



HAL
open science

Modélisation des transferts hygrothermiques à travers les parois dans un modèle de climat urbain : application aux centres-villes historiques à réhabiliter

Margot Ruiz

► **To cite this version:**

Margot Ruiz. Modélisation des transferts hygrothermiques à travers les parois dans un modèle de climat urbain : application aux centres-villes historiques à réhabiliter. Génie civil. INSA de Toulouse, 2023. Français. NNT : 2023ISAT0045 . tel-04523964

HAL Id: tel-04523964

<https://theses.hal.science/tel-04523964>

Submitted on 27 Mar 2024

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.

Doctorat de l'Université de Toulouse

préparé à l'INSA Toulouse

Modélisation des transferts hygrothermiques à travers les
parois dans un modèle de climat urbain : application aux
centres-villes historiques à réhabiliter

Thèse présentée et soutenue, le 19 décembre 2023 par

Margot RUIZ

École doctorale

MEGEP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés

Spécialité

Génie civil

Unité de recherche

LMDC - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse

Thèse dirigée par

Stephane GINESTET et Valery MASSON

Composition du jury

Mme Monika WOLOSZYN, Rapporteur, Université Savoie Mont Blanc

Mme Marjorie MUSY, Rapporteur, Cerema

Mme Marion BONHOMME, Examinatrice, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse

M. Robert SCHOETTER, Examinateur, CNRM Météo France

Mme Dominique DEROME, Examinatrice, Université de Sherbrooke

M. Stephane GINESTET, Directeur de thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse

M. Valéry MASSON, Co-directeur de thèse, Centre National de Recherches Météorologiques,
UMR3589, Météo-France & CNRS

M. Youssef DIAB, Président, Université Gustave Eiffel

Remerciements

Ce manuscrit est le résultat de trois ans de travail, que j'ai eu la chance d'effectuer au sein du LMDC et du CNRM. Ces années de doctorat ont été riches en apprentissage sur la modélisation, les transferts hygrothermiques et le climat urbain, mais elles se sont également révélées être une formidable aventure humaine. En effet, de nombreuses personnes ont contribué à l'aboutissement de cette thèse, en m'apportant leur savoir-faire, en partageant des réflexions, en me soutenant... Il est temps de les en remercier.

J'adresse tout d'abord mes remerciements à mon jury de thèse, à Marjorie Musy et à Monika Wolozyn qui ont accepté de rapporter ce travail de thèse, à Youssef Diab pour avoir présidé ce jury, aux examinateurs Dominique Derome et Robert Schoetter. Je vous remercie d'avoir pris le temps de lire mon manuscrit, ainsi que pour toutes les discussions riches et constructives, lors de ma soutenance.

Je remercie mes trois encadrants, Stéphane Ginestet, Valéry Masson et Marion Bonhomme, qui m'ont fait confiance pour cette thèse. Votre aide et votre expérience m'ont été d'un grand secours au cours de ces trois années. Vous avez formé une équipe très complémentaire. Merci Stéphane de m'avoir accompagnée et encouragée à saisir toutes les opportunités (enseignement, conférences, etc.) Si je rentrais stressée dans ton bureau, j'en sortais toujours plus sereine. Merci Marion pour ta bienveillance, tes encouragements et puis ton regard scientifique aiguisé, qui a apporté beaucoup à ma thèse. Merci Valéry de m'avoir poussée à aller plus loin dans mes travaux, quand je pensais que c'était trop compliqué. Je te remercie aussi pour le temps passé ensemble sur le code à chercher des solutions pour atteindre la stabilité numérique, toujours avec optimisme et sourire.

Je tiens également à remercier l'équipe enseignante du Génie Civil de l'INSA Toulouse, pour toutes les connaissances transmises durant mes années en école d'ingénieur et pour m'avoir confortée dans ma décision d'effectuer une thèse. Merci à Claire Oms, qui est la première à qui j'ai confié mon envie de poursuivre en recherche et qui m'a conseillée. Merci à Sylvie Lorente, qui m'a donné l'opportunité d'effectuer mon premier stage en recherche à Hong Kong, au cours duquel j'ai pu m'initier au climat urbain. Merci à Matthieu Labat, pour la découverte de la Simulation Thermique Dynamique avec TRNSYS, qui a été une réelle révélation pour moi.

Ensuite, durant ma thèse, j'ai eu l'opportunité d'enseigner à l'INSA. Je remercie tous les enseignants, qui m'ont accompagnée, dans mes premières expériences d'enseignement dans le supérieur.

J'adresse ma reconnaissance à Sophie Claude et Marina Malagoli, pour le travail colossal effectué sur l'instrumentation des bâtiments de Cahors. Sans ces mesures in-situ, ma thèse ne serait pas ce qu'elle est. Je remercie également Fabien Nougayrolles, pour l'aide apportée, toujours dans la bonne humeur, sur la manip' à Cahors et notamment avec la station météo.

Je tiens à remercier mes anciens co-bureaux du 213-A à l'INSA. Merci à Lucas, Mathias, Marina et Mohamad, pour les échanges scientifiques sur les transferts hygrothermiques ou le confort, mais aussi sur les doutes, les difficultés et les réussites inhérents à la vie de doctorant.

Merci à Alexandre pour sa gentillesse, pour toutes les discussions très intéressantes sur le monde de la recherche académique et pour ses précieux conseils.

Merci à Noé d'être toujours prêt à aider et de répandre sa bonne humeur dans le bureau.

Merci aux doctorants du LMDC, pour les moments passés au RU le midi, autour de la machine à café ou encore en conférence. Vous m'avez permis d'évoluer dans un environnement de travail agréable et convivial.

Je souhaite remercier tous les membres de l'équipe VILLE, qui m'ont réservé un accueil chaleureux au CNRM. La bonne humeur latente, qui se dégage de ce couloir, a indéniablement contribué au bon déroulement de ma thèse. Je suis ravie d'avoir pu travailler quelques jours par semaine dans une équipe pluridisciplinaire aussi chouette et dynamique. J'ai aussi apprécié les jolis moments passés hors-les-murs : en conférence, dans une maison de maître lotoise, autour d'une raclette ou encore en canoë sur l'Aveyron.

Je remercie tout particulièrement mes co-bureaux successifs du CNRM. Merci à Mélanie pour toutes les réflexions autour de la situation préoccupante du monde (mais pas seulement, on a ri aussi) et à Philippe pour le partage d'ondes positives qui m'a permis de garder la motivation.

Merci à Robert pour l'aide sur TEB et les partages 13'Organisé de biblio.

Merci à Yohanna et Anthéa d'avoir animé les pauses avec tout un tas d'activités saugrenues, incluant généralement des yeux et des plantes.

Je remercie également les membres des équipes VEGEO et SURFACE, sans qui la sacro-sainte pause-café n'aurait pas été la même. Au soleil ou dans la salle café, vos esprits tout aussi scientifiques que créatifs ont conduit à un savant mélange de discussions très enrichissantes sur la météo et de conversations quelque peu abracadabrantes.

Je ne peux rédiger ces remerciements sans effectuer un clin d'œil au fabuleux groupe d'Amphibiens Anonymes, réunissant des membres anciens et actuels du CNRM. Merci pour les nombreuses soirées et week-ends, avec une mention spéciale pour la Bamboula dans les Pypy évidemment. Je n'oublierai pas ces moments de convivialité, de rires, de jeux, de danses endiablées, de détente aux balnéos...

Merci à Manon et Nao, pour tous les chouettes moments. Vous m'avez faite rire et repoussée mes limites des bancs de l'INSA aux verres du vendredi soir, jusqu'aux parcours d'accrobranche. Bon, il faut quand même avouer que sur les bouts de bois suspendus, je riais beaucoup moins.

Mon équilibre de vie, je le dois principalement aux bénévoles des assos toulousaines rencontrés ces six dernières années. A ceux avec qui j'ai partagé des maraudes ou des permanences hebdomadaires. A ceux qui sont devenus plus que des co-bénévoles. La liste est longue, je ne me risquerai pas à une énumération, mais sachez que j'ai apprécié débattre longuement du sens de nos missions et de la complexité de la gouvernance associative, tout autant qu'échanger sur nos vies personnelles. Merci de contribuer à rendre ce monde plus doux, presque toujours dans la bonne humeur, malgré les difficultés. J'ai évidemment une pensée chaleureuse, pour tous les animaux croisés, qui loin des tracés de la thèse, me ramenaient sans cesse à l'essentiel.

Je tiens à remercier Elé, également rencontrée dans le monde associatif, mais notre amitié va désormais bien au-delà. On a créé beaucoup de souvenirs au cours de ces dernières années, dans différentes assos, en voyage de Hong Kong à la Suisse, aux soirées El Dorado, aux repas à la maison, aux dégustations de vin ou de sour... Je te remercie de faire partie de mon quotidien, de m'écouter râler longuement et pour tous ces moments de qualité qui m'ont permis de me vider l'esprit, pendant ces trois ans de thèse.

Je ne peux évidemment pas terminer ces remerciements, sans m'adresser à ma famille qui m'a donné les moyens et le soutien nécessaire pour m'accomplir pleinement dans ma vie personnelle et professionnelle. Merci à ma mère pour son support inconditionnel, qui me pousse depuis toujours à croire en moi et à voir toujours plus grand. Merci à ma grand-mère pour son dévouement à notre famille et pour son écoute infinie. Merci à mon frère pour sa manière de tout relativiser. Merci également aux animaux qui font partie intégrante de notre famille et qui y apportent beaucoup de vie et de gaieté. A Chanel, Figaro, Rexxar, Vilaine, Sorcière, Petite, Pingu et bien sûr, à Elie qui illumine mes journées par sa joie de vivre inébranlable, sa candeur et nos balades quotidiennes.

Résumé

Les centres historiques des villes sont constitués de bâtiments ayant souvent un faible niveau de performance énergétique. Dans le contexte actuel de changement climatique, il est essentiel d'améliorer l'efficacité énergétique de ces bâtiments. Néanmoins, les centres anciens des villes moyennes accueillent généralement une population captive, qui n'a pas nécessairement les moyens d'effectuer des travaux de rénovation. A cette contrainte financière s'ajoute l'exigence de conservation du patrimoine, qui s'applique notamment aux façades historiques. Ainsi, l'isolation des parois, qui est un levier d'action pour diminuer les consommations énergétiques, atténuer le phénomène d'îlot de chaleur urbain, ou encore revitaliser les centres-villes historiques, rencontre des obstacles économiques, architecturaux, mais également techniques.

Les parois anciennes se caractérisent par leur forte perméabilité à l'eau, un facteur important à prendre en compte lors de la rénovation. En effet, le choix de la technique d'isolation doit être effectué en considérant le comportement hydrique de la paroi pour éviter l'apparition de pathologies et estimer correctement les déperditions énergétiques. Il est donc primordial d'inclure les transferts hygrothermiques à travers les parois pour simuler efficacement le bâti ancien et sa rénovation. Néanmoins, la plupart des modèles numériques à l'échelle urbaine négligent les transferts d'humidité à travers les parois.

Cette thèse propose une nouvelle méthode de résolution numérique pour les transferts hygrothermiques, qui est adaptée aux différentes contraintes de la modélisation à l'échelle urbaine (résolutions spatio-temporelles, méthode numérique etc.). La validation est réalisée en deux temps. Une validation numérique est effectuée au travers d'une comparaison inter-modèle, avec un logiciel de transferts hygrothermiques de référence Delphin. Elle s'appuie sur quinze compositions de parois et trois climats. Par ailleurs, les résultats simulés, par la méthode développée, sont comparés aux données mesurées dans plusieurs bâtiments rénovés à partir de matériaux biosourcés et instrumentés dans le centre médiéval de la ville de Cahors.

Ensuite, les transferts couplés de masse et de chaleur dans les parois sont intégrés dans le modèle de climat urbain TEB (Town Energy Balance), en utilisant la méthode développée et validée. La pertinence de cette nouvelle version de TEB pour représenter le centre-ville médiéval de Cahors est évaluée par comparaison avec des mesures in-situ. Une amélioration significative est constatée pour la simulation de l'humidité relative intérieure. L'impact des transferts d'humidité est discuté à plusieurs échelles.

Pour conclure, la réhabilitation des parois anciennes des bâtiments du centre-ville de Cahors est étudiée à partir de plusieurs types d'isolant thermique positionnés à l'intérieur ou à l'extérieur. Ces scénarios de réhabilitation sont simulés en utilisant la version modifiée de TEB incluant les transferts d'humidité à travers les parois. Leur pertinence est comparée, vis-à-vis des enjeux énergétiques, du confort intérieur et extérieur, de la conservation du patrimoine et du risque de croissance de moisissures. Des recommandations sont formulées en fonction du type de parois.

Mots-clés : transferts couplés chaleur-masse, modèle de climat urbain, rénovation du bâti ancien, isolation des parois, centre-ville historique

Abstract

Historical city centers are composed of buildings that often have a low level of energy performance. In the current context of climate change, it is essential to improve the energy efficiency of these buildings. However, the old centers of medium-sized towns are generally populated by a captive population, who do not necessarily have the funds to carry out retrofit work. Added to this financial constraint is the need to preserve heritage, which applies in particular to historical facades. Wall insulation, which is a lever for reducing energy consumption, mitigating the urban heat island phenomenon, and revitalizing historical town centers, encounters economic, architectural and also technical barriers.

Old walls are characterized by their high water permeability, an important factor to take into account during renovation. Indeed, the choice of insulation technique must be made considering the hydric behavior of the wall to avoid the appearance of pathologies and correctly estimate energy losses. It is therefore essential to include hygrothermal transfers through walls in order to effectively simulate old buildings and their renovation. However, most urban-scale numerical models neglect moisture transfer through walls.

This thesis proposes a new numerical method for solving hygrothermal transfers, which is adapted to the various constraints of urban-scale modelling (spatio-temporal resolutions, numerical method, etc.). Validation is carried out in two steps: a numerical part and an experimental part. Numerical validation is based on an inter-model comparison, using fifteen wall compositions and three climates. Experimental validation uses data recorded in several buildings retrofitted with bio-based materials and instrumented in the medieval city centre of Cahors.

Then, coupled heat and mass transfer through walls are integrated into the TEB (Town Energy Balance) urban climate model, using the developed and validated method. The suitability of this new version of TEB to represent the medieval town center of Cahors is assessed by comparison with in-situ measurement. A significant improvement is observed when simulating indoor relative humidity. The impact of moisture transfer is discussed at several scales.

In conclusion, the retrofit of the old walls of buildings in the city center of Cahors is studied using several types of thermal insulation positioned inside or outside. These retrofitting scenarios are simulated with the modified version of TEB, including moisture transfer through the walls. Their relevance is compared with regard to energy issues, indoor and outdoor comfort, heritage conservation and wall durability. Recommendations are given according to the type of wall.

Keywords: coupled heat-mass transfer, urban climate model, historical building retrofit, wall insulation, historical city centre

Sommaire

Introduction générale.....	7
Chapitre 1 : État de l'art.....	9
1. Contexte des centres-villes anciens à réhabiliter	9
1.1. Phénomènes physiques globaux et locaux impactant les centres-villes.....	9
1.2. Réhabilitation énergétique des centres-villes historiques	14
1.3. Évaluation des scénarios de réhabilitation énergétique des centres anciens	16
2. Modélisation à l'échelle urbaine.....	17
2.1. Échelles d'étude	18
2.2. Équations bilan des surfaces urbaines	19
2.3. Modélisation des composantes du climat urbain.....	23
2.4. Modèles de climat urbain	26
2.5. Bilan	33
3. Transferts couplés à travers les parois	34
3.1. Milieux poreux.....	34
3.2. Mécanismes de transfert de chaleur et d'humidité	35
3.3. Mécanismes de stockages et déstockages	40
3.4. Caractéristiques des matériaux	42
3.5. Conditions aux limites.....	43
3.6. Modélisation des transferts couplés à travers les parois	47
3.7. Méthode de couplage des outils de simulation	54
4. Positionnement de la thèse	57
Chapitre 2 : Méthode de résolution des transferts hygrothermiques adaptée à l'échelle urbaine..	59
1. Introduction	59
2. Équations de transferts de masse et de chaleur	59
2.1. Hypothèses.....	59
2.2. Équations.....	60
2.3. Données d'entrée	61
2.4. Conditions aux limites.....	62
3. Méthode de résolution numérique.....	63
3.1. Schéma de discrétisation	63
3.2. Approche de résolution numérique découplée.....	65
3.3. Gestion du pas de temps et stabilité numérique	68
4. Validation par comparaison inter-modèle.....	70
4.1. Outil Delphin	71
4.2. Configuration étudiée.....	71
4.3. Méthode d'évaluation.....	77
4.4. Analyse de sensibilité au maillage.....	78
4.5. Résultats détaillés.....	81
5. Conclusion.....	88

Chapitre 3 : Validation expérimentale de la méthode proposée dans le contexte du centre médiéval de Cahors..... 90

1. Introduction	90
2. Centre-ville médiéval de Cahors	91
3. Instrumentation du centre-ville de Cahors	92
3.1. Description générale.....	92
3.2. Bâtiments instrumentés.....	93
3.3. Station météorologique	97
4. Méthodologie de la validation expérimentale.....	98
4.1. Principe	98
4.2. Propriétés des matériaux	100
4.3. Conditions aux limites.....	102
4.4. Critères de validation	105
5. Résultats de la comparaison	106
5.1. Paroi 1 : Briques épaisses isolées à partir de chaux-chanvre.....	106
5.2. Paroi 2 : Pans de bois et briques isolés à partir de chaux-chanvre.....	109
5.3. Paroi 3 : Pans de bois et briques isolés à partir de polystyrène.....	111
5.4. Bilan	113
6. Sources d'incertitudes et précision des résultats	115
6.1. Avantages de la démarche appliquée.....	115
6.2. Erreurs expérimentales.....	116
6.3. Erreurs sur les conditions aux limites	116
6.4. Erreurs sur les propriétés des matériaux.....	116
6.5. Incertitudes du modèle.....	117
7. Conclusion.....	118

Chapitre 4 : Intégration des transferts d'humidité à travers les parois dans le modèle de climat urbain TEB..... 120

1. Introduction	120
2. Description de TEB.....	120
2.1. SURFEX	120
2.2. TEB	122
2.3. TEB-SBL.....	123
2.4. TEB-BEM	124
2.5. TEB-UTCI	126
2.6. Les autres modules de TEB.....	128
3. Implémentation des transferts d'humidité dans TEB.....	128
3.1. Prise en compte de l'humidité dans TEB	128
3.2. Modification du modèle de paroi	128
3.3. Technique de maillage des parois.....	129
3.4. Propriétés des matériaux	130
3.5. Calcul des conditions aux limites en évolution dynamique.....	131
3.6. Modification de la répartition de la pluie dans la rue canyon	133
3.7. Gestion de la variation du pas de temps	134
3.8. Ajout d'un modèle de développement de moisissures	135
4. Simulation hygrothermique du centre médiéval de Cahors dans TEB.....	138

4.1. Configuration de TEB	138
4.2. Méthodologie de la comparaison avec les données mesurées in-situ.....	141
4.3. Données de forçage.....	142
5. Résultats	144
5.1. Conditions hygrothermiques dans la paroi	144
5.2. Conditions intérieures.....	148
5.3. Conditions dans le canyon urbain.....	150
5.4. Échanges entre le canyon urbain et l'atmosphère.....	152
6. Sources d'incertitudes	153
7. Conclusion.....	155
Chapitre 5 : Évaluation multicritère de scénarios de rénovation du centre-ville médiéval de Cahors	156
1. Introduction	156
2. Réhabilitation énergétique des centres anciens	156
2.1. Contexte réglementaire	156
2.2. Spécificités des centres anciens.....	158
2.3. Précautions à prendre.....	161
2.4. Techniques d'isolation.....	162
2.5. Rénovation des centres-villes anciens vis-à-vis de l'ICU	166
2.6. Rôle du comportement hygrothermique des parois dans l'évaluation des scénarios de rénovation.....	169
3. Méthode pour l'évaluation de la rénovation du centre médiéval de Cahors	169
3.1. Méthodologie générale	169
3.2. Définition des scénarios de rénovation.....	171
3.3. Choix des critères d'évaluation	175
4. Résultats	180
4.1. Paroi « massive » constituée de briques épaisses.....	180
4.2. Paroi « légère » à pans de bois.....	188
5. Limites de l'étude.....	195
5.1. Limites de l'outil TEB	195
5.2. Limites des scénarios définis	196
5.3. Limites des critères sélectionnés	197
5.4. Limites de la période climatique étudiée.....	198
6. Conclusion.....	198
Conclusion générale	200
Perspectives de recherche	203
Nomenclature	206
Sigles et acronymes.....	208
Références	209
Liste des figures	241

Liste des tableaux.....	248
Annexe A : Estimation des échanges infrarouges entre les bâtiments du centre-ville ancien à partir d'EnergyPlus	250
Annexe B : Définition de l'évolution des propriétés hydriques des matériaux dans le modèle TEB	252
Annexe C : Évaluation du modèle TEB par comparaison expérimentale avec le bâtiment à typologie pans de bois.....	254
Annexe D : Configuration des bâtiments dans TEB.....	256
Annexe E : Résultats détaillés des différents scénarios simulés	259

Introduction générale

Face à l'urgence climatique, améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments est devenu une priorité. Cette prise de conscience n'est pas nouvelle. En France, les premières réglementations thermiques ont vu le jour en 1975, suite au premier choc pétrolier. Cependant, une grande partie du parc de bâtiments français est antérieure à cette date, ceci est particulièrement vrai dans les centres-villes historiques. Pour ces raisons, la réglementation thermique ne cesse d'évoluer et notamment dans le but de mieux intégrer et de favoriser la réhabilitation énergétique des bâtiments existants.

Toutefois, les centres historiques des villes moyennes, sont généralement peu attractifs et accueillent une population captive, défavorisée, qui n'a pas nécessairement les moyens de lutter contre la précarité énergétique (installation d'isolation), ni contre les vagues de chaleur (achat de climatiseurs). Le gouvernement a donc mis en place en septembre 2013 un plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH), principalement destiné à inciter les ménages et les bailleurs sociaux à rénover leurs logements grâce à des aides financières (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2018).

Aux contraintes financières de la réhabilitation, s'ajoutent des contraintes architecturales. En effet, le souci de préservation du patrimoine limite les travaux de réhabilitation réalisables, notamment au niveau des façades historiques. Ainsi, deux enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle se confrontent : l'urgence de la rénovation énergétique et la conservation du patrimoine historique (Cassar, 2009).

Les villes sont soumises à un climat spécifique, induit par leur morphologie, leurs matériaux, leurs activités etc. Le climat urbain se différencie souvent par des températures moyennes plus élevées que les températures en périphérie ou à la campagne. Il s'agit du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). De plus, la morphologie complexe et étroite des centres historiques les rend particulièrement vulnérables à ce phénomène. Plusieurs projets de recherche ont montré que la rénovation du bâti était un levier d'action majeur pour limiter l'effet d'ICU (Masson et al., 2013b, 2014).

La réhabilitation énergétique des centres historiques nécessite de comprendre le fonctionnement des bâtiments anciens pour mettre en place des techniques de rénovation appropriées. Il est notamment primordial de tenir compte du comportement hygrothermique complexe des matériaux anciens. En effet, l'ajout d'un isolant inadapté pourrait perturber l'équilibre hydrique des parois et entraîner l'apparition de pathologies. Face à cette problématique, les matériaux biosourcés et fortement hygroscopiques semblent être une solution prometteuse pour l'isolation des parois historiques.

En ce sens, les thèses de Claude (2018) et Malagoli de Almeida (2022) proposent plusieurs formulations de mélange de chaux-chanvre, pour application en isolation thermique intérieure des parois anciennes. Leurs travaux s'insèrent dans une démarche d'éco-rénovation des

bâtiments du centre-ville médiéval de Cahors et étudient la rénovation des façades de deux bâtiments mitoyens de ce quartier. Certaines parois de ces bâtiments ont ainsi été isolées à partir de chaux-chanvre et une instrumentation a été mise en place, ce qui a permis d'assurer un suivi de l'impact de ces isolants. Ces travaux expérimentaux ont été complétés par des études numériques. Malagoli de Almeida (2022) modélise le comportement des façades rénovées et permet ainsi de prédire leur comportement hygrothermique, tandis que Claude (2018) étudie l'influence de la morphologie urbaine sur le risque de croissance de moisissures dans les parois.

Cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux de Claude (2018) et Malagoli de Almeida (2022) et vise à proposer un outil de simulation complet et adapté pour évaluer la rénovation des centres-villes historiques à l'échelle urbaine, en tenant compte de leurs spécificités et des enjeux du XXIème siècle. L'objectif final est d'effectuer une évaluation multicritère de la rénovation des parois historiques du centre-ville de Cahors et de conclure sur les solutions d'isolation les mieux adaptées.

Ce travail de thèse s'organise en cinq chapitres.

Le contexte spécifique des centres-villes historiques à réhabiliter est présenté dans le **Chapitre 1**. Une des méthodes pour étudier la rénovation des centres anciens est la simulation numérique. Un état de l'art sur la modélisation à l'échelle urbaine est alors effectué. De plus, les parois des bâtiments anciens ont un comportement hygrothermique spécifique, qu'il convient de prendre en compte. Ce premier chapitre décrit donc également les transferts couplés de chaleur et de masse à travers les parois et leur modélisation. Ensuite, les questions scientifiques, traitées dans ce travail de thèse, sont exposées.

Le **Chapitre 2** se concentre sur le développement d'une méthode de résolution numérique des transferts hygrothermiques facilement intégrable dans un modèle de climat urbain. La méthode proposée est validée par comparaison inter-modèle à partir du logiciel Delphin, sur quinze compositions de parois et dans trois climats.

Une validation expérimentale de la méthode développée est effectuée dans le **Chapitre 3**. Ce travail s'appuie sur l'instrumentation mise en place dans le centre-ville médiéval de Cahors, au cours des thèses précédentes. Les données simulées à partir de la méthode proposée sont alors comparées aux mesures effectuées dans trois parois ayant des compositions différentes. Cette comparaison permet de discuter de la pertinence de la méthode, ainsi que des hypothèses effectuées lors de la définition des conditions aux limites et des propriétés des matériaux.

La méthode numérique adaptée à l'échelle urbaine ayant été validée numériquement et expérimentalement, elle est désormais utilisée pour intégrer les transferts d'humidité à travers les parois dans le modèle de climat urbain TEB. Le **Chapitre 4** détaille les différentes modifications apportées au modèle TEB. La fiabilité de la version modifiée de TEB est également évaluée, par comparaison avec les conditions mesurées dans des parois et bâtiments anciens de Cahors. Enfin, l'impact de la prise en compte des transferts hydriques à travers les parois est discuté à différentes échelles.

Le **Chapitre 5** utilise la version de TEB incluant les transferts d'humidité à travers les parois pour évaluer la rénovation du centre ancien de Cahors. L'isolation des parois historiques est alors étudiée au travers d'une évaluation multicritère, comparant six scénarios de rénovation.

Chapitre 1 : État de l'art

1. Contexte des centres-villes anciens à réhabiliter

Les villes sont soumises à des phénomènes physiques spécifiques, d'échelle globale ou locale, comme le changement climatique ou l'îlot de Chaleur Urbain (ICU). Leurs impacts diffèrent en fonction des caractéristiques des zones urbaines (localisation, densité urbaine, climat, etc.). Les conséquences peuvent être énergétiques et/ou sanitaires. Les centres-villes constituent un point d'attention du fait de leur vulnérabilité. Pour rénover les centres-villes anciens de manière adéquate et durable, il est primordial de considérer ces phénomènes, ainsi que les spécificités des bâtiments des centres anciens. L'évaluation des solutions de rénovation doit donc être effectuée par rapport à ces multiples enjeux.

1.1. Phénomènes physiques globaux et locaux impactant les centres-villes

1.1.1. Phénomène d'ICU

En 1833, Luke Howard est le premier à mettre en évidence le fait que la température de l'air est souvent plus élevée en milieu urbain que dans la campagne environnante (Howard, 1833). Depuis, ce phénomène, nommé l'îlot de chaleur urbain, a été largement étudié. Il correspond à une anomalie positive de température qui s'établit entre la ville et la campagne.

Il existe trois types d'ICU :

- L'ICU sous-terrain correspond à une température dans les sous-sols urbains plus élevée que dans les zones rurales (Taniguchi et al., 2008).
- L'ICU de surface se traduit par des températures de surfaces plus élevées dans les zones urbaines que dans la campagne environnante, jusqu'à 10 à 15 °C de différence en journée (Voogt et Oke, 2003).
- Enfin, l'ICU atmosphérique se caractérise par une température de l'air plus élevée en zone urbaine qu'en zone rurale. Il se définit selon deux échelles (Oke, 1976). A l'échelle de la Couche Limite Atmosphérique (CLA) (voir section 2.1), il traduit l'influence de la ville sur la basse atmosphère et s'y exprime par la différence de température potentielle d'une particule d'air (Oke, 1982). Enfin, lorsque l'on parle d'ICU, l'échelle considérée est généralement l'échelle de la canopée urbaine. Ce type d'ICU est le plus étudié et permet notamment d'évaluer le confort au niveau du piéton, en tenant compte de la température de l'air, mais également d'autres paramètres comme le vent, l'humidité ou le rayonnement. La différence de température entre la zone urbaine et la campagne environnante va de 2 °C pour une ville de 1000 habitants à 12 °C pour une mégalopole de plusieurs millions d'habitants (Oke, 1988).

Lors de la campagne CAPITOU (Masson et al., 2008; Pigeon et al., 2007), un cycle journalier a été observé concernant l'évolution de la différence de températures de l'air entre l'agglomération de Toulouse et sa périphérie. L'intensité de l'ICU observé est très faible durant la journée. En

revanche, durant la nuit, l'intensité de l'ICU augmente et la différence de température dépasse 4 °C.

Le jour, le phénomène d'évaporation est plus faible en ville qu'à la campagne. De plus, la chaleur s'accumule dans les matériaux urbains. Ensuite, durant la soirée, l'énergie stockée en ville est restituée vers l'atmosphère. Ainsi, le refroidissement nocturne de l'air est limité en milieu urbain (Figure 1.1).

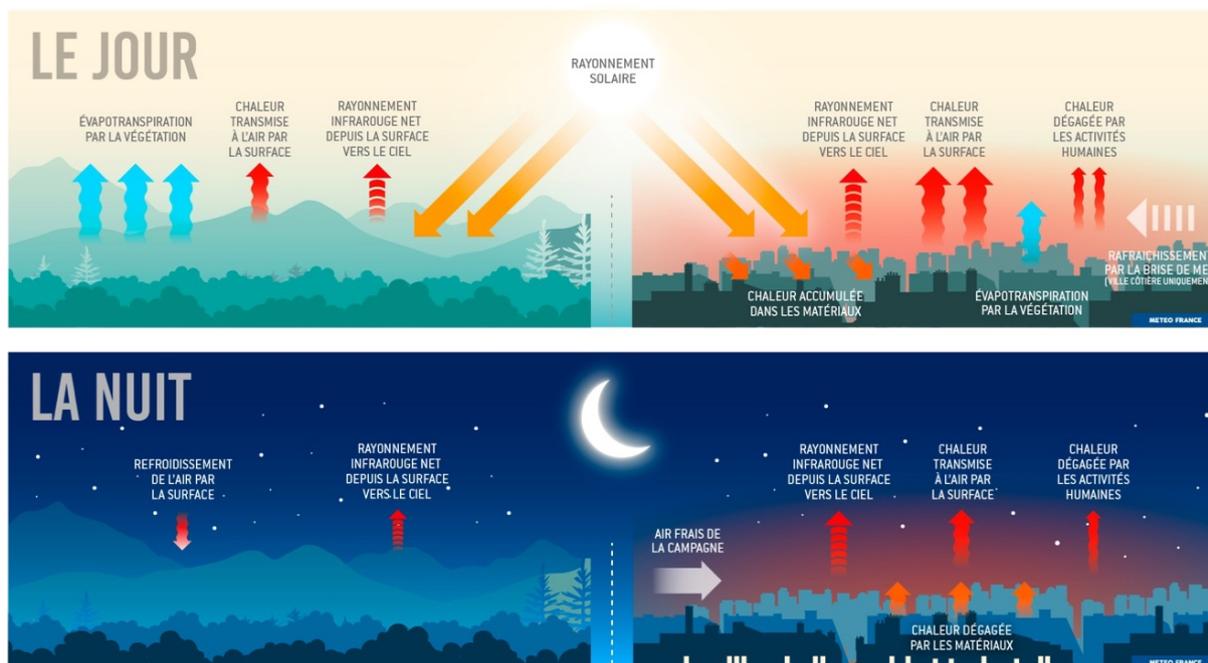


Figure 1.1 – Présentation du bilan d'énergie en zone rurale (à gauche) et en zone urbaine (à droite), le jour (en haut) et la nuit (en bas) (Météo France)

L'ICU est le résultat d'une combinaison de facteurs naturels et humains (Figure 1.2). Ainsi, pour limiter le phénomène d'ICU, il est possible d'agir sur les facteurs humains qui se composent principalement de la forme et des matériaux urbains, de la part de couvert naturel ainsi que des émissions liées à l'activités humaines.

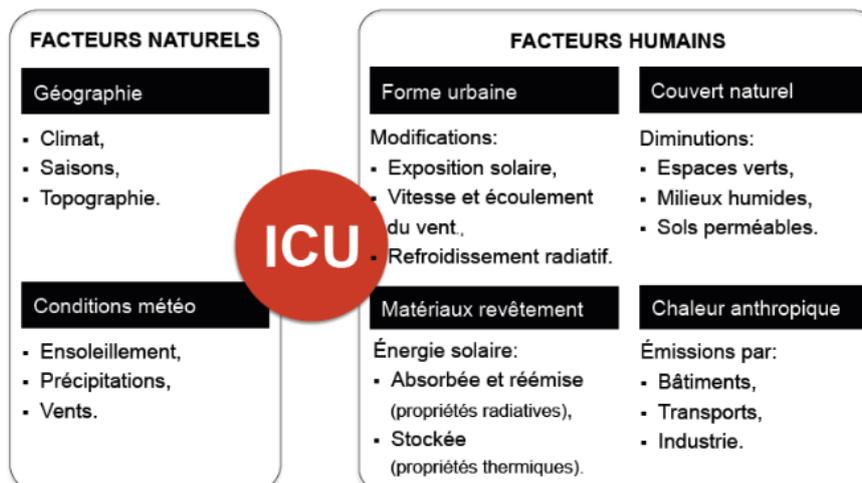


Figure 1.2 – Schéma regroupant les facteurs naturels et humains provoquant le phénomène de l'Ilot de Chaleur Urbain (C. Dubois, 2014)

Les centres-villes anciens sont particulièrement vulnérables au phénomène d'ICU, du fait de leurs rues étroites favorisant le piégeage radiatif, ainsi que de la grande proportion de matériaux minéraux et de l'absence de végétation.

1.1.2. Humidité en ville

Des différences d'humidité entre les zones urbaines et rurales ont été identifiées dès les années 1950 (Kratzer, 1956). Ensuite, plusieurs études ont comparé les cycles journaliers d'humidité observés en zone rurale avec ceux des zones urbaines. Différentes conclusions ont pu être tirées en fonction des villes. Dans certaines villes, des conditions plus sèches qu'à la campagne ont été observées. Ce phénomène est appelé UDI (Urban Dry Island, soit Ilot Sec Urbain en français) (Landsberg, 1981; Lokoshchenko, 2017; Milelli et al., 2023; Moriwaki et al., 2013), et s'explique en partie par l'imperméabilisation des villes. Le phénomène inverse a également été enregistré, il est caractérisé par des conditions plus humides en ville qu'à la campagne. Ce phénomène a été nommé UME (Urban Moisture Excess) ou encore UMI (Urban Moisture Island ou Ilot d'Humidité Urbain) (Ackerman, 1987; Chandler, 1967; Holmer et Eliasson, 1999; Shi et Zhang, 2022; Wang et al., 2021). Cet excès d'humidité est particulièrement observé lors des nuits claires d'été. Dans des climats tropicaux et subtropicaux, le phénomène d'UMI peut accentuer le stress thermique induit par l'ICU (Du et al., 2022).

Pour mieux comprendre le phénomène d'UMI et ses mécanismes, Wang et al. (2021) ont utilisé un modèle de climat urbain tenant compte des principaux processus d'humidité. La Figure 1.3 présente la part de chaque processus dans le bilan hydrique effectué au niveau de la canopée urbaine. Ainsi, dans une ville très dense comme Hong Kong, les apports d'humidité se font principalement par évapotranspiration au niveau des couverts naturels et par rejets anthropiques d'humidité. En effet, la climatisation transfère l'humidité intérieure vers l'extérieur, sous forme d'humidité anthropique. L'évaporation de l'eau ruisselant sur les routes et les toits contribue également à l'apport d'humidité en milieu urbain. Les termes puits d'humidité sont les effets des parois (celles-ci peuvent absorber une partie de l'humidité de l'air et de l'eau de pluie) et de la ventilation urbaine, c'est-à-dire des échanges d'air de la canopée urbaine avec la partie supérieure de la Couche Limite Urbaine (CLU) et avec les zones environnantes.

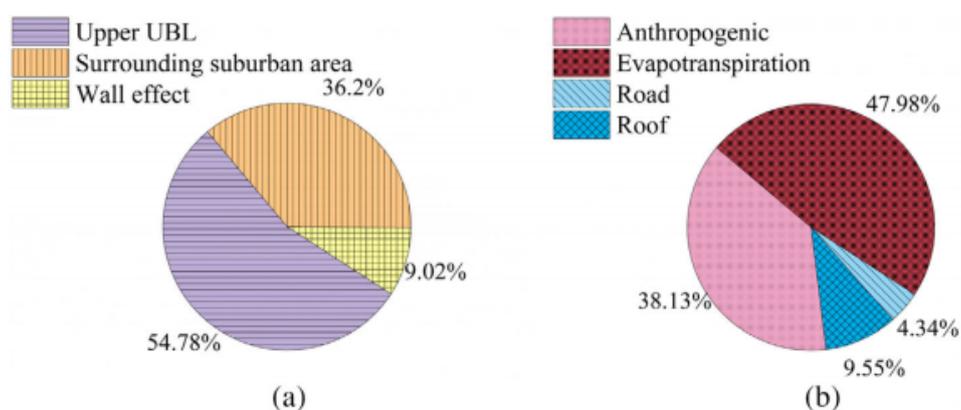


Figure 1.3 – Composition du bilan d'humidité urbain avec les termes puits (a) et les termes sources (b) obtenu à partir de l'application d'un modèle de climat urbain à la ville de Hong Kong (Wang et al., 2021)

Néanmoins, les composantes de ce bilan hydrique sont propres à la ville de Hong Kong et de plus amples études seraient nécessaires pour étendre ces conclusions à d'autres villes.

Cependant, dans le contexte urbain, l'humidité est une variable beaucoup moins étudiée que la température. Pourtant l'humidité est un critère important notamment pour le confort des personnes en milieu urbain (Zhang et al., 2023). De plus, de nombreux phénomènes d'atténuation de l'ICU reposent sur le phénomène d'évaporation, dont l'efficacité est restreinte en cas d'humidité trop élevée.

1.1.3. Impact du changement climatique en ville

Le changement climatique est un phénomène d'échelle globale au cœur des préoccupations de notre siècle. Le Groupe Intergouvernemental d'experts pour l'Étude du Climat (GIEC) présente des projections climatiques prévoyant une forte augmentation de la température moyenne de l'atmosphère terrestre d'ici 2100 (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Ensuite, de nombreuses études s'appuient sur ces projections mondiales, pour produire des projections à l'échelle locale.

En France, le projet EPICEA se concentre sur l'influence du changement climatique sur l'évolution du climat urbain à l'échelle régionale du bassin parisien. En s'appuyant sur des projections climatiques globales pour le forçage des données météorologiques au-dessus de la ville, un réchauffement de l'ordre de +2,0/2,4°C en hiver et +3,5/5,0°C en été, respectivement pour les températures minimales et maximales, a été estimé d'ici 2100 (Lemonsu et al., 2013).

Guerreiro et al. (2018) étudient les futurs changements du climat dans 571 villes européennes et se concentrent notamment sur les vagues de chaleur. La conclusion est que ce phénomène va s'intensifier à l'avenir. Les villes d'Europe centrale devraient connaître une augmentation conséquente des températures maximales, tandis qu'en Europe du Sud, c'est plutôt le nombre de jour connaissant des vagues de chaleur qui devraient augmenter.

En ce qui concerne l'interaction entre le changement climatique et le phénomène d'ICU, Oleson et al. (2011) montrent que le phénomène d'ICU ne devrait pas s'intensifier, voir même légèrement diminuer avec le changement climatique, d'ici 2100. Selon Oleson et al. (2011), la diminution du contraste entre les températures des zones urbaines et rurales peut s'expliquer par leur réponse différente à l'augmentation du rayonnement à grande longueur d'onde, due au réchauffement de l'atmosphère. En hiver, la diminution de l'ICU est également liée au réchauffement global qui entraîne une diminution des besoins en chauffage.

Cependant, ces résultats ne prennent pas en compte l'expansion urbaine, ce qui peut conduire à une sous-estimation des températures en ville (Chapman et al., 2019). Chen et Frauenfeld (2016) étudient l'impact de la future urbanisation, associé au changement climatique en Chine et trouve une augmentation plus forte des températures en zone urbaine qu'en zone rurale.

Les projets ACCLIMAT (Masson et al., 2013b) et MUSCADE (Masson et al., 2014) étudient les interactions entre les villes, les consommations d'énergie, le microclimat urbain et le changement climatique. Ils comparent l'impact de différents scénarios, dans le but de proposer de possibles stratégies d'adaptation face au changement climatique. Ils montrent que les effets combinés de

l'urbanisation et du changement climatique conduiront à une exposition plus importante des populations urbaines aux canicules.

1.1.4. Conséquences sanitaires

Les citoyens sont donc soumis à la fois à un phénomène d'échelle locale, l'ICU, et à une perturbation globale, le changement climatique. De plus, l'ONU prévoit une augmentation de la population mondiale d'environ 7,3 milliards actuellement à près de 9,7 milliards d'individus en 2050, dont les deux tiers se concentreraient dans de vastes zones urbanisées. Ainsi, une majorité de la population sera exposée à ces perturbations.

La vague de chaleur ayant eu lieu en Europe en 2003, est un exemple de ce qui pourrait se produire plus fréquemment à l'avenir. Pour rappeler quelques chiffres, la canicule de 2003 a provoqué la mort de 15 000 personnes en France (Fouillet et al., 2006).

La surmortalité augmente lorsque les températures maximales restent très élevées durant plusieurs jours consécutifs et retourne à la normale après quelques jours à des températures maximales moyennes pour la saison (Figure 1.4). Laaidi Karine et al. (2012) mettent également en avant le lien entre la surmortalité et les températures minimales observées chaque jour durant les vagues de chaleur de 2003 à Paris. Le risque de mortalité augmente, lorsque le métabolisme est soumis à une température ne descendant pas en-dessous de 20°C.

Ainsi, le phénomène d'ICU ne perturbe pas seulement le confort des citoyens, mais se convertit en réel problème de santé publique. Une étude a montré que dès lors que la température ambiante s'éloigne de l'optimal de confort, le taux de mortalité augmente de 2,72 %, pour chaque degré au-dessus de la valeur optimale (Huynen et al., 2001).

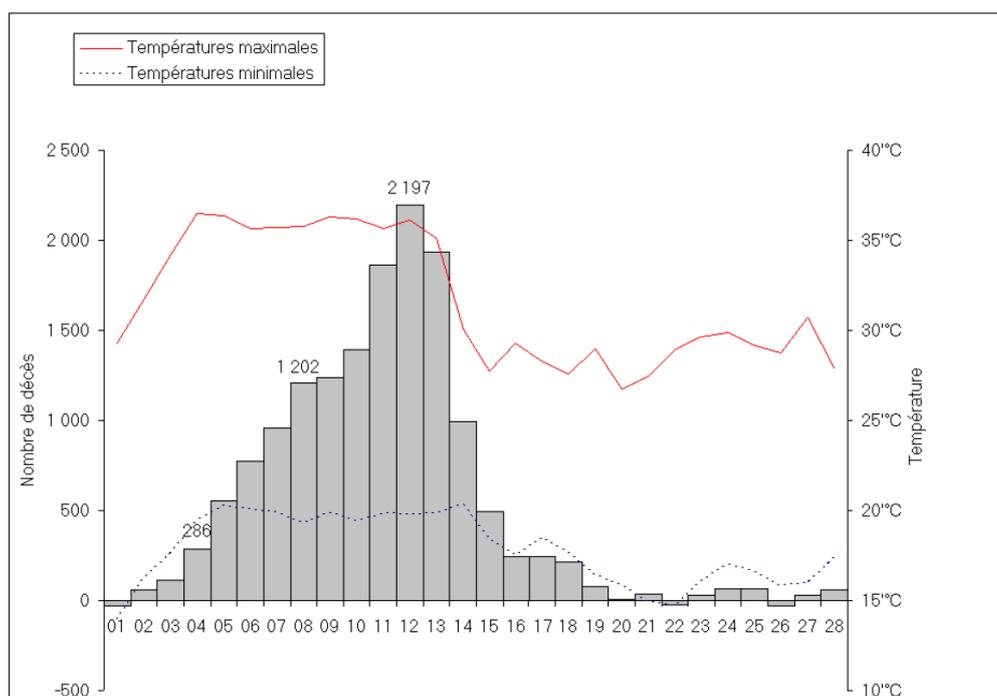


Figure 1.4 – Graphique du nombre de décès journalier et des températures minimales (en bleu) et maximales (en rouge) en France en août 2003 (INSERM)

1.1.5. Conséquences énergétiques

Le phénomène d'ICU a également un impact sur les consommations énergétiques (Allegrini et al., 2012a; Calice et al., 2017). Cependant, cet aspect est difficile à prévoir et dépend très largement de la zone climatique étudiée. En effet, l'impact de l'ICU est négatif en été, en augmentant les consommations liées à la climatisation. Cette augmentation des consommations énergétiques engendre un accroissement de l'effet d'ICU, ce qui augmente la température locale et entraîne à nouveau une augmentation des besoins en climatisation. Il s'agit du phénomène d'auto-amplification (Santamouris et Adnot, 2004). En revanche, l'ICU a un effet positif en hiver, puisque l'augmentation de la température de la ville entraîne une diminution des besoins en chauffage des habitants. Lors de l'étude d'une stratégie d'adaptation vis-à-vis de l'ICU, il est important de vérifier son impact saisonnier, pour s'assurer que la solution est pertinente par rapport au bilan global.

Dans les conditions climatiques actuelles, en France, la consommation d'énergie en climatisation est bien inférieure à celle en chauffage. Cette situation pourrait s'inverser pour un réchauffement global moyen de 6°C (Masson et al., 2013b). Le projet ACCLIMAT montre également qu'avec le réchauffement climatique, les besoins en chauffage auraient tendance à diminuer plus rapidement que l'augmentation de la demande en climatisation, lors des années avec des étés peu ensoleillés. Ainsi, le réchauffement climatique tendrait à faire diminuer la consommation totale d'énergie, du moins pour un climat dans lequel les consommations de chauffage dominent actuellement.

En plus de l'augmentation de l'inconfort, des risques sanitaires et de l'augmentation des consommations énergétiques, Colombert (2008) met en avant d'autres conséquences néfastes, telles que la réduction de l'efficacité des systèmes de rafraîchissement passif, la pollution atmosphérique et l'impact sur la biodiversité. Une étude réalisée lors d'une vague de chaleur à Phoenix en Arizona, souligne un autre risque : le risque de coupures d'électricité, liées à la demande accrue de climatisation (Stone et al., 2021).

L'ensemble des villes sont concernées par ces conséquences. Néanmoins, les centres-villes historiques sont particulièrement vulnérables au phénomène d'ICU, du fait de leur morphologie dense et contiguë, de la faible proportion de végétation et des bâtiments peu isolés. De plus, dans le cas des villes moyennes, ils accueillent souvent des populations sensibles. Ainsi, l'évaluation de la réhabilitation énergétique des centres-villes historiques doit tenir de ces phénomènes locaux et globaux.

1.2. Réhabilitation énergétique des centres-villes historiques

En Europe, 14% de bâtiments existant ont été construits avant 1919 et environ 12% entre 1919 et 1945 (Ascione et al., 2015). Les bâtiments historiques représentent donc une part importante du parc immobilier européen. Leur réhabilitation joue un rôle clé dans la réduction des consommations énergétiques globales et dans l'amélioration du confort des habitants de ces bâtiments (Buda et Pracchi, 2018), ce qui explique la forte augmentation de l'intérêt scientifique concernant l'efficacité énergétique et le confort thermique des bâtiments historiques ces dernières années (Martínez-Molina et al., 2016).

Les bâtiments historiques correspondent à des bâtiments construits avant 1948 et représentatifs des techniques de construction de l'époque. Ils sont le résultat de plusieurs siècles d'évolution et se caractérisent généralement par une architecture de type vernaculaire (Cantin et al., 2010). Elle se définit comme une réponse aux besoins des sociétés et aux contraintes climatiques locales, en utilisant les matériaux et savoir-faire régionaux (Dipasquale et al., 2014). Ils sont conçus à partir de technologies, de matériaux et de solutions constructives qui ne sont plus utilisés aujourd'hui et sont donc les vestiges des techniques et architectures historiques. Du fait de leur intérêt culturel, leur rénovation est soumise à des contraintes patrimoniales, qui consistent généralement à conserver l'apparence extérieure des bâtiments. En réponse à ces fortes exigences, la rénovation des parois anciennes est soumise à une réglementation thermique (RT) spécifique : la RT « élément par élément » applicable aux bâtiments datant d'avant 1948 définie par l'arrêté du 3 mai 2007, modifié par l'arrêté du 22 mars 2017.

Par ailleurs, les parois des bâtiments anciens se caractérisent généralement par une inertie thermique élevée. L'inertie permet de stocker la chaleur et de la restituer avec un certain déphasage. Les bâtiments anciens ont donc tendance à s'échauffer moins vite durant les journées d'été, ce qui leur permet d'assurer un bon confort intérieur (APUR, 2011).

La seconde caractéristique des parois anciennes concerne leur comportement hydrique. En effet, elles sont constituées de matériaux poreux et ont une forte perméabilité à l'eau sous forme liquide et vapeur (Camuffo, 2019). Il est judicieux de noter que le bâti ancien est donc particulièrement sensible aux transferts d'humidité et possède un équilibre hygrothermique subtil, contrairement aux constructions récentes qui se caractérisent par leur forte étanchéité (DGHUC et al., 2007). Ainsi, la mise en place de solutions inadaptées peut perturber l'équilibre hydrique de la paroi et mener à l'apparition de moisissures (Straube et Schumacher, 2007). Posani et al. (2019) discutent de la compatibilité hydrique entre les différents types d'isolants et les parois en briques anciennes, et concluent qu'il n'est pas possible de fournir une solution générique, car de nombreux critères entrent en jeu. Néanmoins, les matériaux biosourcés sont généralement recommandés pour la réhabilitation des parois anciennes, car ce sont des matériaux fortement hygroscopiques, qui permettent de conserver une part de la perméabilité de la paroi (Amziane et al., 2013; Claude et al., 2019). Leur particularité réside dans leur capacité à réguler l'humidité présente dans l'air, ce qui correspond à la capacité de tampon hydrique (Maalouf et al., 2014).

En effet, les transferts d'humidité à travers les parois impactent leur environnement à plusieurs niveaux (Figure 1.5). Par exemple, à la suite d'un évènement de pluie qui humidifie la paroi, le phénomène d'évaporation a lieu au niveau de la surface extérieure, ce qui peut abaisser la température localement et avoir un effet positif sur le confort d'été des piétons (Abuku et al., 2009a; Saneinejad et al., 2012, 2014). Au niveau de la surface intérieure, la capacité de tampon hydrique de certains matériaux participe à l'amélioration du confort intérieur et impacte les consommations énergétiques de CVC (Chauffage Ventilation Climatisation) (Maalouf et al., 2014; Osanyintola et Simonson, 2006; Zhang et al., 2017; Zhou et al., 2020). La teneur en eau influe également sur la conductivité thermique de la paroi, et donc sur les consommations énergétiques du bâtiment (Mendes et al., 2003). L'interface entre deux couches de matériaux, l'encastrement des poutres ou encore la surface intérieure sont des points propices à l'accumulation d'humidité et à la condensation. Ils sont donc vulnérables à l'apparition de moisissures (Claude, 2018).

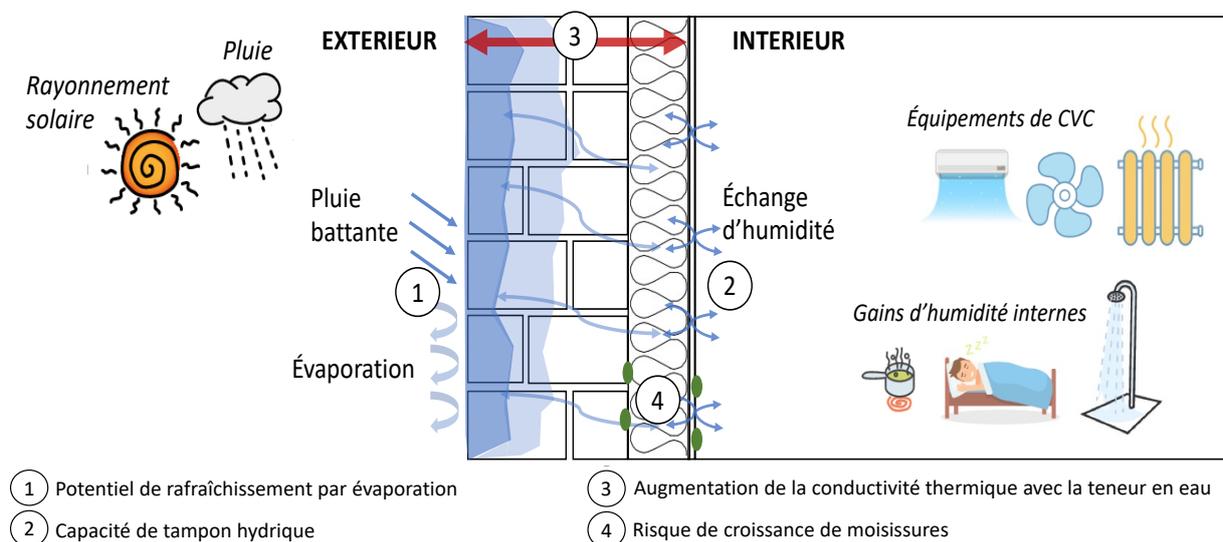


Figure 1.5 – Récapitulatif des potentiels impacts des transferts d'humidité à travers les parois

Finalement, le choix de la solution de rénovation mise en place doit être effectué, après avoir compris le fonctionnement du bâtiment existant et en prenant différentes précautions. Les points énoncés dans cette section, et plus généralement les problématiques associées à la rénovation des centres-villes anciens, seront rediscutés plus en détail dans le Chapitre 5.

1.3. Évaluation des scénarios de réhabilitation énergétique des centres anciens

L'évaluation de la rénovation énergétique des parois anciennes peut être effectuée par trois méthodes (Webb, 2017) :

- Les essais en laboratoire ;
- Les mesures sur site ;
- Les outils de simulation des performances énergétiques des bâtiments.

Les essais en laboratoire sont particulièrement pertinents pour caractériser un matériau. L'obtention des propriétés hygrothermiques permet par exemple de comparer facilement plusieurs types d'isolant. Le comportement de parois entières peut également être étudié en environnement contrôlé, sous des conditions spécifiques (Johansson et al., 2014; Vereecken et Roels, 2014).

Les mesures sur site permettent d'évaluer des rénovations effectuées en contexte réel. Pour cela, les parois et leur environnement doivent être instrumentées (Claude, 2018; Malagoli de Almeida, 2022). Cette méthode nécessite donc la mise en place d'instruments de mesure, qui peut être lourde. De plus, elle permet seulement d'évaluer la solution de rénovation mise en place. Il n'y pas de comparaisons possibles avec d'autres scénarios de rénovation. Elle est également limitée par la durée d'instrumentation et la quantité de données recueillies. Enfin, les résultats obtenus sont propres au bâtiment étudié.

Les simulations énergétiques des bâtiments peuvent être utilisées pour prédire le comportement énergétique du bâtiment, incluant notamment l'évolution temporelle des conditions intérieures et des consommations énergétiques. Cette méthode permet d'étudier rapidement une grande variété de solutions de réhabilitation énergétique sur de longues périodes d'étude, en climat

présent ou futur (Akkurt et al., 2020; Webb, 2017), ce qui la rend particulièrement efficace pour la comparaison de plusieurs scénarios de rénovation. Néanmoins, ces modèles ont davantage été conçus pour simuler les bâtiments récents et connaissent des limites dans la simulation des bâtiments anciens. Webb (2017) souligne deux limites principales :

1. Les hypothèses standards effectuées sur les données d'entrée ne sont pas adaptées aux bâtiments historiques. Par exemple, les bâtiments historiques ont des propriétés hygrothermiques très différentes de celles des bâtiments plus récents (Camuffo, 2019; Cantin et al., 2010).
2. Les outils de simulation énergétique des bâtiments ne prennent pas toujours en compte certains phénomènes physiques, comme les échanges d'humidité à travers les parois. Or la section précédente a montré l'importance particulière de ce phénomène dans le contexte des centres historiques, notamment pour l'étude de la durabilité des parois anciennes. De même, certains modèles simplifiés ne permettent pas de prendre en compte correctement l'inertie thermique des murs épais (Aste et al., 2009; Verbeke et Audenaert, 2018). En effet, la modélisation précise de l'effet de l'inertie thermique nécessite de résoudre les équations algébriques différentielles pour le transfert de la chaleur au cours du temps (Clarke, 2001).

De nombreux outils effectuent des simulations énergétiques à l'échelle du bâtiment (parmi les plus utilisés se trouvent EnergyPlus, IDA ICE, ESP-r, DOE-2 et TRNSYS) (Foucquier et al., 2013; Harish et Kumar, 2016). Certains seulement considèrent les transferts hydriques à travers les parois avec des niveaux de précisions et des coûts computationnels différents (Carmeliet et al., 2011; Janssens et al., 2008; Rode et Grau, 2003; Woloszyn et Rode, 2008).

En revanche, les modèles à l'échelle du bâtiment ne sont généralement pas adaptés pour considérer précisément les effets de la forme urbaine compacte sur les conditions aux limites. En effet, la configuration urbaine modifie la répartition du rayonnement à grande et courte longueur d'onde, ainsi que l'écoulement du vent, qui est un élément indispensable au calcul de la quantité de pluie absorbée par les façades et des échanges convectifs thermiques et massiques. De plus, les centres anciens sont particulièrement vulnérables au phénomène d'ICU (Rosso et al., 2018) et ce phénomène n'est pas simulé par les outils de simulation énergétique des bâtiments. Négliger ces aspects pourrait avoir des conséquences significatives sur l'estimation des conditions intérieures, des consommations énergétiques et sur la durabilité des parois.

Pour répondre à ces problématiques, les modèles numériques permettant d'effectuer des simulations énergétiques à l'échelle urbaine sont une piste intéressante, puisque les modèles de climat urbain permettent de simuler le comportement énergétique des bâtiments et leur interaction avec le microclimat urbain à l'échelle d'une ville.

2. Modélisation à l'échelle urbaine

La simulation à l'échelle du bâtiment ne permet pas de tenir compte suffisamment précisément de l'environnement, qui pourtant joue un rôle primordial lors de la comparaison de plusieurs scénarios de réhabilitation des centres historiques. Cette section détaille les autres échelles d'étude possibles, les phénomènes à considérer ainsi que les différents types de modèles

existants, y compris leurs hypothèses, avantages et inconvénients. Elle permet ainsi de conclure sur la méthode de modélisation la mieux adaptée, dans le contexte de la réhabilitation des centres-villes anciens.

2.1. Échelles d'étude

Le climat urbain s'étudie selon plusieurs échelles horizontales, quatre selon Oke (2002) :

- L'échelle la plus large est l'échelle **macro** pour des étendues supérieures à 100 km ;
- La **méso**-échelle s'étend de 10 à 200 km et correspond à l'échelle de la ville ;
- Le quartier ou l'îlot urbain est représenté par l'échelle dite **locale** ou urbaine (100m à 50km) ;
- Enfin, l'échelle **micro** (de 1cm à 1km) comprend les bâtiments et leurs façades.

A ces échelles spatiales horizontales, s'associent des échelles verticales (Figure 1.6).

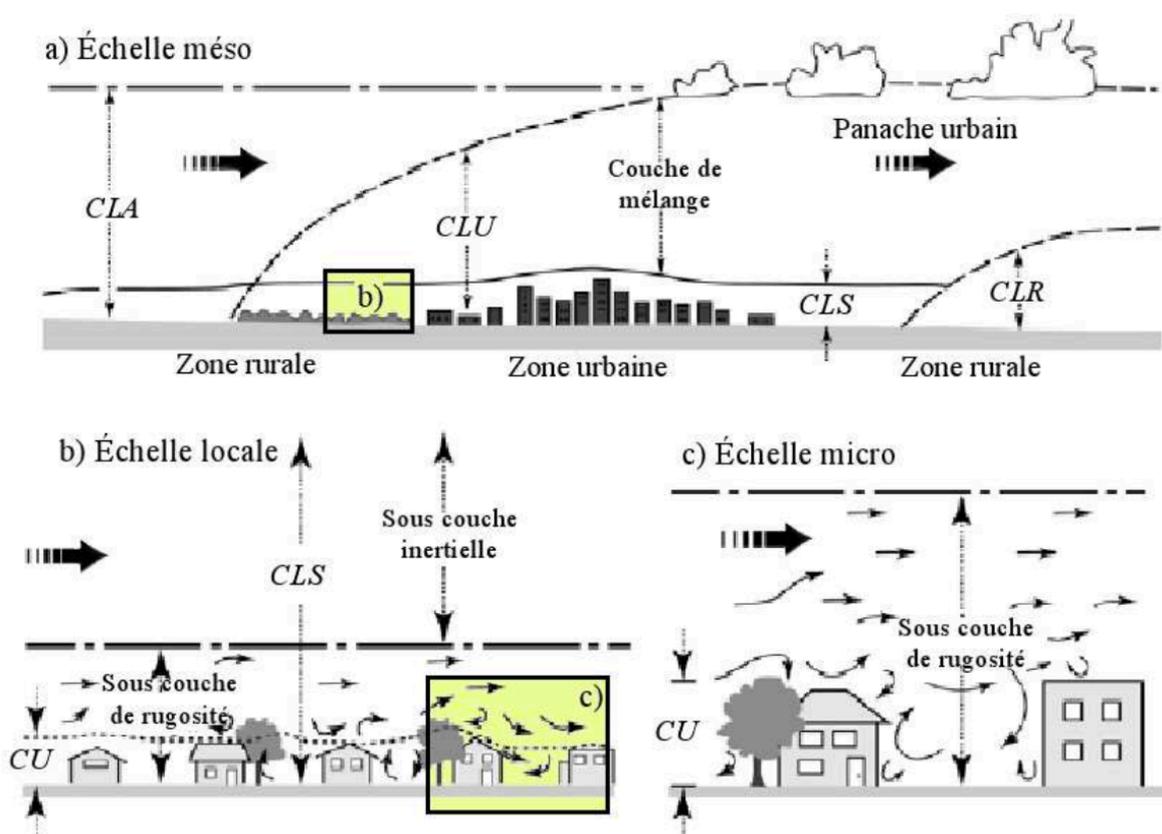


Figure 1.6 – Schéma de la Couche Limite Urbaine (Adaptation de Oke (2006) par Bouyer (2009))

Premièrement, la Couche Limite Atmosphérique (CLA) correspond à la partie inférieure de la troposphère qui est très influencée par la surface terrestre à l'échelle de la journée. Au cours d'un cycle journalier, son épaisseur varie de quelques kilomètres la journée, à seulement quelques centaines de mètre la nuit (Dupont, 2001).

La CLA se décline en deux catégories la Couche Limite Rurale (CLR) et la Couche Limite Urbaine (CLU), qui est modifiée par les activités urbaines (Oke, 1976).

La CLU se divise en deux sous-parties :

- La partie haute de la CLU est la **couche de mélange**, peu soumise aux effets de la rugosité de la surface urbaine. Elle est d'avantage influencée par les vents synoptiques et les effets thermiques.
- La Couche Limite de Surface (**CLS**) est la partie inférieure de la CLU et représente environ 10% de la hauteur totale de la CLU (Robitu, 2005).

La CLS se divise en trois sous-couches (Oke, 1976) :

- La première est la **sous-couche inertielle**. Elle n'est pas influencée directement par les obstacles individuels mais plutôt par la rugosité moyenne de la surface urbaine en-dessous (Erell et al., 2012). L'écoulement s'homogénéise horizontalement, elle est dite couche à flux constants. Les flux turbulents y sont à peu près constants et la distribution des vitesses moyenne de vent tend à être uniforme (Plate, 1995).
- En-dessous, se trouve la **sous-couche rugueuse**. L'écoulement y est fortement influencé par les obstacles (comme les bâtiments) et le flux turbulent est donc inhomogène (Raupach et al., 1980). L'écoulement dans cette couche est donc impacté par l'orientation des obstacles par rapport aux vents. Cette couche s'étend du sol jusqu'à la hauteur pour laquelle l'homogénéité horizontale de l'écoulement est atteinte (Raupach et al., 1991).
- Enfin, la couche de **canopée urbaine** s'étend de la surface du sol au sommet des bâtiments. Elle correspond donc à la circulation de l'air entre les obstacles qui peuvent être non seulement des bâtiments mais aussi d'autres éléments comme les arbres. L'activité urbaine comme le trafic routier peut également impacter l'écoulement. Sa hauteur est environ égale à la hauteur des principaux éléments de rugosité (Oke, 2006).

2.2. Équations bilan des surfaces urbaines

2.2.1. Bilan énergétique

Le bilan énergétique de la surface terrestre correspond à la somme algébrique des différents flux échangés entre cette surface et son environnement. L'équation suivante représente le bilan effectué sur les zones rurales :

$$Q_R = Q_{LE} + Q_H + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1-1)$$

Cette équation est adaptée pour être représentative des zones urbaines (Oke, 1988) :

$$Q_R + Q_F = Q_{LE} + Q_H + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1-2)$$

Avec Q_R le rayonnement net résultant du bilan radiatif, Q_F le flux provenant des activités anthropiques, Q_{LE} et Q_H les flux de chaleur respectivement latent et sensible, ΔQ_S le terme de stockage dans le sol et les matériaux, ΔQ_A le flux advectif (qui correspond aux échanges de chaleur liés à la circulation d'air sur l'horizontale). L'ensemble des termes de ce bilan s'expriment comme des densités de flux en $W \cdot m^{-2}$.

Les termes de gauche représentent les apports nets qui réchauffent l'air, tandis que les termes de droite correspondent à la dissipation et au stockage d'énergie en fonction de différents processus.

Les bilans énergétiques urbains et ruraux se différencient par les processus intervenants et leurs proportions variant en fonction de l'urbanisation (Figure 1.7). La principale différence entre les équations des zones urbaines et rurales est l'ajout d'un terme : le flux Q_F correspondant aux activités anthropiques dans le cas des milieux urbains. Ce terme regroupe la chaleur émise par les activités humaines telles que l'industrie, les transports ou encore les systèmes de chauffage et climatisation.

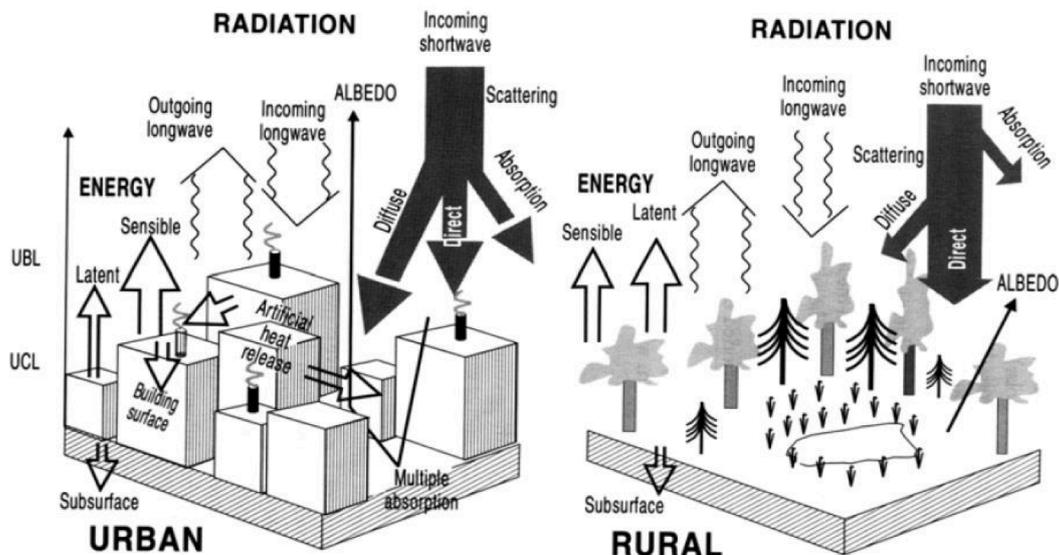


Figure 1.7 – Schéma représentant les différents flux d'énergie et de rayonnement au niveau des zones urbaines et rurales (Adaptation de Bridgman et al. (1995) Gill (2024))

Finalement, les zones urbaines se caractérisent généralement par une augmentation du flux de chaleur anthropique, du flux radiatif, du stockage thermique dans les matériaux, des pertes sensibles mais aussi par une réduction de l'évapotranspiration et des pertes d'énergie latente.

2.2.2. Bilan radiatif

Le flux radiatif net est un des principaux termes du bilan énergétique. Il correspond au bilan entre les rayonnements de courtes et longues longueurs d'onde descendant et ascendant (Figure 1.8).

$$Q_R = L \downarrow - L \uparrow + (1 - \alpha)K \downarrow \quad (1-3)$$

Avec α l'albedo (-), $L \uparrow$ le rayonnement de grande longueur d'onde émis par le milieu ($W \cdot m^{-2}$), $L \downarrow$ le rayonnement atmosphérique descendant ($W \cdot m^{-2}$) et $K \downarrow$ le flux solaire global incident ($W \cdot m^{-2}$).

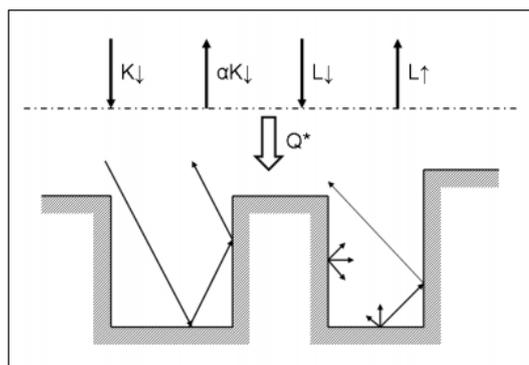


Figure 1.8 – Schéma du bilan radiatif au niveau de la canopée urbaine (Colombert 2008)

Le flux solaire global incident $K \downarrow$ correspond à la somme de trois composantes : le rayonnement direct total $I_{t,direct}$, le flux diffus total induit par les particules atmosphériques $I_{t,diffus}$ Et le rayonnement réfléchi par les surfaces urbaines $I_{réfléchi}$.

$$K \downarrow = I_{t,direct} + I_{t,diffus} + I_{réfléchi} \quad (1-4)$$

Les trois termes s'expriment telles des densités de flux en $W \cdot m^{-2}$.

La Figure 1.9 montre ces trois composantes et détaille la composition du rayonnement diffus : le diffus de circonférence du rayonnement direct, le diffus isotrope et le diffus de l'horizon.

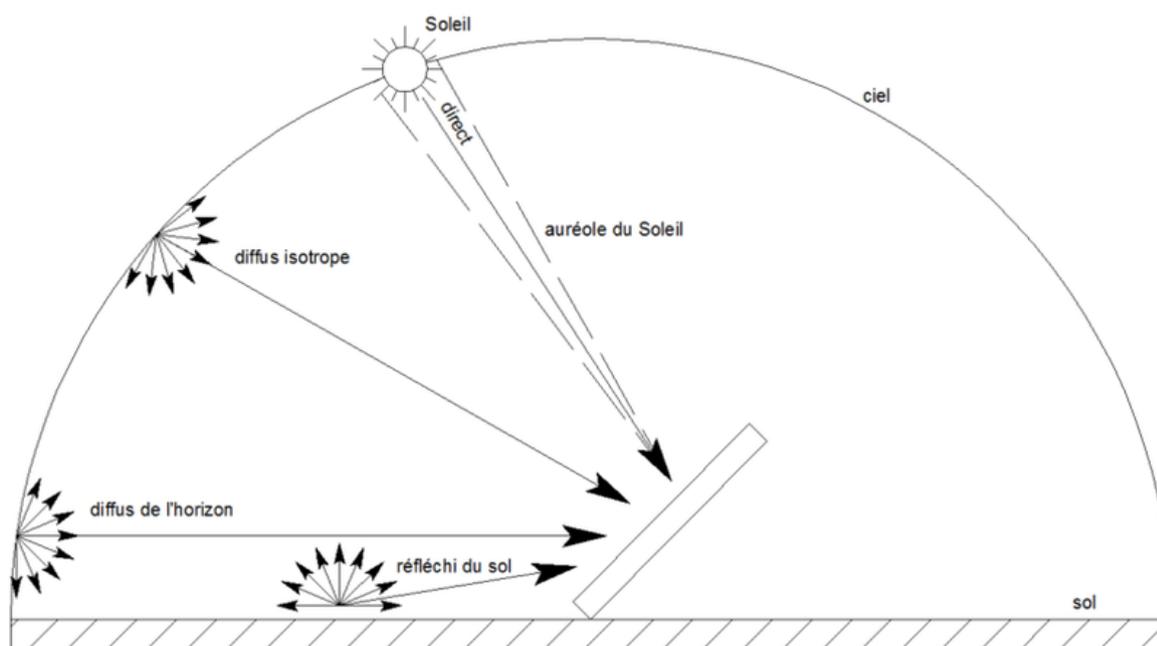


Figure 1.9 – Schéma des composantes du rayonnement solaire global (Adaptation de Duffie et Beckman (2013) par Claude (2018))

Le rayonnement à grande longueur d'onde (GLO) ou rayonnement infrarouge correspond aux rayons émis par tout corps ayant une température non nulle.

Le rayonnement GLO descendant ($L \downarrow$) est engendré par la présence de vapeur d'eau, de gaz carbonique, d'aérosols et d'autres particules dans l'atmosphère. Ce flux peut être mesuré à partir d'un pyr géomètre ou alors estimé à partir d'une formule empirique, dépendant principalement de la couverture nuageuse et de la température d'air.

Le rayonnement infrarouge ascendant de la surface urbaine vers l'atmosphère peut être calculé en appliquant la loi de Stefan-Boltzmann :

$$L \uparrow = \varepsilon \sigma T^4 - (1 - \varepsilon) L \downarrow \quad (1-5)$$

Avec ε l'émissivité du corps (-), σ la constante de Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$) et T la température équivalente de la surface urbaine (K).

2.2.3. Bilan hydrique

Comme pour le bilan énergétique, le bilan hydrique s'écrit de façon différente en ville et à la campagne. L'équation suivante présente la forme du bilan hydrique en milieu naturel :

$$P = Q + ETR + \Delta Ru + \Delta Rh \quad (1-6)$$

Avec P l'ensemble des précipitations, Q la quantité d'eau qui ruisselle, ETR l'évapotranspiration, ΔRu et ΔRh les réserves en eau respectivement du sol et du sous-sol. L'ensemble des termes de ce bilan s'expriment comme des densités de flux en $kg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$.

Il est adapté de la manière suivante pour correspondre aux zones urbaines (Oke, 1987) (Figure 1.10) :

$$P + F + I = E + \Delta r + \Delta S + \Delta A \quad (1-7)$$

Avec F la quantité de vapeur d'eau provenant des processus de combustion, des rejets industriels, I la quantité d'eau apportée artificiellement par les canalisations (par exemple arrosage), E la quantité de vapeur d'eau échangée durant les processus d'évaporation, d'évapotranspiration et de condensation, Δr la quantité d'eau perdue par ruissellement et évacuation, ΔS la quantité d'eau stockée par la ville et ΔA le bilan net de vapeur d'eau transportée par advection. L'ensemble des termes de ce bilan s'expriment comme des densités de flux en $kg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$.

Les termes de gauche correspondent aux apports hydriques. En milieu naturel, il se compose des précipitations, tandis qu'en ville s'ajoute l'arrosage et la vapeur d'eau issue des activités anthropiques notamment des processus industriels. Néanmoins, notons qu'en zone agricole, l'irrigation peut également représenter un apport conséquent d'eau.

Les termes de droite sont les processus de dissipations, stockages et déstockages hydriques. La zone rurale comporte l'évapotranspiration, le ruissellement et le stockage dans le sol et le sous-sol. La zone urbaine se différencie par la mise en place de systèmes d'évacuation de l'eau et par l'imperméabilisation des surfaces.

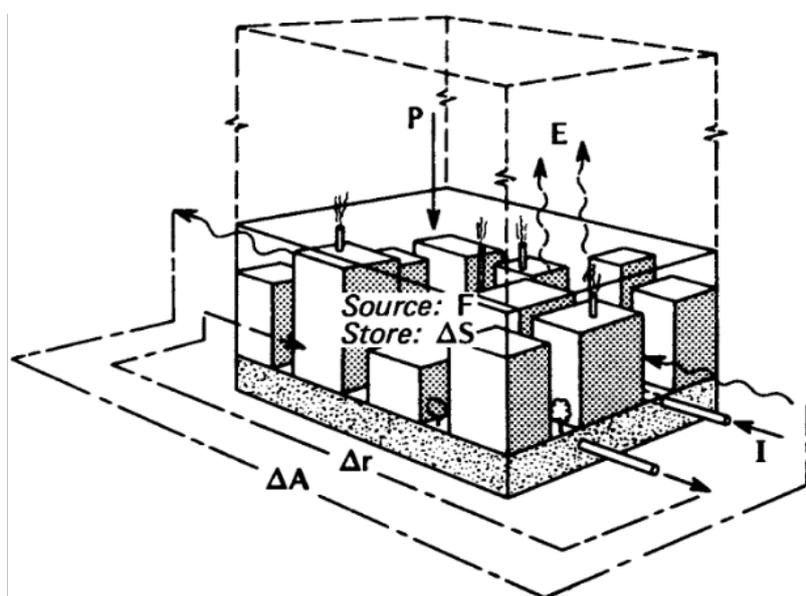


Figure 1.10 – Schéma de la contribution des termes au bilan hydrique en zone urbaine (Oke, 1987)

2.3. Modélisation des composantes du climat urbain

Le climat urbain est la résultante complexe de facteurs naturels et anthropiques. Il est en effet influencé par les conditions météorologiques, le positionnement géographique, l'urbanisation comprenant notamment les bâtiments et les activités humaines, mais également les éventuels couverts naturels tels que la végétation et les espaces en eau. Chacun de ces éléments doit être modélisé physiquement, pour obtenir un modèle complet du climat urbain. Pour la modélisation du climat urbain, les quatre composantes principales sont un modèle radiatif, un modèle pour les écoulements d'air, un modèle pour la simulation énergétique des bâtiments ou de la ville et un modèle d'hydrologie urbaine.

2.3.1. Modèles aérodynamiques

La CFD (Computational Fluid Dynamics) est une technique largement utilisée pour résoudre les problèmes de mécanique des fluides et notamment les écoulements d'air en milieu urbain (Toparlar et al., 2017). La CFD permet de prendre en compte la complexité physique en couplant plusieurs phénomènes et convient aux études à l'échelle macro, méso, micro, mais également à l'échelle du bâtiment, de ces composants ou même à l'échelle humaine. Dans le contexte de l'étude du microclimat dans les centres historiques, l'utilisation de la CFD présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet la prise en compte des géométries complexes, qui caractérisent les quartiers médiévaux notamment. Cette méthode fournit une description relativement précise des conditions météorologiques en tout point du maillage et permet donc de décrire l'écoulement du vent dans la canopée urbaine, mais aussi la pluie battante incidente aux façades (Abuku et al., 2009b; Blocken et al., 2007b). L'étude de l'écoulement du vent en considérant les aspects énergétiques, permet d'identifier précisément les coefficients d'échange convectif de chaleur au niveau des parois (Allegrini et al., 2012b; Blocken et al., 2009; Defraeye, 2011). L'ajout de la loi de conservation de l'humidité et la modélisation des transferts couplés dans les parois rendent possible la déduction des coefficients d'échange convectif massique et du taux de séchage des parois (Saneinejad, 2013).

Les outils de CFD sont nombreux, parmi les plus utilisés ANSYS Fluent, OpenFOAM, Code Saturne et COMSOL. Ils se différencient par l'algorithme de résolution utilisé, les méthodes de discrétisations (méthodes des différences finies, des volumes finis, des éléments finis ou encore méthode spectrale), les approches disponibles (LES, RANS, URANS, hybride) et également les modèles de turbulence. Cependant, ils possèdent tous le même inconvénient principal qui est le coût computationnel élevé induit par leur complexité.

Des codes CFD sont également développés dans le but spécifique d'étudier les écoulements en milieu urbain, ce qui est le cas de UrbaWind ou encore de CityFFD (Mortezazadeh, 2019).

D'autres modèles s'appuient sur des approches simplifiées pour décrire l'écoulement de l'air en milieu urbain, comme celle basée sur les coefficients de trainée (Hamdi et Masson, 2008). Ces méthodes peuvent être suffisantes dans le cas de l'étude de géométries urbaines simplifiées et ont l'avantage d'avoir un coût computationnel très nettement inférieur.

2.3.2. Modèles radiatifs

Les modèles radiatifs à l'échelle urbaine permettent la détermination des échanges radiatifs entre l'atmosphère et la ville, mais également au sein du milieu urbain. Les rayonnements étudiés sont les rayonnements à courte longueur d'onde (CLO) et à grande longueur d'onde (GLO). La répartition du rayonnement est impactée par la morphologie urbaine de la zone étudiée et par la végétation. Ces obstructions entraînent des ombres portées et des réflexions multiples, qu'il convient de prendre en compte pour évaluer précisément les flux radiatifs en ville. L'accès au rayonnement solaire est dépendant du facteur de vue du ciel et les échanges entre les surfaces urbaines sont déterminés en fonction des facteurs de vue entre chacune d'elles. De plus, il est également primordial de connaître les propriétés radiatives des matériaux urbains, pour évaluer les parts de rayonnement absorbés et réfléchis.

Les modèles permettent de considérer des géométries plus ou moins complexes : il existe des modèles bidimensionnels (hypothèse de rue canyon), et des modèles tridimensionnels homogènes ou hétérogènes. Ils se différencient également par les hypothèses choisies pour la discrétisation et la détermination des températures de surface urbaine.

La principale différence concerne les méthodes utilisées pour le calcul des réflexions multiples entre les différentes surfaces du canyon. La méthode la plus précise et la plus coûteuse en temps de calcul est la méthode des radiosités, utilisée dans l'outil SOLENE (Groleau, 2000). Elle s'appuie sur les formules physiques de transfert radiatif et résout l'ensemble des équations d'échange entre les surfaces de la scène urbaine. Robinson et Stone (2005) ont développé un algorithme simplifié des radiosités implémenté dans CitySim (anciennement SUNtool)(Kämpf, 2009). Il a l'avantage d'être spécialement adapté à l'environnement urbain. Il est basé sur la description de l'environnement extérieur par deux hémisphères et discrétisé en un certain nombre d'éléments. Une autre méthode utilisée pour étudier les réflexions multiples entre les surfaces est le programme de lancer de rayon avec Monte-Carlo. Cette solution est implémentée dans l'outil Radiance (Compagnon, 2001) et également dans EnergyPlus, pour la prise en compte des inter-réflexions lors de la STD (Simulation Thermique Dynamique) d'un bâtiment.

Il existe également d'autres modèles radiatifs davantage simplifiés comme le modèle SOLWEIG (Solar longwave Environmental Irradiance Geometry model) (Lindberg et al., 2008) ou le modèle RayMan (Matzarakis et al., 2010). Ils sont principalement utilisés pour évaluer le confort des piétons et tiennent compte des effets des bâtiments et de la végétation. Ces modèles ont l'avantage de nécessiter relativement peu de données météorologiques en entrée.

2.3.3. Modèles énergétiques des bâtiments

Le bâti est la principale caractéristique des zones urbaines et interagit fortement avec son environnement extérieur. Il est indispensable de prendre compte les effets du bâtiment lors du bilan énergétique urbain. Le comportement énergétique du bâtiment doit donc être intégré dans les simulations du microclimat urbain.

De nombreux modèles énergétiques à l'échelle du bâtiment existent. Les objectifs de ces modèles BES (Building Energy Simulation) sont de fournir les conditions thermiques détaillées à l'intérieur du bâtiment et d'estimer les besoins énergétiques.

Les principaux éléments à prendre en compte pour la modélisation des bâtiments sont (Garreau, 2021) :

- Leur modèle thermique et leur géométrie ;
- Les sollicitations extérieures ;
- Les systèmes énergétiques ;
- Les occupants et les équipements.

Pour effectuer des simulations énergétiques à l'échelle urbaine, il est compliqué de simuler chaque bâtiment individuellement, notamment car le coût computationnel et la quantité de paramètres d'entrée à définir seraient trop élevés. De ce fait, des outils adaptés pour les simulations énergétiques à l'échelle du quartier ou de la ville ont été développés, ils se nomment respectivement UBES (Urban Building Energy Simulation) et CES (City Energy Simulation).

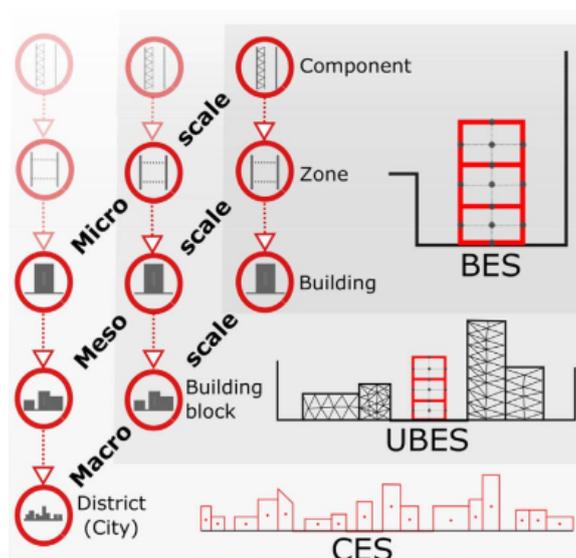


Figure 1.11 – Échelles des différentes catégories de simulation du bâti : Building Energy Simulation (BES), Urban Building Energy Simulation (UBES), City Energy Simulation (CES) (Frayssinet et al. 2018)

Dans la littérature de nombreuses revues des modèles UBES existent, elles distinguent plusieurs approches et les répartissent en différentes catégories en fonctions des objectifs de chacun (Allegrini et al., 2015b; Frayssinet et al., 2018; Johari et al., 2020; Li et al., 2017; Sola et al., 2018; Swan et Ugursal, 2009). Ici seuls les modèles, dont l'approche est basée sur la modélisation physique des bâtiments, des systèmes et de l'occupation, sont étudiés. Ainsi, les modèles UBES permettent de calculer les flux énergétiques à l'échelle du quartier et d'évaluer les consommations énergétiques urbaines. L'outil CitySim (Robinson et al., 2009), l'outil CityBES (Hong et al., 2016), l'outil DIMOSIM (Riederer et al., 2015) sont des exemples de modèles UBES.

La plupart des modèles UBES, capitalisent sur les modèles BES déjà existants et validés. Ils se basent sur ces modèles à l'échelle du bâtiment pour les intégrer à l'échelle du quartier. Ainsi, ils écotent de la même lacune que les logiciels BES pour la représentation du bâti ancien, qui est la mauvaise voire la non prise en compte des transferts d'humidité à travers les parois (Webb, 2017). La plupart de ces outils sont donc mal appropriés pour l'évaluation de scénario de réhabilitation dans les centres historiques.

Par ailleurs, les sollicitations extérieures de ces simulations sont généralement basées sur des fichiers météorologiques, qui contiennent des données souvent enregistrées dans des aéroports. Or ces données ne sont pas représentatives des conditions réelles du microclimat urbain et peuvent entraîner une mauvaise estimation des consommations énergétiques associées à l'usage de systèmes de CVC (Calice et al., 2017; Hong et al., 2019).

2.3.4. Modèles hydrologiques

Les modèles d'hydrologie urbaine ont pour but de représenter le cycle de l'eau en milieu urbain. Ils permettent notamment de résoudre le bilan hydrologique urbain, en simulant les processus de surface et de sub-surface. Ils considèrent donc le comportement hydrique du sol urbain et la gestion des eaux pluviales, y compris l'infiltration, le stockage et la restitution vers l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration (Fletcher et al., 2013).

Il existe des modèles simplifiés basés sur une paramétrisation des flux d'évapotranspiration, qui considère séparément les flux provenant de la surface du sol et ceux émanant de la végétation (Mitchell et al., 2001; Rodriguez et al., 2008; Xiao et al., 2007). D'autres approches plus détaillées couplent les transferts hydriques et énergétiques à l'échelle du canyon urbain. Ces modèles permettent d'évaluer l'impact microclimatique de différentes stratégies d'aménagement urbain, comme des pavés poreux, des toitures végétalisées et des espaces en eau (De Munck et al., 2013; Lemonsu et al., 2007; Stavropoulos-Laffaille et al., 2018).

2.4. Modèles de climat urbain

Les sections précédentes ont permis de présenter les éléments nécessaires à une modélisation du climat urbain, ainsi que les modèles adaptés pour la représentation de chaque catégorie (aérodynamique, radiatif, énergétique et hydrologique). Une modélisation complète du climat urbain nécessite d'évaluer simultanément ces quatre aspects. Ainsi, des outils ont été conçus pour représenter l'ensemble des interactions physiques à l'échelle urbaine. Or, simuler avec précision tous les facteurs engendrerait un temps de calcul trop élevé. Des compromis doivent être réalisés, dans le but de trouver l'équilibre entre coûts computationnels et précision des modèles. Des hypothèses simplificatrices peuvent être effectuées au niveau des processus physiques et/ou de la géométrie étudiée. Les outils se différencient alors par les hypothèses de simplification choisies. En effet, l'échelle temporelle varie beaucoup d'un outil à l'autre : certains outils sont capables de fournir des résultats pour seulement une journée, alors que d'autres offrent la possibilité d'étudier plusieurs années. Concernant la taille du domaine, les outils permettent de réaliser des études allant de l'échelle micro à méso (Figure 1.12).

Une autre option pour obtenir une simulation complète consiste à coupler plusieurs modèles (Sola et al., 2018), mais cette opération peut être complexe à mettre en œuvre et/ou engendrer un temps de calcul élevé. De plus, il est difficile de réaliser en parallèle une simulation énergétique des bâtiments et une simulation microclimatique. Les deux raisons principales sont la différence dans les échelles spatiotemporelles étudiées et le fait que la zone urbaine est un système ouvert alors que le bâtiment est un système fermé.

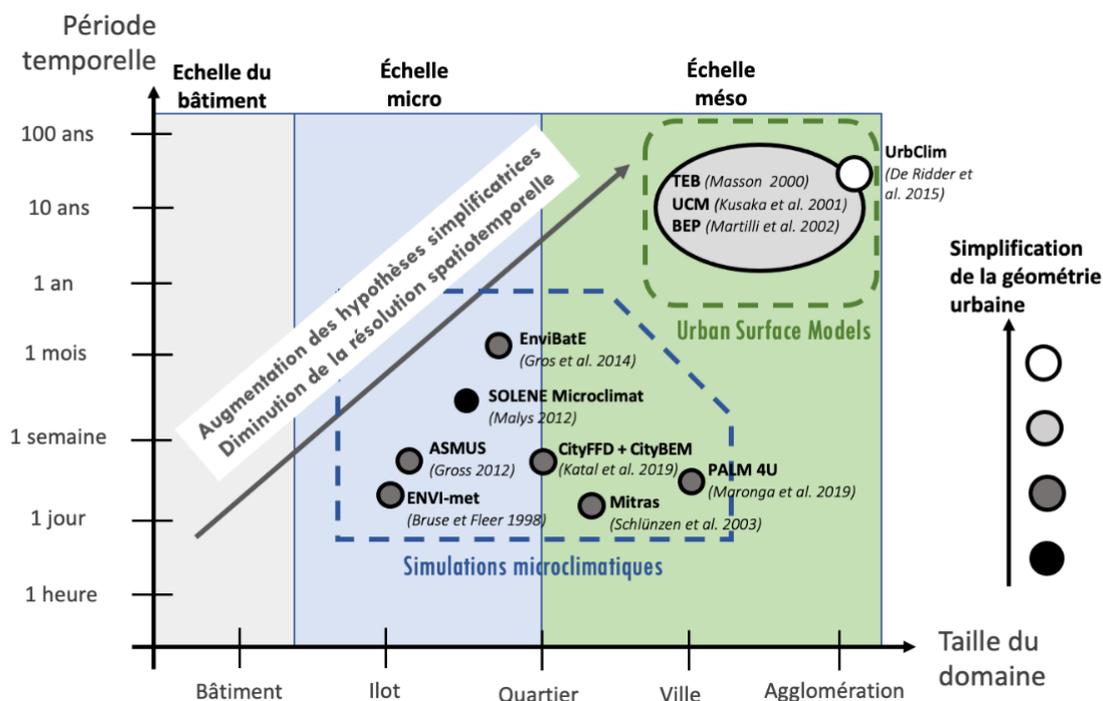


Figure 1.12 – Représentation d'outils permettant d'étudier le climat urbain, en fonction de leurs échelles spatiotemporelles

2.4.1. Modèle de microclimat urbain

Les outils de modélisation microclimatiques sont conçus pour simuler les conditions extérieures au niveau d'une rue, d'un îlot ou encore d'un quartier. Ils tiennent généralement compte de manière plutôt détaillée de la géométrie urbaine et décrivent la variabilité spatiale des champs simulés. Pour cela, ils sont souvent utilisés dans l'évaluation de stratégies d'atténuation de l'ICU. Il existe plusieurs modèles microclimatiques, par exemple ENVI-met (Bruse et Flerer, 1998), MITRAS (Salim et al., 2018; Schlünzen et al., 2003), MUKLIMO_3 (Früh et al., 2011), ASMUS (Gross, 2012), EnviBatE (Gros, 2013), SOLENE-microclimat (Malys et al., 2015) ou encore PALM 4U (Maronga et al., 2019).

ENVI-met

ENVI-met (Bruse et Flerer, 1998) figure parmi les outils les plus utilisés. Il a été créé dans le but de simuler les interactions entre les surfaces urbaines, l'air et les plantes (Figure 1.13). Sa résolution spatiotemporelle est de 0.5 à 10 m et de 1 à 5 secondes, pour une période allant de 24 à 48 heures. Il se compose de quatre sous-modèles :

- Modèle atmosphérique : champs du vent en 3D à partir de la CFD (RANS) ;
- Modèle du sol : température et teneur en eau du sol en surface et en profondeur ;
- Modèle de végétation : géométrie des plantes en 3D et échanges physiques avec leur environnement ;
- Modèle de l'environnement bâti : calcul des échanges thermiques au travers des parois à l'aide d'un modèle multi-nœud (Simon et al., 2017) et calcul dynamique de l'évolution de la température intérieure des bâtiments en fonction des flux entrant et sortant au niveau de l'enveloppe du bâti et en considérant les zones thermiques.

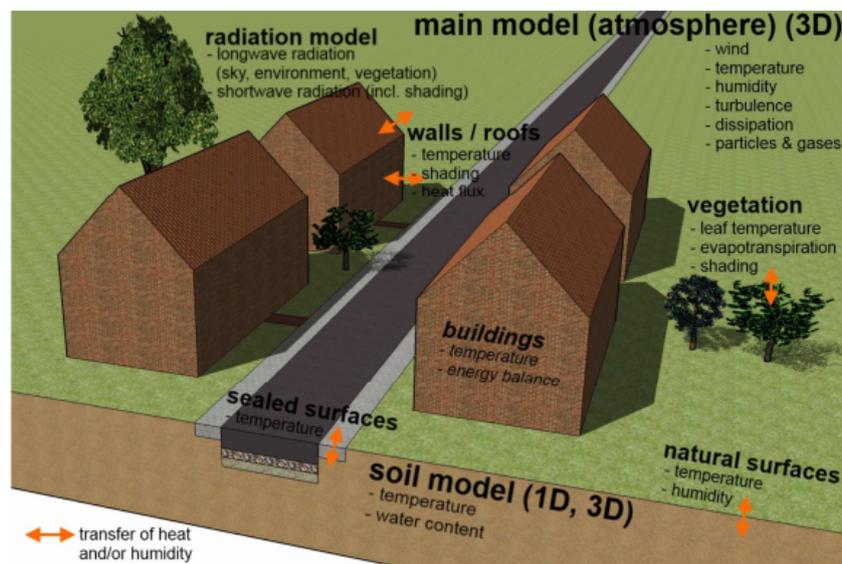


Figure 1.13 – Représentation des sous-modèle de ENVI-met (Huttner, 2012)

Il comprend également un couplage avec BioMet permettant d'évaluer des indices de confort thermique (Tmrt, PMV/PPD, PET ou encore UTCI).

La littérature souligne plusieurs points faibles de ce modèle, notamment au niveau du calcul des flux radiatifs, de la tendance à surestimer la turbulence dans les zones de fortes accélérations, de la non prise en compte de la pluie, des conditions nuageuses et de vent considérées constantes sur la période d'étude ou encore d'une simplification trop importante de la géométrie. Pour plus de détails, Tsoka et al. (2018) s'appuient sur les résultats de 52 études utilisant ENVI-met et proposent une revue des limites de ce logiciel. Un autre inconvénient majeur de cet outil est associé au coût computationnel. Le temps moyen de calcul d'une journée type pour un quartier est de douze jours (Fahed, 2018).

Par ailleurs, cet outil ne permet pas d'effectuer un réel bilan énergétique des bâtiments. Un couplage entre ENVI-met et EnergyPlus a permis de visualiser l'effet de l'environnement urbain sur la performance énergétique des bâtiments, (Yang et al., 2012). La stratégie de couplage mise en place est relativement simple, car le couplage est unidirectionnel, c'est-à-dire que les données de sortie de ENVI-met sont utilisées en tant que conditions aux limites dans EnergyPlus.

SOLENE

SOLENE est un modèle thermo-radiatif de la scène urbaine (Groleau, 2000). Cet outil a été créé dans le but d'évaluer la pertinence des aménagements urbains. Il permet d'étudier des cycles journaliers avec un pas de temps variant entre cinq minutes et une heure, pour une zone urbaine allant d'un bâtiment à un quartier. Il a pour avantage de prendre en compte précisément des géométries urbaines complexes et de fournir une description détaillée des processus radiatifs (GLO, CLO direct et diffus), basée sur la méthode des radiosités. SOLENE comporte également un modèle thermique des bâtiments. Il tient compte des transferts de chaleur par conduction à travers les parois et du stockage de chaleur en fonction de la capacité thermique des matériaux. Un bilan intérieur est également réalisé à partir des échanges au niveau des parois, des apports solaires, des apports liés à la ventilation ou encore à l'occupation et aux équipements (Bouyer, 2009).

Malgré ces éléments, ce modèle énergétique des bâtiments est parfois considéré incomplet. En effet, il ne permet pas d'évaluer des changements locaux de matériaux, des défauts de structure, car les murs ne sont pas discrétisés dans le modèle thermique, alors que le modèle radiatif permet une description spatiale très précise des apports radiatifs au niveau des parois. Pour ces raisons, Rodler et al. (2018) proposent un couplage entre SOLENE et un outil de simulation énergétique des bâtiments DANA.

L'outil SOLENE seul n'intègre pas les aspects aérodynamiques, ni de bilan hydrique. Pour compléter l'outil sur ces points, des couplages avec des outils de CFD ont été mis en place :

- SOLENE et Fluent pour prendre en compte les effets de l'écoulement du vent et des transferts de masse et de chaleur dans le sol (Bouyer, 2009; Bouyer et al., 2011) ;
- SOLENE-microclimat : couplage avec le code Saturne dans le but principal de modéliser et d'évaluer une enveloppe végétale (Malys, 2012) ;
- EnviBatE : couplage avec QUIC-URB qui permet de calculer le champ de vitesse du vent dans la scène urbaine (Gros, 2013).

PALM 4U

Dans le cadre du Urban Climate Under Change ([UC]²), le projet allemand MOSAIK (Model-based city planning and application in climate change) a pour mission de développer un nouveau modèle de climat urbain à haute résolution (Figure 1.14). Le détail des objectifs de ce nouvel outil est présenté dans Maronga et al. (2019).

Ce modèle est conçu dans le but d'être suffisamment rapide pour étudier de larges zones, typiquement de grandes villes. Il peut s'appliquer à des domaines allant jusqu'à 2000 km², avec une résolution classique de 10 m. Le modèle est également capable de représenter à haute résolution des zones spécifiques d'intérêt (soit un domaine d'environ 1 km² avec une discrétisation de 1 m). Les périodes simulées pourront aller d'un cycle journalier à plusieurs jours, ce qui permettra d'étudier les conditions climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur.

PALM 4U est basé sur le code de PALM (Parallelized Large-Eddy Simulation Model), un modèle qui traite les flux de la couche limite atmosphérique (Maronga et al., 2015; Raasch et Sch, 2001). Ainsi, pour la CFD, le mode principal est de type LES, mais un mode optionnel de type RANS est également disponible pour résoudre les écoulements en milieux urbains. Concernant les aspects radiatifs, le schéma radiatif de PALM est récupéré et adapté aux contraintes de l'échelle urbaines. Ainsi, le modèle traite séparément la part de rayonnement solaire et celle de diffus, et considère les effets de réflexions multiples entre les bâtiments ainsi que des ombres en fonction de la position du soleil.

Le sol est représenté par un modèle multicouche tenant compte des transferts verticaux de chaleur et d'eau. Les différents processus physiques induits par le fonctionnement de la végétation sont considérés, de même que leurs impacts radiatifs et aérodynamiques.

PALM 4U comprend également un modèle de bâtiment, basé sur une approche holistique, qui calcule les conditions intérieures et les consommations énergétiques en fonction des transferts

par conduction à travers l'enveloppe, de la ventilation, des gains internes et des apports solaires par les fenêtres (Pfafferott et al., 2021).

Un module de biométéorologie urbaine est également implémenté. Il est basé sur des modèles existants : RayMan (Matzarakis et al., 2010) et SkyHelios (Matzarakis et Matuschek, 2011). Ce nouveau modèle de climat urbain intègre également des aspects socio-économiques et permet d'évaluer la dispersion des substances chimiques polluantes.

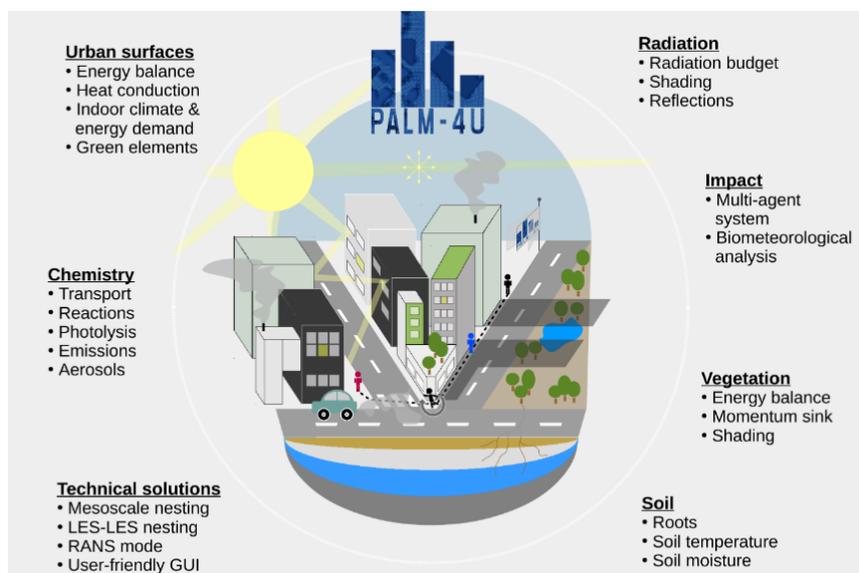


Figure 1.14 – Schéma récapitulatif du contenu de PALM 4U (<https://palm.muk.uni-hannover.de>)

Finalement, ce projet attache une importance majeure, à l'accessibilité de cet outil. En effet, il devrait devenir un logiciel gratuit ou open source. L'objectif est qu'il soit accessible pour des personnes qui ne sont pas expertes du domaine. Pour cela, un travail particulier est réalisé sur l'interface de l'outil, dans le but de la rendre la plus « user-friendly » possible. Pour vérifier sa praticabilité, une stratégie de Living Lab a été directement intégrée dans son processus de développement (Steuri et al., 2020; Winkler et al., 2020).

Autres couplages

Parmi les différents outils recensés, une grande partie prend en compte les transferts hydriques au niveau du sol urbain. En revanche, aucun ne considère les transferts d'humidité à travers les parois des bâtiments. Ainsi, un modèle a été développé par des chercheurs de l'ETH Zurich pour étudier l'effet des surfaces poreuses (verticales et horizontales) sur les conditions microclimatiques dans un canyon urbain (Ferrari et al., 2020; Kubilay et al., 2018; Saneinejad, 2013; Saneinejad et al., 2014, 2012). Il est basé sur le logiciel OpenFOAM et correspond au couplage de quatre sous-modèles principaux :

- CFD (RANS), pour l'écoulement du vent dans la rue canyon ;
- WDR (Wind-Driven Rain ou pluie poussée par le vent) calculée avec un modèle Eulérien multiphase ;
- BE-HAM (Building Enveloppe – Heat and Moisture transfer) pour le transfert couplé de masse et de chaleur au niveau des matériaux des bâtiments ;
- Radiatif (CLO et GLO) dont les calculs sont basés sur la méthode des radiosités.

De plus récents travaux ont étendu ce couplage à un modèle météorologique à l'échelle méso COSMO (Consortium for Small-scale Modelling) (Carmeliet et al., 2021; Kubilay et al., 2021, 2020).

Par ailleurs, il existe de nombreuses études proposant de coupler un outil CFD à un outil BES. Ce type de couplage permet d'étudier simultanément le microclimat et le comportement énergétique des bâtiments. Ainsi les températures de surface sont calculées par les outils BES, et la partie CFD les récupère pour calculer l'écoulement du vent dans l'environnement urbain. Ils sont particulièrement adaptés pour évaluer l'impact du microclimat urbain sur les consommations énergétiques. Zhai et al. (2002) présentent les différentes approches possibles pour effectuer ce type de couplage. Pour citer quelques exemples, Allegrini et al. (2012b) couplent TRNSYS et ANSYS Fluent, tandis que Hadavi et Pasdarsahri (2021) proposent un couplage entre EnergyPlus et OpenFOAM. Néanmoins, ces couplages sont généralement limités à de petits groupes de bâtiments.

Pour pallier cet inconvénient, il est préférable de coupler des modèles de type UBES ou CES avec des outils de CFD, ce qui permet d'effectuer des simulations énergétiques et microclimatiques à l'échelle d'une ville. Dans la littérature, on retrouve plusieurs exemples, comme le couplage entre l'outil CitySim et OpenFOAM (Allegrini et al., 2015a), et celui entre CityBEM (City Building Energy Model) et CityFFD (City Fast Fluid Dynamics) (Katal et al., 2019).

2.4.2. Modèles à l'échelle méso

Il existe une autre famille d'outils, conçus pour calculer les échanges entre les zones urbanisées et l'atmosphère. Ils fonctionnent à l'échelle méso-climatique sur de longues périodes temporelles. Ces modèles de climat urbain peuvent être couplés à des modèles atmosphériques et doivent donc avoir un coût computationnel réduit. Leur objectif initial étant de quantifier les échanges énergétiques, radiatifs et hydriques ainsi que les interactions aérodynamiques entre l'atmosphère et la canopée urbaine, le besoin de précision sur les conditions dans la rue est moins fort que dans les modèles microclimatiques. Ils font donc appel à des simplifications géométriques permettant de réduire le temps de calcul. Trois types sont généralement distingués (Grimmond et al., 2011, 2010; Hamdi et al., 2020; Masson, 2006) (Figure 1.15) :

- **L'approche par dalle** consiste à modifier les paramètres du sol dans les modèles de transfert sol-végétation-atmosphère, davantage conçus pour les zones naturelles. Cette méthode s'applique en adaptant la longueur de rugosité et la hauteur de déplacement, qui sont très élevées au niveau des villes. Le bilan énergétique se trouve également modifié pour tenir compte des phénomènes spécifiques des zones urbaines comme les flux de chaleur anthropique, le piégeage radiatif dans la canopée urbaine, le stockage de chaleur dans les matériaux urbains et l'évaporation. Ils s'appuient sur la théorie de la similitude de Monin-Obukhov (1954). Ces modèles ne résolvent pas la géométrie tridimensionnelle de la ville, ce qui les rend particulièrement rapide. Par exemple, SM2U (Sub-Meso Soil Model urbain) (Dupont, 2001; Dupont et Mestayer, 2006) et UrbClim (De Ridder et al., 2015) sont des modèles appliquant l'approche par dalle.
- Les **modèles de canopée urbaine à une seule couche** sont intégrés à la couche la plus basse du modèle atmosphérique et effectuent les calculs des échanges à partir d'une géométrie simplifiée de la ville (composée de trois facettes : paroi, rue et toit). Néanmoins,

ce type de modèle permet de capturer les principaux phénomènes physiques tridimensionnels impactant les flux radiatifs, énergétiques et aérodynamiques. Les modèles UCM (Urban Canopy Model) (Kusaka et al., 2001), TEB (Town Energy Balance) dans sa version originale (Masson, 2000), CLMU (Community Land Model Urban) (Oleson et al., 2008), SLUCM (Single-layer Urban Canopy Model) (Huszar et al., 2014) sont à une seule couche.

- Les **modèles de canopée urbaine multicouches** considèrent également une géométrie simplifiée de la canopée urbaine. Leur principale différence par rapport aux modèles à simple couche est qu'ils assurent une interaction directe avec la couche limite planétaire, puisque les bilans y sont calculés en plusieurs points verticaux de la canopée urbaine. Des exemples sont le modèle BEP (Building Effect Parameterization) (Martilli et al., 2002) ou encore TEB avec l'intégration d'un module multicouche (Hamdi et Masson, 2008).

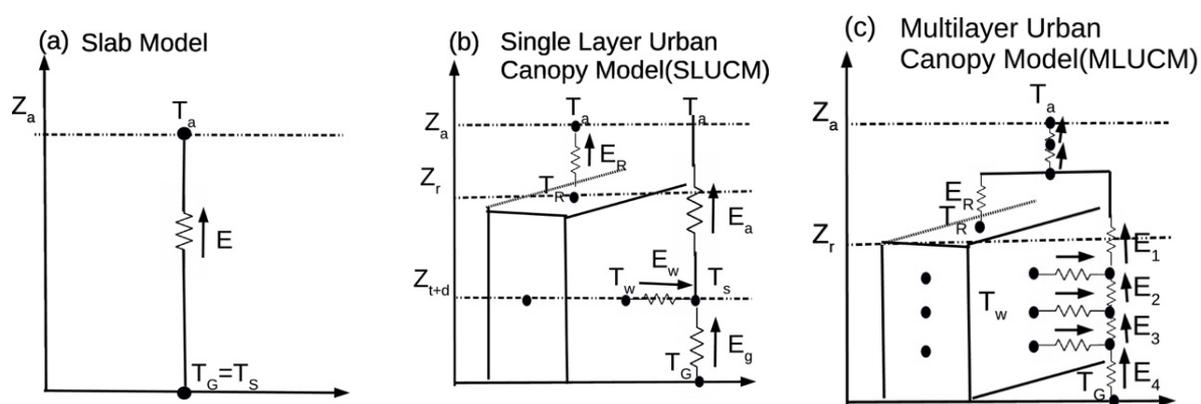


Figure 1.15 – Schéma des trois principaux types de modèles méso : (a) approche par dalle, (b) modèle de canopée urbaine simple couche et (c) modèle de canopée urbaine multicouche (Garuma, 2018)

Finalement, les approches par dalle ne sont pas pertinentes vis-à-vis de la problématique étudiée. En effet, cette thèse se concentre sur la rénovation des bâtiments et ce type de modèle ne représente pas explicitement le bâti. En revanche, les modèles de canopée urbaine qu'ils soient simple ou multi couche, semblent être mieux adaptés, et ils ont l'avantage par rapport au modèle microclimatique d'être capable de simuler des villes entières et sur de longues durées.

TEB est parmi les modèles de canopée urbaine les plus utilisés. Depuis sa première version datant de l'année 2000 (Masson, 2000), de nombreux développements ont été intégrés. Il comprend notamment un module permettant de décrire de manière complète le comportement énergétique des bâtiments (Bueno et al., 2012). Cependant, comme la majorité des modèles, il néglige les transferts d'humidité à travers les parois. Par ailleurs, il est capable de simuler les transferts détaillés à travers le sol (Stavropoulos-Laffaille et al., 2018), de modéliser la végétation (jardin, arbre, toiture ou façade végétalisée) (De Munck et al., 2013; Lemonsu et al., 2012; Redon et al., 2020, 2017) ou encore d'évaluer le confort des piétons et habitants (Hallegatte et al., 2013). Ainsi, il est aussi bien utilisé pour paramétrer les échanges entre les surfaces urbaines et l'atmosphère, que pour évaluer des scénarios d'aménagement urbain, des mesures d'atténuation de l'ICU ou encore les consommations énergétiques des bâtiments, à l'échelle d'une ville entière.

Par ailleurs, un modèle de climat urbain a récemment été développé dans le but spécifique d'étudier les mécanismes de l'îlot d'humidité dans des villes très denses (Wang et al., 2021). Dans cet objectif, le modèle intègre différents phénomènes intervenant dans le bilan d'humidité urbain (Figure 1.16) :

- La convection d'humidité au niveau des surfaces artificielles (sol, paroi, toit) ;
- Le stockage et les transferts d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment ;
- L'évapotranspiration au niveau des surfaces naturelles ;
- Les rejets anthropiques d'humidité et de chaleur ;
- Le taux de ventilation représentant les échanges d'air de la canopée urbaine avec les zones environnantes et avec la CLU.

Cependant, ce modèle a été développé pour mieux comprendre les phénomènes liés à l'humidité dans le climat urbain, mais il n'a pas été conçu dans le but de prédire précisément le comportement du microclimat, des bâtiments et des parois. Pour cela, l'ensemble des phénomènes sont pris en compte de manière simplifiée. Par exemple, les transferts d'eau liquide à travers les parois sont négligés et seuls les transferts sous forme de vapeur sont considérés. De plus, les températures et humidités intérieures sont supposées constantes.

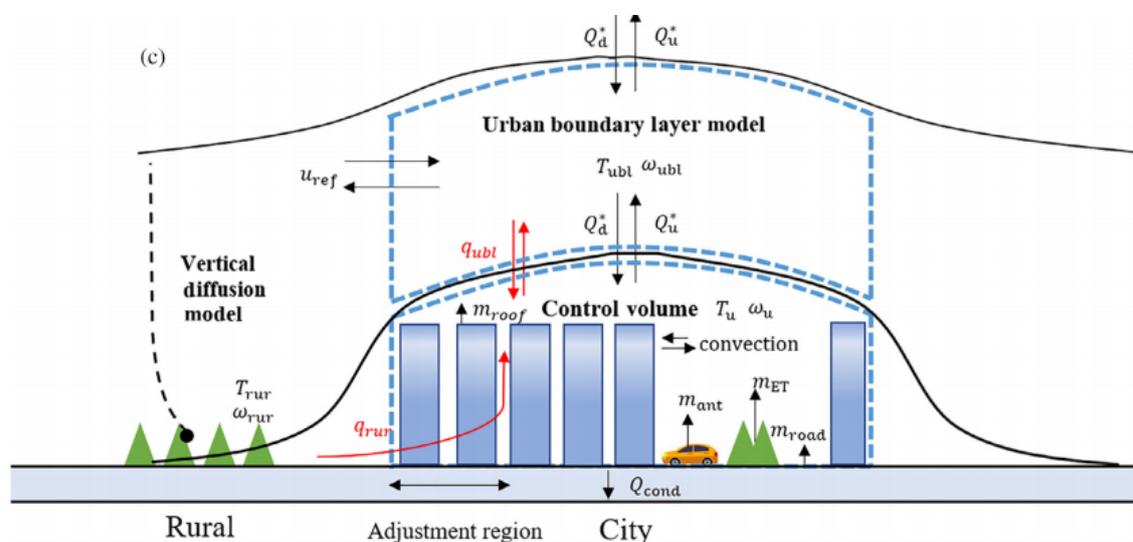


Figure 1.16 – Schéma du modèle urbain conçu pour étudier le phénomène d'îlot d'humidité urbain (Wang et al., 2021)

2.5. Bilan

En conclusion, il existe une grande variété de modèles permettant d'effectuer des simulations du climat urbain. Ils se différencient par les échelles de simulation et les hypothèses effectuées. Les avantages et inconvénients de chacun ont été discutés dans cette section, dans l'objectif de déterminer quel modèle est le mieux adapté à notre étude. Ce travail de thèse se concentre sur la réhabilitation des centres-villes anciens et la section 1 a mis en avant une de leur spécificité : la perméabilité à l'eau sous forme liquide et vapeur des parois des bâtiments qui les constituent. Ainsi, pour simuler correctement leur comportement et tenir compte de leurs avantages potentiels sur le phénomène d'ICU et le confort d'été, il est indispensable que le modèle considère les transferts hydriques à travers les parois. De plus, la durabilité des parois, notamment le risque

de développement de moisissures, est un critère important pour évaluer des solutions de réhabilitation. Pour évaluer ce critère, il est nécessaire d'effectuer des simulations durant plusieurs années. Les études simulent généralement le développement de moisissures sur trois années, pour obtenir des résultats représentatifs (Claude et al., 2019; Lu et al., 2021).

La plupart des modèles de climat urbain négligent les transferts d'humidité à travers les parois (Azam, 2021), ce qui s'explique en partie par le temps de calcul élevé nécessaire à la résolution des transferts. Par exemple, l'outil EnergyPlus comprend plusieurs options pour décrire les transferts à travers les parois en 1D et le modèle comportant les transferts couplés de masse et de chaleur est cent fois plus lent que le modèle de base incluant seulement les transferts par conduction thermique (Goffart et al., 2017).

Ainsi, parmi les modèles évoqués dans cette section, seulement deux considèrent les transferts d'humidité à travers les parois (Kubilay et al., 2018; Wang et al., 2021). Or, ces modèles ne sont pas adaptés à notre étude, sur d'autres aspects. Leur principal inconvénient est qu'ils ne permettent pas de prendre en compte de manière détaillée le comportement énergétique des bâtiments, un critère clé pour évaluer la performance énergétique d'une solution de rénovation.

De plus, deux principaux types de modèles ont été mis en avant : les modèles à l'échelle micro et ceux à l'échelle méso. Les modèles microclimatiques permettent d'effectuer des simulations sur de très courtes périodes allant de un jour à deux semaines, ce qui n'est pas suffisant pour permettre d'évaluer le risque de développement de moisissures. Les modèles à l'échelle méso semblent donc mieux adaptés.

Finalement, cette thèse propose de travailler avec le modèle TEB, un modèle à l'échelle méso, déjà très complet. En effet, il permet de décrire les interactions entre le microclimat et le comportement énergétique du bâtiment, sur de larges échelles spatio-temporelles. Son principal inconvénient pour l'évaluation de scénarios de rénovation de centre ancien est donc qu'il néglige les transferts d'humidité à travers les parois. Une partie du travail de cette thèse consistera donc à intégrer les transferts couplés de masse et de chaleur dans le modèle TEB.

3. Transferts couplés à travers les parois

L'enveloppe du bâti correspond à l'interface entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Les parois qui constituent ces enveloppes sont donc soumises à des conditions aux limites différentes au niveau de leurs deux surfaces. Les gradients ainsi créés, entraînent des transferts de chaleur, d'air et d'humidité à travers les parois. Ces parois sont constituées de plusieurs matériaux de construction, qui sont généralement des milieux poreux.

3.1. Milieux poreux

Les matériaux poreux sont composés d'une matrice solide comprenant différents types de pores : des pores fermés et ouverts (connectés ou non). La matrice solide se caractérise par sa porosité totale, sa surface spécifique, la géométrie du réseau de pores et la distribution de la taille de ses pores (Rouquerol et al., 1994). Les réseaux de pores ouverts connectés permettent de transporter des fluides sous forme liquide ou gazeuse. La phase liquide se compose principalement d'eau et

la phase gazeuse comporte de l'air et de la vapeur d'eau, qui sont tous les deux considérés, comme des gaz parfaits.

Ces matériaux sont très complexes à l'échelle microscopique et par manque d'information il n'est pas envisageable de résoudre les transferts à cette échelle. La définition du Volume Élémentaire Représentatif (VER) permet de simplifier la représentation des transferts en passant de l'échelle microscopique hétérogène à une échelle macroscopique homogène (Figure 1.17). En effet, il prend en compte un nombre suffisamment grand de pores pour être représentatif des échanges globaux tout en lissant les complexités morphologiques. Le VER doit contenir une phase solide et des espaces vides (pores), peu importe où il est placé dans l'échantillon. La distribution de la taille des pores doit être représentative de l'ensemble du matériau (Bear et Bachmat, 1990).

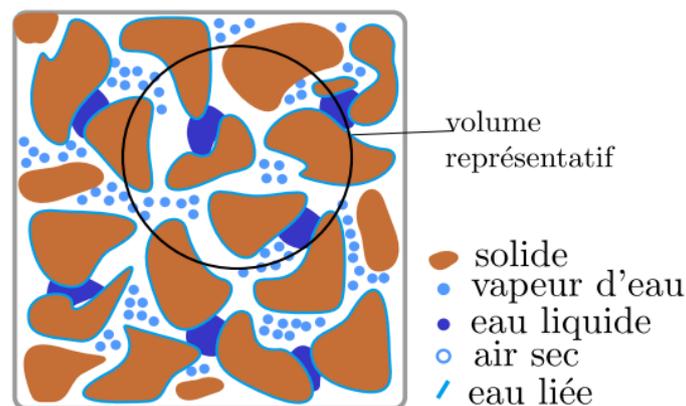


Figure 1.17 – Schéma d'un milieu poreux composé de différentes phases (Busser 2018)

3.2. Mécanismes de transfert de chaleur et d'humidité

La théorie sur les transferts couplés de masse et de chaleur a été introduite par De Vries (1958) et Philip et De Vries (1957), puis par Luikov (1975). Leurs travaux sur la physique des sols servent désormais de référence aux études et modèles développés en physique du bâtiment.

Ces modèles s'appuient sur des équations de conservation écrites sous la forme d'équations aux dérivées partielles (EDP) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(j) + S \quad (1-8)$$

Avec ρ une densité volumique, j un flux par unité de surface et de temps, S un terme source, $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ un terme de stockage et $\nabla(j)$ un terme de transport.

Le terme de transport se divise en plusieurs types de transferts : transfert de chaleur, transfert d'eau sous forme liquide et d'eau sous forme vapeur. En s'appuyant sur les travaux de Künzle (1995) et de Krus (1996), le Tableau 1.1 récapitule les différents mécanismes de transfert ainsi que les causes et potentiels moteurs associés.

Tableau 1.1 – Mécanismes de transport de chaleur et d'humidité et leur potentiel moteur basé sur les travaux de Krus (1996) et Künzl (1995)

Transport	Mécanisme	Causes/Potentiels moteurs
Chaleur	Conduction	Gradient de température dans le matériau
	Rayonnement	Température de surface des pores à la puissance 4
	Flux d'air	Différence de masse volumique, pression totale
	Flux enthalpiques associés aux mouvements d'humidité	Diffusion de vapeur avec changement de phase et transport d'eau liquide
Vapeur d'eau	Diffusion de gaz	Pression de vapeur (température, pression totale)
	Effusion (transport moléculaire)	Pression de vapeur
	Thermodiffusion	Température
	Flux d'air (advection)	Gradient de pression totale
Eau liquide	Conduction capillaire	Pression capillaire/ succion capillaire
	Diffusion de surface	Humidité relative
	Flux d'infiltration	Gravité
	Flux hydraulique	Différence de pression totale
	Électrocinétique	Champ électrique
	Osmose	Concentration d'ions

Dans le cas d'une paroi, certains phénomènes ne sont pas pris en compte, car ils ont lieu seulement dans des cas très isolés. En effet, les forces électrocinétiques liées au champ électrique n'interviennent pas. De même, aucune réaction chimique à l'intérieur des matériaux n'est considérée, l'osmose est donc négligée (Künzel, 1995).

Les autres types de transfert sont détaillés dans les sections suivantes.

3.2.1. Transferts de chaleur

En ce qui concerne le transfert de chaleur, le principal phénomène à prendre en compte est la conduction thermique à travers la matrice solide de la paroi. Ce flux est induit par un gradient de température et suit la loi de Fourier :

$$q_{cond} = -\lambda(w, T) \cdot \nabla T \quad (1-9)$$

Avec q_{cond} le flux conductif ($W \cdot m^{-2}$), λ la conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), T la température (K) et w la teneur en eau ($kg \cdot m^{-3}$).

Le coefficient de conductivité peut s'exprimer en fonction de la température et de la teneur en eau. Scheffler (2008) montre que l'influence de la température sur la conductivité thermique peut être négligée à des températures ambiantes et pour des matériaux de construction traditionnels. En revanche, la teneur en eau influence la conductivité thermique de la paroi, puisque l'eau liquide a une conductivité thermique environ vingt fois plus élevée que celle de l'air. Taoukil et al.

(2013) présente l'exemple d'un matériau biosourcé dont la conductivité thermique à saturation est deux à trois fois plus élevée que la conductivité thermique sèche.

Toute surface ayant une température non nulle émet un rayonnement, le phénomène de rayonnement a donc lieu au sein même des pores. De même, le phénomène de convection peut également être observé au sein des pores. Ainsi, la matrice solide est soumise à trois phénomènes de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement. Il est difficile de mesurer les deux derniers phénomènes. Dans la pratique, ils sont pris en compte de manière équivalente lors de la mesure de la conductivité de la matrice solide, puisqu'elle se fait sur des échantillons à l'échelle macroscopique et que cette méthode ne permet pas de distinguer la part de chaque phénomène dans le transfert de chaleur. Ainsi un coefficient de conductivité équivalent est déterminé.

Le transport d'eau sous forme liquide ou vapeur engendre le transport d'énergie enthalpique. A volume constant, l'enthalpie et l'énergie interne peuvent être considérées égales. L'enthalpie correspond à l'énergie pour passer de l'état de référence (ici de l'eau liquide à $T_{ref} = 0\text{ °C}$) à l'état étudié. Les enthalpies de l'eau sous forme liquide et vapeur s'expriment de la manière suivante :

$$h_l = c_l(T - T_{ref}) \quad (1-10)$$

$$h_v = c_v(T - T_{ref}) + L_v \quad (1-11)$$

Avec h_l l'enthalpie massique de l'eau liquide ($J.kg^{-1}$), h_v l'enthalpie massique de la vapeur d'eau ($J.kg^{-1}$), c_l la capacité calorifique de l'eau liquide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), c_v la capacité calorifique de la vapeur d'eau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), T la température actuelle (K), T_{ref} la température de référence (K), L_v la chaleur latente de changement de phase ($2,454e6 J.kg^{-1}$ à 20 °C et à pression atmosphérique).

L'enthalpie de la vapeur comporte une part de chaleur sensible induite par la température de l'eau et une autre de chaleur latente due au changement de phase (de liquide à vapeur).

Enfin, les flux de chaleur associés aux transferts d'eau sont égaux au produit du flux de transfert massique et de l'enthalpie du fluide.

3.2.2. Transferts d'eau sous forme vapeur

Le principal mécanisme de transfert de vapeur d'eau est la diffusion qui peut se produire en fonction de deux moteurs : soit la concentration en vapeur d'eau, soit la température.

D'une part, la diffusion se produit sous un gradient de concentration de vapeur d'eau dans l'air humide. Ce phénomène peut également se caractériser en fonction du gradient de pression partielle de la vapeur d'eau, si la pression totale est considérée constante.

Deux modes différents sont considérés en comparant la taille des pores par rapport au libre parcours moyen (lpm) des molécules de vapeur d'eau dans la matrice solide. Le libre parcours moyen correspond à la distance moyenne parcourue par une molécule entre deux chocs moléculaires.

Dans le premier mode, la taille des pores est supérieure au libre parcours moyen. Statistiquement, dans cette configuration, la plupart des collisions ont lieu entre les molécules et les collisions avec

les parois sont donc négligeables. Le flux de diffusion de vapeur d'eau ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) suit donc la loi de Fick (1855) :

$$j_{diffusion}^v = -\delta_v \cdot \nabla p_v = -\frac{\delta_{v,air}}{\mu} \cdot \nabla p_v \quad (1-12)$$

Avec δ_v la perméabilité à la vapeur du matériau ($kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$), $\delta_{v,air}$ la perméabilité à la vapeur de l'air ($kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$), μ le facteur de résistance à la vapeur d'eau (-) et p_v la pression partielle de vapeur d'eau (Pa).

En revanche, lorsque la taille des pores est inférieure au libre parcours moyen, les chocs entre les molécules deviennent négligeables et les collisions avec les parois des pores prédominent lors du déplacement des molécules de vapeur d'eau. Ce phénomène est appelé effusion ou diffusion de Knudsen :

$$j_{effusion}^v = -\frac{D_a}{K_n \cdot R_v \cdot T} \cdot \nabla p_v \quad (1-13)$$

Avec D_a le coefficient de diffusion ($m^2.s^{-1}$), R_v la constante des gaz parfaits de la vapeur d'eau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), $K_n = \frac{lpm}{d}$ le nombre de Knudsen, lpm le libre parcours moyen (m) et d le diamètre des pores (m).

L'effusion concerne des pores très étroits à partir de 10^{-8} m de diamètre environ (Krus, 1995).

La thermodiffusion ou l'effet Soret (Artola, 2009) est un phénomène qui apparaît lorsque la phase gazeuse est soumise à un gradient de température et qui entraîne de ce fait le déplacement de vapeur d'eau. Le flux de thermodiffusion ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) associé est déterminé par l'équation suivante :

$$j_{thermodiffusion}^v = D_{v,t} \cdot \nabla T \quad (1-14)$$

Avec $D_{v,t}$ le coefficient de thermodiffusion ($kg.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$).

Ce phénomène est généralement négligé en physique du bâtiment, car les gradients de température sont relativement faibles. En effet, Krus (1996) montre que la part de la thermodiffusion dans le transport total de vapeur d'eau est inférieure à 0,05%. De plus, l'étude bibliographique menée par Janssen (2011) s'appuie sur plusieurs études expérimentales et confirme cette hypothèse.

Un autre mécanisme pour transporter la vapeur d'eau à travers la paroi est lié au phénomène d'advection d'air, c'est-à-dire que la vapeur est déplacée avec le flux d'air sous le gradient de pression totale. Nicolai (2007) assimile ce phénomène à de la convection et utilise une équation de la forme de la loi de Darcy (1856) pour exprimer le flux associé :

$$j_{conv}^v = -c_v \cdot K_g \cdot (\nabla p_g + \rho_g \cdot g) \quad (1-15)$$

Avec c_v la fraction massique de vapeur dans le gaz (-), K_g la perméabilité du gaz (s), p_g la pression de la phase gazeuse (Pa), ρ_g la masse volumique du gaz ($kg.m^{-3}$) et g le terme de la gravité ($m.s^{-2}$).

Néanmoins ce phénomène est difficile à quantifier, d'autant plus qu'il dépend grandement des imperfections ponctuelles du bâtiments (fissures et autres).

3.2.3. Transferts d'eau sous forme liquide

La capillarité apparaît au sein des pores, quand la teneur en eau est relativement élevée. Elle correspond au phénomène d'interaction à l'interface entre l'eau liquide et l'air contenus dans les pores (Figure 1.17), et résulte des forces de tension superficielle entre les deux phases. La pression capillaire est égale à la différence de pression entre les deux côtés de l'interface liquide/gaz (Daïan, 2010.) La loi de Laplace permet de relier la pression capillaire, au rayon de courbure moyen et à sa tension superficielle :

$$p_c = p_l - p_0 = \frac{2\gamma}{r} \quad (1-16)$$

Avec p_c la pression capillaire (Pa), p_0 la pression totale de l'air ambiant (Pa), γ la tension superficielle (N/m) et r le rayon de courbure (m).

La loi de Kelvin décrit l'équilibre entre eau liquide et vapeur d'eau et permet de relier la pression capillaire à l'humidité relative ou à la pression partielle de vapeur :

$$p_c = \frac{\rho_w \cdot R}{M_w} \cdot T \cdot \ln \varphi = \frac{\rho_w \cdot R}{M_w} \cdot T \cdot \ln \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (1-17)$$

Avec ρ_w la masse volumique de l'eau ($kg \cdot m^{-3}$), R la constante des gaz parfaits ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$), M_w la masse molaire de l'eau ($kg \cdot mol^{-1}$), T la température (K), φ l'humidité relative (-), p_v la pression de vapeur d'eau (Pa) et $p_{v,sat}$ la pression de vapeur d'eau saturante (Pa).

A l'échelle microscopique, la loi de Poiseuille décrit l'écoulement de l'eau liquide dans des tubes capillaires, représentant les pores d'un matériau. A l'échelle macroscopique, le flux d'eau liquide circulant par capillarité j_{Darcy}^l ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) est exprimé selon la loi de Darcy (1856) :

$$j_{Darcy}^l = -K_l \cdot (\nabla p_l + \rho_l \cdot g) \quad (1-18)$$

Avec K_l la conductivité de l'eau liquide (s), p_l la pression de la phase liquide (Pa), ρ_l la masse volumique de l'eau liquide ($kg \cdot m^{-3}$) et g le terme de la gravité ($m \cdot s^{-2}$).

De plus, dans les pores de petites tailles, l'action de la gravité est négligeable devant celle de la pression capillaire. En ce qui concerne les pores de plus grandes dimensions, le phénomène de conduction capillaire n'existe qu'à des humidités relatives très élevées (proche de 100%). Ainsi, le terme lié à la gravité dans la loi de Darcy est généralement négligé.

De plus, lorsque le bâtiment est considéré comme peu étanche, la pression totale est supposée égale à l'intérieur et à l'extérieur, ce qui signifie que p_0 est supposée constante. A partir de ces hypothèses, il est possible de réécrire la loi de Darcy ainsi :

$$j_{Darcy}^l = -K_l \cdot \nabla p_c \quad (1-19)$$

L'approche de Darcy est présentée dans cette étude, mais il existe d'autres approches, notamment l'approche diffusive, par la loi de Fick.

La diffusion de surface est un phénomène qui intervient lors de l'adsorption de molécule. Il correspond aux déplacements des molécules d'eau le long des parois des pores.

Philip et De Vries (1957) utilisent le gradient de teneur en eau pour décrire ce phénomène :

$$j_{surf\ diff}^l = -D_{l, surf\ diff} \cdot \nabla w \quad (1-20)$$

Avec $j_{surf\ diff}^l$ le flux d'eau induit par la diffusion de surface ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), $D_{l, surf\ diff}$ le coefficient de diffusion de surface ($m^2 \cdot s^{-1}$) et w la teneur en eau ($kg \cdot m^{-3}$).

Dans la réalité, il est difficile de différencier le transport d'eau par diffusion de surface des autres phénomènes.

3.3. Mécanismes de stockages et déstockages

3.3.1. Stockage thermique

Dans le cadre du bilan énergétique, l'inertie thermique se traduit en partie par un terme de stockage, traduisant la variation d'énergie dans le temps :

$$\Delta S = \frac{\partial u}{\partial t} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1-21)$$

Avec ΔS la variation de l'énergie stockée ($J \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$), ρ la masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$), c_p la capacité calorifique massique de l'air ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), T la température (K), t le temps (s) et u la densité d'énergie ($J \cdot m^{-3}$).

3.3.2. Isotherme de sorption

L'hygroscopicité correspond à la capacité de certains matériaux à adsorber/fixer l'humidité de l'air ambiant. Lorsque l'air est humide, des molécules d'eau se fixent sur la surface des pores, phénomène d'adsorption physique, qui résulte de l'attraction entre les molécules d'eau adsorbées et celles du solide (force de Van der Waals). Si l'air ambiant dépasse une teneur en eau critique, le phénomène de condensation capillaire apparaît dans les pores. Au contraire, quand l'humidité dans l'air environnant diminue, les molécules d'eau sont évacuées, jusqu'à trouver un état d'équilibre entre la teneur en eau du milieu poreux et l'humidité relative de l'air ambiant.

Cette aptitude à échanger de l'humidité avec l'air ambiant est représentée par l'isotherme de sorption, qui représente la teneur en humidité dans le matériau en fonction de l'humidité relative, à une température donnée. Ainsi, la Figure 1.18, donne l'allure de la courbe d'adsorption et de désorption pour un matériau de construction poreux typique et montre un décalage entre la courbe d'adsorption et de désorption. Ce phénomène est appelé hystérésis et traduit le fait qu'il est plus simple pour l'humidité de pénétrer le matériau que d'en ressortir du fait de la géométrie des pores et des forces capillaires.

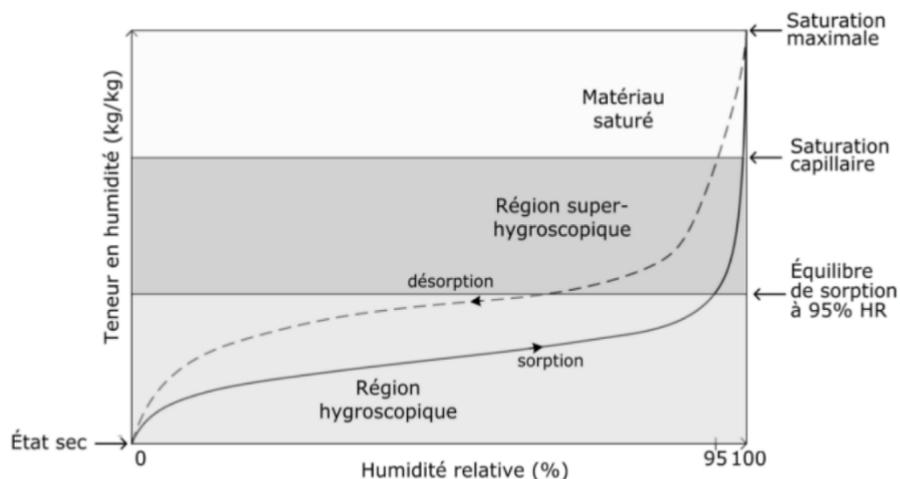


Figure 1.18 – Isotherme de sorption d'un matériau hygroscopique représentant une hystérésis entre l'adsorption et la désorption (Piot, 2009)

L'isotherme de sorption se divise selon trois régions :

- La **région hygroscopique** : la vapeur d'eau est adsorbée. Les mécanismes de diffusion et effusion interviennent. Des couches mono-moléculaires puis multi-moléculaires se forment au niveau des surfaces des pores. Jusqu'à environ 95% d'humidité relative, le transport d'humidité se fait essentiellement sous forme de vapeur d'eau (Étapes 1 et 2 dans la Figure 1.19).
- La **région super-hygroscopique** : avec l'augmentation de l'humidité relative, les transports sous forme liquide augmentent et prédominent, de sorte que seulement quelques poches transportent de la vapeur d'eau (Étape 3 dans la Figure 1.19).
- La **région super-saturée** : le matériau reste en contact prolongé avec l'eau liquide, ce qui entraîne la dissolution des poches d'air transportant de la vapeur d'eau, jusqu'à atteindre la saturation en eau liquide du matériau (Étape 4 dans la Figure 1.19).

Ainsi l'occurrence des mécanismes de transferts présentés dans la section précédente, dépend principalement de la teneur en eau.

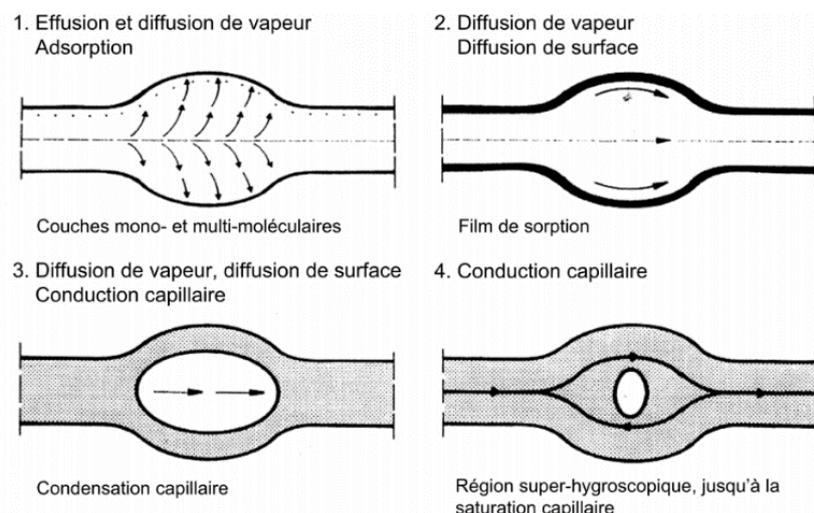


Figure 1.19 – Mécanismes de transfert d'humidité en fonction de la teneur en eau des pores (Adaptation de Krus (1996) par Piot (2009))

3.4. Caractéristiques des matériaux

Les mécanismes présentés dans les parties précédentes nécessitent la connaissance d'un certain nombre de propriétés des matériaux. La principale difficulté est que certaines caractéristiques des matériaux varient beaucoup en fonction de la teneur en eau.

De plus, les caractéristiques hygrothermiques sont des éléments clés pour représenter la spécificité de chaque matériau (Posani, 2021). Par exemple, les matériaux ayant une forte perméabilité à la vapeur seront dit hygroscopiques et auront notamment un effet de tampon hydrique. D'autres matériaux se laisseront facilement traverser par l'eau sous forme liquide. Ce sont des matériaux à capillarité active.

3.4.1. Porosité

La porosité correspond au rapport entre le volume des pores et le volume de l'échantillon. Dans le cadre de l'étude des transferts d'humidité, l'indicateur choisi sera la porosité ouverte qui traduit donc le volume des pores ouverts par rapport à celui de l'échantillon. Il est notamment intéressant d'évaluer la teneur en eau saturante qui se définit comme le rapport entre la masse d'eau remplissant la porosité accessible et la masse sèche de l'échantillon.

3.4.2. Transfert de chaleur

La conductivité thermique varie en fonction de la teneur en eau. Notons que la température a également un impact sur la conductivité thermique surtout dans le cas de matériaux à changement de phase. Dans cette étude, l'effet de la température sera négligé.

Nicolai (2007) propose le modèle suivant :

$$\lambda = \lambda_{dry} + \lambda_l \cdot \theta_l \quad (1-22)$$

Avec λ la conductivité thermique du matériau humide ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), λ_{dry} la conductivité thermique du matériau sec ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), λ_l la conductivité thermique de l'eau liquide ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) et θ_l la teneur en eau liquide ($m^3 \cdot m^{-3}$).

3.4.3. Transfert de vapeur d'eau

L'expression suivante relie la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau au coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air.

$$K_v = \delta_v = \frac{\delta_{v,air}}{\mu} = \frac{D_{v,air}}{\mu R_v T} \quad (1-23)$$

Avec K_v Ou δ_v la perméabilité à la vapeur du matériau ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), $\delta_{v,air}$ la perméabilité à la vapeur de l'air ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), μ le facteur de résistance à la vapeur d'eau (-) et $D_{v,air}$ le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air ($m^2 \cdot s^{-1}$).

3.4.4. Transfert d'eau sous forme liquide

Le coefficient de perméabilité à l'eau liquide est difficile à caractériser expérimentalement. Jusqu'à présent, il n'existe pas une méthode standard pour sa mesure expérimentale. Künzel

(1995) propose l'expression suivante pour obtenir le coefficient de diffusion de transfert liquide D_l (m^2/s) :

$$D_l = 3,8 \cdot \left(\frac{A_w}{w_f}\right)^2 \cdot 1000^{\frac{w}{w_f}-1} \quad (1-24)$$

Avec A_w le coefficient d'absorption de l'eau ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2}$), w la teneur en eau ($kg \cdot m^{-3}$) et w_f la teneur en eau à saturation libre ($kg \cdot m^{-3}$).

La détermination du coefficient d'absorption de l'eau A_w Est définie dans la norme NF EN ISO 15148 (2003), qui décrit un test de capillarité.

Ensuite, une relation permet de déduire le coefficient de perméabilité liquide (K_l) à partir du coefficient de diffusion liquide (D_l) (Künzel, 1995) :

$$K_l = \frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot D_l \cdot \frac{\varphi}{\rho_l R_v T} \quad (1-25)$$

Avec ρ_l la masse volumique du liquide ($kg \cdot m^{-3}$), φ l'humidité relative (-), T la température (K) et $R_v = 61,7 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

Le terme $\frac{\partial w}{\partial \varphi}$ est calculé à partir d'un modèle de stockage d'humidité.

3.4.5. Stockage d'humidité

Le stockage d'humidité est un phénomène complexe à modéliser. Il existe de nombreux modèles qui se classent en deux catégories : l'isotherme de sorption et la courbe de rétention d'humidité.

L'**isotherme de sorption** décrit l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative dans le matériau. Parmi les modèles les plus utilisés, on trouve le modèle de Künzel (1995) et le modèle GAB (Blahovec et Yanniotis, 2008).

La **courbe de rétention d'humidité** décrit l'évolution de la teneur en eau en fonction de la pression capillaire. La relation entre la courbe de rétention de l'humidité et l'isotherme de sorption peut être déduite de la loi de Kelvin (1-17). Les premiers modèles pour représenter la courbe de rétention d'humidité ont été conçus pour des problèmes de physique des sols, mais certains peuvent être appliqués à la physique du bâtiment. Genuchten (1980) a développé un modèle uni-modal pour décrire cette courbe. Ensuite, Durner (1994) propose un modèle multimodal, basé sur le modèle uni-modal de van Genuchten. Zhao (2012) présente plusieurs modèles qui peuvent être appliqués aux matériaux de construction et donnent leurs principaux avantages et inconvénients.

Cependant, la plupart des modèles ne tiennent pas compte de l'effet de l'hystérésis. Les travaux de Zhang et al. (2014) proposent une revue et une comparaison de différents modèles permettant de représenter le phénomène d'hystérésis.

3.5. Conditions aux limites

Côté extérieur, la paroi est soumise à la variation des conditions météorologiques comme la température et l'humidité relative. Elle reçoit également des rayonnements à courte longueur

d'onde (CLO) provenant du soleil et des rayonnements à grande longueur d'onde (GLO) émis par les particules et autres surfaces du milieu urbain. Le vent entraîne également une convection et accentue les effets de la pluie.

Au niveau de sa surface intérieure, la paroi est soumise à des températures, humidités relatives et sollicitations différentes. Elle est exposée à des rayonnements à grande longueur d'onde, ainsi qu'à de la convection qui peut être forcée ou libre en fonction de la stratégie de ventilation appliquée.

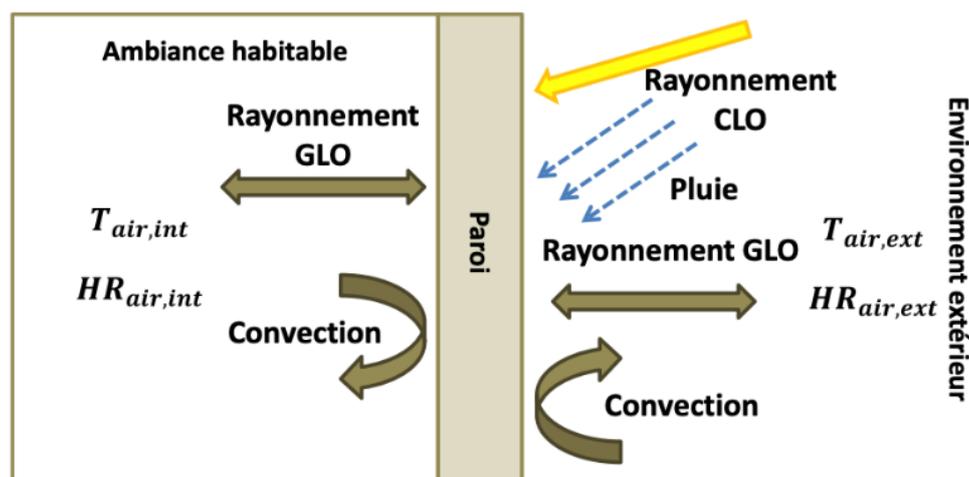


Figure 1.20 – Interactions entre la paroi et les environnements intérieur et extérieur (Ferroukhi, 2015)

3.5.1. Rayonnement

Les façades reçoivent une densité de flux radiatif net q_{net} , qui correspond à la somme des flux radiatifs à CLO (q_{CLO}) et à GLO (q_{GLO}) :

$$q_{net} = q_{CLO} + q_{GLO} \quad (1-26)$$

Le flux à CLO correspond au rayonnement solaire et doit prendre en compte ces trois composantes : les rayonnements directs, diffus et réfléchis (Figure 1.9). Cette condition aux limites est fortement influencée par l'environnement urbain. Le rayonnement solaire incident $q_{CLO,inc}$ est généralement calculé par un modèle radiatif, comme ceux présentés dans la section 2.2.2. La densité de flux absorbée par la paroi est ensuite déduite en multipliant le rayonnement incident par le coefficient d'absorption du matériau.

$$q_{CLO} = (1 - \alpha) q_{CLO,inc} \quad (1-27)$$

Avec α l'albedo (-).

Le rayonnement à grande longueur d'onde traduit les échanges infrarouges entre la paroi et son environnement qui se compose à la fois du sol, du ciel mais aussi des surfaces des bâtiments environnants. En effectuant quelques simplifications, le rayonnement net GLO peut s'écrire de la manière suivante (Noilhan, 1981) :

$$q_{GLO} = \varepsilon\sigma[F_{sol}(T_{sol}^4 - T_{surf}^4) + F_{ciel}(T_{ciel}^4 - T_{surf}^4) + F_{s1}(T_{s1}^4 - T_{surf}^4) + \dots + F_{sN}(T_{sN}^4 - T_{surf}^4)] \quad (1-28)$$

Avec ε l'émissivité de la surface étudiée (-), σ la constante de Stefan Boltzmann ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$), F le facteur de vue (-) et T la température (K).

Cette équation traduit l'équilibre au niveau d'une surface en considérant le rayonnement reçu provenant des autres surfaces urbaines et du ciel, la part de ce rayonnement qui est réfléchi, et en soustrayant le rayonnement émis par la surface d'intérêt. Cette fonction ne permet pas de représenter les réflexions multiples du rayonnement à GLO.

3.5.2. Convection

L'effet de convection s'applique aussi bien au niveau de la surface intérieure qu'au niveau de la surface extérieure. La convection se réalise sous deux gradients celui de température et celui de pression. Les équations suivantes expriment le flux de convection thermique $q_{conv,surf,th}$ ($W \cdot m^{-2}$) et le flux de convection massique $j_{conv,surf,m}$ ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). Il est également important de noter que la convection massique engendre également un flux thermique $q_{conv,surf,m}$ ($W \cdot m^{-2}$).

$$q_{conv,surf,th} = h_{conv,th} \cdot (T_{air} - T_{surf}) \quad (1-29)$$

$$q_{conv,surf,m} = L_v \cdot h_{conv,m} \cdot (p_v(T_{air}) - p_{v,surf}) \quad (1-30)$$

$$j_{conv,surf,m} = h_{conv,m} \cdot (p_{v,air} - p_{v,surf}) \quad (1-31)$$

Avec $h_{conv,th}$ le coefficient convectif de chaleur ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), $h_{conv,m}$ le coefficient convectif de masse ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), T_{air} la température de l'air (K), T_{surf} la température de surface (K), $p_{v,air}$ la pression de vapeur d'eau de l'air (Pa) et $p_{v,surf}$ la pression de vapeur d'eau de la surface (Pa).

Les coefficients d'échange convectif $h_{conv,th}$ et $h_{conv,m}$ sont des éléments essentiels pour quantifier les échanges convectifs au niveau des surfaces des parois. Leur valeur dépend des conditions de l'environnement, principalement de la vitesse de l'air et de la différence de température entre la surface de la paroi et l'air ambiant.

De nombreuses corrélations permettent de calculer le **coefficient de convection thermique** à partir de ces deux grandeurs (Defraeye, 2011; Mirsadeghi et al., 2013; Palyvos, 2008). Parmi les formulations les plus utilisées, on peut citer le modèle de McAdams (1954), le modèle de Loveday et Taki (1996), le modèle DOE-2 (Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), 1994) ou encore l'algorithme TARP (Walton, 1983). Plusieurs travaux s'attachent à comparer différents modèles semi-empiriques (Janssen et al., 2007b; Mirsadeghi et al., 2013). Cependant, il est difficile de

conclure sur la méthode la plus pertinente pour calculer le coefficient de convection thermique (Palyvos, 2008).

Généralement, le **coefficient d'échange convectif de masse** $h_{conv,m}$ est déduit du coefficient d'échange convectif de chaleur en appliquant une relation basée sur le nombre de Lewis (Defraeye, 2011). Cette analogie est appelée relation de Lewis ou encore analogie de Chilton-Colburn (Chilton et Colburn, 1934) :

$$h_{conv,m} = h_{conv,th} \left(\frac{\delta_{v,air}}{\lambda} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{R_v T c_{p,a} \rho_a} \right)^{1/3} \quad (1-32)$$

Avec $\delta_{v,air}$ la perméabilité de l'air à la vapeur d'eau ($1,87 * 10^{-10} s$), λ la conductivité thermique de l'air ($0,0242 W/mK$), R_v la constante de gaz spécifique de la vapeur d'eau ($461,524 J/kgK$), $c_{p,a}$ la capacité calorifique massique de l'air ($1006 J/kgK$) et ρ_a la masse volumique de l'air ($1,225 kg/m^3$).

L'application numérique permet d'obtenir l'approximation suivante :

$$h_{conv,m} = h_{conv,th} * 7,7 * 10^{-9} \quad (1-33)$$

Ces coefficients d'échange varient spatialement et temporellement. Cet aspect est parfois négligé en considérant seulement un coefficient constant pour l'ensemble d'une paroi, bien que des études montrent que le coefficient d'échange varie beaucoup entre plusieurs points d'une même façade (Saneinejad, 2013). De plus, les transferts d'humidité sont fortement influencés par la valeur du coefficient d'échange convectif de masse (Janssen et al., 2007b).

3.5.3. Pluie battante

La pluie battante, aussi appelée pluie poussée par le vent, est une pluie à laquelle le vent donne une composante de vitesse horizontale (Blocken et Carmeliet, 2004). Le calcul de la pluie battante dépend de nombreux facteurs comme la quantité de précipitations, la vitesse et de la direction du vent, la taille des gouttes d'eau, l'orientation de la paroi, les caractéristiques des matériaux qui la composent, la géométrie du bâtiment ou encore l'environnement urbain (Blocken et Carmeliet, 2004). Blocken et Carmeliet (2010, 2004) dressent un état de l'art sur ce sujet et recensent trois méthodes pour quantifier le phénomène de la pluie battante : les mesures expérimentales, les méthodes semi-empiriques et les méthodes numériques (CFD par exemple).

Les mesures expérimentales sont complexes à mettre en place et sont soumises à de fortes incertitudes (Blocken et Carmeliet, 2006). De plus, les résultats obtenus sont propres au bâtiment et à la façade étudiés.

Les méthodes CFD sont les plus précises, puisqu'elles permettent de considérer finement la géométrie du bâtiment, l'écoulement du vent et la trajectoire des gouttes de pluie. Une référence pour ce type de modèle est le modèle CFD de Choi (1994, 1993). Cependant, ces méthodes sont complexes et associées à un temps de calcul élevé (Blocken et Carmeliet, 2010).

Les méthodes semi-empiriques ont l'avantage d'être plus simples à prendre en main. Parmi les plus avancées et les plus utilisées, on compte le modèle ISO standard pour la prédiction de la pluie battante (NF EN ISO 15927-3, 2009) et le modèle semi-empirique de Straube et Burnett (2000). Ces méthodes calculent généralement la pluie battante à partir des précipitations horizontales,

de l'orientation de la paroi, de la vitesse et de la direction du vent. Un coefficient est utilisé pour prendre en compte la géométrie du bâtiment et l'environnement urbain. Les deux méthodes semi-empiriques citées se différencient principalement par les données d'entrée utilisées, les éléments considérés et les hypothèses effectuées (Blocken et Carmeliet, 2010). Ces méthodes semi-empiriques sont indispensables pour évaluer simplement la pluie battante incidente à une paroi. Cependant, leur comparaison montre une grande différence dans les résultats obtenus en fonction de la méthode choisie, il est donc nécessaire d'améliorer ces corrélations (Zhou et al., 2023).

Notons que la pluie incidente ne correspond pas à la pluie absorbée par la paroi. Pour connaître la quantité de pluie absorbée par la paroi, il faut déterminer la quantité de pluie maximale que peut absorber la façade du bâtiment. En effet, le mur peut absorber une quantité limitée d'eau, l'eau restante s'écoulera le long de la façade. L'équation suivante permet de calculer le flux maximal de pluie battante absorbable par les pores (Fechner et al., 2020) :

$$j_{pluie,max} = -(K_l(w_{sat}^{elem}) + K_l(w_i^{elem})) \cdot \frac{p_i^{elem}}{x^{elem}} \quad (1-34)$$

Avec $K_l(w)$ la conductivité thermique de l'eau liquide qui dépend de la teneur en eau (s), w_{sat}^{elem} la teneur en eau à saturation ($kg.m^{-3}$), w_i^{elem} la teneur en eau à actuelle ($kg.m^{-3}$), $p_{c,i}^{elem}$ la pression capillaire actuelle dans l'élément (Pa) et x^{elem} l'épaisseur de l'élément dans la direction de transport (m).

Finalement, la quantité de pluie absorbée correspond au minimum entre la pluie battante incidente et la quantité de pluie maximale que peut absorber la paroi.

$$j_{pluie} = \min(j_{pluie,inc}; j_{pluie,max}) \quad (1-35)$$

A partir de ce flux d'eau liquide, il est également possible de déduire un flux enthalpique qui sera intégré aux conditions aux limites du bilan énergétique.

$$q_{pluie} = h_l \cdot j_{pluie} \quad (1-36)$$

Avec q_{pluie} la densité de flux thermique liée à l'absorption de pluie ($W.m^{-2}$).

3.6. Modélisation des transferts couplés à travers les parois

Depuis les premiers modèles numériques développés dans les années 1990, beaucoup d'autres modèles ont émergé. Il existe aujourd'hui une grande diversité de modèles qui se différencient par les phénomènes physiques considérés, les hypothèses simplificatrices choisies, les potentiels moteurs utilisés, le traitement et la prise en compte des conditions aux limites, le type et le niveau de discrétisation spatiale et temporelle, les méthodes de résolutions numériques appliquées et l'usage du modèle (logiciel commercial ou ouvert). Woloszyn et Rode (2008) et Delgado et al. (2010, 2012) présentent un état de l'art des logiciels HAM (Heat, Air, and Moisture transfer). Parmi les plus connus, on trouve Delphin (Nicolai, 2007), WUFI (Künzel, 1995), MATCH (Rode Pedersen, 1990) ou encore HAM-Tools (Sasic Kalagasidis et al., 2004). L'étude des transferts couplés à travers les matériaux de construction est également possible en utilisant des logiciels de CFD comme COMSOL (S. Dubois, 2014). Il existe également des modèles très simplifiés basés

sur des fonctions de transfert ou le facteur de réponse, qui ont été développés notamment dans le but d'intégrer les transferts d'humidité aux simulations énergétiques des bâtiments.

3.6.1. Hypothèses simplificatrices des modèles

Il est difficile d'obtenir une solution mathématique exacte du fait de la grande quantité de phénomènes physiques à prendre en compte. Des choix de simplifications sont effectués de manière à trouver un équilibre entre temps de calcul et précision de la solution. Ces simplifications sont propres à chaque modèle et dépendent de leurs objectifs.

Plusieurs hypothèses de simplification particulièrement récurrentes consistent à négliger les phénomènes suivants (Janssen et al, 2007) :

- La diffusion de vapeur sous un gradient de température (effet Soret) ;
- L'effet de la gravité dans les pores ;
- L'influence de la température sur le stockage d'humidité ;
- La contribution des phases gazeuses au stockage de chaleur ;
- Les transferts d'air à travers la paroi.

D'autres modèles font appel à des simplifications plus importantes encore en négligeant les transferts d'humidité sous forme liquide (Yan et al., 2019).

Au contraire, certains modèles effectuent moins de simplifications et considèrent des phénomènes complexes, par exemple en considérant la formation de glace (Hens, 2012; Sontag et al., 2014) ou en simulant les transports de sel et les transitions de phase associées (cristallisation, dissolution, hydratation, déshydratation et déliquescence) (Nicolai, 2007). Bien que ces derniers phénomènes puissent avoir un impact considérable sur les transferts hygrothermiques et sur la durabilité des matériaux, la plupart des modèles les négligent.

De manière plus générale, les modèles de transferts couplés de masse et de chaleur considèrent souvent la matrice solide comme homogène, isotrope, indéformable et inerte chimiquement.

3.6.2. Phénomène d'hystérésis

La section 3.4.5 traitait du stockage/déstockage d'eau dans les matériaux et a mis en avant le phénomène d'hystérésis entre les courbes d'adsorption et de désorption. Plusieurs études comparent les résultats des simulations obtenus en utilisant la courbe d'adsorption, la courbe de désorption ou en tenant compte de l'hystérésis. Les travaux de Carmeliet et al. (2005) montrent une faible différence entre les versions, tandis que Libralato et al. (2021) soulignent le fait que le phénomène d'hystérésis peut avoir un impact important dans certains cas.

Bien que des modèles existent pour représenter le phénomène d'hystérésis (Mualem, 1974; Zhang et al., 2014), l'impact de l'hystérésis de l'isotherme de sorption est souvent négligé. En effet, parmi les 37 modèles de transfert de chaleur et d'humidité étudiés par Hens (2002), seulement deux tiennent compte du phénomène d'hystérésis. Ainsi, certains proposent d'utiliser la courbe d'adsorption (Künzel, 1995), d'autres la courbe de désorption (Vogelsang et al., 2013) ou encore la moyenne entre adsorption et désorption (Rode Pedersen, 1990).

3.6.3. Conditions aux limites

Le traitement des conditions aux limites varie énormément d'un modèle à l'autre. En ce qui concerne les conditions intérieures, les modèles requièrent généralement la température intérieure et une grandeur pour évaluer l'humidité qui peut être l'humidité relative, la pression de vapeur ou encore la température de rosée. Ces données permettent d'évaluer les échanges convectifs entre la paroi et l'environnement intérieur. Certains modèles utilisent également la pression de l'air intérieur, pour évaluer le phénomène d'advection à travers la paroi. Les températures de surface intérieure peuvent aussi être utilisées pour le calcul des échanges infrarouges entre les différentes surfaces internes.

Des données sur la température et l'humidité extérieures sont requises pour évaluer les échanges au niveau de la face extérieure des parois. La plupart des modèles s'appuient également sur les flux de rayonnement à CLO et à GLO, ainsi que sur la direction et la vitesse du vent (Delgado et al., 2012). Les informations concernant le vent permettent notamment le calcul des coefficients d'échange par convection au niveau de la surface extérieure de la paroi. Enfin, seulement la moitié des quatorze modèles hygrothermiques étudiés par Delgado et al. (2012) considèrent les effets des précipitations. Par exemple, Yan et al. (2019) négligent la pénétration de l'humidité de l'extérieur vers l'intérieur en faisant l'hypothèse que les surfaces extérieures des bâtiments modernes sont imperméables. Finalement, tous les outils ne permettent pas la prise en compte de l'ensemble des conditions aux limites existantes.

3.6.4. Méthodes de résolution numérique

Les sections précédentes ont présenté les phénomènes physiques entrant en jeu. Leur mise en équation aboutit à un système d'équations aux dérivées partielles (EDP) non linéaires à résoudre sur un domaine continu. Cette étude se focalisera sur la résolution par calcul numérique (Figure 1.21).

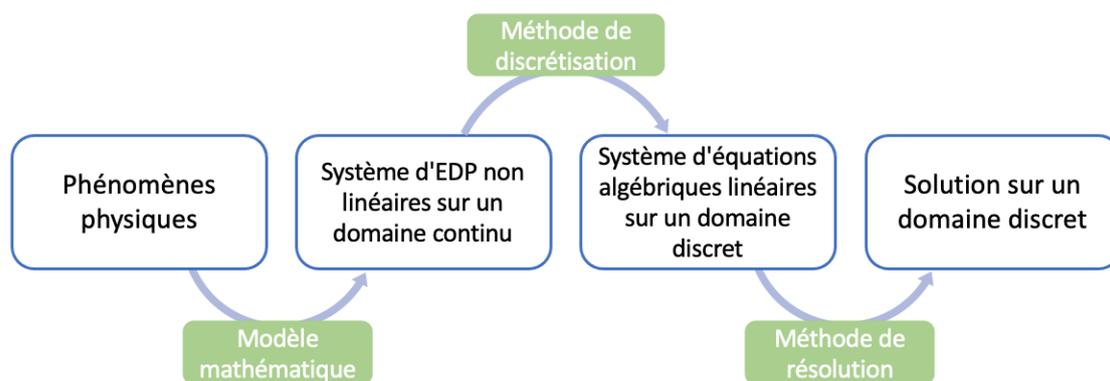


Figure 1.21 – Schéma de principe de la résolution par calcul numérique adapté de Popa (2002)

Ces méthodes se basent sur la discrétisation temporelle et spatiale du domaine. Les discrétisations peuvent être uniformes ou variables dans le but de mieux optimiser le calcul. Par exemple, le pas de discrétisation est souvent plus faible près des bords de la géométrie étudiée, car ces zones sont généralement soumises à de plus grandes variations que le centre du domaine.

De même, le pas de temps peut être variable et changé en fonction du niveau de difficulté pour obtenir la convergence.

Les principales méthodes de discrétisation sont les suivantes (Tableau 1.2) :

- Méthode des Différences Finies (MDF) ;
- Méthode des Volumes Finis (MVF) (Patankar, 1980) ;
- Méthode des Eléments Finis (MEF) ;
- Méthode spectrale (MS).

Ces méthodes se différencient par :

- Le processus de discrétisation ;
- Le type d'approximation de la variable inconnue (approximation des équations ou approximation des solutions).

Chaque méthode peut faire appel à différents schémas de discrétisation. Plusieurs types de schémas de discrétisation existent : implicite, semi-implicite et explicite. Les schémas explicites sont les plus simples, mais ils ne sont pas stables pour de larges mailles spatiotemporelles. En revanche, les schémas de discrétisation complètement implicites sont inconditionnellement stables. Le schéma de Crank et Nicolson (1947) est également un schéma de type implicite. Les schémas implicites se différencient par leur ordre de convergence temporelle : premier ordre pour le complètement implicite et second ordre pour le schéma de Crank-Nicholson. Selon les travaux de Patankar (1980), le schéma de Crank-Nicholson peut mener à des oscillations au niveau de la solution, ce qui ne permet pas de garantir la cohérence physique des solutions, même lorsqu'il y a convergence. Les schémas totalement implicites nécessitent d'être résolus à partir de méthodes de résolution complexes et itératives. Enfin, il existe le schéma Implicite-Explicite (IMEX), qui est un schéma de type semi-implicite. Il a l'avantage d'être numériquement stable et cohérent sans utiliser de méthodes de résolutions itératives (Gasparin, 2019). Plusieurs travaux ont étudié ce schéma et les résultats obtenus étaient satisfaisants (Gasparin et al., 2019, 2017).

L'étude de Woloszyn et Rode (2008) compare dix-sept outils de simulation HAM pour les bâtiments. Parmi ces outils, onze utilisent la méthode MVF, quatre les fonctions de transfert et deux la MEF, pour résoudre les transferts à travers l'enveloppe du bâti.

Tableau 1.2 – Comparaison des méthodes de discrétisation basé sur Popa (2002)

Méthode	Concept	Avantages	Inconvénients
Méthode des Différences Finies (MDF)	<ul style="list-style-type: none"> • Discrétisation du domaine en un nombre fini de points • Approximation des dérivées des EDP en chaque point par des développements en séries de Taylor tronquées à l'ordre de précision choisie 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre facile • Nécessite une mémoire et un temps de calcul raisonnables 	<ul style="list-style-type: none"> • Principe de conservation pas assuré après la discrétisation • Apparition éventuelle d'instabilités numériques • Pas adapté pour le traitement de géométries complexes
Méthode des Volumes Finis (MVF)	<ul style="list-style-type: none"> • Discrétisation du domaine en volume de contrôle • Intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle • Obtention d'équations discrétisées conservant toutes les grandeurs physiques sur chaque volume de contrôle 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre facile • Adapté aux géométries complexes • Nécessite une mémoire et un temps de calcul raisonnables • Préservation du principe de conservation des équations sur chaque volume de contrôle 	<ul style="list-style-type: none"> • Solution obtenue moins précise que pour la méthode spectrale
Méthode des Eléments Finis (MEF)	<ul style="list-style-type: none"> • Discrétisation du domaine en un nombre fini de domaines élémentaires de dimension finie (éléments finis) • Utilisation de fonctions linéaires ou quadratiques sur chaque élément, pour décrire la variation locale de l'inconnue • Remplacement de l'inconnue par son approximation dans les équations différentielles et évaluation du résidu 	<ul style="list-style-type: none"> • Convient pour des géométries complexes 	<ul style="list-style-type: none"> • Formalisme mathématique complexe et difficile à mettre en œuvre • Coût en mémoire et en temps de calcul élevé • Caractère conservatif des équations pas toujours assuré
Méthode spectrale (MS)	<ul style="list-style-type: none"> • Approximation de l'inconnue par des séries de Fourier tronquées ou par des séries de polynômes Chebichev (approximation valable sur l'ensemble du domaine de calcul) • Remplacement dans les équations du modèle de l'inconnue par cette approximation 	<ul style="list-style-type: none"> • Fourni des solutions très précises 	<ul style="list-style-type: none"> • Formalisme mathématique complexe et difficile à mettre en œuvre • Pas adapté pour le traitement de géométries et de conditions aux limites complexes

Finally, the methods MDF, MVF and MEF allow to reach a system of linear equations on a discrete domain, which is simpler to solve. Different resolution methods can be applied depending on the discretization scheme. They can be iterative and complex like the Newton-Raphson algorithm or simpler and without sub-iterations like the LU decomposition method (Lower-Upper).

Moreover, some works use reduced models, which are particularly effective for solving hygrothermal transfers in porous media. Berger et al. (2017) propose a review. These models are the result of reduction methods that consist in reducing the order of a system of EDP without significantly changing its behavior (Deiml et al., 2015). Nevertheless, these methods have two major inconveniences which are the numerical cost and the need to provide the input data representing the behavior of the system studied (Azam, 2021).

3.6.5. Potentiels moteurs

In the context of this study, two equations are solved, the system must therefore have two unknowns. It is then necessary to rewrite the equations in terms of only two driving potentials.

The driving potential for heat transfers is obvious: temperature. As for humidity transfers, there are multiple possibilities. The first models (Luikov, 1975; Philip et De Vries, 1957) used water content as a driving potential. However, water content has a discontinuity between two materials (Figure 1.22) (Freitas, 1996).

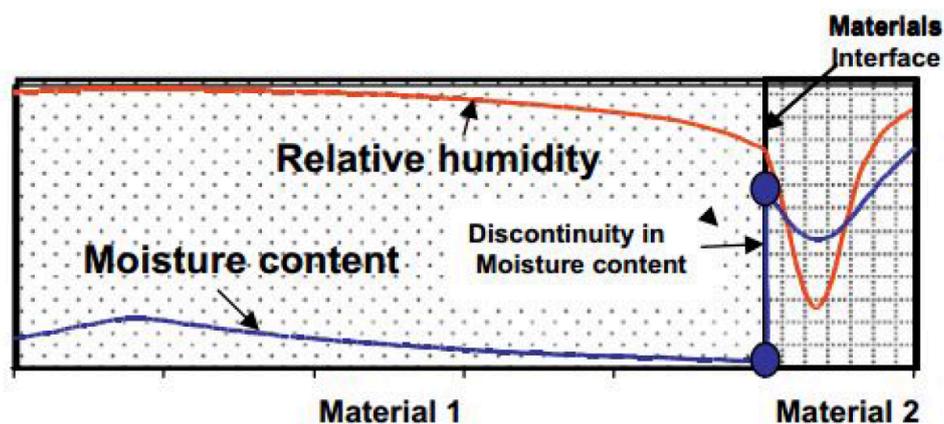


Figure 1.22 – Illustration de la teneur en eau et de l'humidité relative à l'interface entre deux matériaux (Tariku et al., 2010)

Figure 1.22 shows that relative humidity does not have a discontinuity at the interface (Tariku et al., 2010), which makes it a simpler driving potential to use. Thus, the software WUFI (Künzel, 1995) relies on relative humidity, which has the advantage of being easily measurable experimentally. However, this driving potential leads to a very limited representation of the super-hygroscopic domain (Nicolai, 2007), since relative humidity is almost always 100%.

La pression partielle de vapeur d'eau est utilisée comme potentiel moteur dans HAM-Tools (Sasic Kalagasidis et al., 2004). Un des avantages est que c'est un potentiel moteur réel puisqu'il apparaît dans la loi de Fick. De plus, la pression de vapeur d'eau est directement présente dans les bilans de conservation d'énergie et de masse, ce qui implique un faible réarrangement des équations. Cependant, Williams Portal (2011) met en avant la mauvaise convergence numérique, lors d'un changement brutal de conditions aux limites.

La pression capillaire est le potentiel moteur lié à la loi de Darcy et est utilisée dans les modèles HAM-BE (Li et al., 2009), Delphin 5 et 6 (Nicolai, 2007) et aussi celui de Janssen et al (2007). Lors de sa confrontation aux simulations de benchmark par Janssen (2014), il donne des résultats numériques très satisfaisants.

Enfin, le logarithme de la pression capillaire est également utilisé comme potentiel moteur dans certains modèles (par exemple celui de Schellen et al. (2008)). L'objectif de son utilisation est d'éviter les variations de pression capillaire entre l'état humide et sec des matériaux, mais ce potentiel moteur souffre d'une forte non-linéarité de l'humidité proche de la saturation (Janssen, 2014).

3.6.6. Prise en compte dans les modèles BES

Les transferts hygrothermiques à travers les parois sont un phénomène clé à considérer lors de la simulation des bâtiments anciens, comme expliqué dans la section 1.3. Pour cela, des modèles HAM ont été étendus de sorte à pouvoir simuler un bâtiment entier, ce qui est le cas des programmes WUFI-Plus et CHAMPS-BES (Nicolai et al., 2007). A l'inverse, certains outils BES, comme EnergyPlus, TRNSYS, IDA ICE (Kalamees, 2004), BSim (Rode et Grau, 2003) ou encore le programme ESP-r (Nakhi, 1995) ont été complétés par des modèles de parois permettant de simuler les transferts hygrothermiques. Des outils complets comme HAMFitPlus (Tariku et al., 2010) ont également été conçus pour simuler les transferts hygrothermiques sur l'ensemble du bâtiment.

Les modèles intégrés sont souvent simplifiés et ne prennent pas en compte l'ensemble des phénomènes influençant les transferts, dans un souci de coût computationnel notamment. Les principaux types de modèles intégrés dans les outils BES sont les suivants :

- Facteur de réponse ;
- Fonction de transfert ;
- Modèle Résistance-Capacitance ;
- Méthodes des différences finies.

De même les conditions aux limites sont souvent simplifiées. Par exemple, des modèles comme ceux basés sur les facteurs de réponse ne considèrent pas les échanges avec l'extérieur. De plus, de nombreux modèles numériques ne permettent pas la prise en compte de la pluie battante.

Certains modèles fournissent des résultats plus précis, mais nécessitent plus de temps de calcul et davantage de paramètres d'entrée, ce qui est le cas de ceux basés sur les différences finies. De même, une attention particulière doit être portée à la résolution temporelle et au maillage du domaine, car les différents types de modèles n'ont pas la même sensibilité à ces critères (Abadie et Mendes, 2006).

Par exemple, l'outil de simulation EnergyPlus, comporte plusieurs modèles de transferts dans les parois :

- CTF (Conduction Transfer Functions), qui considère seulement le phénomène de conduction thermique en s'appuyant sur des fonctions de transfert ;
- CondFD (Conduction Finite Difference), un algorithme résolvant uniquement les transferts de chaleur par conduction en appliquant la méthode des différences finies ;
- EMPD (Effective Moisture Penetration Depth), un modèle simplifié considérant les phénomènes d'adsorption et de désorption au niveau de la surface intérieure de la paroi, en représentant la capacité de tampon hydrique de la paroi à l'aide de deux couches fictives ayant une teneur en humidité uniforme (une première couche de surface permet de représenter l'effet tampon à court terme et la seconde plus profonde permet de tenir compte de la réponse plus lente des matériaux) ;
- HAMT (Heat and Moisture Transfer), un modèle de transfert couplé basé sur les travaux de Kunzel (1995), qui considère la température et l'humidité relative comme potentiel moteur.

Plusieurs travaux se concentrent sur l'évaluation des différents modèles de EnergyPlus. La comparaison des résultats de ces modèles souligne des différences considérables concernant la prédiction des conditions intérieures surtout l'humidité. Les écarts varient en fonction du climat et peuvent ensuite se répercuter sur l'évaluation des consommations énergétiques (Araújo et al., 2021; Yang et al., 2015). La comparaison des résultats du modèle HAMT avec des données expérimentales a fourni des résultats satisfaisants et montre l'importance de définir précisément les paramètres d'entrée (Goffart et al., 2017; Spitz et al., 2013). Ainsi, le modèle HAMT est utilisé pour l'optimisation de l'isolation par des matériaux biosourcés (Torres-Rivas et al., 2018) ou encore pour la simulation de bâtiments anciens (Stephan et al., 2013). Le principal inconvénient du modèle HAMT et plus généralement de ce type de modèle est la forte augmentation du coût computationnel. En effet, le temps de calcul est cent fois plus élevé, que lorsqu'un modèle classique de type CTF est utilisé (Goffart et al., 2017).

3.7. Méthode de couplage des outils de simulation

Il existe plusieurs outils BES tenant compte des transferts d'humidité à travers les parois. En revanche, comme détaillé dans la section 2.4, aucun outil de climat urbain complet fonctionnant sur de larges échelles spatio-temporelles ne les considère. L'un des objectifs de cette thèse est de les intégrer dans un modèle de climat urbain. Selon Sola et al. (2020), il existe trois méthodes pour simuler un nouveau processus dans un modèle à l'échelle urbaine :

- L'architecture séquentielle ;
- La co-simulation ;
- L'approche intégrée.

3.7.1. Architecture séquentielle

Lorsque l'architecture séquentielle est mise en place pour le couplage, un premier programme effectue une simulation autonome et les résultats ainsi obtenus serviront de données d'entrée pour le second sous-modèle. Cette approche est également appelée couplage externe unidirectionnel (Figure 1.23). Dans le contexte étudié, la première simulation serait effectuée à

partir du modèle de climat urbain et permettrait de fournir les conditions aux limites au modèle HAM. Ainsi, ce type de couplage permet seulement une première approche du problème étudié (Cóstola et al., 2008), puisqu'il ne permet pas de prendre en compte les effets de la paroi sur les ambiances intérieures et extérieures.

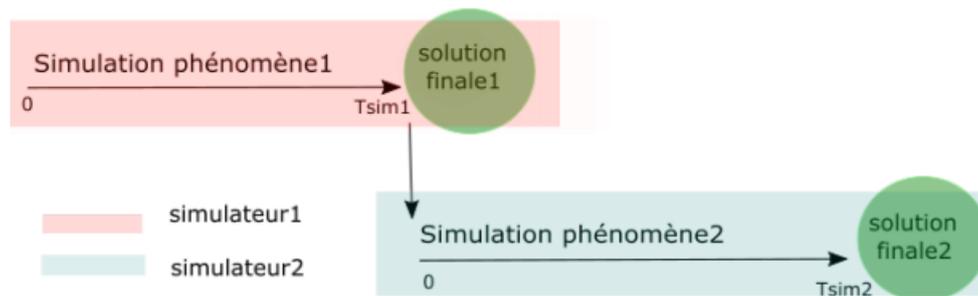


Figure 1.23 – Schéma du couplage externe statique unidirectionnel (Garci, 2016)

Il existe une autre approche basée sur des enchaînements séquentiels. Il s'agit de la méthode WRM (Waveform Relaxation Method ou méthode de relaxation des formes d'onde). Cette méthode itérative est utilisée pour l'analyse de systèmes dynamiques non-linéaires sur un domaine temporel (Lelarasmee et al., 1982). Chaque système est résolu indépendamment sur l'ensemble de la période et du domaine spatial étudiés. La solution de chaque système est représentée par une forme d'onde qui servira d'entrée à l'autre système (Figure 1.24). La forme d'onde est échangée entre les deux systèmes jusqu'à obtenir la convergence (Raad et al., 2015). Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est relativement simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas d'avoir accès au programme à chaque pas de temps.

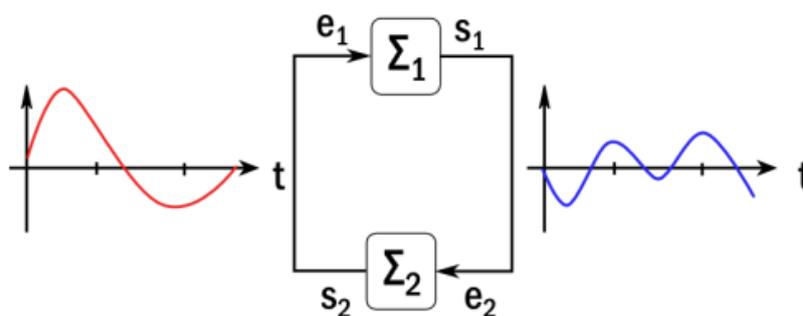


Figure 1.24 – Schéma de la méthode de relaxation des formes d'onde (WRM) appliquée entre deux programmes (appelés Σ_1 et Σ_2) dont les entrées et sorties sont notées respectivement e_1 , e_2 , s_1 et s_2 (Raad, 2017)

3.7.2. Co-simulation

L'approche de co-simulation consiste à coupler deux outils individuels, en les faisant interagir à chaque pas de temps (Trčka et al., 2009). Deux approches de co-simulation sont distinguées : le couplage faible et le couplage fort (Figure 1.25).

Le **couplage faible** s'effectue au travers de la simulation simultanée des deux modèles avec des échanges de données à certains pas de temps (Mira et al., 2013). Il faut noter que les pas de temps de simulation des deux programmes peuvent être différents, par exemple d'environ cinq minutes

pour un modèle de climat urbain (Clarke, 2001), et inférieur à la minute pour un modèle de type HAM (Heat, Air, and Moisture) (Abadie et Mendes, 2006). Le plus grand des deux pas de temps correspond généralement au pas d'échange entre les deux programmes. Ainsi, la sortie du premier modèle à la fin du pas d'échange sert d'entrée au second modèle, puis la sortie de celui-ci servira d'entrée pour le premier modèle au pas de temps suivant. La convergence n'est donc pas vérifiée à chaque pas de temps, ce qui ne permet de garantir la consistance du modèle. Néanmoins, cette technique est largement utilisée et a l'avantage de prendre en compte l'influence réciproque d'un modèle sur l'autre. Par exemple, ce type de couplage se révèle être une approche pertinente pour combiner les phénomènes des modèles HAM et BES (Costola et al., 2009; Trcka et al., 2006a, 2006b).

Le **couplage fort** permet comme le couplage faible l'échange de données entre les deux programmes à chaque pas de temps. La spécificité de ce couplage est que les simulations et les échanges de données entre les deux programmes sont répétés jusqu'à que la convergence soit atteinte pour le pas d'échange en cours. La mise en place d'un critère de convergence permet de garantir la consistance du modèle à chaque pas de temps (Mokhtari et al., 2009; Ren et Razeq, 1994).

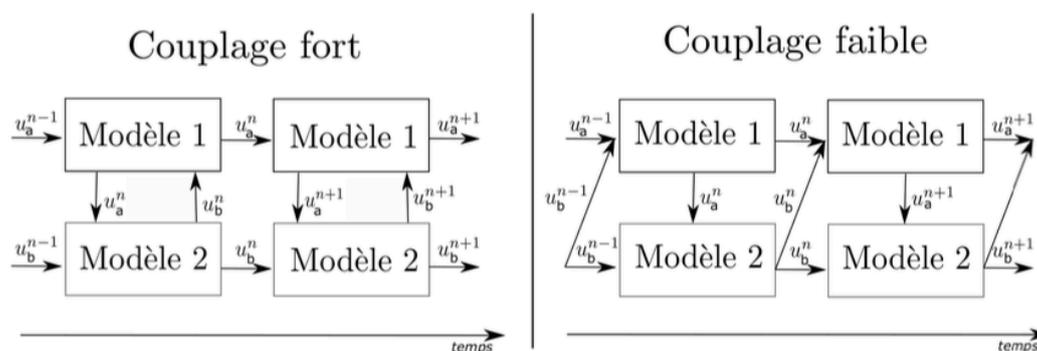


Figure 1.25 – Schéma des deux types de co-simulation entre deux programmes (Azam, 2021)

Costola et al. (2009) s'attachent à fournir un cadre théorique au couplage externe intervenant entre des programmes de type BES et HAM. Deux problématiques principales existent pour la mise en place de ce type de couplage.

La première est le chevauchement des modèles, c'est-à-dire que les deux programmes calculent la distribution de la température au niveau des parois, en appliquant des équations différentes. L'objectif étant d'utiliser le modèle HAM, plus complet, pour simuler les transferts couplés dans certaines parois, deux options existent (Costola et al., 2009) :

- Supprimer la paroi dans le programme BES : les programmes BES et HAM ont besoin d'échanger des données en deux points (au niveau de la surface intérieure et de la surface extérieure) ;
- Synchroniser la paroi entre les deux programmes : l'équation de transfert de chaleur doit être modifiée dans l'outil BES pour tenir compte de l'influence de l'humidité dans les échanges de chaleur (modification du terme de stockage, évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en humidité et ajout de terme lié à l'enthalpie associées aux transferts d'humidité). En parallèle, le modèle HAM simule les transferts d'humidité.

Ainsi les deux programmes doivent communiquer en plusieurs points d'interface de la paroi.

L'autre problématique concerne le choix des variables de couplage. Dans la première option, les conditions aux limites du modèle HAM sont définies à partir de flux thermiques et massiques calculés par le modèle BES à partir de la température de surface et d'une grandeur traduisant l'humidité en surface de la paroi au pas de temps précédent. Dans la seconde méthode, les conditions aux limites du modèle HAM sont calculées à partir de formules intégrant la température et de l'humidité de surface de la paroi au pas de temps actuel, ce qui permet l'obtention de résultats plus précis. Néanmoins cette solution demande d'avantage d'effort pour l'implémentation.

Les deux problématiques présentées ci-dessus sont également valables lors du couplage entre un modèle HAM et un modèle de climat urbain.

3.7.3. Approche intégrée

L'approche intégrée consiste à implémenter directement le sous-modèle HAM à l'intérieur d'un modèle de climat urbain, dans la même architecture et le même langage de programmation. Ainsi, un outil de simulation complet et totalement intégré est obtenu. Ce type de couplage requiert une bonne connaissance des deux modèles et un certain savoir-faire, ce qui le rend parfois complexe à mettre en place (Raad, 2017). En revanche, une fois l'intégration effectuée, il est plus simple à utiliser.

4. Positionnement de la thèse

Cette thèse propose d'étudier la rénovation des centres-villes historiques, afin d'identifier des solutions de rénovations répondant aux problématiques énergétiques et microclimatiques présentées précédemment. Lors de cette étude, les spécificités de la rénovation des parois historiques, comme la conservation du patrimoine et le risque de croissance de moisissures, seront également considérées.

La thématique de la rénovation des centres-villes historiques est étudiée au LMDC depuis de nombreuses années, au travers d'un partenariat avec le Grand Cahors (Claude, 2018; Claude et al., 2019, 2017; Malagoli de Almeida, 2022). Ce travail s'appuiera donc naturellement sur l'exemple du centre-ville médiéval de Cahors, qui sera présenté de manière détaillée dans le Chapitre 3. Les précédents travaux de recherche ont notamment permis d'étudier l'éco-rénovation de parois anciennes de ce quartier.

La première section de ce chapitre a montré que la rénovation des parois anciennes était un point à fort enjeux à la fois du point de vue des consommations énergétiques, du confort intérieur et extérieur, de la conservation du patrimoine mais également de la durabilité. De ce fait, ce travail de thèse se concentre uniquement sur l'isolation des parois, les autres aspects de la rénovation ne seront pas considérés.

La simulation semble être une solution adéquate pour comparer rapidement différents scénarios de rénovation. Néanmoins, les outils actuels ne sont pas forcément adaptés aux spécificités des

centres historiques. De plus, les modèles de type BES ne sont pas retenus dans cette étude, car ils ne permettent pas de simuler les interactions entre les bâtiments et le microclimat urbain. De même, les modèles à l'échelle microclimatique ne sont pas choisis, car ils ne sont pas capables d'effectuer des simulations sur de larges périodes temporelles, ce qui est un élément indispensable pour l'évaluation du risque de croissance de moisissures. Finalement, le modèle TEB est sélectionné, car il permet de simuler des villes sur de longues durées et de modéliser le comportement énergétique du bâtiment.

Cette thèse propose d'implémenter les transferts couplés de masse et de chaleur à travers les parois dans TEB, en appliquant une approche intégrée, dans le but d'obtenir un outil complet et adapté à la simulation des centres anciens et à la prise en compte des enjeux actuels. Néanmoins, les méthodes et les échelles de résolutions spatiotemporelles utilisées dans les modèles de transferts hygrothermiques sont très différentes de celles employées dans TEB. Des compromis devront être effectués, pour développer une méthode adaptée à la résolution de ce phénomène à l'échelle urbaine. A partir de cette nouvelle version de TEB, une étude multicritère sur la rénovation des parois du centre-ville médiéval de Cahors sera effectuée.

Chapitre 2 : Méthode de résolution des transferts hygrothermiques adaptée à l'échelle urbaine

1. Introduction

Actuellement, les modèles de climat urbain négligent les transferts hydriques à travers les parois, qui sont pourtant un phénomène clé pour la simulation des centres-villes anciens. Il existe de nombreux modèles, méthodes et outils pour décrire les transferts couplés de masse et de chaleur à l'échelle des parois, mais ils ne sont pas adaptés à la résolution numérique à l'échelle urbaine et sont difficilement intégrables dans les outils comme TEB. En effet, les modèles fonctionnant à l'échelle des parois recherchent des solutions toujours plus précises pour la résolution des transferts, tandis que les modèles à l'échelle urbaine sont déjà basés sur de nombreuses hypothèses simplificatrices (par exemple une seule composition de paroi par quartier). Le même niveau de précision n'est donc pas attendu pour la résolution de ce phénomène à l'échelle d'une paroi et à l'échelle urbaine.

Ainsi, ce chapitre propose plusieurs adaptations, concernant notamment les échelles de discrétisation spatiotemporelles et le schéma de résolution numérique, en vue de l'intégration des transferts hygrothermiques à travers les parois dans le modèle de climat urbain TEB.

2. Équations de transferts de masse et de chaleur

2.1. Hypothèses

Le modèle choisi décrit les transferts couplés de masse et de chaleur à travers une paroi multicouche, en 1D. Ce modèle permet de considérer les transferts de chaleur par conduction. Les transferts d'eau sous forme liquide et vapeur sont également modélisés à travers les différentes couches, ce qui permet de tenir compte de l'impact des transferts d'humidité sur les transferts de chaleur. En effet, l'eau se déplace avec son énergie interne et les phénomènes d'évaporation et de condensation impactent la température dans la paroi. Il tient également compte de l'impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique des matériaux et de sa contribution au stockage de chaleur.

Ce modèle s'appuie sur des hypothèses courantes, qui consistent à négliger les phénomènes suivants (Janssen et al, 2007) :

- La diffusion de vapeur induite par les gradients de température (effet Soret) ;
- L'effet de la gravité dans les pores ;
- L'influence de la température sur le stockage d'humidité ;
- La contribution des phases gazeuses au stockage de chaleur ;
- Le transfert d'air à travers la paroi ;
- La formation de glace dans les pores ;

- Les réactions chimiques ;
- Les processus d'altération des pores ;
- L'effet d'hystérésis ;
- L'anisotropie des matériaux.

Deux phénomènes supplémentaires sont négligés (Mendes et al., 2003) :

- La dépendance du stockage de chaleur à la variation de stockage d'humidité ;
- L'effet des transferts d'eau liquide sur l'équation de la chaleur.

Cette section a présenté les hypothèses sur lesquelles s'appuie la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse à travers les parois, dans ce travail de thèse. La prochaine étape consiste à écrire les équations du modèle hygrothermique.

2.2. Équations

Le modèle utilisé est en partie basé sur les travaux de Grunewald (1997) et Nicolai (2007). Il comporte deux équations (2-1) et (2-2), qui correspondent respectivement aux bilans de conservation d'énergie et de masse. La partie gauche des équations correspond aux termes de stockage, tandis que les éléments de droite sont les termes de transport. Plusieurs types de transfert sont considérés : les transferts de chaleur par conduction, les transferts de vapeur d'eau en utilisant la diffusion de Fick et les transferts d'eau sous forme liquide basés sur la loi de Darcy.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + h_v K_v \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial \rho^{v+l}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_l \frac{\partial p_c}{\partial x} + K_v \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) \quad (2-2)$$

Avec u la densité d'énergie ($J.m^{-3}$), ρ^{v+l} la masse volumique de l'eau sous forme liquide et vapeur ($kg.m^{-3}$), h_l l'enthalpie de l'eau liquide ($J.kg^{-1}$), h_v l'enthalpie de la vapeur d'eau ($J.kg^{-1}$), K_l la conductivité liquide (s), p_c la pression capillaire (Pa), p_v la pression de vapeur (Pa) et K_v la perméabilité à la vapeur ($kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$).

Les expressions des enthalpies massiques de l'eau liquide et vapeur sont fournies dans les équations (1-10) et (1-11). La capacité calorifique de la vapeur d'eau étant largement inférieure à la valeur de la chaleur latente de vaporisation, l'enthalpie massique de la vapeur d'eau est simplifiée de la manière suivante (Berger, 2014) :

$$h_v = L_v \quad (2-3)$$

Avec L_v La chaleur latente de vaporisation ($J.kg^{-1}$).

En accord avec les hypothèses effectuées, les termes de stockage s'écrivent ainsi :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = (c_{mat} \rho_{mat} + c_l w) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial \rho^{v+l}}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2-5)$$

Avec c_{mat} la capacité calorifique du matériau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), ρ_{mat} la masse volumique du matériau ($kg.m^{-3}$), c_l la capacité calorifique de l'eau liquide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), w la teneur en eau ($kg.m^{-3}$).

Les équations ci-dessus comportent trois inconnues : la température, la pression de vapeur et la pression capillaire. Cependant, seulement deux équations sont résolues, il faut donc réduire le nombre de variables inconnues à deux. Les deux potentiels moteurs retenus sont la température pour la chaleur et la pression capillaire pour l'humidité. La pression capillaire est un potentiel moteur permettant de fournir des résultats satisfaisants, ce point est détaillé dans la section 3.6.5 du Chapitre 1.

Les deux équations sont alors réécrites en fonction de la température et de la pression capillaire. Pour cela, la relation de Kelvin est utilisée et les équations suivantes sont obtenues :

$$(c_{mat} \rho_{mat} + c_l w) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\lambda + L_v K_v \left[\frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T} \varphi + \frac{p_c \rho_v}{T \rho_l} \right] \right) \frac{\partial T}{\partial x} + \left[L_v K_v \frac{\rho_v}{\rho_l} \right] \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial p_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_v \left[\frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T} \varphi + \frac{p_c \rho_v}{T \rho_l} \right] \frac{\partial T}{\partial x} + \left[K_l + K_v \frac{\rho_v}{\rho_l} \right] \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) \quad (2-7)$$

2.3. Données d'entrée

Le modèle utilisé pour calculer les transferts hygrothermiques à travers la paroi s'appuie sur des données d'entrée fournies par l'utilisateur. Il est en effet primordial de correctement définir les conditions initiales, les propriétés des matériaux et les données météorologiques.

2.3.1. Conditions initiales

Le modèle de transferts hygrothermiques nécessite d'être initialisé, pour simuler l'évolution du comportement de la paroi. Pour cela, il est nécessaire de fournir en entrée du modèle les conditions hygrothermiques dans la paroi, à l'état initial :

- Le profil de la température ;
- Le profil de la pression capillaire (qui peut aussi être déduit du profil de l'humidité relative).

2.3.2. Propriétés des matériaux

Le modèle présenté permet de simuler des parois composées de plusieurs couches de matériaux. Chaque matériau est défini en entrée du modèle par son épaisseur, sa conductivité thermique sèche, sa masse volumique et sa capacité calorifique. Il est également nécessaire de paramétrer

les fonctions permettant de calculer l'évolution des propriétés physiques des matériaux selon le niveau d'humidité. Ces fonctions matériaux permettent de calculer les caractéristiques suivantes pour chaque maille et à chaque pas de temps :

- L'évolution de la conductivité thermique du matériau en fonction de la teneur en eau ;
- Le stockage d'humidité, qui se traduit par le calcul de la teneur en eau en fonction de la pression capillaire ;
- L'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau ;
- L'évolution de la conductivité liquide en fonction de la teneur en eau.

Ces fonctions sont fournies en entrée du modèle sous la forme d'une liste de points décrivant des courbes. Le modèle effectue ensuite des interpolations pour déterminer les différentes caractéristiques. Dans ce chapitre, les listes de points utilisées sont issues de la base de données du logiciel Delphin. Néanmoins, il est également possible d'entrer des données obtenues à partir de caractérisation expérimentales ou extraites d'autres bases de données.

2.3.3. Données climatiques

L'évolution des variables hygrothermiques à l'intérieur de la paroi, est fortement conditionné par les échanges au niveau des deux surfaces, intérieure et extérieure. Il est donc primordial de fournir des données précises concernant l'évolution temporelle de l'ambiance intérieure et de l'environnement extérieur. Ainsi, les échanges au niveau des surfaces intérieures sont définis à partir de la température et l'humidité relative intérieure. Concernant la surface extérieure, il faut fournir la température et l'humidité relative extérieure, mais également la vitesse et la direction du vent, la pluie battante incidente, ainsi que les flux radiatifs solaire et infrarouge incidents à la façade. Ces données peuvent être de différentes origines : des fichiers météorologiques, des sorties de simulation, des mesures in-situ ou encore des constantes fixées. La section suivante détaille le calcul des conditions aux limites à partir de ces données climatiques.

2.4. Conditions aux limites

La paroi est l'interface entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur. Elle est donc soumise à des contraintes différentes sur ses deux faces.

Au niveau de la surface extérieure, la façade est exposée à des conditions météorologiques variables qui sont fournies en entrée du modèle. De ces données climatiques sont déduites les conditions aux limites. Le flux thermique et le flux massique au niveau de la surface extérieure sont notés respectivement q_{sext} et j_{sext} .

$$q_{sext} = q_{conv} + q_{CLO,abs} + q_{GLO,net} + h_v j_{conv} + h_l j_{pluie} \quad (2-8)$$

$$j_{sext} = j_{conv} + j_{pluie} \quad (2-9)$$

Avec q_{conv} le flux de chaleur convectif ($W.m^{-2}$), j_{conv} le flux massique convectif ($kg.m^{-2}.s^{-1}$), $q_{CLO,abs}$ le flux radiatif de courte longueur d'onde absorbé par la façade ($W.m^{-2}$), $q_{GLO,net}$ le flux radiatif de grande longueur d'onde net échangé entre la paroi et son environnement ($W.m^{-2}$), et j_{pluie} le flux de pluie battante incidente à la façade ($kg.m^{-2}.s^{-1}$).

Au niveau de la surface intérieure, les conditions aux limites pour les équations de masse et de chaleur sont restreintes aux transferts convectifs de masse et de chaleur.

$$q_{sint} = q_{conv} + h_v j_{conv} \quad (2-10)$$

$$j_{sint} = j_{conv} \quad (2-11)$$

En réécrivant les conditions aux limites en fonction des deux potentiels moteurs sélectionnés, les équations suivantes sont obtenues :

$$q_{sext} = h_{conv,th} (T_{ext} - T_{surf,ext}) + (1 - \alpha) q_{CLO,inc} + \varepsilon \sigma (T_{equiv}^4 - T_{sext}^4) + L_v h_{conv,m} \left[p_{v,ext} - p_{sat}(T_{sext}) \exp\left(\frac{p_{c,sext}}{\rho_l R_v T_{sext}}\right) \right] + c_l (T_{ext} - T_{ref}) j_{pluie} \quad (2-12)$$

$$j_{sext} = h_{conv,m} \left[p_{v,ext} - p_{sat}(T_{sext}) \exp\left(\frac{p_{c,sext}}{\rho_l R_v T_{sext}}\right) \right] + j_{pluie} \quad (2-13)$$

$$q_{sint} = h_{conv,th} (T_{int} - T_{sint}) + L_v h_{conv,m} \left[p_{v,int} - p_{v,sat}(T_{sint}) \exp\left(\frac{p_{c,sint}}{\rho_l R_v T_{sint}}\right) \right] \quad (2-14)$$

$$j_{sint} = h_{conv,m} \left[p_{v,int} - p_{sat}(T_{sint}) \exp\left(\frac{p_{c,sint}}{\rho_l R_v T_{sint}}\right) \right] \quad (2-15)$$

Avec $h_{conv,th}$ le coefficient de convection de chaleur ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), $h_{conv,m}$ le coefficient de convection massique ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), α l'albedo (-), $q_{CLO,inc}$ le flux radiatif de courte longueur d'onde incident à la paroi ($W \cdot m^{-2}$) et ε l'émissivité de la façade (-).

Finalement, les équations traduisant les conditions aux limites font à la fois intervenir des flux et la température ou la pression capillaire de surface. Les conditions aux limites sont donc des conditions de type Fourier.

3. Méthode de résolution numérique

Cette section se concentre sur le développement d'un nouveau schéma numérique. Il est conçu pour résoudre les transferts couplés et pour être facilement intégrable dans un modèle de climat urbain. Le schéma numérique proposé doit correspondre au schéma du modèle TEB et fonctionner à de larges échelles spatio-temporelles. Des compromis entre précision et adaptation doivent être trouvés.

3.1. Schéma de discrétisation

La mise en équation des transferts couplés de masse et de chaleur a abouti à un système d'équations différentielles partielles non linéaires à résoudre sur un domaine continu. La résolution par le calcul numérique se base sur des méthodes de discrétisation spatio-temporelle du domaine, qui permettent d'obtenir un système d'équation linéaire sur un domaine discret, plus simple à résoudre (voir section 3.6.4 du Chapitre 1). Ces discrétisations peuvent être uniformes

ou variables dans le but de mieux optimiser le calcul. La méthode de discrétisation utilisée est la méthode des différences finies (MDF).

Les modèles à l'échelle urbaine et ceux à l'échelle de la paroi utilisent des techniques et paramètres différents pour la discrétisation. L'objectif de ce travail est de proposer une méthode intermédiaire facilement intégrable dans le modèle TEB et fournissant des résultats d'une précision satisfaisante. Pour cela, les méthodes de discrétisation et de résolution typiquement utilisées par les deux types de modèles sont comparées. Le modèle TEB est sélectionné comme référence pour l'échelle urbaine. Concernant la modélisation des transferts hygrothermiques à l'échelle de la paroi, l'outil de référence choisi est le logiciel Delphin, qui est largement utilisé et validé et qui sera présenté plus en détail dans la section 4.1

Le Tableau 2.1 présente les détails de la comparaison et met en avant de fortes différences concernant la gestion du pas de temps et du maillage ainsi que sur la méthode de résolution choisie. En effet, les pas de temps et maillages sont variables et fins dans Delphin, tandis qu'ils sont constants et très grossiers dans TEB. En revanche, dans les deux modèles, les schémas de discrétisation appliqués sont totalement implicites. Lorsqu'un schéma totalement implicite est utilisé pour résoudre les transferts couplés, il doit être associé à une méthode de résolution itérative. Ainsi, la résolution dans Delphin est effectuée à partir de la méthode de Newton-Raphson, qui est complexe et qui nécessite d'effectuer des itérations à chaque pas de temps, jusqu'à atteindre la convergence. Les transferts de chaleur à travers les parois dans le modèle TEB sont résolues à partir d'une méthode plus simple : la décomposition Lower-Upper (LU).

Tableau 2.1 – Caractéristiques des méthodes de discrétisation et de résolution pour Delphin, TEB et la méthode proposée

	Delphin (Nicolai, 2007)	TEB (Masson, 2000)	Méthode proposée
Schéma de discrétisation	Totalement implicite	Totalement implicite	Implicite-Explicite (IMEX)
Pas de temps	Variable	5 min	5 min (diminué à 10 secondes dans les moments critiques)
Maillage	Variable	5 nœuds	Variable
Méthode de résolution numérique	Méthode de Newton-Raphson (itérative et complexe)	Décomposition LU (Lower-Upper)	Décomposition LU (Lower-Upper)

L'implémentation d'un schéma totalement implicite pour résoudre les transferts couplés dans TEB n'est pas une solution envisageable, car cela impliquerait d'ajouter une méthode itérative et complexe qui alourdirait trop le modèle. Par ailleurs, les schémas de discrétisation explicite sont difficilement intégrables dans TEB. Finalement, le schéma de discrétisation retenu est un schéma Implicite-Explicite (IMEX), car il n'a pas besoin de méthode de résolution itérative pour être stable numériquement (Gasparin, 2019).

Plusieurs études ont montré que ce schéma semi-implicite permettait d'obtenir des résultats d'un niveau de précision totalement satisfaisant (Berger et al., 2017a; Gasparin et al., 2019, 2017). La comparaison du schéma IMEX avec un schéma totalement implicite a même montré, que le

schéma IMEX permet de fournir des résultats plus précis avec un temps de calcul plus faible (Gasparin, 2019). Le schéma IMEX et le schéma totalement implicite considèrent un schéma implicite pour la résolution du champ, puisque dans les deux cas, les variables inconnues sont calculées au pas de temps $j+1$. Ils se différencient par la méthode utilisée pour calculer les propriétés non linéaires à chaque pas de temps. En effet, pour le schéma implicite, les coefficients de stockage et de diffusivité sont calculés au pas de temps $j+1$, tandis que le schéma IMEX les calcule à j , ce qui permet d'éviter les sous-itérations.

La discrétisation spatiale est effectuée par une différence centrée de second ordre. Une analyse de sensibilité est utilisée pour comparer plusieurs versions de maillages (section 4.4), dans l'objectif de trouver un compromis entre nombre de nœuds et précision des résultats. En effet, le nombre de nœuds actuellement utilisé pour décrire la paroi dans TEB est généralement fixé à cinq, ce qui ne semble pas suffisant pour résoudre correctement les transferts couplés de masse et de chaleur.

Les quatre maillages testés sont définis dans le Tableau 2.2 et les trois premières versions ont la spécificité de ne pas comporter d'affinement du maillage à l'interface entre deux matériaux. Ainsi, une même maille peut comporter plusieurs couches de matériaux différentes. Dans ce cas, les propriétés hydrothermiques de la maille sont calculées en effectuant une moyenne pondérée.

Tableau 2.2 – Caractéristiques du maillage pour les quatre versions testées et pour le modèle de référence Delphin

Version de maillage	Taille de la première maille (m)	Facteur d'accroissement (-)	Taille maximale de mailles (m)	Affinement du maillage à l'interface entre deux couches de matériaux	Nombre de nœuds *
Version 1	0,005	2	0,5	Non	5 à 9
Version 2	0,0025	1,7	0,1	Non	9 à 16
Version 3	0,001	1,5	0,1	Non	15 à 23
Version 4	0,001	1,5	0,1	Oui	15 à 50
Delphin	0,001	1,3	0,05	Oui	21 à 62

* intervalle du nombre de nœuds associé à chaque version de maillage, pour des parois dont les épaisseurs sont comprises entre 10 et 50 cm et dont les compositions sont détaillées dans le Tableau 2.4.

Enfin, concernant la discrétisation temporelle, l'approximation est réalisée à partir d'une différence finie de premier ordre centrée à droite. Le pas de temps est généralement fixé à cinq minutes. Dans les moments critiques pour la convergence, il est diminué à dix secondes. Cet ajustement du pas de temps permet d'assurer la stabilité numérique du modèle. Les détails sur sa mise en place sont présentés dans la section 3.3.

3.2. Approche de résolution numérique découplée

Les deux équations (2-6) et (2-7) sont résolues par une approche de résolution numérique découplée. Ainsi deux systèmes matriciels sont résolus séparément : un pour l'équation de la masse et un pour celle de la chaleur. L'équation de la chaleur a une seule inconnue : la température, et l'équation de la masse permet de calculer la pression capillaire. Cette thèse propose de résoudre l'équation de la masse puis l'équation de la chaleur. Ainsi, le premier

système calcule la pression capillaire au pas de temps $j+1$ et cette valeur est utilisée lors de la résolution de l'équation de la chaleur au même pas de temps (Figure 2.1). La résolution numérique de chaque système est effectuée à partir de la méthode de décomposition LU.

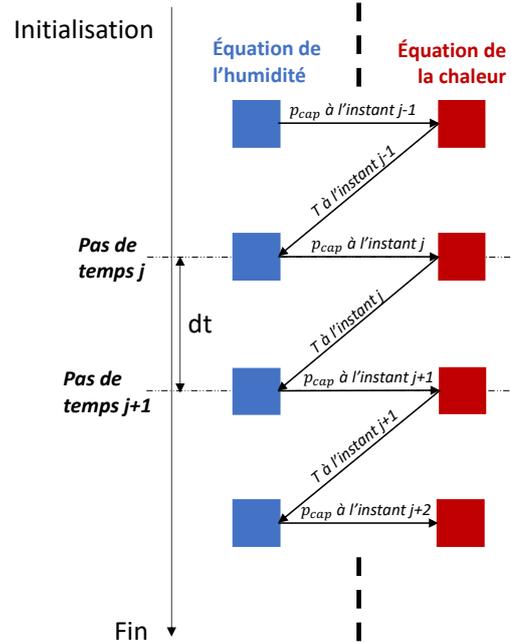


Figure 2.1 – Approche de résolution découplée résolvant l'équation de la masse puis l'équation de la chaleur

Finalement, les équations discrétisées suivantes sont obtenues pour résoudre le modèle au pas de temps $j+1$ et au nœud i (Figure 2.2) :

$$0 = (C_{PP})_i^j \frac{p_{c,i}^{j+1} - p_{c,i}^j}{\Delta t} + \left[\frac{(K_{PT})_{i-1/2}^j (T_i^j - T_{i-1}^j)}{\Delta x_i \Delta x_{i-1/2}} - \frac{(K_{PT})_{i+1/2}^j (T_{i+1}^j - T_i^j)}{\Delta x_i \Delta x_{i+1/2}} \right] + \left[\frac{(K_{PP})_{i-1/2}^j (p_{c,i}^{j+1} - p_{c,i-1}^{j+1})}{\Delta x_i \Delta x_{i-1/2}} - \frac{(K_{PP})_{i+1/2}^j (p_{c,i+1}^{j+1} - p_{c,i}^{j+1})}{\Delta x_i \Delta x_{i+1/2}} \right] \quad (2-16)$$

$$0 = (C_{TT})_i^j \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} + \left[\frac{(K_{TT})_{i-1/2}^j (T_i^{j+1} - T_{i-1}^{j+1})}{\Delta x_i \Delta x_{i-1/2}} - \frac{(K_{TT})_{i+1/2}^j (T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x_i \Delta x_{i+1/2}} \right] + \left[\frac{(K_{TP})_{i-1/2}^j (p_{c,i}^{j+1} - p_{c,i-1}^{j+1})}{\Delta x_i \Delta x_{i-1/2}} - \frac{(K_{TP})_{i+1/2}^j (p_{c,i+1}^{j+1} - p_{c,i}^{j+1})}{\Delta x_i \Delta x_{i+1/2}} \right] \quad (2-17)$$

Les coefficients de stockage C_{**} et de diffusion K_{**} sont calculés de la manière suivante :

$$C_{TT} = c_{mat} \rho_{mat} + c_l w; \quad C_{PP} = \frac{dw}{dp_c}; \quad K_{TT} = \lambda + L_v K_{PT}; \quad K_{TP} = L_v K_v \frac{p_v}{R_v T \rho_l}; \quad K_{PP} = K_l + K_v \frac{p_v}{R_v T \rho_l} \text{ et } K_{PT} = K_v \frac{p_v}{R_v T^2} \left(L_v - \frac{p_c}{\rho_l} \right).$$

Comme expliqué précédemment, l'implémentation d'un schéma IMEX nécessite de calculer ces coefficients C_{**} et K_{**} à partir des valeurs de température et pression capillaire au pas de temps j .

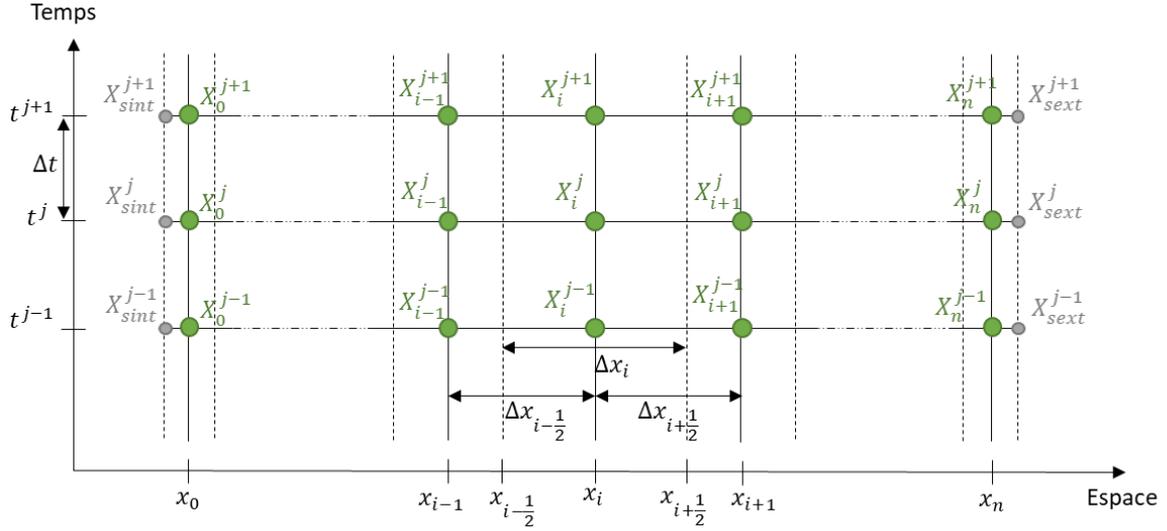


Figure 2.2 – Grille de discrétisation spatiotemporelle pour une variable inconnue X , en appliquant le schéma IMEX

La discrétisation spatiale implique de calculer les valeurs de certaines grandeurs entre deux points de maillage. Les épaisseurs des mailles sont moyennées et les coefficients de diffusion K_{**} sont calculés en appliquant une moyenne pondérée : $\Delta x_{i-1/2} = (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})/2$; $\Delta x_{i+1/2} = (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})/2$; $K_{**i-1/2} = (K_{**i} * \Delta x_i + K_{**i-1} * \Delta x_{i-1})/(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})$ et $K_{**i+1/2} = (K_{**i} * \Delta x_i + K_{**i+1} * \Delta x_{i+1})/(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})$.

La même méthode de discrétisation et les mêmes potentiels moteurs sont utilisés pour définir les conditions aux limites et les équations suivantes sont obtenues :

$$q_{sext}^{j+1} = h_{conv,th} (T_{ext}^{j+1} - T_{sext}^{j+1}) + L_v h_{conv,m} (p_{v,ext}^{j+1} - p_{v,sext}^j) + j_{rain} c_i (T_{ext}^{j+1} - T_{ref}) + \alpha q_{CLO,inc} + \varepsilon \sigma \left(\frac{T_{equiv}^{j+1} + T_{sext}^j}{2} \right)^3 (T_{equiv}^{j+1} - T_{sext}^j) \quad (2-18)$$

$$j_{sext}^{j+1} = h_{conv,m} \left(p_{v,ext}^{j+1} - p_{v,sext}^j \left(1 + \frac{1}{\rho_l R_v T_{sext}^j} (p_{c,sext}^{j+1} - p_{c,sext}^j) \right) \right) + j_{rain} \quad (2-19)$$

$$q_{sint}^{j+1} = h_{conv,th} (T_{int}^{j+1} - T_{sint}^{j+1}) + L_v h_{conv,m} \left(p_{v,int}^{j+1} - p_{v,sint}^j \left(1 + \frac{1}{\rho_l R_v T_{sint}^j} (p_{c,sint}^{j+1} - p_{c,sint}^j) \right) \right) \quad (2-20)$$

$$j_{sint}^{j+1} = h_{conv,m} \left(p_{v,int}^{j+1} - p_{v,sint}^j \left(1 + \frac{1}{\rho_l R_v T_{sint}^j} (p_{c,sint}^{j+1} - p_{c,sint}^j) \right) \right) \quad (2-21)$$

Les variables de surface sont approximées par leur valeur au nœud le plus proche.

3.3. Gestion du pas de temps et stabilité numérique

Le schéma de discrétisation IMEX permet d'assurer la stabilité numérique, sans utiliser de méthode de résolution itérative. Néanmoins, le pas de temps doit être suffisamment faible, pour atteindre la convergence des résultats. La discrétisation temporelle retenue consiste à **fixer un pas de temps à cinq minutes** (ce qui correspond au fonctionnement par défaut du modèle TEB), qui est **réduit à dix secondes dans les moments critiques pour la convergence**. Ces moments sont identifiés à l'aide de cinq tests (Figure 2.3), qui permettent de détecter la présence de variations brusques, d'oscillations, de fortes pluies ou encore des résultats incohérents.

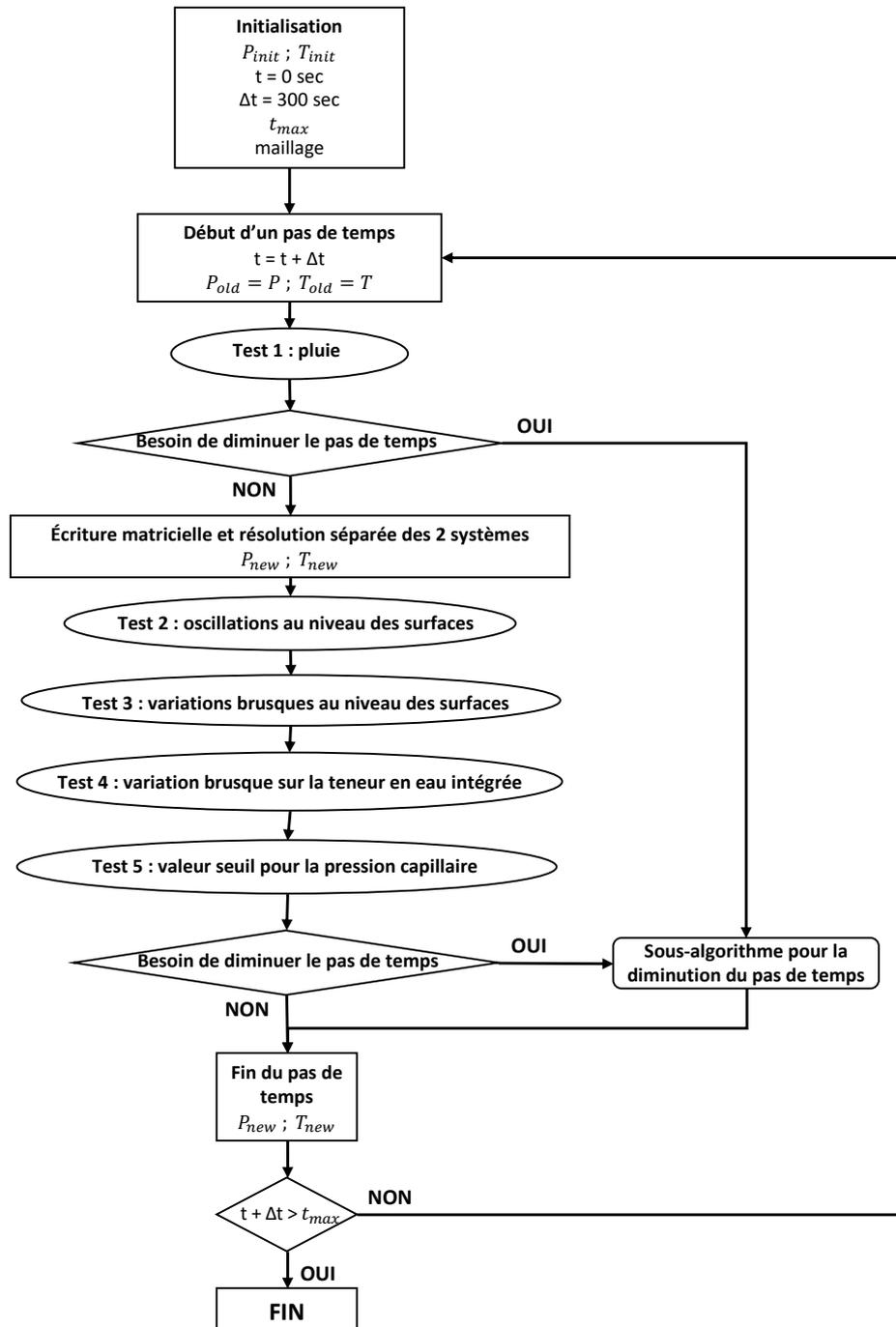


Figure 2.3 – Schéma du fonctionnement de la méthode numérique proposée

Le premier test consiste à vérifier la **quantité de pluie absorbée par la paroi**. Si le flux de pluie absorbé est supérieur à une valeur seuil, le moment est identifié comme critique pour la convergence. Le pas de temps est donc diminué pour les équations de masse et de chaleur.

Le deuxième test détecte les **oscillations sur les variables de température et de pression capillaire simulées au niveau des surfaces intérieures et extérieures de la paroi**. Ce test est réalisé seulement si la variation enregistrée entre le pas de temps actuel et le pas de temps précédent est supérieure à la valeur limite fixée. Il consiste à observer l'évolution du signe du taux de variation, mais aussi à étudier l'évolution des deux derniers taux de variation par rapport à la tendance. La procédure est détaillée dans la Figure 2.4, pour la pression capillaire à la surface extérieure. La même procédure de test est appliquée à la pression capillaire au niveau de la surface intérieure et à la température simulée aux surfaces intérieure et extérieure de la paroi. Ainsi, quatre éléments sont vérifiés. Si un seul de ces cas retournent un résultat insatisfaisant, le moment est défini comme critique pour la convergence et le pas de temps est diminué pour les deux équations.

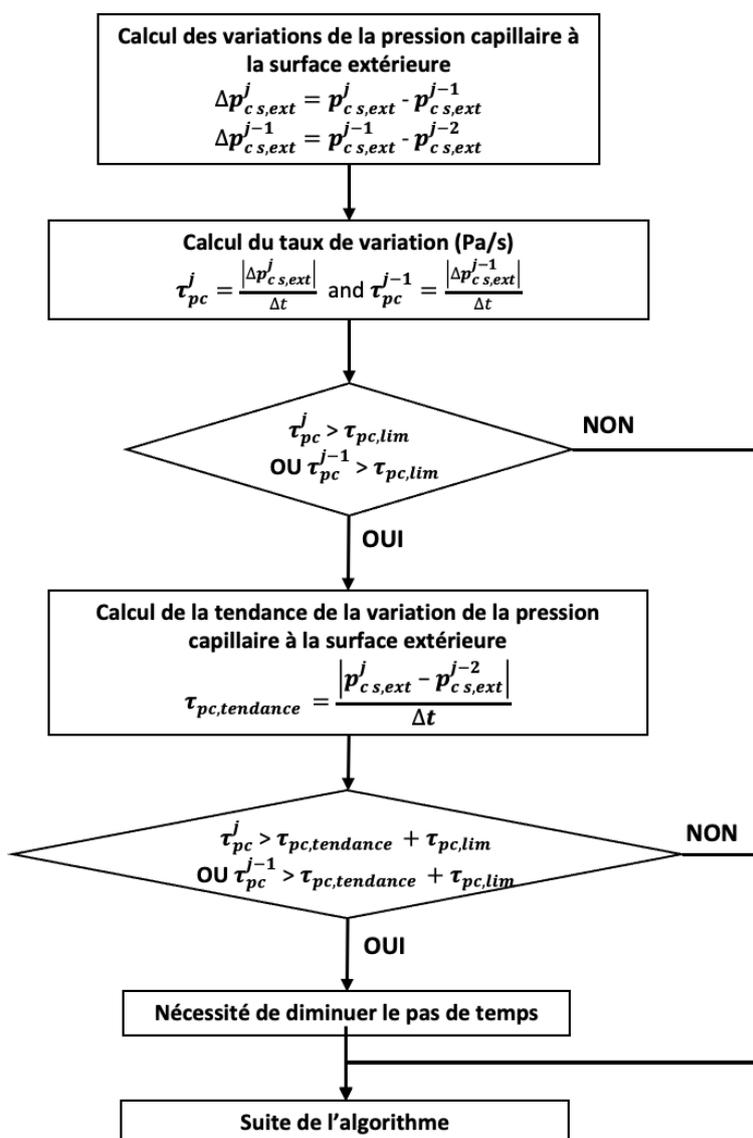


Figure 2.4 – Algorithme décrivant le Test 2 pour la pression capillaire au niveau de la surface extérieure

Le Test 3 permet de repérer les **variations brusques de température ou de pression capillaire au niveau des surfaces de la paroi**. Ainsi, ce test vérifie que le taux de variation en valeur absolue est inférieur à la valeur seuil fixée pour la température et la pression capillaire. Si le critère n'est pas respecté pour au moins une des deux variables à une des deux surfaces, le pas de temps doit être diminué pour les deux équations.

Le quatrième test est similaire au troisième test, mais il est appliqué à la teneur en eau intégrée de la paroi. En effet, la **valeur absolue du taux de variation de la teneur en eau intégrée** est vérifiée, elle ne doit pas dépasser un certain seuil. Si le test n'est pas vérifié, le pas de temps est diminué pour les deux équations.

Le cinquième test s'assure que la **pression capillaire ne soit pas positive**. Si la valeur de la pression capillaire en un point du maillage dépasse la valeur seuil, le pas de temps des deux équations est diminué. Si la diminution du pas de temps ne suffit pas à résoudre le problème, la valeur de la pression capillaire est remplacée une valeur donnée.

Le Tableau 2.3 résume l'ensemble des valeurs limites utilisées dans chaque test. Ces valeurs ont été choisies pour représenter des seuils acceptables et fournir des résultats satisfaisants, tout en limitant le nombre de diminution du pas de temps.

Tableau 2.3 – Valeurs seuil utilisées pour les cinq tests

Test	Variables	Unités	Valeurs limites
Test 1	Taux de pluie absorbée	$kg.m^{-2}.s^{-1}$	0,00002
Test 2	Taux de variation pour		
	- la pression capillaire	$Pa.min^{-1}$	40000
	- la température	$^{\circ}C.min^{-1}$	0,01
Test 3	Taux de variation pour		
	- la pression capillaire	$Pa.min^{-1}$	400000
	- la température	$^{\circ}C.min^{-1}$	0,04
Test 4	Taux de variation pour la teneur en Eau intégrée	$kg.m^{-3}.min^{-1}$	0,01
Test 5	Pression capillaire limite	Pa	0
	Valeur de remplacement pour La pression capillaire	Pa	-1e5

4. Validation par comparaison inter-modèle

Une méthode numérique a été développée pour être facilement intégrable à un modèle de climat urbain. La prochaine étape consiste à valider le modèle de transferts hygrothermiques et la méthode de résolution proposée. Il existe trois principales méthodes pour ce type de validation : la validation expérimentale par confrontation à des données mesurées, la validation théorique basée sur une solution analytique et la validation numérique par comparaison inter-modèle (Dong et al., 2020). Cette section présente une validation par comparaison avec le modèle de référence Delphin 6.1. Une validation expérimentale sera présentée ultérieurement dans le Chapitre 3.

4.1. Outil Delphin

Delphin est un programme de simulation, développé par l'Institut für Bauklimatic (IBK) et la Technische Universität Dresden (TUD) en Allemagne, pour le calcul des transferts couplés de chaleur, d'humidité, d'air, de polluant et de sel dans des parois multi-couches (Fechner et al., 2020). Dans cette étude, les simulations sont réalisées avec la version 6.1 de Delphin, en considérant seulement les transferts couplés de chaleur et d'humidité à travers une paroi en 1D.

Cet outil a été choisi pour la comparaison inter-modèle, car il est largement utilisé et validé. En effet, Delphin a été testé par confrontation aux Benchmarks HAMSTAD du 1 au 5 (Hagentoft et al., 2004), aux tests de la norme BS EN 15026:2007 (2007), de la norme ISO 10211:2007 (2007) et au test IBK. Sontag et al. (2013) présentent le détail de cette validation et concluent que toutes les versions du programme répondent à l'ensemble des exigences de tous les cas d'essai.

Concernant les données d'entrée, le logiciel Delphin comprend une base de données, regroupant les caractéristiques hygrothermiques d'un grand nombre de matériaux. Ces matériaux peuvent donc être choisis directement. Lorsque l'on souhaite utiliser des données expérimentales pour définir un nouveau matériau, il existe deux options possibles :

- La première consiste à choisir un matériau similaire parmi la base de données et à adapter les paramètres de base connus par l'utilisateur. Delphin redimensionnera alors automatiquement les courbes.
- Lorsque suffisamment d'informations sont connues, il est également possible de saisir les valeurs directement dans un tableau, de sorte à obtenir une courbe plus représentative du comportement réel du matériau étudié.

L'utilisateur doit également définir des données sur les conditions intérieures et extérieures pour le calcul des conditions aux limites.

4.2. Configuration étudiée

L'objectif est de comparer les résultats de la méthode développée à ceux de l'outil de référence Delphin. La comparaison est effectuée à partir d'une configuration de simulation typique. La fiabilité de la méthode proposée est évaluée pour plusieurs compositions de parois et différents climats. Toutes les parois sont initialisées à partir de données fixées et soumises aux mêmes conditions intérieures constantes et des conditions extérieures calculées à partir d'un fichier météorologique (Figure 2.5). La méthode de résolution développée a pour vocation à être intégrée dans un modèle de climat urbain. Les conditions aux limites définies doivent donc être représentatives du milieu urbain. Dans cet objectif, le logiciel EnergyPlus est utilisé pour déterminer les flux radiatifs incidents à la paroi, la pluie battante est estimée à partir de la norme NF EN ISO 15927-3 (2009) et les échanges convectifs sont calculés à partir du modèle DOE-2. La suite de cette section détaille davantage les méthodes appliquées pour déterminer les conditions aux limites urbaines.

Par ailleurs, pour obtenir des résultats de comparaison pertinents, il est nécessaire d'utiliser les mêmes méthodes de calcul des conditions aux limites et de définir les caractéristiques hygrothermiques des matériaux de la même manière dans les deux outils comparés.

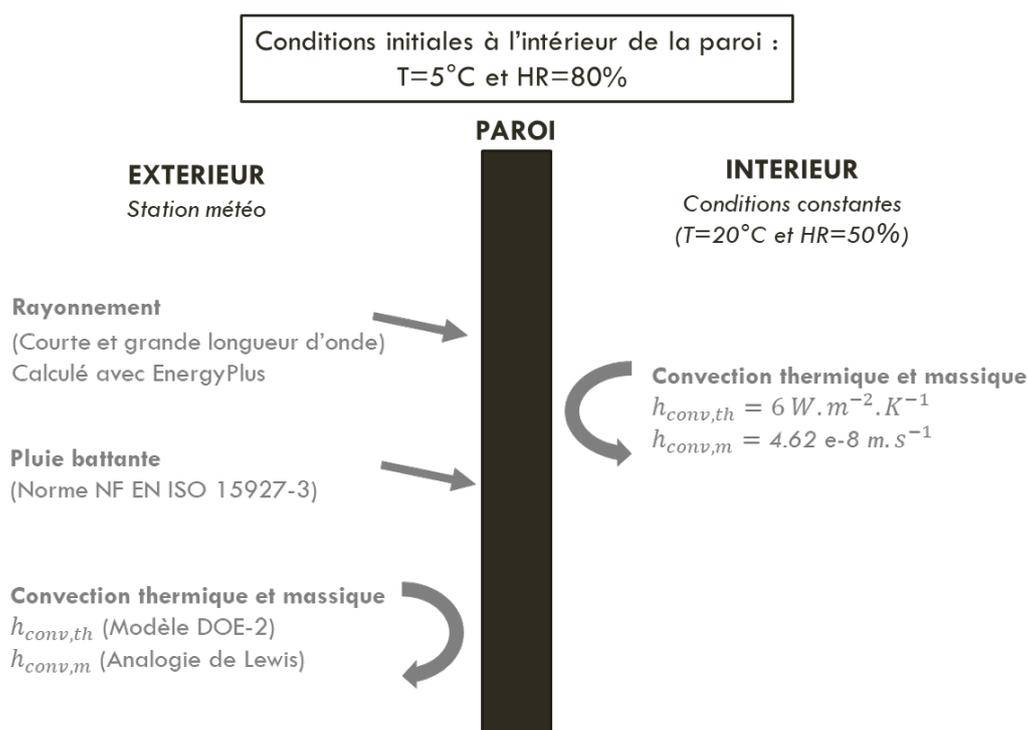


Figure 2.5 – Schéma de la configuration typique simulée

4.2.1. Calcul des conditions aux limites en milieu urbain

Cette section détaille les méthodes employées pour calculer les conditions aux limites représentatives du milieu urbain. Ce travail s'appuie notamment sur l'outil EnergyPlus, qui comporte différentes options permettant d'évaluer précisément les conditions aux limites d'une façade.

Les conditions aux limites au niveau de la surface extérieure dépendent fortement de la forme urbaine étudiée. L'environnement urbain choisi correspond au cas d'étude de cette thèse : le centre-ville médiéval de Cahors, qui est un quartier dense avec des rues étroites. La paroi étudiée est plus précisément localisée au premier étage d'une façade orientée est.

Convection thermique et massique

Les coefficients de convection thermique et massique sont des variables essentielles pour l'estimation des échanges thermiques et massiques au niveau de surfaces urbaines. Ces coefficients sont fortement influencés par la vitesse du vent local et la différence de température entre l'air et la surface. Cette section s'appuie sur le modèle DOE-2, pour le calcul des coefficients de convection thermiques. Le calcul est effectué par le logiciel EnergyPlus et la variable de sortie utilisée est appelée : "Surface Outside Face Convection Heat Transfer Coefficient [W/m²-K](Hourly)". Le coefficient de convection massique est ensuite déduit du coefficient de convection thermique, en appliquant l'analogie de Lewis (Janssen et al, 2007) (voir section 3.5.2 du Chapitre 1). Les coefficients de convection sont calculés en amont et sont donc une donnée d'entrée pour Delphin et la méthode proposée.

Rayonnement à courte longueur d'onde

Le rayonnement incident à courte longueur d'onde est fortement influencé par l'environnement urbain. Le logiciel EnergyPlus permet de calculer le rayonnement solaire incident à la paroi étudiée, en prenant en compte l'environnement urbain de manière précise. Il considère les trois composantes du rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi.

La simulation d'un seul bâtiment d'intérêt est effectuée (Figure 2.6). Celui-ci correspond au cas étudié expérimentalement à Cahors (voir Chapitre 3.) Les autres bâtiments sont considérés comme des masques solaires (en violet dans la Figure 2.6). Ils sont également utilisés pour calculer les inter-réflexions entre les surfaces urbaines extérieures, en s'appuyant sur la méthode du lancer de rayons.

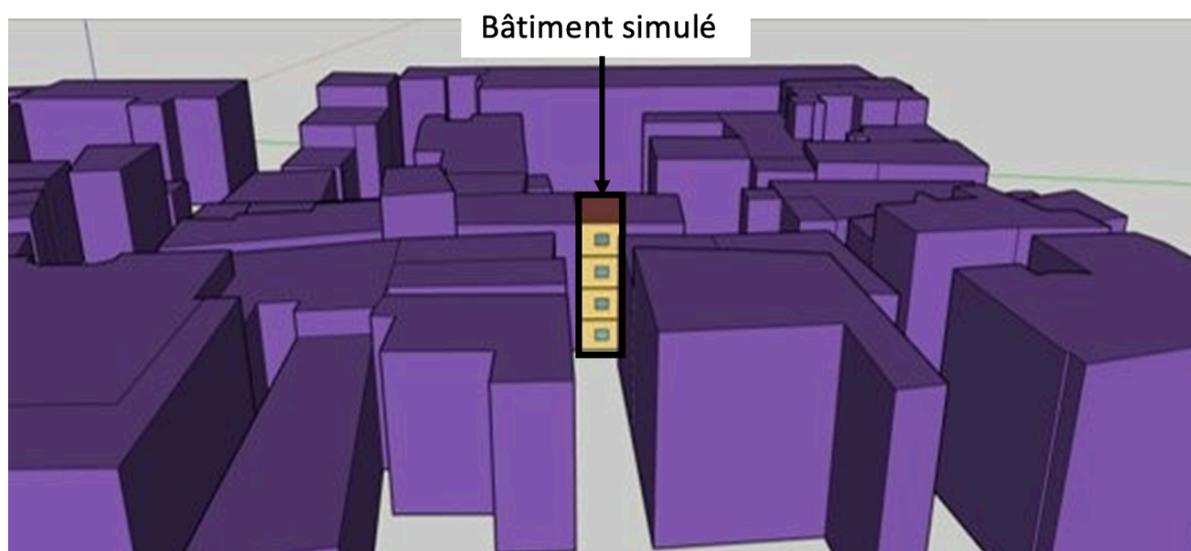


Figure 2.6 – Zone urbaine simulée dans EnergyPlus pour définir les conditions aux limites, avec une vue de la façade est du bâtiment simulé, en centre-ville de Cahors

Le flux radiatif à courte longueur d'onde incident à la façade du premier étage est donc calculé par EnergyPlus, en tenant compte de l'environnement urbain complexe. La condition aux limites requise en entrée des deux outils est donc déduite de la sortie de l'outil EnergyPlus appelée "Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area [W/m2](Hourly)". Le rayonnement solaire absorbé par la paroi est déduit du flux radiatif incident, en multipliant par le coefficient d'absorption du rayonnement solaire fixé à 0,7 pour toutes les parois étudiées.

Rayonnement à grande longueur d'onde

Des échanges infrarouges ont lieu entre la façade étudiée et l'atmosphère, le sol, mais également l'ensemble des surfaces urbaines (notamment les autres bâtiments). Cependant, le mode par défaut d'EnergyPlus considère seulement les échanges radiatifs à grande longueur d'onde entre le sol, le ciel et un environnement dont la température est supposée égale à celle de l'air. Les flux infrarouges échangés entre les bâtiments ne sont donc pas directement simulés.

Cette thèse propose une nouvelle approche pour prendre en compte ce phénomène. En effet, une stratégie de chaînage séquentiel de plusieurs bâtiments à partir d'EnergyPlus a été développée et

s'appuie sur la méthode WRM (méthode de relaxation des formes d'onde) (Raad et al., 2015). La première étape est le calcul des facteurs de vue entre les surfaces du bâtiment étudié et celles des bâtiments environnants. Les façades des bâtiments sont discrétisées par orientation et par étage. Ensuite, la méthode consiste à simuler plusieurs bâtiments séparément avec EnergyPlus en utilisant les facteurs de vue et les températures de surface des bâtiments environnants comme donnée d'entrée pour calculer les flux radiatifs à grande longueur d'onde. La stratégie repose sur plusieurs itérations. A chaque itération, chaque bâtiment de l'environnement est simulé sur la période de simulation entière (une année) et le rayonnement infrarouge est calculé à partir des températures de surface des autres bâtiments calculés à l'itération précédente. Des itérations sont effectuées jusqu'à atteindre la convergence des températures de surface du bâtiment étudié. Davantage de détails sur cette méthode de calcul sont fournis dans l'Annexe A.

Finale, la sortie d'EnergyPlus nommée "Surface Outside Face Net Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m2](Hourly)" est utilisée pour définir le flux radiatif à grande longueur d'onde incident à la paroi du premier étage orientée est.

Pluie battante

La pluie poussée par le vent est un critère primordial dans les simulations hygrothermiques. La pluie battante dépend de la quantité de précipitations, de la vitesse et de la direction du vent, de l'orientation de la paroi et des caractéristiques des matériaux qui la composent. La méthode utilisée pour le calcul de la pluie battante dans Delphin est le modèle de pluie battante issu de la norme NF EN ISO 15927-3 (2009). Elle correspond également à la méthode choisie pour calculer la pluie incidente à la façade, dans le modèle développé.

Cette norme fournit la formule semi-empirique suivante pour calculer l'exposition de la paroi à la pluie battante (I) en une heure (Orr et Viles, 2018) :

$$I = \frac{2}{9} v r^{8/9} \cos(D - \theta) \quad (2-22)$$

Avec v la vitesse du vent horaire moyenne de référence à 10m ($m.s^{-1}$), r la quantité de précipitation horaire (mm), D la direction du vent horaire moyenne ($^{\circ}$) et θ l'orientation de la paroi ($^{\circ}$).

Cependant, cette équation ne tient pas compte de l'effet de l'environnement urbain sur la pluie battante interceptée par la paroi. Pour cela, la norme ISO 15927-3 incite à prendre en compte plusieurs facteurs :

- L'application d'un **coefficient de rugosité du terrain** (C_R) permet de tenir compte de la rugosité de l'environnement et de la hauteur par rapport au sol.
- Le **coefficient topographique** (C_T) est utilisé pour considérer les variations de vitesse du vent notamment au niveau des collines.
- Il est également important de tenir compte du **facteur d'obstruction** (O). Il permet d'adapter la quantité de pluie battante arrivant au niveau de la paroi en fonction des obstacles créés par l'environnement urbain et se détermine en fonction de la distance horizontale jusqu'à l'obstacle le plus proche.
- Le dernier est le **facteur de captation** (W) qui traduit l'effet de la conception du bâtiment, par exemple le type de mur, la hauteur, la présence d'avancées etc.

Pour chaque facteur, la norme propose des tableaux donnant des valeurs en fonction des différentes configurations possibles. Pour le quartier médiéval étudié, le produit des quatre coefficients est fixé à 0,07.

Finalement, la formule semi empirique suivante est obtenue :

$$I_w = C_R * C_T * O * W * I = 0.07 * I \quad (2-23)$$

Cette formule est utilisée pour calculer la pluie incidente à la paroi $j_{pluie,inc}$. Il est ensuite possible de calculer la pluie absorbée par la paroi en fonction de son état actuel, en utilisant les équations présentées dans la section 3.5.3 du Chapitre 1.

4.2.2. Compositions des parois

L'évaluation du modèle se fait sur quinze parois (voir Tableau 2.4), dont la composition diffère par le nombre de couches et les propriétés des matériaux. Ainsi, l'outil est testé pour des parois traditionnelles ou plus modernes, éventuellement associées à des systèmes d'isolation intérieurs ou extérieurs, imperméables, hygroscopiques ou encore capillairement actifs.

Tableau 2.4 – Détails de la composition des parois étudiées

N°	Composition des parois de l'extérieur vers l'intérieur
1	Brique cadurcienne (0,4 m) – Chaux-chanvre (0,1 m)
2	Chaux-chanvre (0,1 m) – Brique cadurcienne (0,4 m)
3	Brique cadurcienne (0,4 m)
4	Chaux-chanvre (0,1 m)
5	Brique cadurcienne (0,4 m) – Silicate de calcium (0,1 m)
6	Brique cadurcienne (0,4 m) – Laine minérale (0,1 m) – Retardateur de vapeur (0,001 m) – Plaque de plâtre (0,01 m)
7	Enduit à la chaux (0,01 m) – Laine minérale (0,1 m) – Brique cadurcienne (0,4 m)
8	Terre crue (0,2 m)
9	Béton (0,2 m)
10	Enduit minéral fin (0,015 m) – Polystyrène expansé (0,1 m) – Béton (0,2 m)
11	Béton (0,2 m) – Laine minérale (0,1 m) – Pare-vapeur (0,001 m) – Plaque de plâtre (0,01 m)
12	Brique ancienne (0,215 m)
13	Brique ancienne (0,215 m) – Pare-vapeur perforé (0,001 m) – Mousse phénolique (0,05 m) – Pare-vapeur (0,001 m) – Plâtre (0,0125 m)
14	Brique ancienne (0,215 m) – Mortier colle (0,0065 m) – Silicate de calcium (0,14 m) – enduit à la chaux (0,004 m)
15	Brique ancienne (0,215 m) – Mortier colle (0,008 m) – Fibre de bois (0,1 m) – Plaque de plâtre (0,012 m)

Les caractéristiques de la terre crue sont issues de la publication de Soudani et al. (2016) et celles de la brique cadurcienne et du chaux-chanvre sont les résultats de la caractérisation des matériaux du Living Lab de Cahors (Claude, 2018). Les autres matériaux sont extraits de la base de données de Delphin. De plus, les compositions des parois historiques complexes (de la n°12 à la n°15) sont extraites des travaux de Lu et al. (2021). Les propriétés hygrothermiques de l'ensemble des matériaux sont détaillées dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 – Propriétés hygrothermiques des matériaux composant les parois étudiées

	Masse volumique ρ ($kg.m^{-3}$)	Capacité calorifique c ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	Conductivité thermique sèche λ_{dry} ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Coefficient de résistance à la vapeur μ (-)	Coefficient d'absorption d'eau A_w ($kg.m^{-2}.s^{-0.5}$)	Teneur en eau à saturation w_{sat} ($kg.m^{-3}$)	Source des valeurs
Brique cadurcienne	1616	800	0,49	9	0,28	388	Claude (2018)
Silicate de calcium	186,8	1100	0,059	3,64	0,77	916,4	Base de données de Delphin
Pare-vapeur	1276	1000	0,23	94384,5	0	113	Base de données de Delphin
Béton	2104,2	1000	2,1	76,12	0,01	219,9	Base de données de Delphin
Polystyrène expansé	23	1500	0,036	96	0	920	Base de données de Delphin
Mortier colle	1409,9	1059	0,6	22,89	0	340	Base de données de Delphin
Plaque de plâtre	850	850	0,2	10	0,28	551	Base de données de Delphin
Isolant à base de chaux-chanvre	440	1000	0,107	6,5	0,2	789	Claude (2018)
Enduit à la chaux	1249,9	999	0,57	12,14	0,13	452,2	Base de données de Delphin
Enduit minéral fin	586,3	1198	0,134	12,64	0,07	360	Base de données de Delphin
Laine minérale	37	840	0,04	1	0	900	Base de données de Delphin
Brique ancienne	1715,2	920	0,543	22,17	0,14	322,1	Base de données de Delphin
Pare-vapeur perforé	1276	1000	0,23	600	0	113	Base de données de Delphin
Mousse phénolique	35,5	1470	0,02	113,73	0,01	501,2	Base de données de Delphin
Plâtre	1043,4	1047	0,261	11,28	0,37	356	Base de données de Delphin
Terre crue	1730	648	0,6	9,83	0,39	345	Soudani et al. (2016)
Retardateur de vapeur	1000	1400	0,15	1533	0	9	Base de données de Delphin
Panneau en fibre de bois	150	2000	0,042	3	0,07	600	Base de données de Delphin

Toutes les parois présentées dans le Tableau 2.4 ont été simulées dans le climat de Cahors. La méthode numérique est également évaluée dans des climats plus extrêmes, pour tester ses limites. Les parois n°1 et 10 ont été évaluées dans deux climats supplémentaires : le climat désertique (chaud et sec) d'Assouan (Egypte) et le climat tropical (chaud et humide) de Manaus (Brésil). Le forçage météorologique pour le climat de Cahors, est réalisé à partir des données enregistrées par Météo France à l'aérodrome de Cahors-Le Montat, en 2016. Pour les climats d'Assouan et de Manaus, des fichiers météorologiques extraits de la base de données de EnergyPlus sont utilisés. Concernant les conditions intérieures, elles sont considérées constantes à une température de 20°C et une humidité relative de 50%, dans tous les cas. La méthode numérique est ainsi évaluée pour quinze parois et trois climats.

4.3. Méthode d'évaluation

La stratégie adoptée pour l'évaluation de la méthode consiste à vérifier les valeurs des variables utilisées pour le calcul des échanges de la paroi avec son environnement, ainsi que la cohérence globale des grandeurs simulées dans la paroi. Ainsi, six variables sont retenues pour évaluer le modèle :

- La température et la pression de vapeur **au niveau de la surface intérieure** ;
- La température et la pression de vapeur **au niveau de la surface extérieure** ;
- La température moyenne dans la paroi et la teneur en eau **intégrée sur l'ensemble de la paroi**.

Par ailleurs, l'interface entre le mur porteur (brique ou béton) et l'isolant est une localisation critique dans le contexte de la rénovation des parois anciennes, puisque le risque de croissance de moisissures y est particulièrement élevé (Claude, 2018). Il est donc primordial de simuler correctement la température et l'humidité relative en ce point, pour évaluer la durabilité des parois isolées. Ainsi, lorsque le risque de moisissures est étudié, il est nécessaire d'ajouter deux variables pour l'évaluation du modèle :

- La température et l'humidité relative **à l'interface entre l'isolant et le mur porteur** (brique ou béton).

L'évolution temporelle de ces variables est vérifiée par comparaison des données simulées par la méthode développée, avec les résultats de Delphin. La comparaison est effectuée avec une périodicité de cinq minutes. L'erreur réalisée par notre méthode est alors estimée par rapport à la référence donnée par Delphin. Une erreur absolue est calculée pour la température et l'humidité relative et une erreur relative est estimée pour la pression de vapeur et la teneur en eau.

$$err_{abs}^j = \left| X_{méthode}^j - X_{Delphin}^j \right| \quad (2-24)$$

$$err_{rel}^j = \left| \frac{X_{méthode}^j - X_{Delphin}^j}{X_{Delphin}^j} \right| \quad (2-25)$$

Avec $X_{méthode}^j$ la valeur de la variable calculée par la méthode proposée au pas de temps j , et $X_{Delphin}^j$ la valeur de la variable calculée par Delphin au pas de temps j .

Les simulations sont réalisées sur une année. Dans le but de présenter les résultats de manière concise, la durée pendant laquelle l'erreur dépasse une valeur seuil fixée (Tableau 2.6) est calculée. Les résultats sont considérés insatisfaisants, lorsque l'erreur dépasse la valeur seuil plus de 10% du temps (ce qui correspond à une case rouge dans les tableaux suivants : du Tableau 2.7 au Tableau 2.10).

Lorsque l'objectif est seulement d'étudier les échanges hygrothermiques entre la paroi et son environnement, il suffit que les résultats obtenus pour les six variables représentant les conditions hygrothermiques moyennes dans la paroi et au niveau des surfaces soient satisfaisants

pour valider. Les résultats à l'interface doivent être considérés pour la validation seulement si l'objectif est d'étudier le risque de croissance de moisissures en ce point.

Tableau 2.6 – Valeurs seuils pour l'écart entre la méthode proposée et Delphin

	T (°C)	p_{vap} (Pa)	w (kg. m ⁻³)	HR (%)
Type d'erreur	Absolue	Relative	Relative	Absolue
Valeur seuil	1	5 %	10 %	5

4.4. Analyse de sensibilité au maillage

L'objectif de cette section est de trouver un compromis pour la discrétisation spatiale. La première version de maillage étudiée correspond à un maillage très grossier avec une première maille de 5 mm et un taux d'accroissement de 2. Le schéma proposé fonctionne généralement bien pour des parois composées d'une ou deux couches de matériaux et permet de simuler efficacement les matériaux perméables, hygroscopiques et capillaires actifs, qui sont les caractéristiques des matériaux traditionnels et biosourcés (Tableau 2.7).

Tableau 2.7 – Durée de dépassement pour chaque simulation avec la version 1 du maillage

Numéro de paroi	Climat	Surface intérieure		Surface extérieure		Paroi entière		Interface	
		T	Pvap	T	Pvap	T	w	T	HR
1	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
2	Cahors	Green	Green	Green	LightGreen	Green	Green	Red	Red
3	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Black	Black
4	Cahors	Green	Green	Green	LightGreen	Green	Green	Black	Black
5	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red	Red
6	Cahors	Green	Green	Green	Green	LightGreen	Yellow	Red	Red
7	Cahors	Green	Green	LightGreen	Yellow	Red	LightGreen	Red	Red
8	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Black	Black
9	Cahors	Green	Green	Green	Red	Green	LightGreen	Black	Black
10	Cahors	LightGreen	Green	LightGreen	Yellow	LightGreen	Green	Red	Yellow
11	Cahors	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Red	Red
12	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Black	Black
13	Cahors	Red	Green	Red	LightGreen	Red	Green	Red	Red
14	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red	Red
15	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red
1	Assouan	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
10	Assouan	Red	Green	Green	LightGreen	Yellow	Green	Red	Red
1	Manaus	Green	Green	Green	LightGreen	Green	Green	Red	Red
10	Manaus	Green	Green	Red	Yellow	LightGreen	Green	Red	Red

Durée de dépassement de la valeur limite sur une année

- Moins de 1% du temps
- Moins de 5% du temps
- Moins de 10% du temps
- Plus de 10% du temps
- Non applicable

Neuf simulations sur dix-neuf donnent des résultats en partie insatisfaisants, ce qui permet de trancher sur les limites du schéma numérique associé à un maillage grossier. Les résultats sont moins satisfaisants pour des solutions contemporaines, comme le béton seul ou isolé par l'extérieur ou l'intérieur. De même, la méthode proposée ne permet pas toujours de simuler efficacement les parois composées de plus de quatre couches de matériaux, par exemple la paroi n°13. Le nombre de nœuds n'est pas suffisant pour décrire les fortes variations induites par les changements de matériaux. De plus, le nombre de nœuds dépend de l'épaisseur de la paroi. Or certaines parois composées d'un seul matériau sont plus fines et donc comportent peu de nœuds,

ce qui peut également entraîner des résultats insatisfaisants (par exemple la paroi 12, composée de seulement 21,5 cm de briques).

Concernant la simulation des conditions hygrothermiques à l'interface, cette version grossière de maillage ne permet de fournir des résultats satisfaisants pour aucune des configurations étudiées.

Une seconde proposition est effectuée en affinant le maillage. Cette version 2 de maillage se caractérise par une première maille de 2,5mm avec un taux d'accroissement de 1,7. Ainsi, les parois comportent entre 9 et 16 nœuds en fonction de leur épaisseur.

Avec ce maillage affiné, les résultats deviennent satisfaisants pour les parois fines ainsi que les parois composées de béton. En revanche, les résultats restent en partie insatisfaisants pour les parois n°13 et 14 qui sont constituées respectivement de cinq et quatre couches de matériaux (Tableau 2.8). Notons que les résultats à l'interface restent insatisfaisants pour de nombreuses parois.

Tableau 2.8 – Durée de dépassement pour chaque simulation avec la version 2 du maillage

Numéro de paroi	Climat	Surface intérieure		Surface extérieure		Paroi entière		Interface	
		T	Pvap	T	Pvap	T	w	T	HR
1	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green
2	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Light Green
3	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Black	Black
4	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Black	Black
5	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
6	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
7	Cahors	Green	Green	Green	Light Green	Green	Yellow	Red	Red
8	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Black	Black
9	Cahors	Green	Green	Green	Light Green	Green	Green	Black	Black
10	Cahors	Green	Green	Green	Light Green	Light Green	Green	Yellow	Light Green
11	Cahors	Green	Green	Green	Light Green	Green	Green	Light Green	Red
12	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Black	Black
13	Cahors	Red	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red
14	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Light Green	Red
15	Cahors	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
1	Assouan	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Light Green
10	Assouan	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Red	Green
1	Manaus	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
10	Manaus	Green	Green	Light Green	Light Green	Light Green	Green	Green	Green

Durée de dépassement de la valeur limite sur une année

- Moins de 1% du temps
- Moins de 5% du temps
- Moins de 10% du temps
- Plus de 10% du temps
- Non applicable

Une version 3 du maillage est testée dans le but d'obtenir des résultats satisfaisants pour l'ensemble des parois, y compris celles comportant quatre couches de matériaux ou plus. Dans cette version, le maillage est encore affiné et se caractérise par une première maille de 1 mm, un taux d'accroissement de 1,5. Ainsi, les parois ont une discrétisation spatiale comprenant entre 15 et 23 nœuds en fonction de leur épaisseur. Finalement, les résultats obtenus (Tableau 2.9) montrent que le maillage ainsi affiné fournit des résultats satisfaisants pour l'ensemble des configurations étudiées, pour les surfaces intérieures et extérieures ainsi que la moyenne dans la paroi. Cette version de maillage peut donc être utilisée pour discrétiser les parois dans TEB,

lorsque l'on ne se préoccupe pas de l'évolution des conditions à l'intérieur de la paroi, mais seulement des échanges avec les ambiances.

Par ailleurs, cette version de maillage fournit des résultats satisfaisants pour la simulation des conditions hygrothermiques à l'interface, pour les parois comportant seulement des matériaux hygroscopiques et/ou capillairement actifs. Cependant, les résultats obtenus à partir de cette version de maillage ne sont pas satisfaisants, dans le cas de parois comprenant de nombreuses couches de matériaux, des matériaux imperméables ou peu perméables (comme le béton). La version 3 n'est donc pas adaptée pour évaluer le risque de croissance de moisissure à l'interface.

Tableau 2.9 – Durée de dépassement pour chaque simulation avec la version 3 du maillage

Numéro de paroi	Climat	Surface intérieure		Surface extérieure		Paroi entière		Interface	
		T	Pvap	T	Pvap	T	w	T	HR
1	Cahors								
2	Cahors								
3	Cahors								
4	Cahors								
5	Cahors								
6	Cahors								
7	Cahors								
8	Cahors								
9	Cahors								
10	Cahors								
11	Cahors								
12	Cahors								
13	Cahors								
14	Cahors								
15	Cahors								
1	Assouan								
10	Assouan								
1	Manaus								
10	Manaus								

Durée de dépassement de la valeur limite sur une année

- Moins de 1% du temps
- Moins de 5% du temps
- Moins de 10% du temps
- Plus de 10% du temps
- Non applicable

Aucune des trois premières versions de maillage n'a permis de simuler correctement le comportement à l'interface pour l'ensemble des compositions de paroi, ce qui s'explique en partie par le fait qu'aucun affinement du maillage à l'interface n'est appliqué. En effet, l'interpolation des résultats entre deux points ne permet pas de quantifier précisément l'accumulation d'humidité à l'interface entre deux couches de matériaux. **Il est donc impossible de décrire correctement le comportement hygrothermique à l'interface, sans affiner le maillage à cette localisation.** Pour cela, une quatrième version de maillage est étudiée. Elle possède les mêmes caractéristiques que la version 3, à l'exception que le maillage est affiné à l'interface entre deux couches de matériaux. Ainsi, les versions 3 et 4 conduisent au même maillage et donc aux mêmes résultats pour les parois composées de seulement une couche de matériau.

Finalement, cette dernière version de maillage permet d'obtenir des résultats satisfaisants pour les huit variables étudiées, dans toutes les configurations (Tableau 2.10). La version 4 du maillage pourra donc être utilisée pour simuler les parois, dans les cas où le risque d'apparition de moisissures à l'interface est étudié.

Tableau 2.10 – Durée de dépassement pour chaque simulation avec la version 4 du maillage

Numéro de paroi	Climat	Surface intérieure		Surface extérieure		Paroi entière		Interface	
		T	Pvap	T	Pvap	T	w	T	HR
1	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
2	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
3	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
4	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
5	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
6	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
7	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
8	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
9	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
10	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
11	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
12	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
13	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
14	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
15	Cahors	■	■	■	■	■	■	■	■
1	Assouan	■	■	■	■	■	■	■	■
10	Assouan	■	■	■	■	■	■	■	■
1	Manaus	■	■	■	■	■	■	■	■
10	Manaus	■	■	■	■	■	■	■	■

Durée de dépassement de la valeur limite sur une année

- Moins de 1% du temps
- Moins de 5% du temps
- Moins de 10% du temps
- Plus de 10% du temps
- Non applicable

4.5. Résultats détaillés

Cette sous-partie présente des extraits de résultats, pour la paroi brique/chaux-chanvre (n°1), au mois d'août 2016, dans le climat de Cahors. Le schéma numérique proposé associé aux quatre versions de maillage est confronté à l'outil de référence Delphin (Figure 2.7). L'étude détaillée est effectuée pour deux périodes différentes : une période ensoleillée du 4 au 8 juillet 2016 et une période pluvieuse du 22 au 26 novembre 2016. La fiabilité du modèle sera ainsi vérifiée dans des conditions météorologiques opposées.

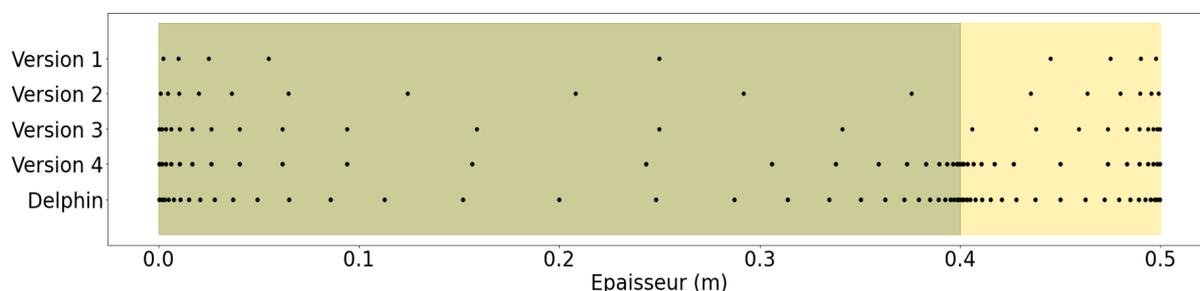


Figure 2.7 – Les versions de maillage appliquées à la paroi en brique isolée à partir de chaux-chanvre

4.5.1. Période ensoleillée

La première période étudiée s'étend du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors, ce qui correspond à cinq jours chauds et ensoleillés, sans évènement de pluie. La Figure 2.8 décrit les principales variables utilisées pour le calcul des conditions aux limites extérieures.

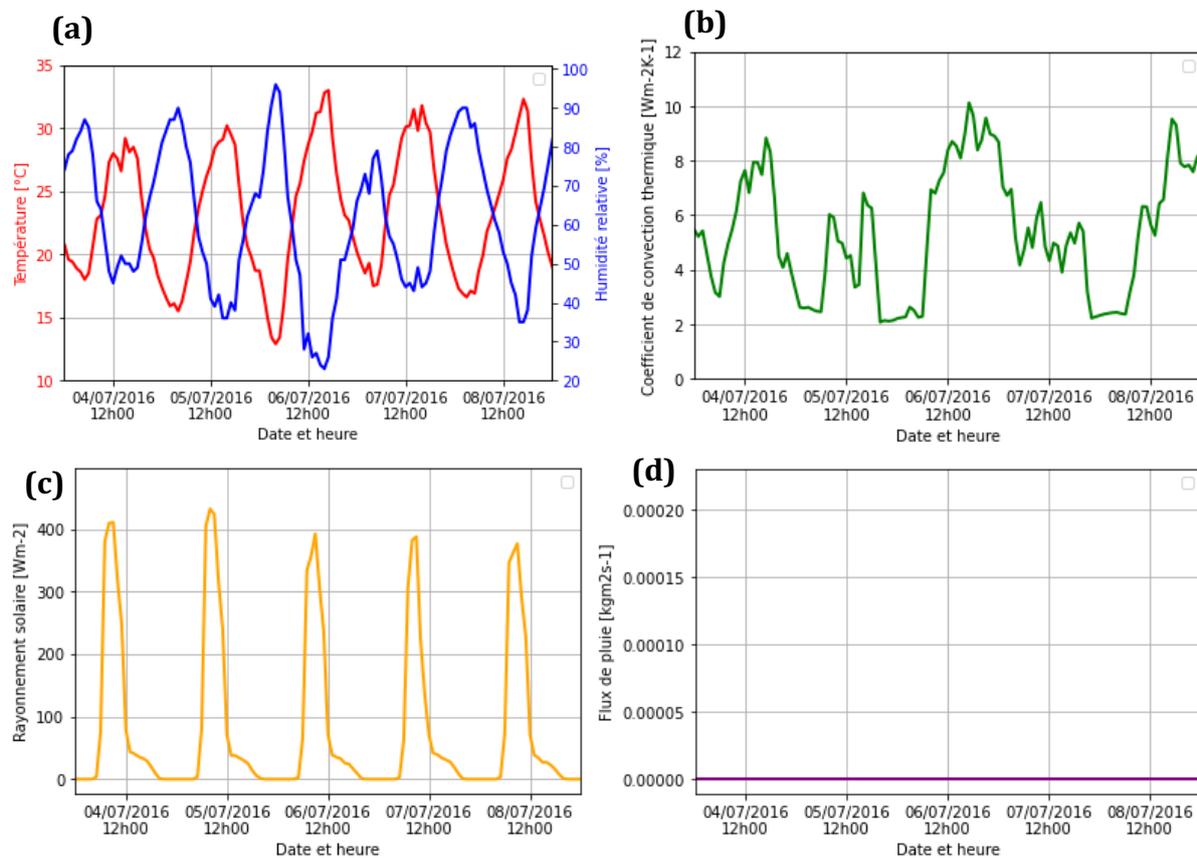


Figure 2.8 – Principales variables utilisées pour calculer les conditions aux limites extérieures : température et humidité relative extérieure (a), coefficient de convection thermique (b), rayonnement solaire incident à la façade (c) et flux de pluie incident à la paroi (d), du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors

La Figure 2.9 montrent des résultats très satisfaisants pour l'évolution temporelle de la température et de la pression de vapeur au niveau de la surface extérieure pour les trois versions de maillage.

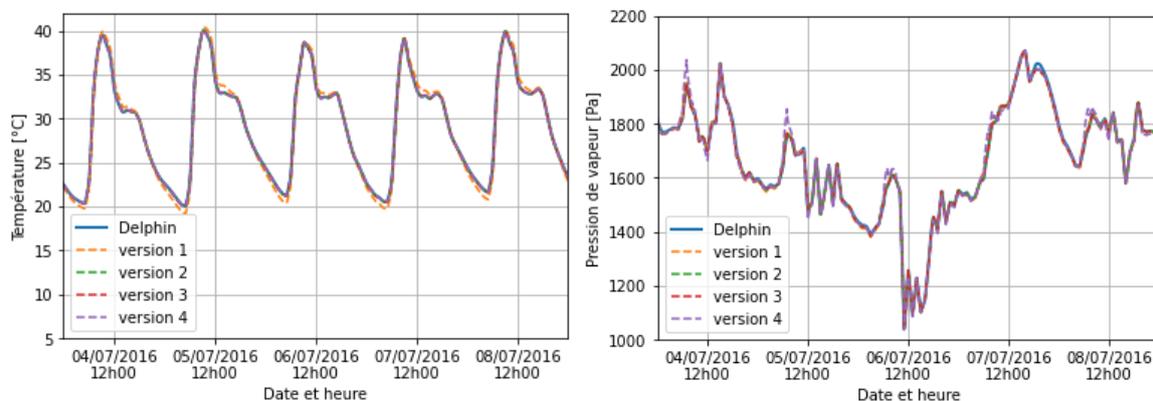


Figure 2.9 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de la pression de vapeur (à droite) au niveau de la surface extérieure du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors

Concernant la température et la pression de vapeur au niveau de la surface intérieure, un très bon accord entre les valeurs simulées par Delphin et par la méthode développée associée aux

différentes versions de maillage est observé (Figure 2.10). Un léger déphasage est constaté pour la version 1 du maillage, la plus grossière, ce qui s'explique par une épaisseur plus importante de la première maille. Néanmoins, l'écart entre cette version et Delphin reste très faible.

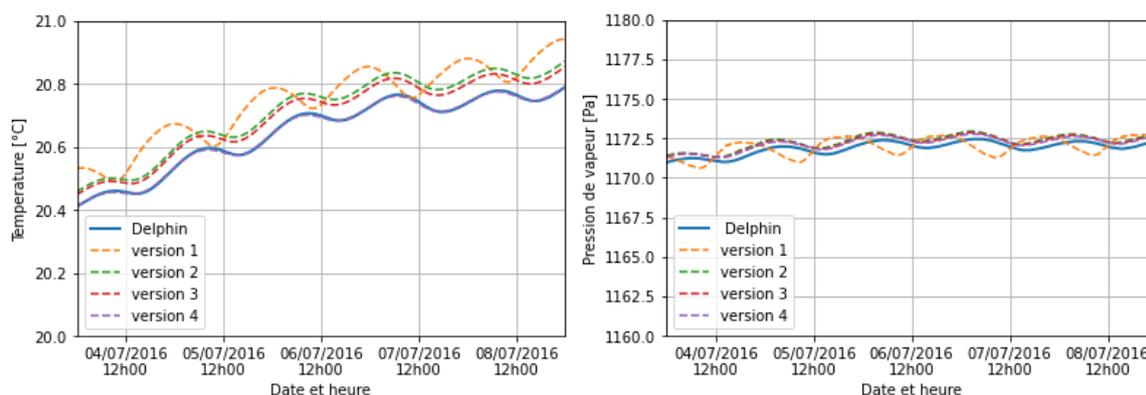


Figure 2.10 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de la pression de vapeur (à droite) au niveau de la surface intérieure du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors

Puisque l'objectif de cette section est de vérifier la validité de la méthode sur une période ensoleillée, le comportement de la température et de la teneur en eau dans la paroi est étudié au moment de la journée où le rayonnement solaire incident est maximal. Selon la Figure 2.11, les quatre versions de maillages permettent de bien représenter l'évolution spatiale de la température et de la teneur en eau dans la paroi. En effet, même la version 1, dont le maillage très grossier est composé de seulement de 9 nœuds, permet de fournir des résultats très satisfaisants.

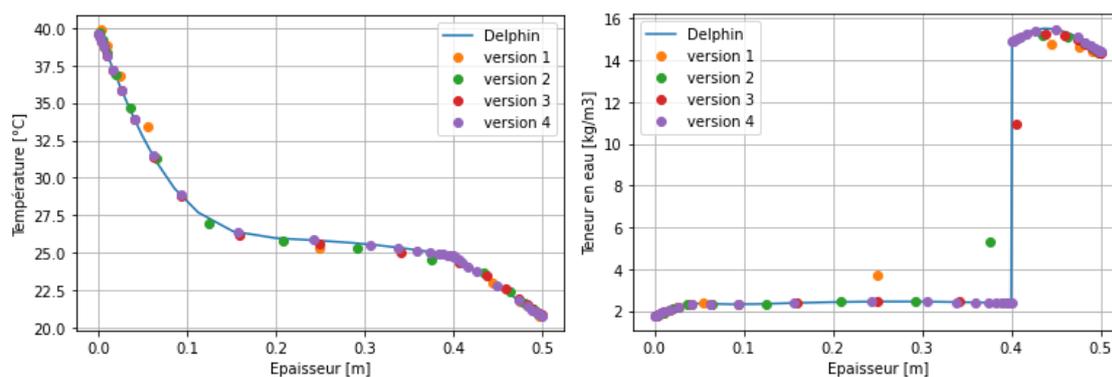


Figure 2.11 – Profil de la température (à gauche) et de la teneur en eau (à droite) dans la paroi le 8 juillet 2016 à 9h30 à Cahors

Le but étant d'évaluer l'impact des transferts hygrothermiques sur les bilans dans la rue ou à l'intérieur, une observation complémentaire est effectuée pour évaluer les flux thermiques et massiques échangés avec l'environnement au niveau des surfaces.

La Figure 2.12 présente les résultats obtenus concernant les flux thermiques et massiques au niveau de la surface extérieure. Ils sont satisfaisants pour les quatre versions, bien qu'une légère différence d'amplitude soit observée pour le maillage le plus grossier. Notons toutefois, que la méthode développée associée aux versions de maillage 1 à 3, entraîne parfois des pics de flux

massique. La quatrième version de maillage (la plus fine) fournit des résultats plus satisfaisants pour le flux massique.

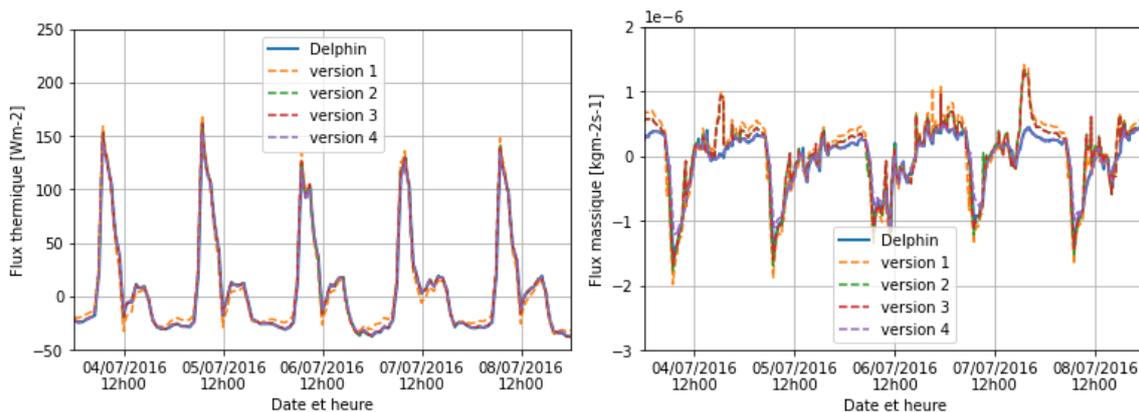


Figure 2.12 – Évolution temporelle du flux thermique (à gauche) et du flux massique (à droite) au niveau de la surface extérieure du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors

La Figure 2.13 présente la même étude au niveau de la surface intérieure. Pour les versions 2 à 4, les résultats suivent bien ceux de l'outil de référence. En revanche, pour la version 1, un déphasage est observé à la fois pour le flux thermique et le flux massique. Cette erreur s'explique par la dimension de la première maille plus élevée pour cette version du maillage.

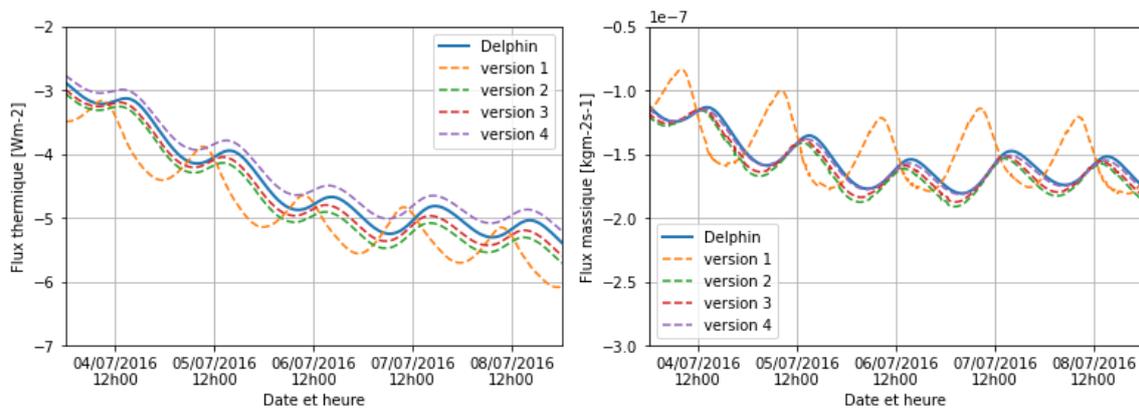


Figure 2.13 – Évolution temporelle du flux thermique (à gauche) et du flux massique (à droite) au niveau de la surface intérieure du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors

Finalement, les résultats obtenus sont plutôt satisfaisants pour les quatre versions de maillage, bien que le maillage le plus grossier entraîne parfois des déphasages. La méthode développée est donc adaptée pour simuler le comportement hygrothermique des parois en conditions estivales.

Le dernier point de comparaison correspond à l'interface brique/isolant. La version 4 de maillage est la seule comportant un affinement à l'interface entre deux couches de matériaux et elle permet donc l'obtention de résultats plus précis que les autres versions (Figure 2.14).

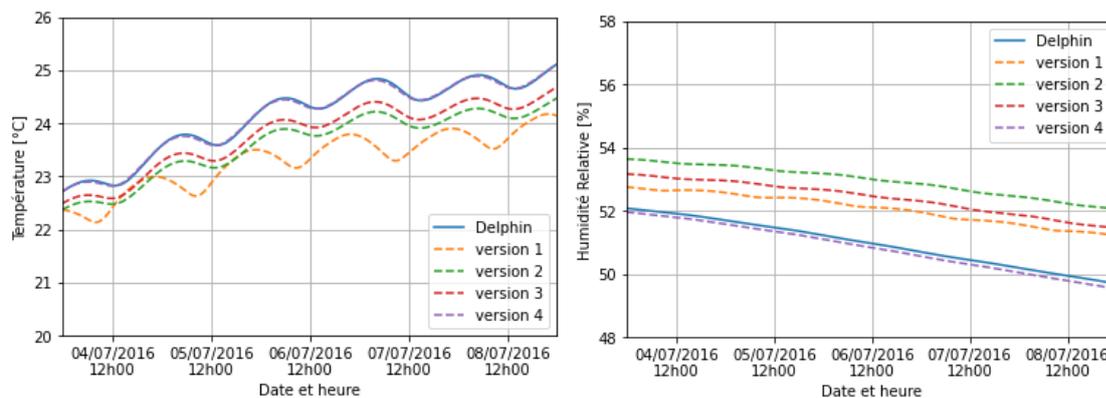


Figure 2.14 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de l'humidité relative (à droite) à l'interface du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors

4.5.2. Évènement pluvieux

Cette seconde période s'étend sur cinq jours, du 22 au 26 novembre 2016. Un évènement de pluie a lieu pendant la nuit du 22 au 23 novembre 2016, ce qui a humidifié la paroi. Durant les jours suivants, une phase de séchage est observée. La Figure 2.15 décrit les principales variables nécessaires pour le calcul des conditions aux limites extérieures de la paroi. Comme précédemment, le schéma numérique proposé associé aux trois versions de maillage est comparé avec l'outil de référence Delphin.

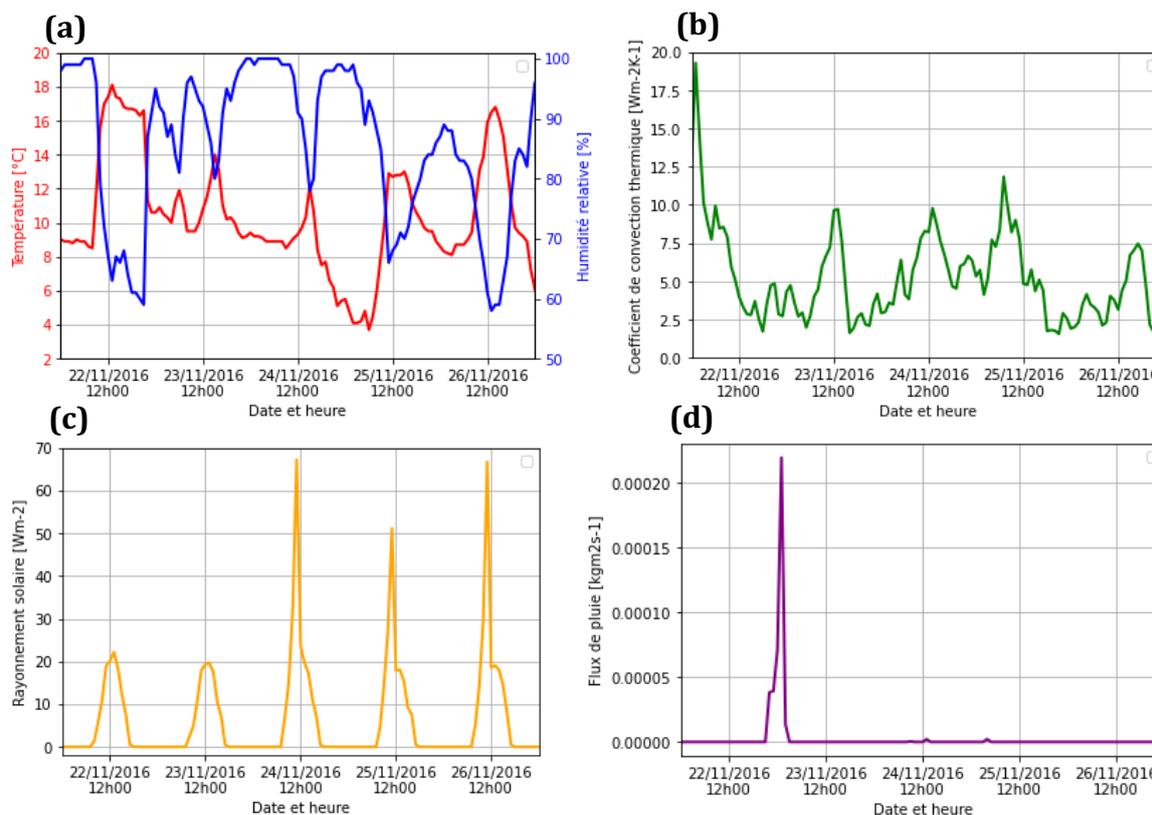


Figure 2.15 – Principales variables utilisées pour calculer les conditions aux limites extérieures : température et humidité relative extérieure (a), coefficient de convection thermique (b), rayonnement solaire incident à la façade (c) et flux de pluie incident à la paroi (d), du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors

La Figure 2.16 montre des résultats très satisfaisants pour l'évolution temporelle de la température et la pression de vapeur au niveau de la surface extérieure pour les trois versions de maillages. La version de maillage 1 entraîne une légère différence d'amplitude sur les pics. Globalement, plus le maillage utilisé est fin, plus les résultats simulés par la nouvelle méthode se rapprochent de ceux de Delphin.

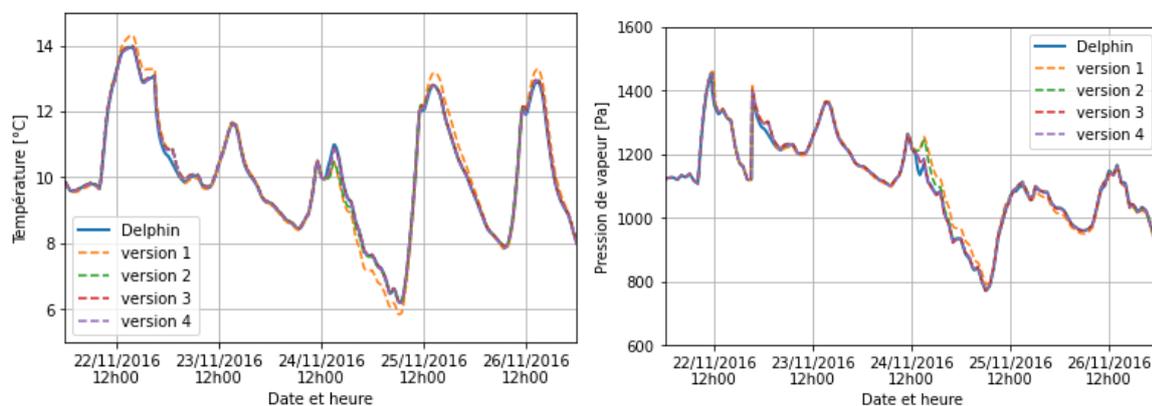


Figure 2.16 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de la pression de vapeur (à droite) au niveau de la surface extérieure du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors.

Les résultats sont très satisfaisants pour la température et la pression de vapeur au niveau de la surface intérieure. Un léger déphasage est toujours observé pour la version 1 de maillage. Néanmoins, l'ordre de grandeur des écarts est très faible.

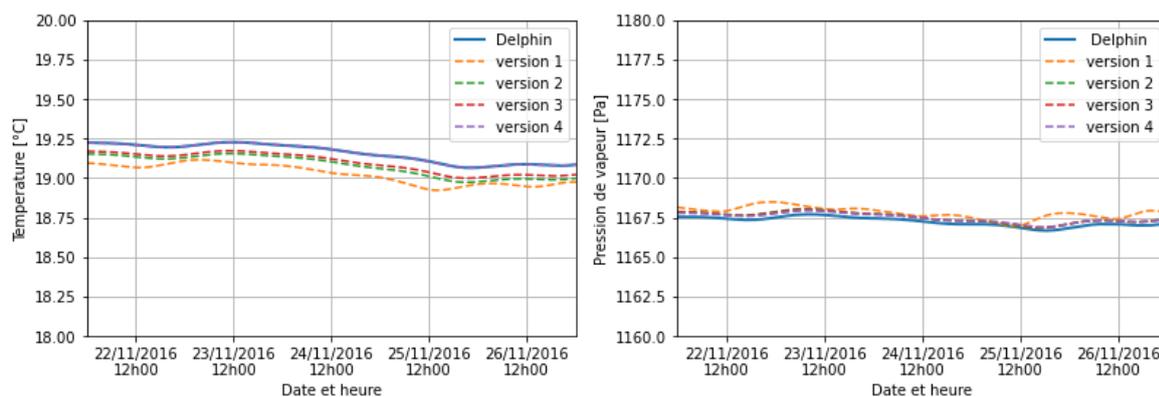


Figure 2.17 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de la pression de vapeur (à droite) au niveau de la surface intérieure du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors.

La méthode développée associée aux trois versions de maillage permet de représenter l'évolution spatiale de la température et de la teneur en eau, d'une manière très satisfaisante aussi bien durant la phase d'humidification de la paroi (Figure 2.18) que durant la phase de séchage (Figure 2.19).

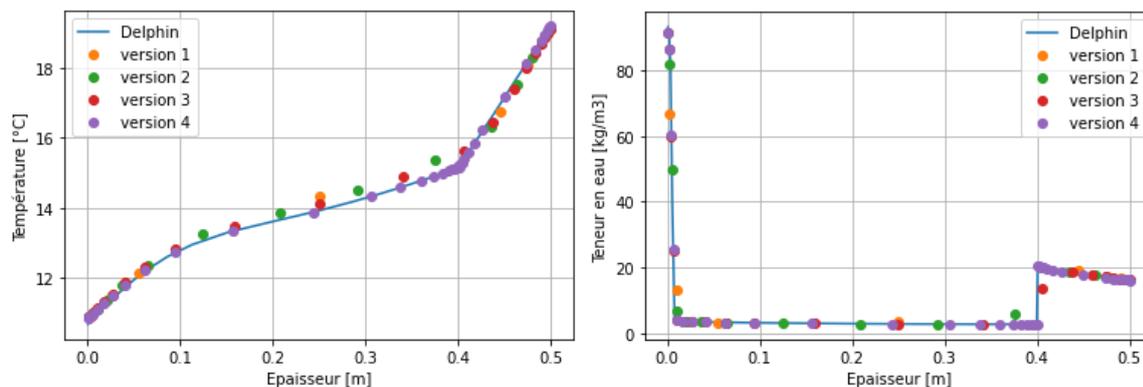


Figure 2.18 – Profil de la température (à gauche) et de la teneur en eau (à droite) dans la paroi le 23 novembre 2016 à minuit à Cahors

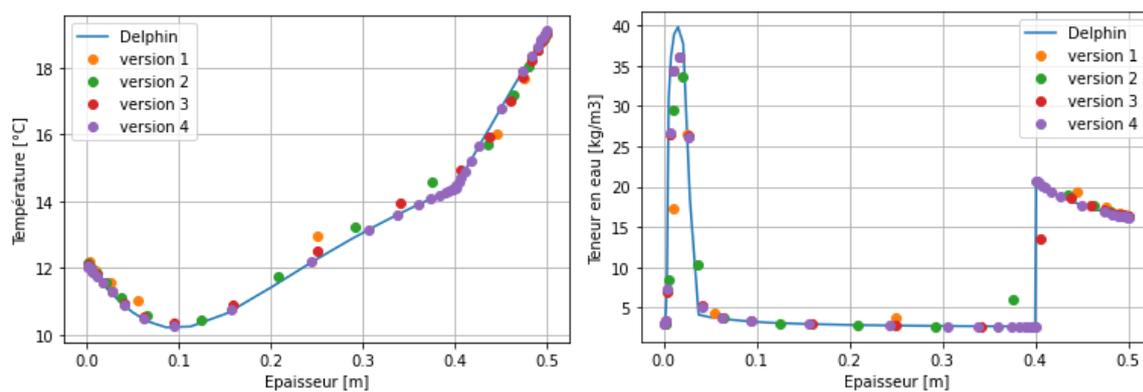


Figure 2.19 – Profil de la température (à gauche) et de la teneur en eau (à droite) dans la paroi le 25 novembre 2016 à midi à Cahors

L'étude des flux massiques et thermiques au niveau des surfaces extérieure (Figure 2.20) et intérieure (Figure 2.21) a également permis de montrer un bon accord entre les résultats simulés par la méthode développée et par l'outil de référence.

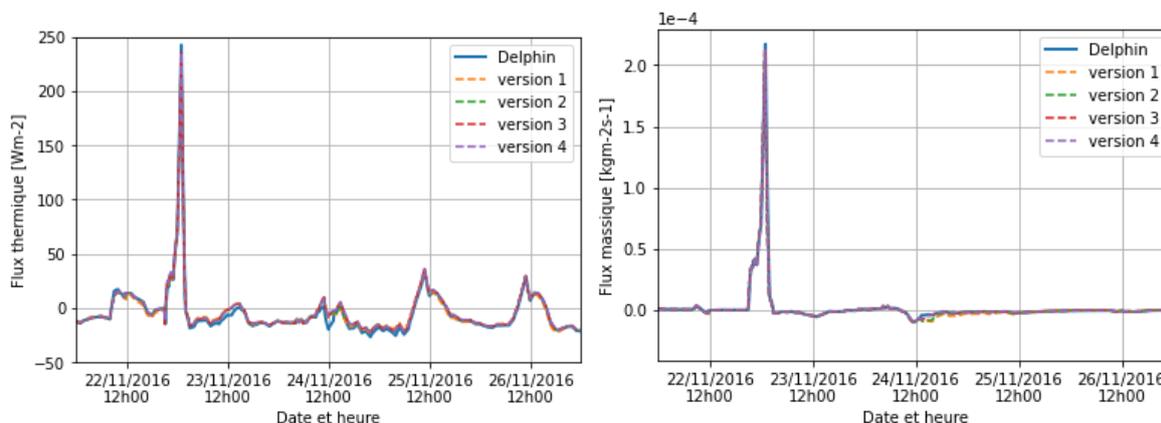


Figure 2.20 – Évolution temporelle du flux thermique (à gauche) et du flux massique (à droite) au niveau de la surface extérieure du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors

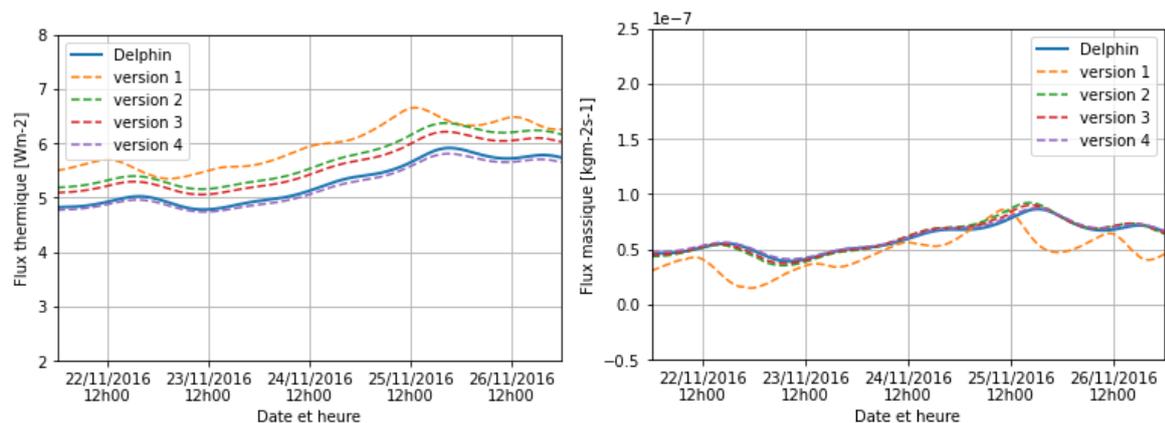


Figure 2.21 – Évolution temporelle du flux thermique (à gauche) et du flux massique (à droite) au niveau de la surface intérieure du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors

Finalement, la validation numérique fournit de bons résultats, y compris durant un évènement de pluie et la phase de séchage qui suit. Les quatre versions de maillage ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants. De légers déphasages sont observés avec la version 1 du maillage. Néanmoins, les écarts de valeurs entraînés sont très faibles.

À l'interface brique/isolant, la version 4 du maillage permet toujours d'obtenir les résultats les plus satisfaisants (Figure 2.22), comme attendu. Un écart plus important est observé pour les autres versions comprenant un maillage non affiné à l'interface.

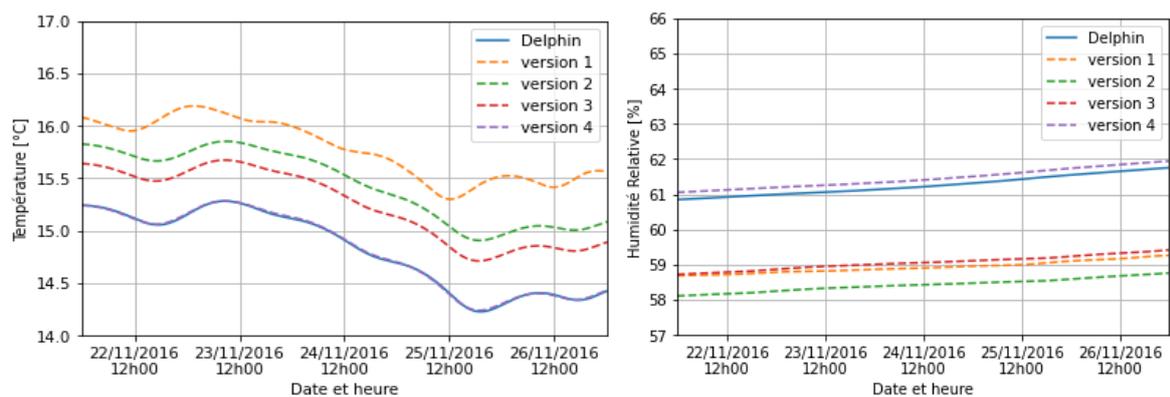


Figure 2.22 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de l'humidité relative (à droite) à l'interface du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors

5. Conclusion

Une nouvelle méthode de résolution numérique des transferts couplés a été développée dans le but spécifique d'intégrer les transferts hydriques à travers les parois dans le modèle de climat urbain TEB. Cette méthode originale lève plusieurs verrous concernant les échelles de résolution spatiotemporelles et les schémas numériques, qui sont très différents entre l'échelle de la paroi et celle de la ville. Des compromis ont donc été trouvés pour assurer des résultats de qualité satisfaisante et pour obtenir une méthode facilement intégrable dans un modèle à l'échelle

urbaine. En effet, elle comprend un schéma de discrétisation IMEX, qui permet d'utiliser une méthode de résolution numérique non itérative, une approche de résolution découplée, qui permet de conserver la structure du code du modèle TEB et l'utilisation de seulement deux pas de temps différents, qui évite l'application d'un pas de temps totalement variable.

Lors de la validation par comparaison avec Delphin, une analyse de sensibilité au maillage a été effectuée sur quinze compositions de paroi et dans trois climats. Cette étude a permis de trouver un compromis concernant la technique de maillage et le nombre de nœuds nécessaires pour la simulation des parois. Finalement, la version 3 du maillage qui comporte entre 15 et 23 nœuds, sans affinement du maillage à l'interface, fournit des résultats de qualité satisfaisante pour étudier les échanges hygrothermiques entre la paroi et son environnement. En revanche, lors de l'étude du risque de moisissure à l'interface, il est nécessaire d'appliquer un affinement du maillage en ce point. Il est alors préconisé d'appliquer la version 4 de maillage.

Ce chapitre s'est concentré sur le développement et la validation d'une méthode de résolution adaptée à la résolution des transferts couplés de masse et de chaleur à travers les parois à l'échelle urbaine. La thèse a pour objectif plus général d'étudier le comportement spécifique des parois dans les centres-villes historiques. Le travail effectué dans ce chapitre n'a pas permis d'évaluer la fiabilité des hypothèses pour représenter les centres anciens. En effet, il est primordial de vérifier que la définition des propriétés des matériaux et le calcul des conditions aux limites, sont pertinents et adaptés au cas d'étude. Des mesures effectuées dans les parois anciennes de Cahors vont nous permettre de valider cet aspect.

Chapitre 3 : Validation expérimentale de la méthode proposée dans le contexte du centre médiéval de Cahors

1. Introduction

Les parois anciennes se caractérisent par leur comportement hygrothermique spécifique, qu'il est nécessaire de considérer lors de leur rénovation. L'évaluation de scénarios de rénovation à l'échelle urbaine fait appel à des modèles de climat urbain qui négligent ce phénomène. Le chapitre précédent consistait à développer une nouvelle méthode de résolution des transferts hygrothermiques spécifiquement adaptée pour l'intégration dans un modèle de climat urbain. Il existe trois méthodes principales pour valider un nouveau modèle de transferts couplés à travers les parois : la validation théorique basée sur une solution analytique, la validation par comparaison inter-modèle et la validation expérimentale (Dong et al., 2020). La méthode développée a été validée numériquement par comparaison inter-modèle avec l'outil de référence Delphin, dans le chapitre précédent. Cette première validation a permis de vérifier la cohérence des résultats obtenus sur quinze parois de compositions différentes et dans trois climats, en considérant la forme urbaine de Cahors. Néanmoins, ce type de validation ne permet pas de vérifier la pertinence des hypothèses effectuées pour représenter les centres-villes anciens.

La validation par comparaison à des mesures in-situ est la seule méthode permettant de vérifier la fiabilité du modèle pour simuler les bâtiments historiques (Huerto-Cardenas et al., 2020; Panico et al., 2023). Cette méthode nécessite de monitorer des parois anciennes (Saïd et al., 1999). Les mesures ainsi obtenues sont alors comparées aux résultats simulés. L'obtention d'un bon accord entre mesures et simulations dépend principalement de la composition de la paroi, de la localisation et du niveau de connaissance des données d'entrée fournies au modèle (Panico et al., 2023).

Ce chapitre consiste donc à valider la méthode développée, par comparaison à des mesures effectuées dans le centre-ville médiéval de Cahors. Ce travail se base sur une approche de Living Lab, mise en place dans ce quartier historique de Cahors. Cette démarche a été développée dans l'objectif de promouvoir une rénovation appropriée et durable des parois anciennes (Claude et al., 2017). Dans le cadre de ce projet, plusieurs bâtiments ont été rénovés à partir d'isolant à base de chaux-chanvre et un monitoring de longue durée a été mis en place au cours de précédentes thèses (Claude, 2018; Claude et al., 2019, 2017; Malagoli de Almeida, 2022). Les matériaux présents sur site ont été caractérisés dans de précédents travaux (Claude, 2018) et une station météorologique a été installée pour enregistrer les conditions locales. Ces éléments permettent de réduire les approximations effectuées sur les données d'entrée. Ainsi, ce chapitre a pour objectif de valider expérimentalement la méthode, mais également les hypothèses effectuées sur les conditions aux limites et les propriétés des matériaux.

2. Centre-ville médiéval de Cahors

L'étude des centres-villes historiques est effectuée ici au travers d'une étude de cas : le quartier médiéval de Cahors (44°26'54"N 1°26'29"E) (Figure 3.1). Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat de Cahors est tempéré océanique sans saison sèche et avec un été tempéré (Cfb). Le centre ancien se caractérise par une forme urbaine dense et complexe avec des rues très étroites (Tableau 3.1). Deux principales orientations de rue sont présentes : nord-sud et est-ouest.



Figure 3.1 – Quartier médiéval de Cahors (Charrier, 2013)

Tableau 3.1 – Indicateurs morphologiques du quartier médiéval de Cahors (Claude, 2018)

Quartier medieval de Cahors	
Géométrie du quartier	
Densité brute	0,589
Densité nette	3,93
Rapport d'aspect H/W	4,2
Contiguïté	0,424
Compacité	5,99

Les bâtiments ont principalement été construits au 13^{ème} siècle. Deux principales typologies de bâtiments co-existent dans ce centre historique. La première typologie correspond à des bâtiments dont toutes les parois sont construites à partir de briques massives, autour de 40 cm. La seconde typologie regroupe les bâtiments dont les façades comportent des pans de bois. Ces bâtiments sont généralement constitués de murs très épais au RDC (de l'ordre de 1 m) et de parois à pans de bois, remplies avec des briques moins épaisses (environ 14 cm) pour les autres étages (Claude, 2018).

Au cours des siècles, les parois du centre ancien ont subi des rénovations successives, qui rendent leurs compositions particulièrement hétérogènes. L'usure des façades avec le temps implique également une détérioration irrégulière du revêtement extérieur des parois anciennes.

Le centre-ville médiéval est classé site patrimoine remarquable. Il est également soumis au Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur (PSMV). L'objectif de ces actions est de protéger l'intérêt culturel du quartier. Le PSMV limite notamment les interventions possibles sur le bâti, en indiquant que les rénovations des parois et le remplacement des fenêtres ne doivent pas modifier l'apparence extérieure des bâtiments (Claude, 2018). De ce fait, l'isolation par l'extérieur n'est pas la solution à favoriser. Or l'isolation par l'intérieur présente un certain nombre de contraintes notamment concernant l'équilibre hydrique de la paroi (Straube et Schumacher, 2007).

Par ailleurs, le centre médiéval de Cahors fait face à la précarité énergétique de ses habitants, qui n'ont pas les moyens de rénover leur logement. Les habitants fuient le centre médiéval vers des logements plus modernes et plus confortables. Ainsi, le taux de vacance est très élevé dans le quartier historique de Cahors (Claude, 2018).

De ces constants est né le projet ENERPAT, dont l'acronyme est la contraction d'énergie et patrimoine. Au cours de ce projet, le LMDC et le Grand Cahors ont collaboré dans le but de promouvoir une éco-rénovation des parois anciennes, mais également de revitaliser le centre ancien et de ramener la population dans ce quartier. En effet, la rénovation semble avoir un impact pertinent sur la revitalisation des centres-villes historiques (Roberti et al., 2017). Ainsi, une démarche de Living Lab a été instaurée (Claude et al., 2017). Un isolant a été développé en partenariat avec des acteurs locaux de la construction. Il s'agit un mélange de chaux et de chènevotte. La chènevotte, qui est issue du processus de défibrage de la tige du chanvre, correspond au granulats, tandis que la chaux joue le rôle du liant. Ce matériau a été utilisé pour la rénovation des parois de plusieurs bâtiments. Ces bâtiments ont également été instrumentés dans le but de suivre le comportement des parois rénovées et leur impact sur les conditions dans le bâtiment (Claude, 2018; Claude et al., 2019, 2017; Malagoli de Almeida, 2022).

3. Instrumentation du centre-ville de Cahors

3.1. Description générale

Dans le cadre d'une collaboration entre le LMDC et le Grand Cahors, différents capteurs ont été mis en place dans le quartier médiéval de Cahors (Figure 3.2). La thèse de Sophie Claude, puis celle de Marina Malagoli ont permis la rénovation de plusieurs parois à partir de matériaux biosourcés et l'instrumentation de deux bâtiments (Claude, 2018; Malagoli de Almeida, 2022). Les deux bâtiments instrumentés se situent au sein de l'îlot Chico Mendes :

- Le bâtiment 1 au 46 rue Saint-Urcisse a des murs de 40 cm d'épaisseur et constitués de briques massives ;
- Le bâtiment 2 au 50 rue Saint-Urcisse est construit en pans de bois avec un remplissage de briques de 14cm.

L'instrumentation permet d'enregistrer des mesures in-situ sur les conditions à l'intérieur des bâtiments et dans plusieurs parois anciennes rénovées à partir de différentes solutions. Les conditions météorologiques locales sont également mesurées, à l'aide d'une station positionnée sur le toit de la mairie. Ce suivi de données permet ensuite d'étudier la pertinence des solutions de rénovation mises en place ou encore de valider des modèles numériques.

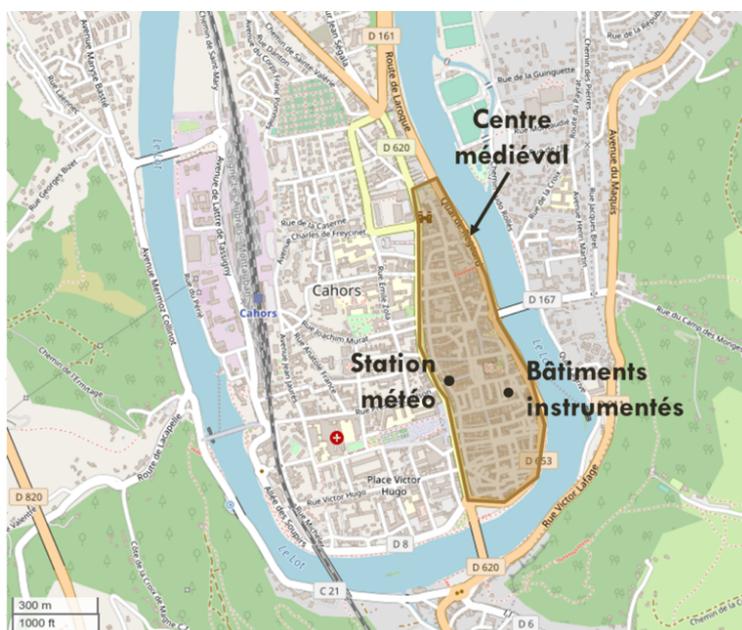


Figure 3.2 – Localisation du centre médiéval de Cahors et des lieux instrumentés

3.2. Bâtiments instrumentés

Les deux bâtiments monitorés sont adjacents et ils comportent un total de trois parois instrumentées (Figure 3.3). Ces parois sont localisées sur la façade ouest des bâtiments. Comme on peut le voir sur la Figure 3.3, l'enduit extérieur a disparu sur une partie des façades, tandis qu'en d'autres points, il reste une couche d'enduit usée. Dans cette étude, nous avons choisi de ne pas considérer d'enduit extérieur.

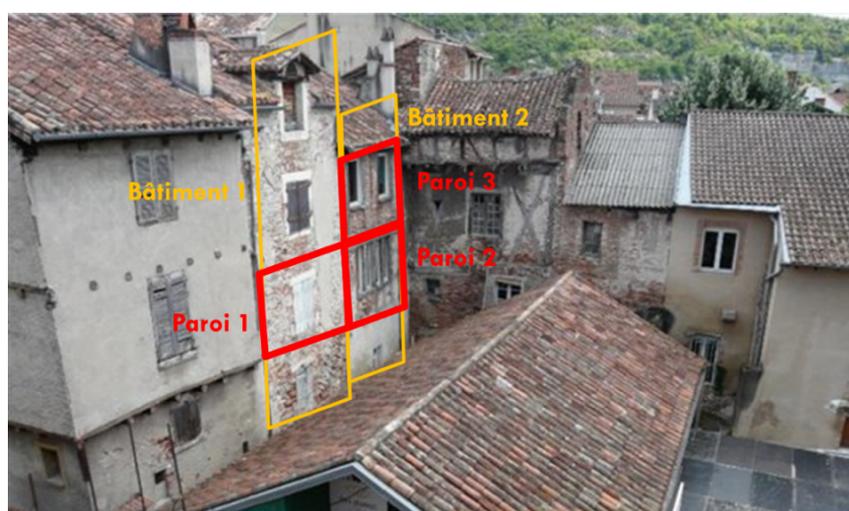


Figure 3.3 – Localisation des trois parois instrumentées

Les bâtiments instrumentés sont des bâtiments vacants, ce qui signifie que les gains internes sont nuls. Les conditions intérieures sont donc en évolution libre. Les volets restent fermés en permanence. Pour simuler une occupation du bâtiment, des radiateurs électriques avec des températures de consigne et des humidificateurs sont utilisés (Figure 3.4). Toutes les pièces adjacentes aux parois monitorées sont équipées de capteurs de la marque KIMO, enregistrant les conditions hygrothermiques intérieures.

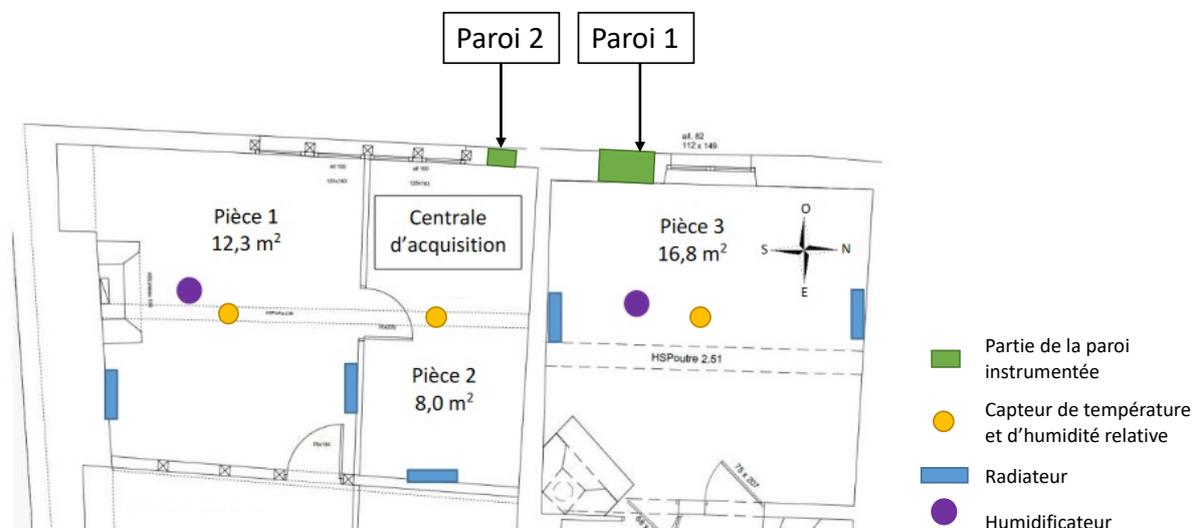


Figure 3.4 – Descriptif des dispositifs expérimentaux installés au R+1 (adapté de Malagoli de Almeida, (2022))

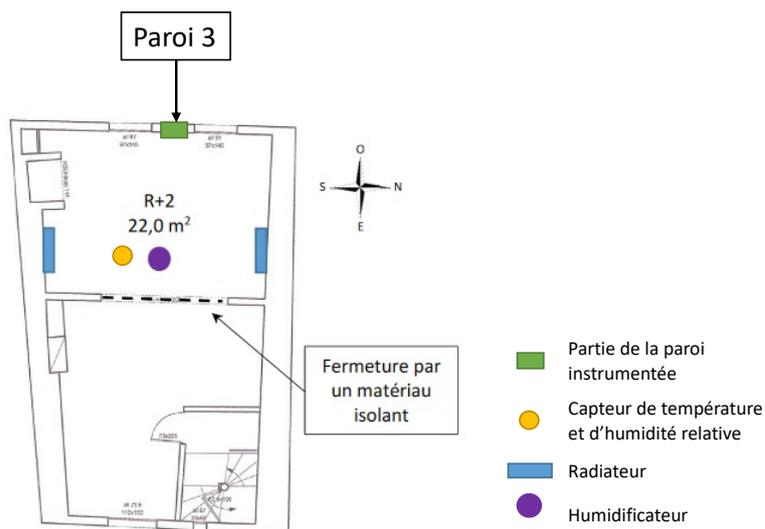


Figure 3.5 – Descriptif des dispositifs expérimentaux installés au R+2 (adapté de Malagoli de Almeida, (2022))

La première paroi étudiée est localisée au premier étage du bâtiment 1 au 46 rue Saint-Urcisse et se compose de 40 cm de brique rénovée à partir de chaux-chanvre (Figure 3.6).

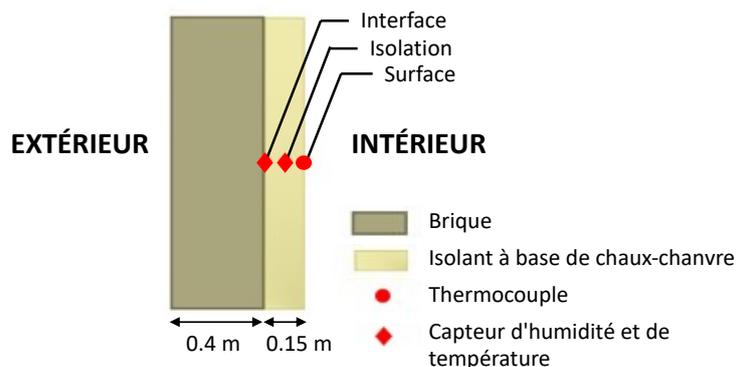


Figure 3.6 – Composition et instrumentation de la paroi 1

La deuxième paroi se situe au premier étage du second bâtiment au 50 rue Saint-Urcisse et comporte 14 cm de briques avec une structure à pans de bois et rénovée avec le même isolant à base de chaux-chanvre (Figure 3.7).

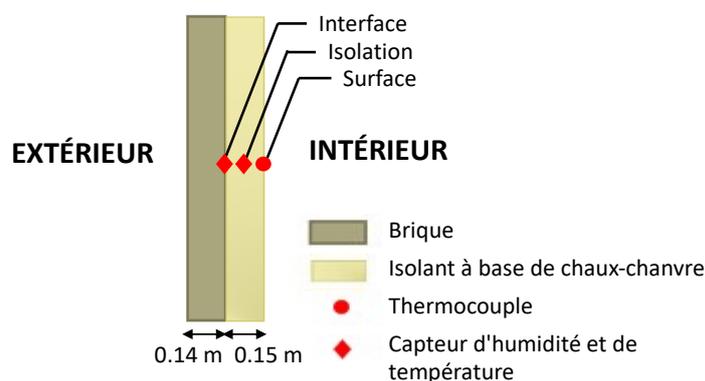


Figure 3.7 – Composition et instrumentation de la paroi 2

La troisième paroi est située au second étage du 50 rue Saint-Urcisse. Cette paroi est également constituée de 14 cm de briques et d'une typologie à pans de bois. Pour cette paroi, la technique d'isolation issue d'une précédente rénovation a été conservée. Elle se compose d'une lame d'air, de polystyrène et d'une plaque de plâtre (Figure 3.8).

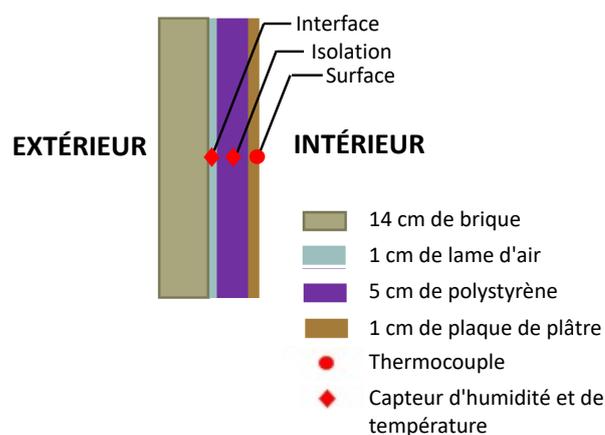


Figure 3.8 – Composition et instrumentation de la paroi 3

L'instrumentation des trois parois est effectuée selon la même méthodologie : un thermohygromètre à l'interface entre brique et isolant, un second thermohygromètre à mi-isolant et un thermocouple au niveau de la surface intérieure (Figure 3.9). Les thermohygromètres de la marque Honeywell permettent de mesurer la température et l'humidité relative à l'intérieur de la paroi. Pour les positionner, il est donc nécessaire de percer la paroi. Une fois le capteur positionné, le trou est fermé à l'aide de silicone (Figure 3.9). L'installation des thermocouples mesurant la température de surface est plus simple : ils sont fixés à la surface intérieure de la paroi en utilisant du ruban adhésif.

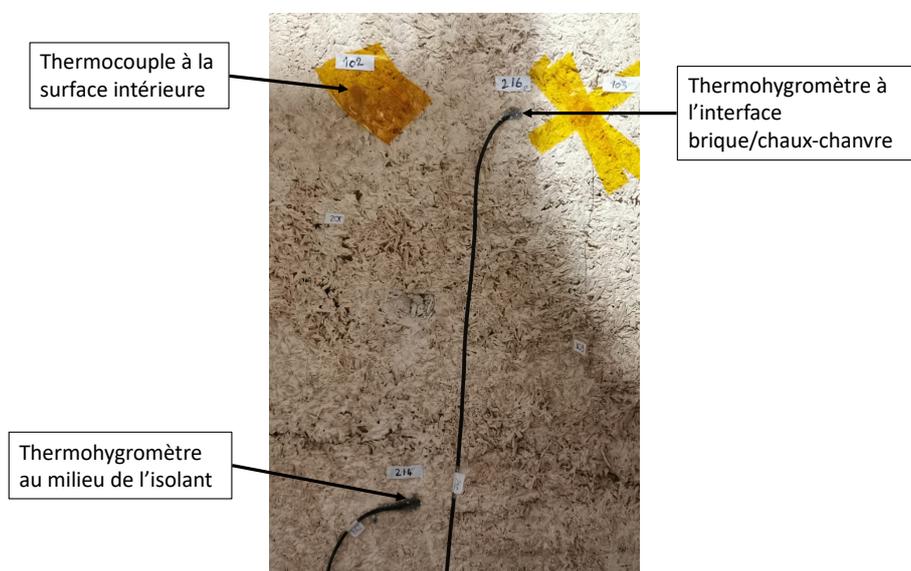


Figure 3.9 – Instrumentation de la paroi 2

Les propriétés des différents capteurs utilisés pour les mesures in-situ dans les bâtiments sont détaillées dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Propriétés des capteurs utilisés pour l'instrumentation des bâtiments (Malagoli de Almeida, 2022)

Grandeur mesurée	Type de capteur	Plage de mesure	Précision
Température de surface	Thermocouple de type K (Alumel-Chromel)	-100 à 1370 °C	±0,3 °C
Température et humidité relative de l'air ambiant	Thermohygromètre (KIMO KH50 et KH110)	-20 à 70 °C 5 à 95 %HR	De -20 °C à 0 °C : ± 0,6 °C De 0 à 30 °C : ± 0,5 °C De 30 à 70 °C : 1,5 % de la valeur lue De 15 °C à 25 °C : ± 2 %HR
Température et humidité relative dans la paroi	Pt1000 + Thermohygromètre à polymère capacitif (Honeywell hih4602-C)	-40 à 85 °C 0 à 100 %HR	± 0,3 °C ± 3,5 %HR

Les mesures enregistrées par les sondes Honeywell et les thermocouples sont récupérés et gérées par des centrales d'acquisition. Deux centrales d'acquisition sont utilisées, une centrale Agilent

au R+1 et une centrale Gantner au R+2 (Figure 3.10). Les signaux des thermohygromètres de la marque Honeywell ont été traités à l'aide d'une transformée de Fourier. Ainsi, un filtre gaussien est appliqué pour supprimer les raies de haute fréquence (Malagoli de Almeida, 2022).



Figure 3.10 – Dispositifs expérimentaux pour la récupération des données au R+1 (à gauche) et au R+2 (à droite) (Malagoli de Almeida, 2022)

Seuls les instruments utilisés dans cette étude sont présentés. Davantage de détails sur l'instrumentation des deux bâtiments et notamment sur le positionnement exact des capteurs peuvent être trouvés dans la thèse de Marina Malagoli de Almeida (2022).

3.3. Station météorologique

Une station météorologique a été installée pour mesurer les conditions extérieures locales. Il est intéressant de noter qu'en milieu urbain, ces données sont particulièrement variables d'un point à l'autre. Il est donc relativement complexe de choisir l'emplacement d'une station météorologique urbaine. Il est plutôt recommandé de centrer son étude sur un site représentatif de la ville ou du quartier étudié. Cependant, de manière générale, le positionnement d'une unique station météorologique en un point donné n'est pas une solution optimale et ne permettra pas de retirer des données représentatives pour l'ensemble des grandeurs météorologiques (Oke, 2006, 2004). Chaque type de capteurs nécessite un positionnement adapté, pour que les données mesurées soient représentatives de la zone urbaine étudiée.

Dans notre cas d'étude, plusieurs contraintes comme le PSMV ou les rues particulièrement étroites ont fait qu'il n'a été possible de ne placer qu'une seule station météorologique regroupant l'ensemble des capteurs. Elle a été positionnée sur un toit dans le centre médiéval de Cahors, proche des bâtiments instrumentés (Figure 3.11). Elle fournit des données concernant : la température, l'humidité relative, la quantité de précipitations, le rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent (Tableau 3.3).



Figure 3.11 – Station météorologique située sur un toit du centre médiéval

Tableau 3.3 – Description des capteurs de la station météorologique Vantage Pro

Grandeur mesurée	Type de capteur	Plage de mesure	Précision
Vitesse du vent	Anémomètre	1 à 80 m/s 1 à 320 km/h	$\pm 5 \%$
Direction du vent	Girouette	0 à 360°	$\pm 3^\circ$
Température et humidité relative	Capteur température/humidité	-40 °C à 65 °C 1 à 100 %	$\pm 0,5 \text{ °C}$ $\pm 3 \text{ \%HR}$
Précipitation	Pluviomètre	0 à 6553 mm	$\pm 4 \%$
Rayonnement solaire	Pyranomètre	400 à 1100 nm 0 à 1800 W/m ²	$\pm 5 \%$
Indice UV	Capteur rayonnement UV	0 à 16	$\pm 5 \%$

4. Méthodologie de la validation expérimentale

4.1. Principe

Cette partie vise à vérifier la fiabilité de la méthode développée pour simuler le centre médiéval de Cahors. Cette étude s'appuie sur les données mesurées in-situ et est donc réalisée en conditions réelles, puisque ni les conditions intérieures ni les conditions extérieures ne sont contrôlées.

Les installations permettant de récupérer des mesures in-situ ont été présentées dans la partie précédente. Elles permettront à la fois de fournir les données d'entrée au modèle mais également de comparer les résultats des simulations à des données in-situ (Figure 3.12).

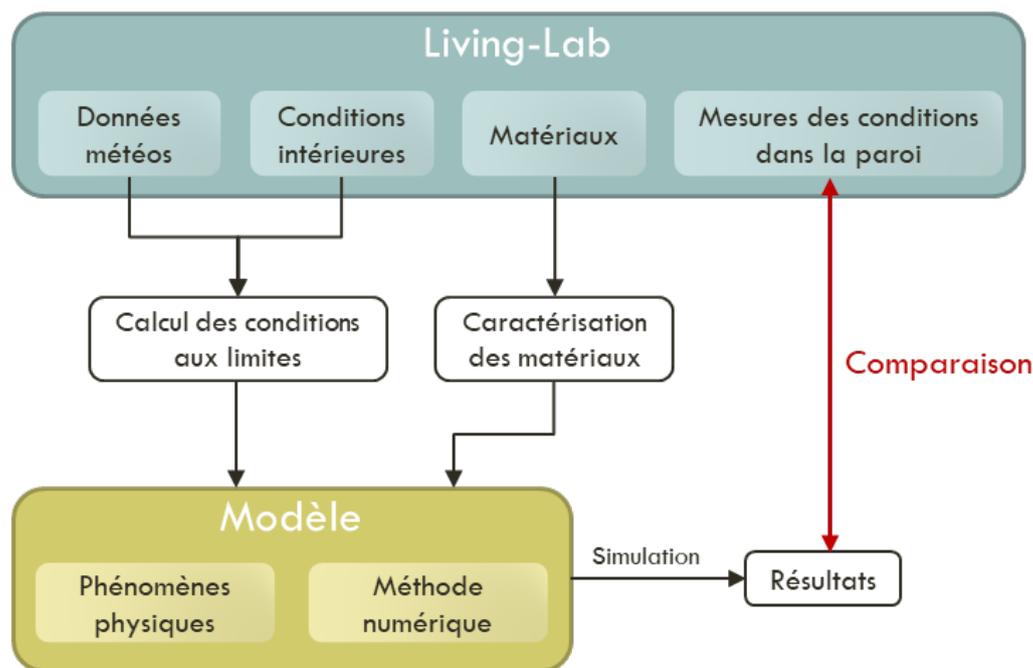


Figure 3.12 – Méthodologie pour la comparaison des données simulées et mesurées

La méthodologie de comparaison est appliquée aux trois parois présentées dans la section 3.2, en utilisant des données enregistrées entre le 15 mars 2021 et le 17 janvier 2022. La simulation se divise en deux temps : une période d’initialisation et une période de comparaison (Tableau 3.4). La paroi est initialisée à une température et une humidité relative uniforme, déterminée à partir des capteurs. Puis, la phase d’initialisation permet d’obtenir des conditions plus représentatives dans chaque maille. La période d’initialisation dure entre quinze jours et un mois. Ensuite, la période de comparaison correspond à la durée maximale durant laquelle l’instrumentation a fourni des données en continu. Elle est donc définie en fonction des différentes contraintes telles que l’étalonnage, l’installation et le bon fonctionnement des capteurs, le retrait ou la pose d’un nouvel isolant. Les différentes étapes du monitoring sont décrites de manière précise dans la thèse de Malagoli de Almeida (2022).

Tableau 3.4 – Périodes d’initialisation et de comparaison des différentes parois

	Période d’initialisation			Période de comparaison		
	Début	Fin	Durée	Début	Fin	Durée
Parois 1 et 2 (R+1)	15/03/21	15/04/21	1 mois	15/04/21	17/01/22	9 mois
Paroi 3 (R+2)	15/03/21	31/03/21	15 jours	01/04/21	27/05/21	2 mois

Une analyse de sensibilité au maillage est menée. Ainsi, chaque paroi est simulée avec les quatre techniques de maillage différentes allant d’un maillage très grossier à un fin, avec ou sans affinement à l’interface (voir le Tableau 2.2 du Chapitre 2). Le détail concernant le positionnement des nœuds de discrétisation est présenté pour chaque paroi dans la Figure 3.13.

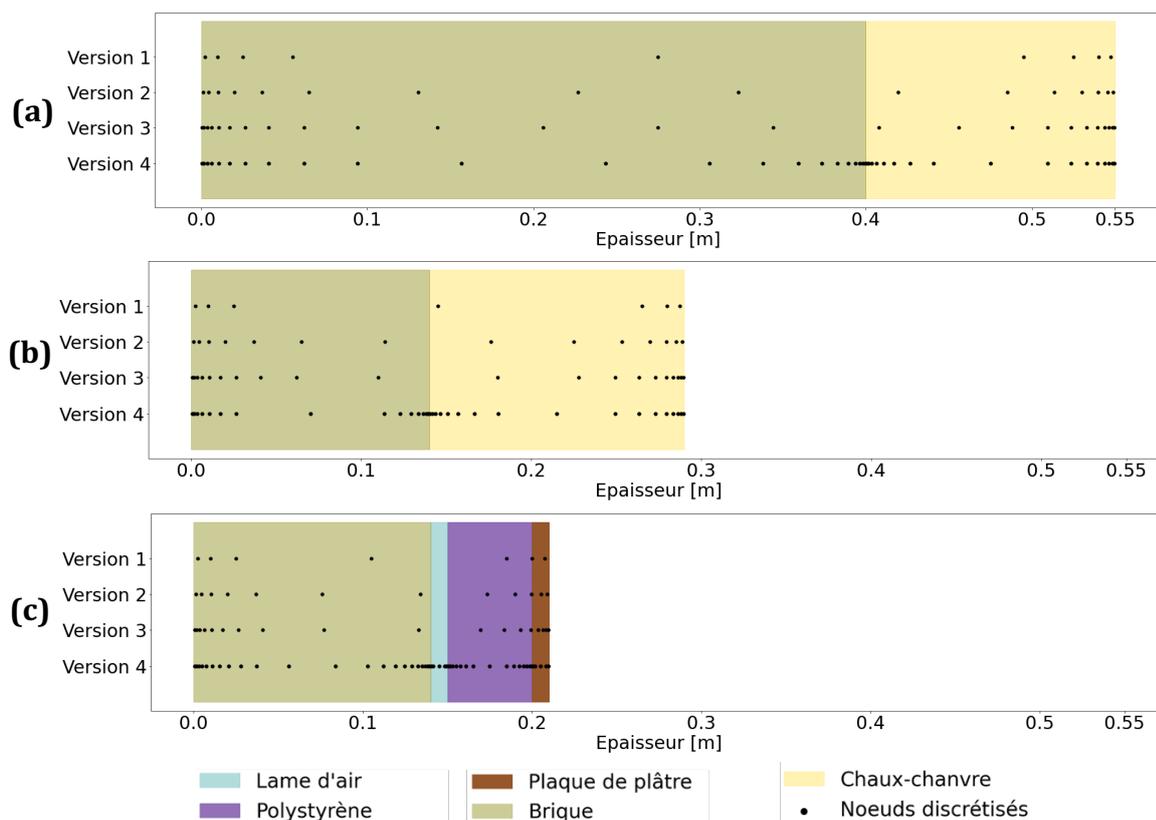


Figure 3.13 – Versions de maillage appliquées à la paroi 1 (a), à la paroi 2 (b) et à la paroi 3 (c)

4.2. Propriétés des matériaux

Les parois étudiées sont composées de plusieurs matériaux (brique, isolant à base de chaux-chanvre, polystyrène, lame d'air ou encore plaque de plâtre). Il est nécessaire de fournir au modèle les propriétés hygrothermiques de ces matériaux. Elles sont décrites dans le Tableau 3.5 et sont issues de différentes sources : de la caractérisation en laboratoire réalisée au LMDC au cours d'une précédente thèse, de la base de données de Delphin 6.1 ou encore de publications.

Tableau 3.5 – Propriétés hygrothermiques des matériaux

	Masse volumique ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	Capacité thermique c_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	Conductivité thermique sèche λ_{dry} ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Perméabilité à la vapeur d'eau μ (-)	Coefficient d'absorption capillaire A_w ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-0.5}$)	Teneur en eau à saturation w_{sat} ($kg \cdot m^{-3}$)	Source des valeurs
Brique du 16ème siècle	1616	800	0,49	9	0,28	388	Claude (2018)
Polystyrène expansé	23	1500	0,036	96	0	920	Base de données de Delphin (ID 187)
Plaque de plâtre	745,07	1825,94	0,1769	11	0,179	574,931	Base de données de Delphin (ID 599)
Chaux-chanvre	440	1000	0,107	6,5	0,2	789	Claude (2018)
Lame d'air (d'épaisseur 10 mm)	1,3	1050	0,067	1	0	0,000017	Base de données de Delphin (ID 15 modifié)

Les propriétés utilisées pour la brique sont issues de la caractérisation d'une brique du 16^{ème} siècle qui a été fournie et datée par le service du patrimoine de la ville de Cahors (Claude, 2018). Elle avait été récupérée dans des projets antérieurs, lors de la démolition de bâtiments du centre ancien de Cahors. Le mélange chaux-chanvre est un matériau qui a été développé par un artisan puis caractérisé au LMDC par Claude (2018) (Figure 3.1). Les caractéristiques de la plaque de plâtre, de la lame d'air et du polystyrène sont extraites de la base de données de Delphin.



Figure 3.14 – Échantillons utilisés pour la caractérisation de la brique du 16^{ème} siècle (en haut à gauche) et pour le mélange chaux-chanvre (en bas à droite) (Claude, 2018)

Le modèle nécessite de paramétrer des fonctions permettant de décrire l'évolution du **comportement du matériau en fonction de son niveau d'humidité**. Elles permettent de caractériser le stockage d'humidité, le transfert de vapeur d'eau et le transfert d'eau liquide. La base de données de Delphin fournit les courbes nécessaires pour la définition de ces fonctions. Ces courbes sont donc directement utilisées pour la plaque de plâtre et le polystyrène dont les propriétés sont extraites de cette base de données. Rappelons que, dans ce chapitre, la base de données de Delphin est seulement utilisée pour définir les données d'entrée du modèle de transferts couplés développé.

Le cas de la lame d'air est plus spécifique, car les données fournies par Delphin négligent le stockage d'humidité dans la lame d'air. Ce phénomène est pourtant indispensable pour décrire correctement le comportement hydrique dans cette zone. Un modèle de stockage d'humidité dans la lame d'air, basé sur les données de Asphaug et al. (2022), a donc été considéré.

L'outil Delphin permet également de créer de nouveaux matériaux. Cela consiste à adapter les fonctions d'un matériau proche, en saisissant les caractéristiques du matériau étudié. Les courbes sont alors redimensionnées. Cette méthode est ici appliquée pour obtenir les fonctions de la brique du 16^{ème} siècle, car la caractérisation effectuée n'est pas suffisante pour définir ces fonctions. Le matériau le plus proche utilisé est une brique ancienne dont l'identifiant dans la base de données de Delphin est [496]. Cette brique a été choisie car ses propriétés hygrothermiques étaient similaires à celles de la brique étudiée.

La caractérisation du chaux-chanvre était plus poussée, ce qui a permis de décrire les fonctions du chaux-chanvre entièrement à partir de données mesurées.

Concernant le stockage d'humidité, la méthode présentée par Malagoli de Almeida (2022) et Seng (2018) a été utilisée. Elle consiste à s'appuyer sur la caractérisation expérimentale de la courbe de sorption effectuée par méthode gravimétrique par Claude (2018). Ces résultats ont permis de calculer les coefficients associés au modèle de sorption GAB (Blahovec et Yanniotis, 2008). La caractérisation expérimentale a fourni une courbe pour l'adsorption et une courbe pour la désorption. Notre modèle ne tenant pas compte des effets d'hystérésis, une seule courbe doit être renseignée en entrée. Finalement, pour décrire le stockage d'humidité, le modèle GAB associé à la courbe de désorption est retenu, selon les recommandations de Vogelsang et al. (2013) :

$$w = \frac{w_m C K \varphi}{(1 - K \varphi)(1 - K \varphi + C K \varphi)} \quad (3-1)$$

Les paramètres C , K et w_m sont à déterminer à partir des résultats expérimentaux.

Les transferts de vapeur sont calculés en utilisant la perméabilité à la vapeur d'eau. La caractérisation en laboratoire de Claude (2018) a permis de déterminer la valeur de la perméabilité à la vapeur d'eau du chaux-chanvre, à partir de l'essai de la coupelle. Künzle (1995) suggère de considérer le coefficient de transfert de vapeur constant, car il est quasiment constant dans la région de sorption et les transferts de vapeur ont principalement lieu dans cette région. Les résultats de la caractérisation ne donnant pas suffisamment de détails sur l'évolution de la perméabilité de la vapeur en fonction de la teneur en eau, il a donc été fixé constant.

Enfin, le coefficient de conductivité liquide est déterminé à partir de l'essai d'absorption d'eau par capillarité, en suivant la méthode détaillée par Malagoli de Almeida (2022). Cet essai permet de calculer le coefficient de diffusion liquide pour différentes teneurs en eau, en appliquant la formule de Künzle (1995). Le coefficient de conductivité liquide peut ensuite être déduit. La méthode et les formules utilisées sont présentées en détail dans la section 3.4.4 du Chapitre 1.

Les échanges au niveau de la surface extérieure sont conditionnés par les propriétés radiatives du matériau de surface. Dans le cas des trois parois étudiées, la surface extérieure est supposée être composée de briques. Les propriétés radiatives de la brique étudiée n'ont pas été déterminées expérimentalement. Son émissivité est fixée à 0.9 et son coefficient d'absorption solaire est supposé égale à 0.7 (Malagoli de Almeida, 2022).

4.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont un élément clé pour simuler le comportement des parois. Les méthodes utilisées pour les définir sont similaires à celles du chapitre précédent. La principale différence est la disponibilité de données mesurées. Ainsi, le fichier météorologique utilisé est issu de la station météorologique locale, l'initialisation de la paroi est déduite des conditions mesurées in-situ et les conditions aux limites intérieures sont désormais variables (Figure 3.15).

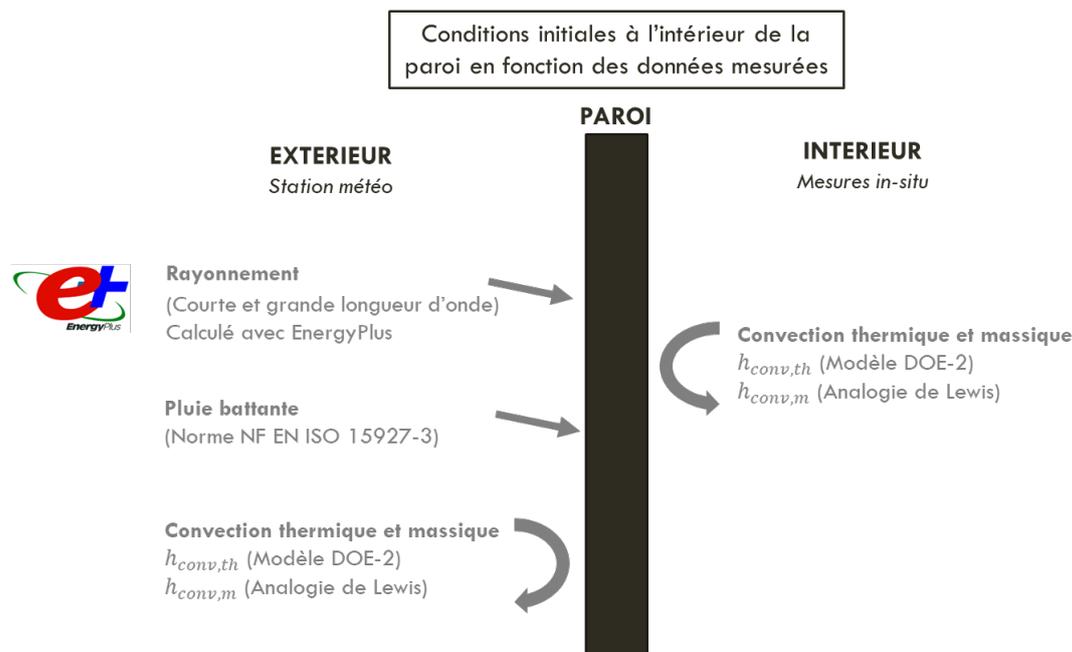


Figure 3.15 – Conditions initiales et conditions aux limites définies pour la simulation des parois instrumentées

Pour rappel, les conditions aux limites au niveau de la surface extérieure sont définies de manière similaire au chapitre précédent :

- Les échanges convectifs sont calculés à partir de la température et de l'humidité relative mesurées par la station météorologique. Le coefficient de convection thermique est calculé à partir d'EnergyPlus en utilisant le modèle DOE-2 et le coefficient de convection massique est déduit à partir de l'analogie de Lewis.
- La pluie incidente à la paroi est estimée à partir de la pluie horizontale enregistrée sur le toit et en appliquant la norme NF EN ISO 15927-3 (2009), le coefficient d'atténuation sélectionné est toujours de 0,07.
- Le rayonnement à courte longueur d'onde incident à un plan horizontal est mesuré par la station. Le flux solaire radiatif incident à la paroi est ensuite calculé en simulant le bâtiment d'intérêt avec EnergyPlus. Notons que les deux bâtiments instrumentés sont simulés séparément. Ainsi, des résultats différents sont obtenus pour les trois parois étudiées.
- Le rayonnement à grande longueur d'onde provenant des particules présentes dans l'atmosphère n'est pas mesuré par la station météorologique. L'outil EnergyPlus permet d'estimer cette valeur à partir des autres variables météorologiques. La méthode présentée dans l'Annexe A, est ensuite appliquée pour calculer le flux infrarouge incident aux façades simulées, en tenant compte des échanges avec l'atmosphère et l'environnement urbain.

Finalement, la Figure 3.16 présente l'évolution temporelle des principales variables impactant les conditions aux limites extérieures sur la période d'initialisation et de comparaison. Elle montre ainsi l'évolution de la température extérieure, de l'humidité relative extérieure, du flux de pluie incident, des flux radiatifs à courte et grande longueur d'onde. La quantité de pluie battante

incidente est identique pour les trois parois étudiées orientées ouest. En revanche, le calcul des flux radiatifs incidents est différencié pour les trois parois étudiées.

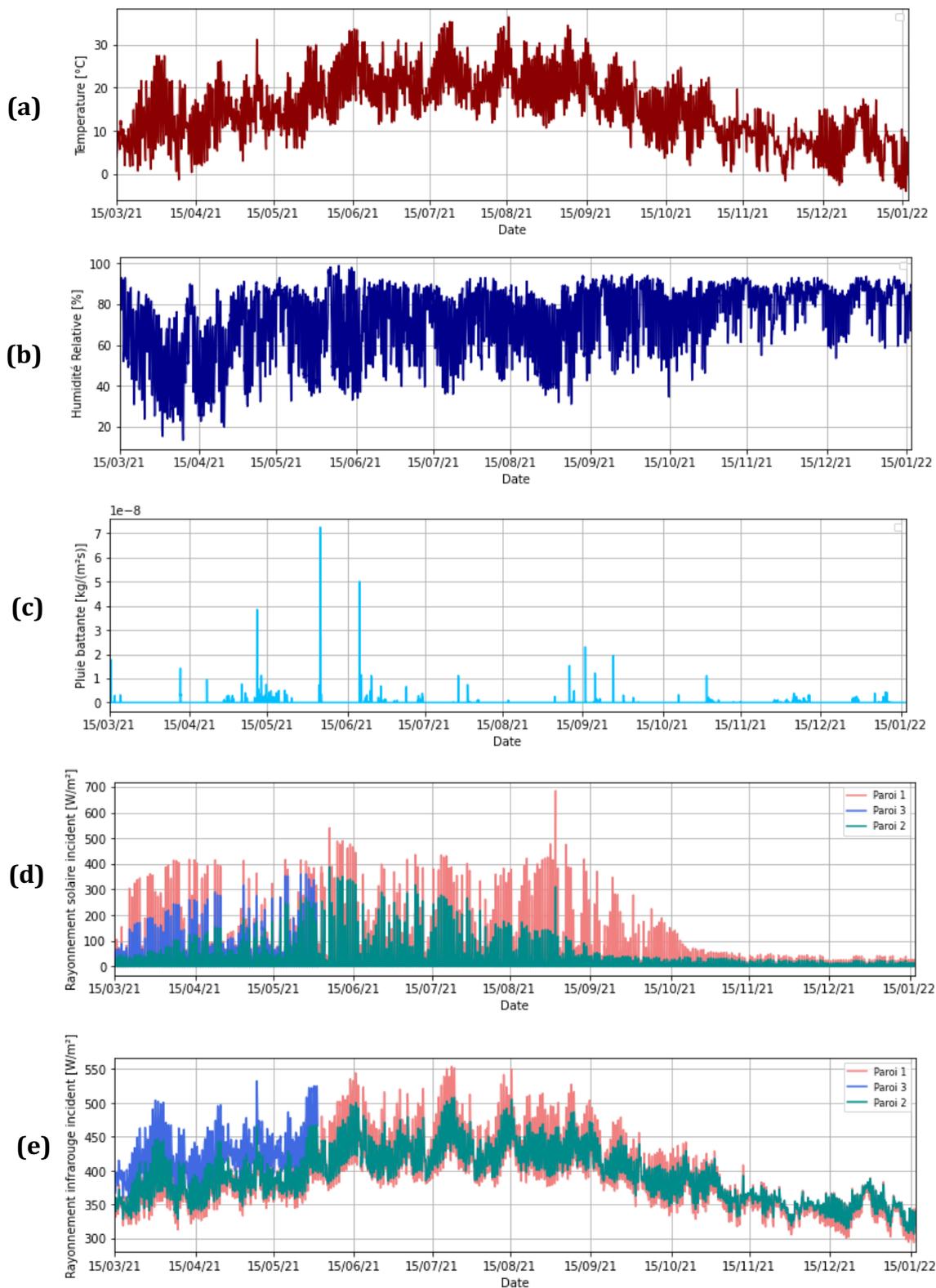


Figure 3.16 – Évolution temporelle des principales variables intervenant dans le calcul des conditions aux limites extérieures : température (a), humidité relative (b), flux de pluie incident aux parois (c), rayonnement solaire incident (d) et rayonnement infrarouge incident aux trois parois (e)

Dans cette partie, les conditions intérieures sont variables et calculées à partir de la température et de l'humidité relative mesurées dans chaque pièce. Le coefficient de convection thermique est également calculé en appliquant le modèle DOE-2, sans prendre en compte la variation de la vitesse de l'air. En effet, la vitesse de l'air est supposée négligeable, car il n'y a pas de système de ventilation mécanique. Le coefficient de convection massique est également déduit du coefficient de convection thermique en appliquant l'analogie de Lewis. Il faut noter que cette étude néglige les échanges infrarouges entre les différentes surfaces internes.

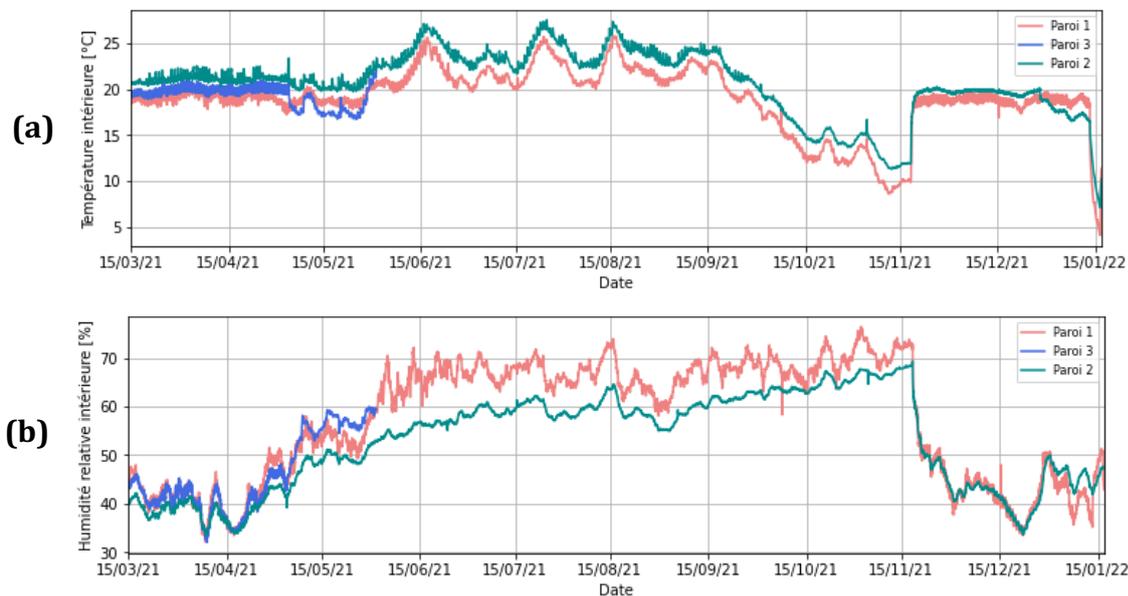


Figure 3.17 – Évolution temporelle de la température (a) et de l'humidité relative (b) à l'intérieur des pièces adjacentes aux trois parois étudiées, du 15 mars 2021 au 17 janvier 2022

4.4. Critères de validation

La validation consiste à évaluer la précision physique d'un modèle par comparaison des résultats simulés et mesurés (Oberkampff et Roy, 2010). L'évaluation est généralement effectuée à partir d'indices statistiques. Néanmoins, il n'existe pas de normes pour la validation expérimentale du comportement hygrothermique des bâtiments et de leur enveloppe (Costa-Carrapiço et al., 2022b). Huerto-Cardenas et al. (2020) proposent une revue des méthodes utilisées dans la littérature. De nombreuses études s'appuient sur les recommandations fournies par la Guideline 14 de l'ASHRAE (2014) pour valider les conditions hygrothermiques (Coşkun et al., 2017; Havinga et Schellen, 2019; Kompatscher et al., 2019). Cependant, ces directives sont conçues pour évaluer la prédiction des consommations énergétiques, qui ont été calculées à partir d'un modèle déjà validé. Cette méthodologie n'est donc pas adaptée.

Huerto-Cardenas et al. (2020) effectuent des recommandations pour la validation expérimentale des conditions hygrothermiques dans les bâtiments historiques, que nous étendrons aux conditions à l'intérieur des parois historiques. Pour correctement valider un modèle de simulation hygrothermique, il est indispensable de combiner l'étude de la température à un paramètre d'humidité, ce qui est plus particulièrement vrai dans le cas des bâtiments historiques. Le choix de l'indice pour quantifier l'erreur est également déterminant. En effet, les indices basés sur le biais moyen peuvent être impactés par l'effet d'annulation d'erreur. Les méthodes

normalisées ont également un inconvénient, puisque le processus de normalisation peut induire une mauvaise interprétation due à leur forte dépendance à l'échelle du jeu de donnée. Finalement, les indices qui apparaissent les mieux adaptées sont l'erreur absolue moyenne ou l'erreur quadratique moyenne (Huerto-Cardenas et al., 2020).

Les températures et humidités relatives simulées sont comparées aux données mesurées, au niveau des trois points de mesures qui sont à l'interface entre la brique et l'isolant, au milieu de l'isolant et au niveau de la surface intérieure. Si aucun point de discrétisation ne se situe exactement sur le point de comparaison, la valeur est déduite en appliquant une interpolation linéaire

Finalement, les résultats des simulations de la méthode développée sont comparés aux mesures in-situ, avec une fréquence de 30 min. Les indices utilisés sont l'Erreur Absolue Moyenne (*EAM*) qui permet de quantifier l'écart et le coefficient de Pearson (*r*) qui traduit la corrélation entre les données simulées et mesurées :

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |m_i - s_i|}{n} \quad (3-2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m}) \times (s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}} \quad (3-3)$$

Avec m_i la valeur mesurée à l'instant i , s_i la valeur simulée à l'instant i et n le nombre de pas de temps étudié.

Deux niveaux de validation sont distingués, en fonction de la précision obtenue. Les valeurs seuils utilisées sont extraites de recommandations (Huerto-Cardenas et al., 2020) et détaillées dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 – Valeurs seuil pour les deux niveaux de validation

	Niveau 1	Niveau 2
<i>EAM</i> (Erreur Absolue Moyenne)	≤ 1 °C ≤ 5 %HR	≤ 2 °C ≤ 10 %HR
<i>r</i> (Coefficient de Pearson)	> 0,7	> 0,7

5. Résultats de la comparaison

5.1. Paroi 1 : Briques épaisses isolées à partir de chaux-chanvre

5.1.1. Interface brique/chaux-chanvre

Le premier point d'étude est l'interface entre la brique et le chaux-chanvre de la paroi 1. La Figure 3.18 met en avant un bon accord entre les mesures et les résultats simulés pour la température, tant au niveau de l'écart que de l'allure. Les résultats sont très satisfaisants, pour les quatre versions de maillages. Plus le maillage est fin, plus l'erreur observée est faible. Concernant l'humidité relative, le même constat peut être effectué, bien qu'un écart plus élevé soit observé entre les simulations et les mesures.

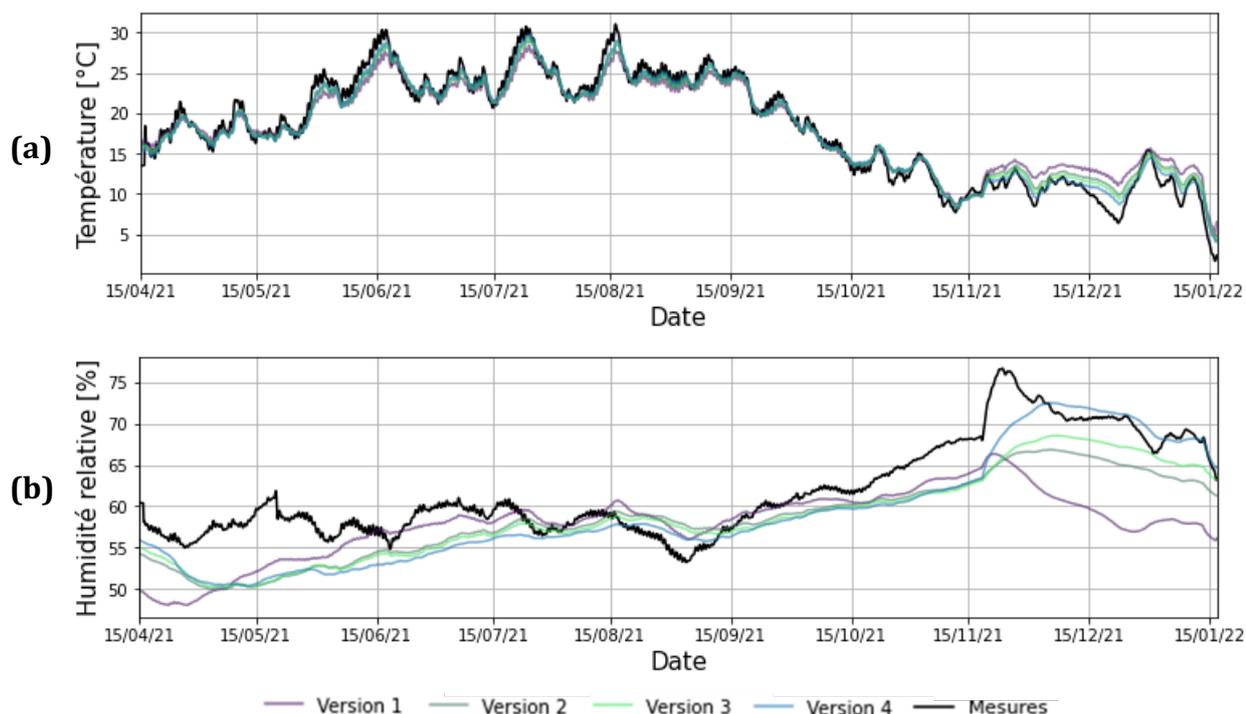


Figure 3.18 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d'humidité relative (b) à l'interface de la paroi 1

Notons qu'il n'a pas été possible de percer un trou pour positionner de capteur dans la brique, car cela aurait pu nuire à la stabilité de la paroi. Ce premier point d'étude est donc le plus influencé par la définition des conditions aux limites extérieures. Au vu de ces résultats, la méthodologie appliquée pour calculer les conditions aux limites semble adaptée et représentative du centre-ville médiéval de Cahors.

5.1.2. Milieu du chaux-chanvre

Le second point d'étude correspond au milieu de l'isolant à base de chaux-chanvre. La comparaison entre les températures simulées et mesurées mène à des résultats très satisfaisants, pour les quatre versions de maillage.

Concernant l'humidité relative, l'écart et l'allure générale sont satisfaisants, malgré un léger déphasage. Ce décalage est potentiellement dû au manque de précision concernant le positionnement du capteur. En regardant plus en détail la Figure 3.19, on constate des oscillations liées aux cycles journaliers plus importantes dans le cas des mesures, que dans les résultats des simulations. Plusieurs éléments peuvent expliquer cette différence, comme une imprécision lors de la définition des caractéristiques du chaux-chanvre ou encore le fait de négliger les transferts d'air à travers l'enveloppe du bâtiment.

Lors de l'étude de la température et de l'humidité, peu de différences sont constatées entre les quatre versions de maillage. Ainsi, l'application d'un maillage très fin et affiné à l'interface n'est pas nécessaire pour décrire les propriétés au milieu du chaux-chanvre, puisqu'il ne permet pas une amélioration significative des résultats.

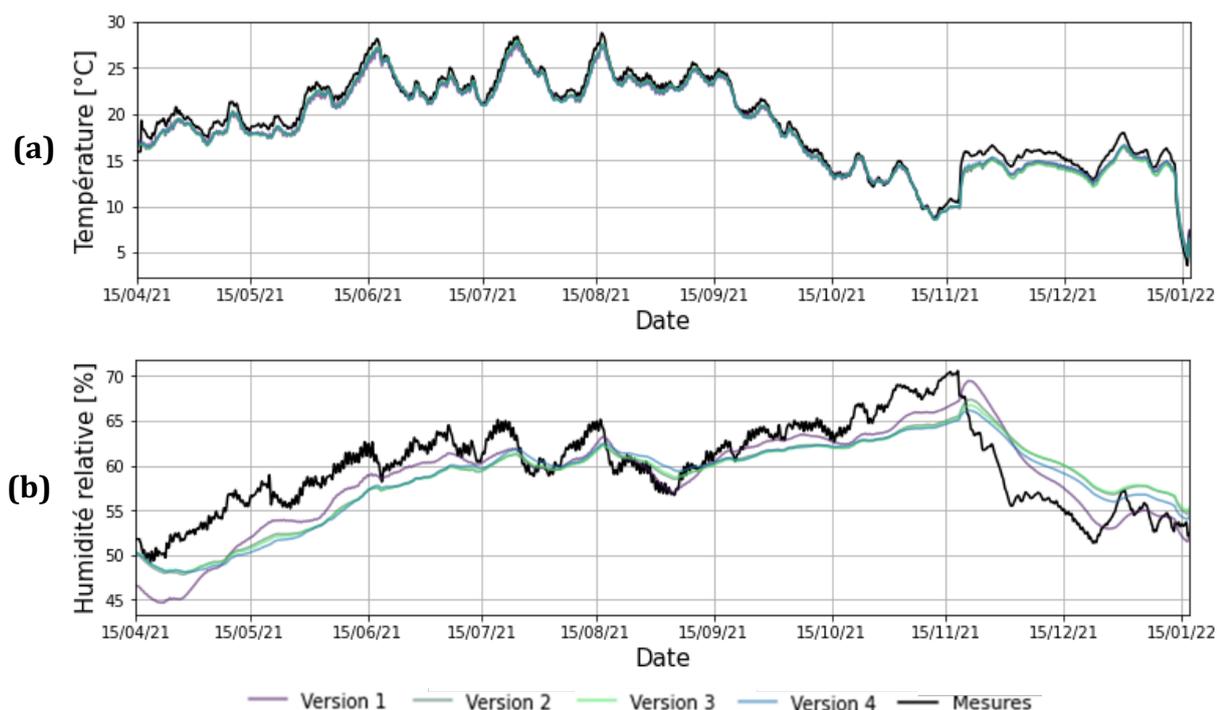


Figure 3.19 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d'humidité relative (b) à mi-isolant de la paroi 1

5.1.3. Surface intérieure

Au niveau de la surface intérieure, seule la température est mesurée et donc comparée. Les résultats obtenus sont très satisfaisants (Figure 3.20). L'écart entre les simulations et les mesures est très faible durant toute la période d'étude. Ce point est particulièrement influencé par les conditions aux limites intérieures ce qui signifie, qu'elles sont bien définies (et que les coefficients de convection thermique et massique sont cohérents.) Une augmentation soudaine de la température de surface est observée le 17 novembre 2021, puis une chute soudaine le 13 janvier 2022, ce qui correspond respectivement au moment où le chauffage a été allumé puis éteint. Lorsque le chauffage est allumé, la consigne reste fixée à 19°C.

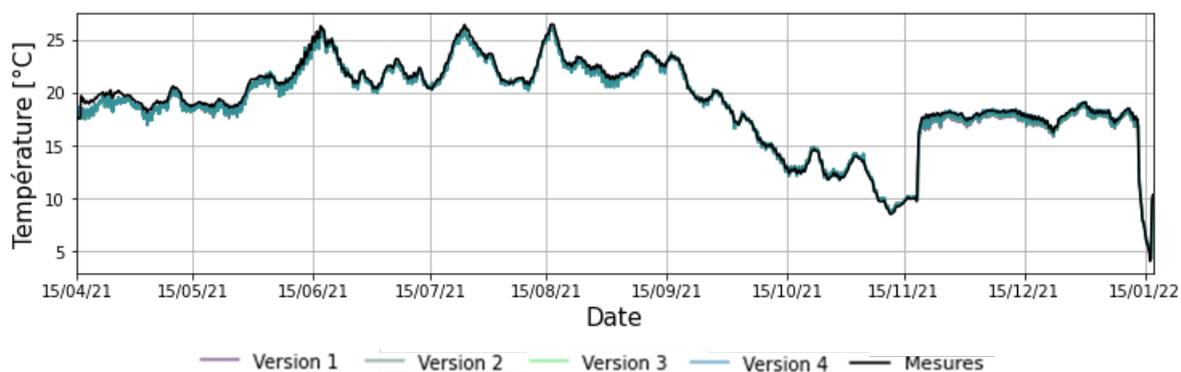


Figure 3.20 – Évolution temporelle de la température simulée et mesurée au niveau de la surface intérieure de la paroi 1

5.2. Paroi 2 : Pans de bois et briques isolés à partir de chaux-chanvre

5.2.1. Interface brique/chaux-chanvre

Cette deuxième paroi se différencie de la première, par sa typologie de construction. Dans ce cas, la paroi est constituée de pans de bois remplis de briques. L'épaisseur de la maçonnerie est plus fine : 14cm. La Figure 3.21 montre que les simulations permettent de reproduire fidèlement l'allure des températures mesurées. Lors de la fin de période d'étude, entre le 15 novembre 2021 et le 15 janvier 2022, l'erreur la plus faible est obtenue pour le maillage le plus grossier, ce qui peut sembler paradoxal. Il faut néanmoins noter qu'il est compliqué de mesurer les conditions hygrothermiques exactement au niveau de l'interface.

Concernant l'humidité relative, l'écart entre les mesures et les simulations est plutôt satisfaisant. Le même constat que pour la température peut être effectué : le maillage le plus grossier fournit l'erreur la plus faible sur la période hivernale. Une forte différence dans les amplitudes journalières entre les simulations et les mesures est observée. Ce décalage n'était pas présent à l'interface entre brique et isolant de la paroi 1. Il semble donc que ce phénomène soit accentué pour la paroi en pans de bois, plus fine et probablement plus perméable à l'air. De plus, la présence de pans de bois dans la façade n'est pas prise en compte par la modélisation 1D, ce qui peut entraîner des effets de bord qui ne sont pas considérés dans les simulations.

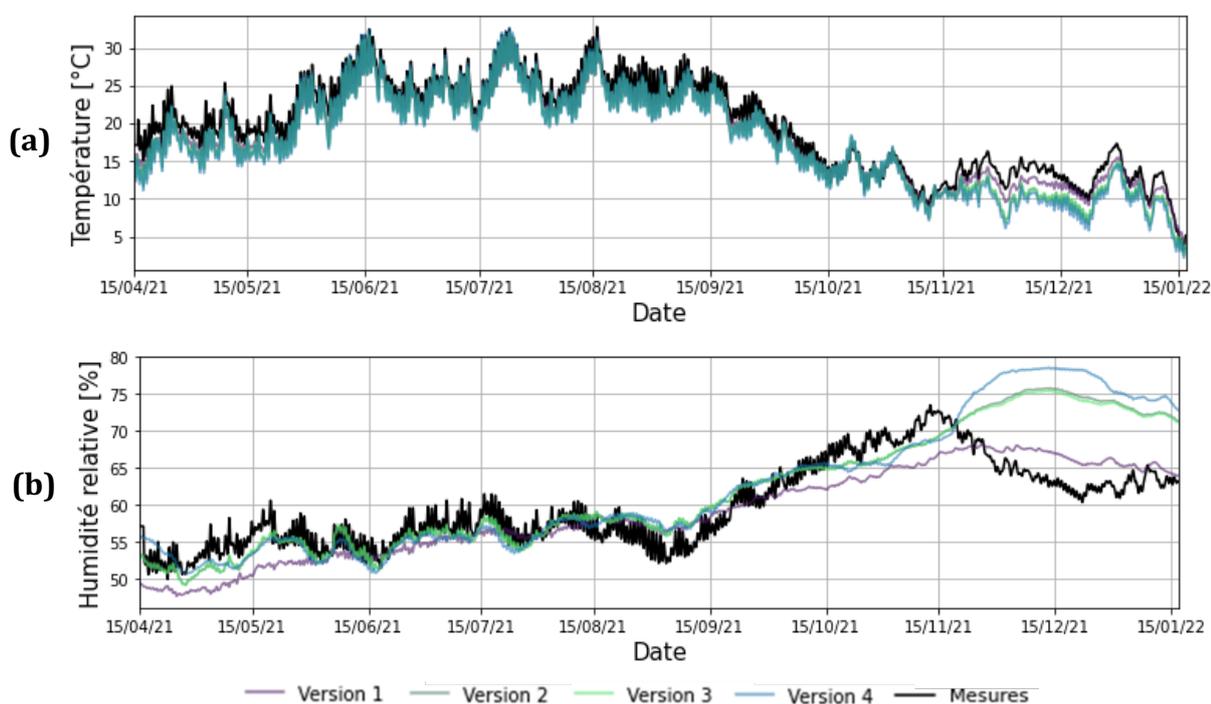


Figure 3.21 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d'humidité relative (b) à l'interface de la paroi 2

5.2.2. Milieu du chaux-chanvre

Au milieu du chaux-chanvre de la paroi 2, un bon accord est observé entre les températures et humidités relatives, mesurées et simulées. En ce point et pour les deux variables étudiées, les quatre versions de maillage fournissent des résultats équivalents.

Néanmoins, comme pour la paroi 1 au milieu du chaux-chanvre, un déphasage est observé entre les humidités relatives mesurées et simulées, ce qui s'explique probablement par la définition des caractéristiques du chaux-chanvre ou le positionnement du capteur.

Cependant, les simulations ne permettent pas de reproduire l'amplitude des cycles journaliers de l'humidité relative mesurée. Le même constat avait été fait au milieu du chaux-chanvre de la paroi 1. Dans le cas de la paroi 2, les amplitudes mesurées sont plus importantes. La principale différence entre les deux parois est la typologie de construction. La paroi à pans de bois entraîne des oscillations mesurées ayant une amplitude plus importante que la paroi en briques massives.

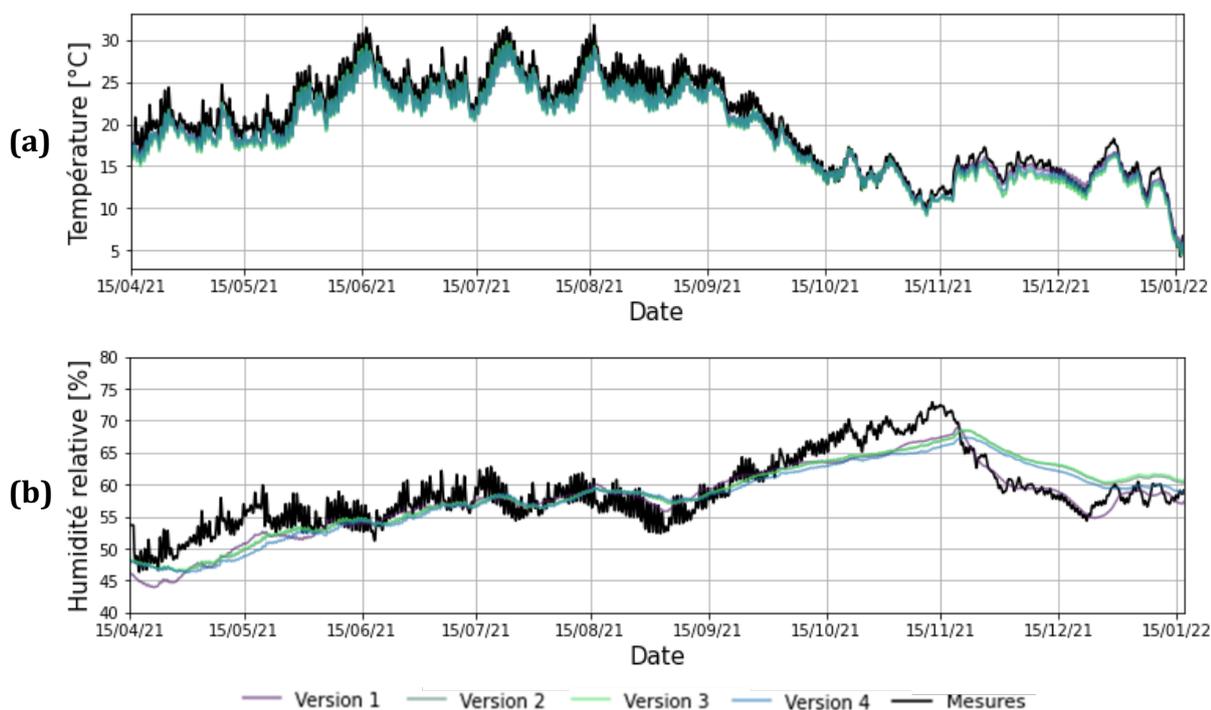


Figure 3.22 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d'humidité relative (b) à mi-isolant de la paroi 2

5.2.3. Surface intérieure

Pour cette seconde paroi, un très bon accord est également observé entre les températures de surface intérieure mesurées et simulées à partir des quatre versions de maillage (Figure 3.23).

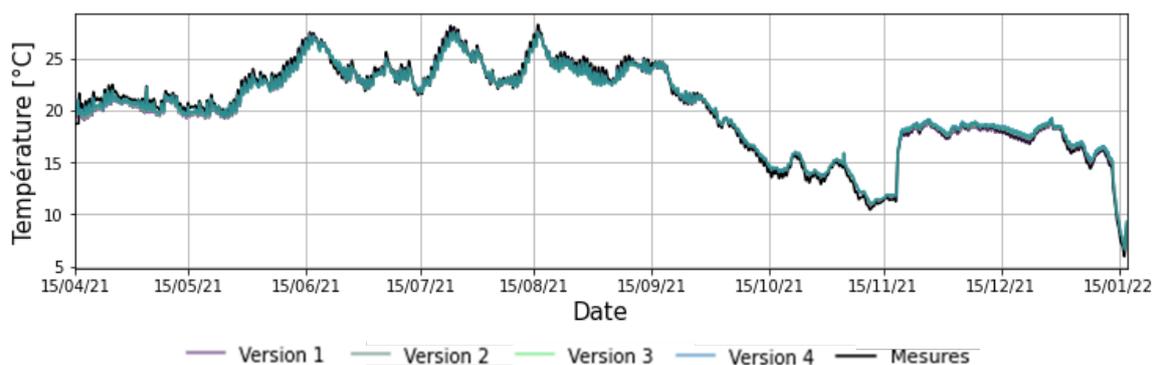


Figure 3.23 – Évolution temporelle de la température simulée et mesurée au niveau de la surface intérieure de la paroi 2

5.3. Paroi 3 : Pans de bois et briques isolés à partir de polystyrène

La troisième paroi a également une typologie à pans de bois. Elle se différencie des deux parois précédentes par le type d'isolant appliqué : du polystyrène. De plus, une lame d'air est présente entre la brique et l'isolant. Ce cas d'étude permet donc d'évaluer la pertinence de la méthode numérique pour simuler le comportement de deux nouvelles couches de matériaux : la lame d'air et le polystyrène. En revanche, la période d'étude est plus courte (moins de deux mois), car le polystyrène a ensuite été retiré pour mettre en place un isolant biosourcé dans le cadre de la thèse de Malagoli de Almeida (2022).

5.3.1. lame d'air

Le premier point d'étude de cette paroi est localisé au centre de la lame d'air. Les résultats simulés reproduisent correctement l'évolution de la température au sein de la lame d'air (Figure 3.24). Concernant l'humidité relative, les simulations fournissent des résultats satisfaisants pour l'allure générale et l'erreur par rapport aux mesures. Néanmoins, le signal mesuré a une amplitude plus élevée que les signaux simulés.

Il est intéressant de noter que la méthode développée parvient à décrire de manière satisfaisante le comportement hygrothermique de la lame d'air. Or, le comportement hydrique d'une lame d'air est particulièrement complexe à modéliser. En effet, sa teneur en eau saturante est très faible - de l'ordre de 17g/kg - ce qui peut poser des problèmes pour la stabilité numérique du modèle. Par exemple, les modèles implicites comme Delphin négligent généralement le stockage d'humidité dans les lames d'air. Cependant, le prendre en compte est primordial pour évaluer correctement l'humidité relative en ce point.

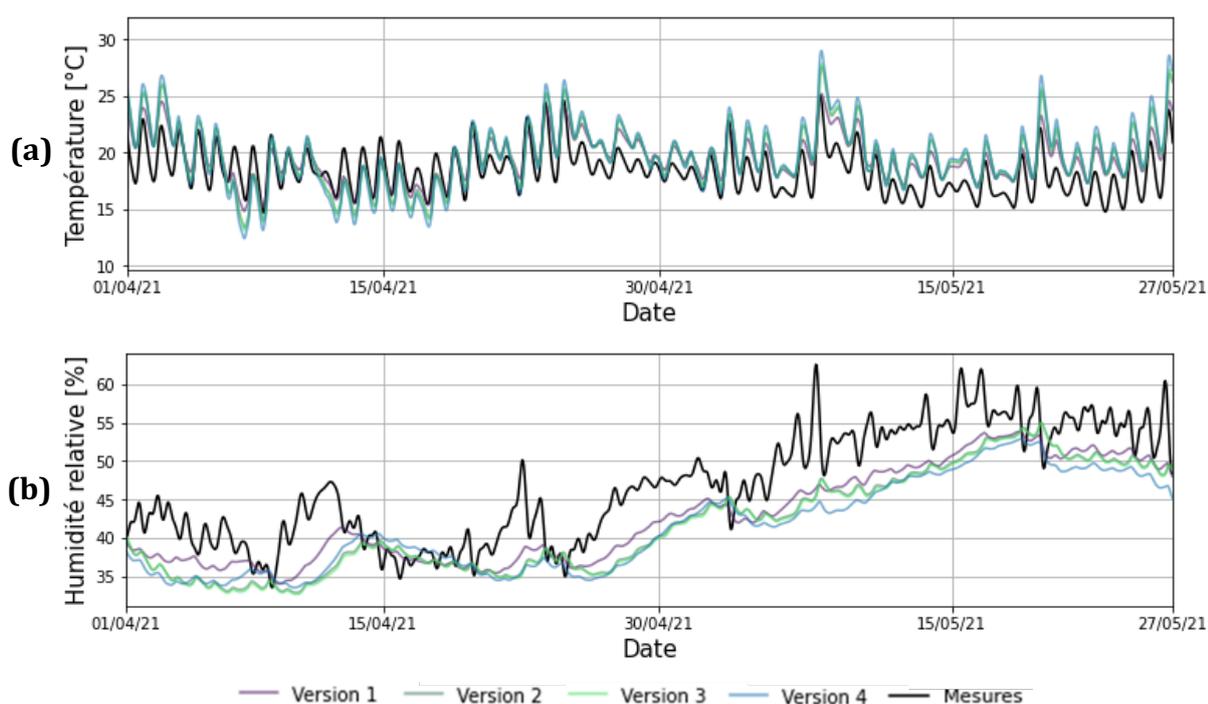


Figure 3.24 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d'humidité relative (b) dans la lame d'air de la paroi 3

5.3.2. Milieu du polystyrène

Le deuxième point d'étude est localisé au centre du polystyrène. La comparaison des mesures et des simulations conduit à des résultats très satisfaisants pour la température. De même, l'évolution de l'humidité relative dans le polystyrène est bien décrite par les quatre versions de maillage. En revanche, une différence d'amplitude du signal est toujours constatée (Figure 3.25).

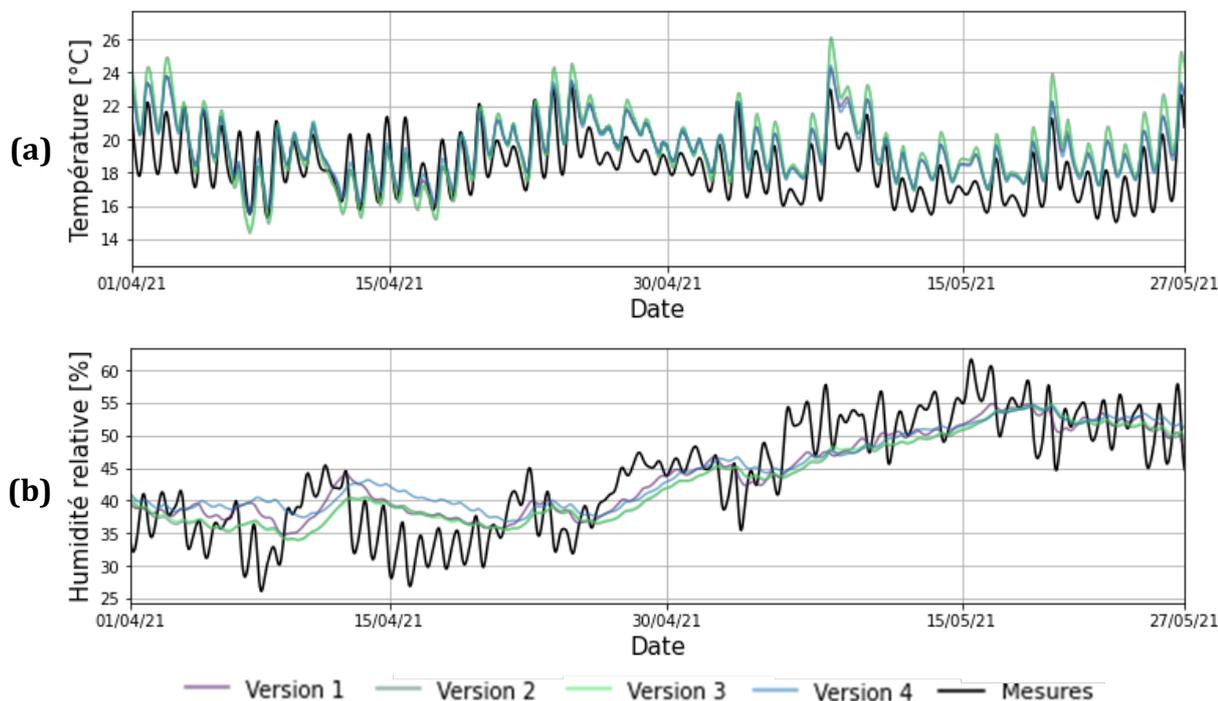


Figure 3.25 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d'humidité relative (b) à mi-isolant de la paroi 3

5.3.3. Surface intérieure

Comme pour les deux parois précédentes, les résultats à la surface intérieure de la plaque de plâtre sont très satisfaisants, ce qui montre que les conditions aux limites intérieures sont définies correctement.

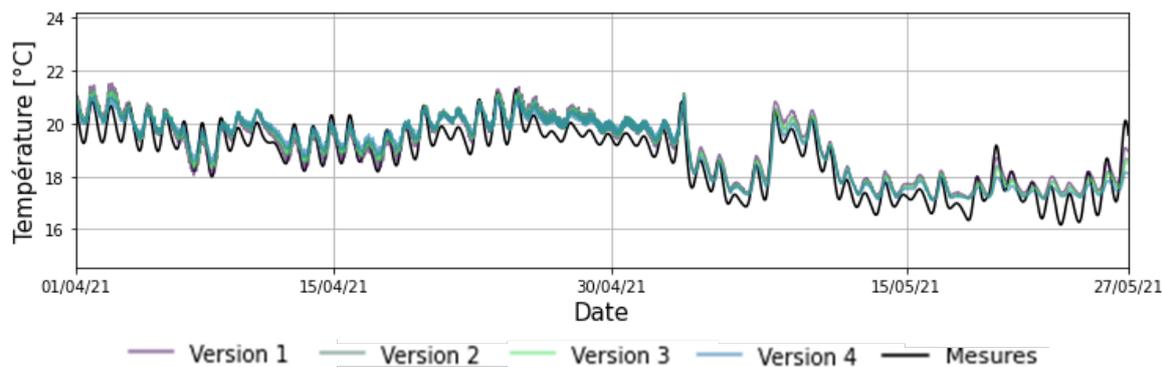


Figure 3.26 – Évolution temporelle de la température simulée et mesurée au niveau de la surface intérieure de la paroi 3

5.4. Bilan

Cette partie a pour but de dresser un bilan global sur la capacité de la méthode numérique à représenter des parois anciennes constituées de typologies et d'isolants différents. L'analyse de sensibilité au maillage permet de conclure sur la pertinence de chaque version et sur la nécessité ou non d'affiner le maillage à l'interface entre deux couches de matériaux, pour décrire l'évolution des propriétés hygrothermiques en différents points. Pour cela, les indicateurs présentés dans la section 4.4 sont calculés pour toutes les combinaisons étudiées.

Globalement, l'ensemble des cas étudiés fournissent des résultats satisfaisants. Chaque point de comparaison a au moins trois versions de maillage sur les quatre qui respectent les critères de validation fixés (Figure 3.27 (a)).

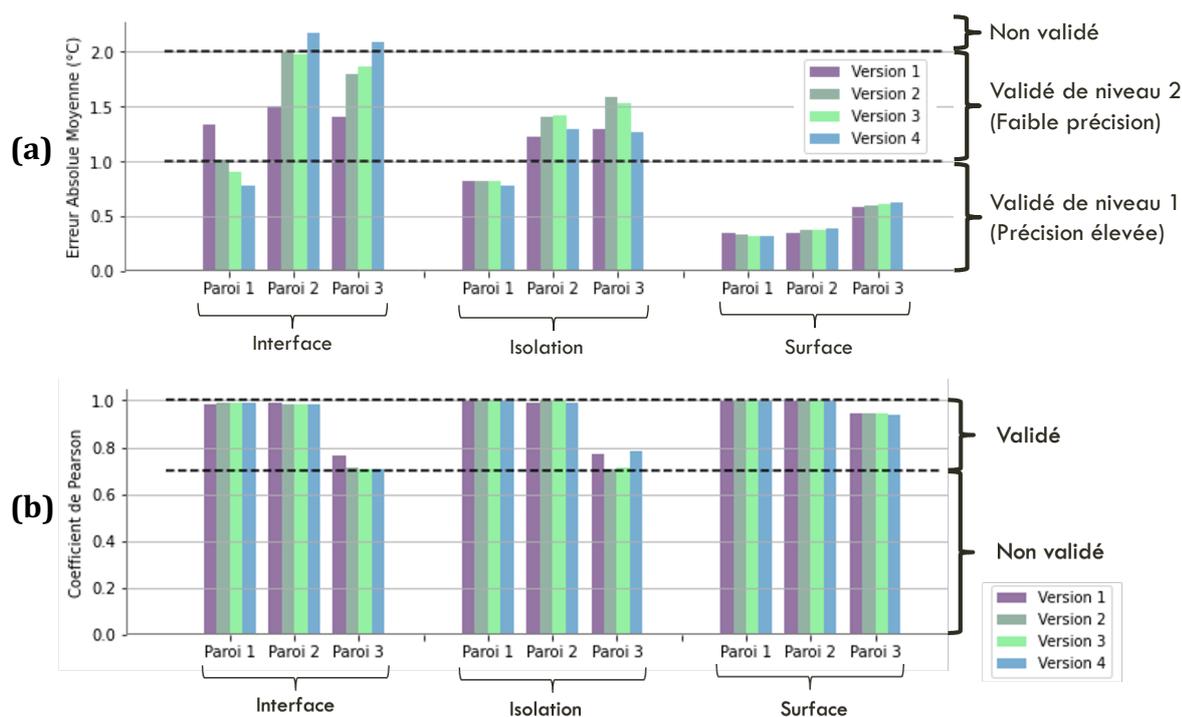


Figure 3.27 – EAM (a) et coefficient de Pearson (b) entre les températures simulées et mesurées pour les trois points étudiés, les trois parois et les quatre versions de maillage

Concernant l'EAM de la température, les indicateurs calculés au niveau de la surface intérieure permettent systématiquement de valider de niveau 1, c'est-à-dire avec une forte précision, selon Huerto-Cardenas et al. (2020) (Tableau 3.6). Les variables de surface sont relativement faciles à estimer car très fortement influencées par les conditions aux limites intérieures. Pour la comparaison à mi-isolant, la paroi 1 valide de niveau 1, tandis que les parois 2 et 3 valident seulement de niveau 2. A l'interface isolant/brique, la validation dépend fortement du maillage appliqué. En effet, la paroi 1 est validée de niveau 1 pour les maillages les plus fins (versions 2, 3 et 4) et de niveau 2 pour le maillage le plus grossier. Les parois 2 et 3 valident de niveau 2 pour les versions 1, 2 et 3, tandis que la version 4 qui est la plus fine, conduit à une valeur de EAM supérieure 2°C et les critères de validation ne sont donc pas respectés. On constate donc qu'il est particulièrement complexe d'évaluer les conditions thermiques à l'interface, notamment car de forts changements ont lieu dans cette zone. De plus, il est compliqué de s'assurer que le capteur

est positionné exactement à l'interface, ce qui implique que la maille la plus fine ne conduit pas forcément à une erreur plus faible.

Les parois 2 et 3 obtiennent des résultats moins satisfaisants que la paroi 1, pour l'EAM de la température au sein de la paroi. Elles ont le point commun d'avoir une typologie à pans de bois remplie de briques. La méthode utilisée considère seulement les transferts en 1D dans la paroi et l'effet des pans de bois sur les transferts thermiques est donc négligé, ce qui peut en partie expliquer cet écart, par rapport à la paroi 1 qui est constitué uniquement de briques massives. Les effets de bord sont donc plus importants pour les parois 2 et 3 que pour la paroi 1.

Le coefficient de Pearson est également calculé pour vérifier la corrélation entre les températures simulées et mesurées. Il est toujours inférieur pour la paroi 3, que pour les autres parois (Figure 3.27 (b)). Cet écart peut s'expliquer par le fait, que les propriétés du polystyrène et de la plaque de plâtre sont issues d'une base de données et non pas de la caractérisation des matériaux in-situ, le polystyrène étant par exemple en place depuis de nombreuses années. De plus, il est particulièrement complexe de décrire le comportement hygrothermique d'une lame d'air.

L'humidité relative est étudiée en seulement deux points de la paroi : à l'interface et au milieu de l'isolant. Concernant l'EAM, toutes les parois associées à toutes les versions de maillage respectent les critères de validation de niveau 1 ou 2. Les résultats obtenus sont donc satisfaisants. L'évaluation du coefficient de Pearson mène également à des résultats satisfaisants, à l'exception de la paroi 1 associée au maillage le plus grossier (version 1) (Figure 3.28). Nous concluons que ce maillage est trop grossier pour décrire correctement le comportement de la paroi.

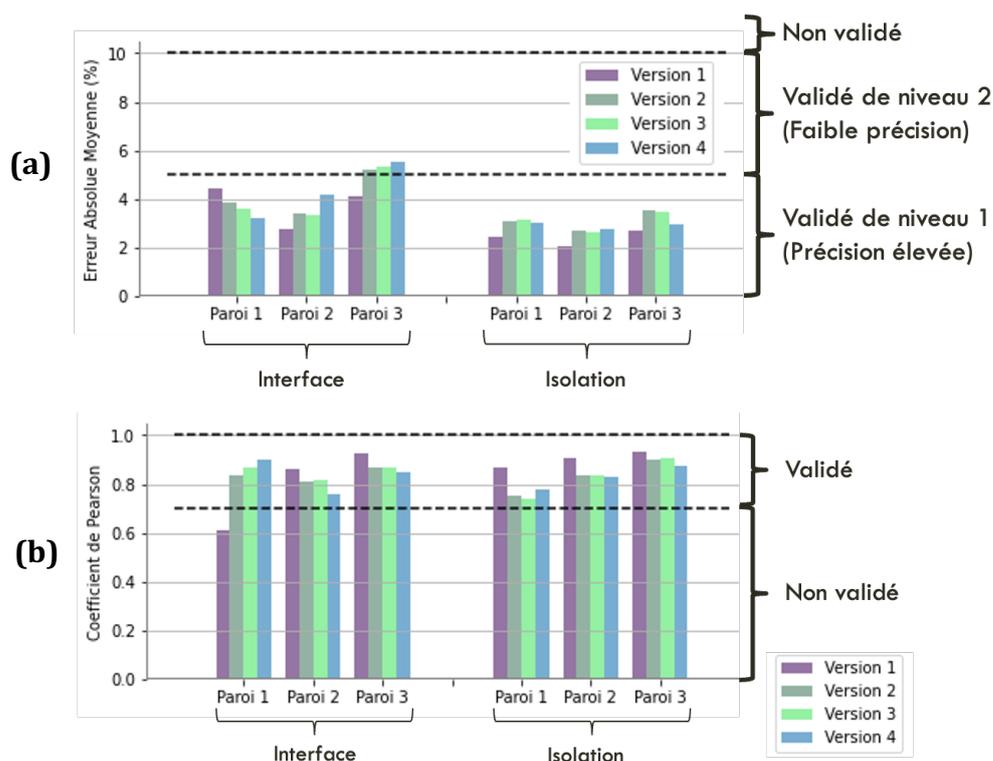


Figure 3.28 – EAM (a) et coefficient de Pearson (b) entre les humidités relatives simulées et mesurées pour les deux points étudiés, les trois parois et les quatre versions de maillage

Finalement, les versions 2 et 3 sont les maillages donnant des résultats satisfaisants pour l'ensemble des cas. La version 1 correspond à un maillage trop grossier qui ne permet pas de fournir des résultats suffisamment précis pour décrire la paroi. La version 4 est un maillage très fin et affiné à l'interface entre les matériaux, elle permet donc d'obtenir des résultats théoriquement plus précis. Cette incohérence sur les résultats observés peut s'expliquer par la difficulté à positionner le capteur précisément.

Cette section proposait une première explication des écarts obtenus, la partie suivante discute de manière plus détaillée des différentes sources d'incertitudes.

6. Sources d'incertitudes et précision des résultats

Ce chapitre présente une validation expérimentale. Cette validation est effectuée par comparaison avec des données mesurées en conditions réelles et en contexte urbain. Il est complexe pour les modèles de refléter les conditions réelles. L'obtention de résultats satisfaisants est conditionnée par la bonne définition des hypothèses concernant : les phénomènes physiques, la géométrie, la composition de la paroi, la localisation géographique, les propriétés hygrothermiques des matériaux, les données météorologiques et la représentativité des données d'entrée fournies au modèle (Akkurt et al., 2020; Costa-Carrapiço et al., 2022a; Panico et al., 2023).

6.1. Avantages de la démarche appliquée

L'instrumentation mise en place à Cahors, permet d'obtenir des données d'entrée plus représentatives du cas étudié et ainsi de minimiser les erreurs effectuées sur les hypothèses. Par exemple, la station météorologique sur le toit permet d'enregistrer les données météorologiques directement dans le centre médiéval de Cahors, plutôt que d'utiliser les données mesurées par une station localisée dans un aéroport en dehors de la ville. De même, les conditions intérieures sont enregistrées au milieu de chaque pièce adjacente aux différentes parois étudiées.

Par ailleurs, des briques prélevées à Cahors ont été caractérisées dans les précédents travaux (Claude, 2018). Concernant l'isolation à base de chaux-chanvre projeté mise en place sur les parois 1 et 2, ses propriétés hygrothermiques sont issues de la caractérisation d'un échantillon similaire au matériau utilisé, fourni par l'artisan (Claude, 2018). La caractérisation en laboratoire des matériaux permet d'éviter en partie l'utilisation d'une base de données (comme celle de Delphin), qui n'est généralement pas un moyen suffisant pour définir précisément les propriétés des matériaux, notamment des briques anciennes (Andreotti et al., 2022).

Malgré ces efforts lors de la configuration du modèle, des incertitudes subsistent. Busser et al. (2019) classifient les erreurs sur la prédiction des transferts hygrothermiques en milieu poreux, en quatre catégories : les erreurs expérimentales, les erreurs sur les conditions aux limites, les erreurs dues au modèle et les erreurs sur les propriétés des matériaux.

6.2. Erreurs expérimentales

Chaque capteur est associé à un certain niveau d'incertitude. Par exemple, les sondes Honeywell, positionnées dans la paroi, ont une précision constructeur de $\pm 3,5 \%HR$ et $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui est très élevé par rapport aux seuils de validation fixés. De plus, la paroi est percée pour insérer les capteurs et il est alors complexe d'estimer parfaitement la position du capteur (aussi bien au milieu de l'isolant qu'à l'interface). Le silicone ajouté pour boucher le trou et maintenir le capteur en place, peut modifier les transferts hygrothermiques et éventuellement impacter la précision des mesures.

6.3. Erreurs sur les conditions aux limites

Cette comparaison a été effectuée dans des conditions réelles, c'est-à-dire que ni les conditions intérieures, ni les conditions extérieures ne sont contrôlées, ce qui ajoute de l'incertitude lors de la définition des conditions aux limites.

Le calcul des conditions aux limites extérieures est basé sur les données enregistrées par la station météorologique, localisée sur le toit. Les données utilisées ne correspondent donc pas exactement aux conditions réelles dans le canyon. De plus, des problèmes de connexions Internet ont empêché de récupérer les conditions météorologiques, sur de courtes périodes et les données manquantes ont été remplacées par les données enregistrées à la station Le Montat, localisée dans un aéroport à proximité de Cahors.

Les méthodes utilisées, pour calculer les conditions aux limites intérieures et extérieures, ont été conçues dans le but de tenir compte de manière complète et précise de l'environnement. Néanmoins, des incertitudes persistent. Tout d'abord, des relations semi-empiriques sont utilisées pour le calcul de la pluie incidente et des coefficients de convection. Des études ont montré qu'en fonction de la relation choisie, les résultats obtenus peuvent beaucoup varier (Pigeon et al., 2014; Zhou et al., 2023). De plus, la méthode utilisée pour décrire les échanges radiatifs en milieu urbain ne tient pas compte de la forme exacte des bâtiments environnants, notamment en considérant les toits plats. La méthode de calcul des échanges infrarouge entre les bâtiments, nécessitent de faire des hypothèses sur la composition et l'occupation des bâtiments environnants. Concernant le rayonnement solaire absorbé, la valeur de l'albedo n'a pas été mesurée, une approximation a donc été utilisée. Au niveau des conditions aux limites intérieures, le rayonnement à grande longueur d'onde est négligé.

6.4. Erreurs sur les propriétés des matériaux

Les propriétés hygrothermiques de la brique et du chaux-chanvre ont été obtenues par caractérisation en laboratoire. Cette caractérisation en laboratoire entraîne une incertitude, due aux équipements ou encore aux erreurs de manipulation. De plus, les mesures ne permettent pas toujours d'obtenir la totalité des données nécessaires pour définir correctement l'isotherme de sorption ou encore l'évolution du coefficient de diffusion vapeur et du coefficient de conductivité liquide en fonction de la teneur en eau.

La composition des parois anciennes est fortement hétérogène, plusieurs types de briques voire de pierres ont pu être utilisés, lors de la construction. Par exemple, la façade du bâtiment a vraisemblablement été démontée et remontée au 19^{ème} siècle à partir de différents matériaux

(briques et quelques pierres), en partie issus de la façade antérieure mais pas seulement (Claude, 2018). Ainsi, les caractéristiques utilisées pour la description de la brique ne sont pas forcément totalement représentatives.

De plus, la description des maçonneries anciennes en appliquant un modèle 1D est particulièrement complexe (Bottino-Leone et al., 2021; Calle et Van Den Bossche, 2021; Gutland et al., 2022). En effet, les vides, les joints de mortiers ou encore les pans de bois ne sont pas pris en compte avec ce type de modélisation. L'usure de la façade implique également des hétérogénéités comme la dégradation de l'enduit extérieur de manière irrégulière. D'ailleurs, celui-ci a été négligé dans cette étude. Des fissures peuvent également apparaître et entraîner l'infiltration de pluie dans la paroi et ainsi perturber les transferts hygrothermiques (Calle et Van Den Bossche, 2017). Par ailleurs, dans cette thèse, les matériaux sont considérés isotropes, leurs propriétés hygrothermiques sont supposées identiques dans toutes les directions.

6.5. Incertitudes du modèle

Le modèle représente les transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux en s'appuyant sur des hypothèses présentées dans le chapitre précédent. Le modèle utilisé s'appuie sur des hypothèses fréquentes comme la modélisation des parois en 1D ou encore le fait de négliger l'effet d'hystérésis et les transferts d'air. Les adaptations effectuées pour fonctionner à l'échelle urbaine induisent des incertitudes supplémentaires, qui ont été considérées acceptables au vu des objectifs de la méthode développée.

De plus, le maillage utilisé est relativement grossier et parfois sans affinement à l'interface entre deux couches de matériaux, ce qui permet de limiter le nombre de nœuds. Les points étudiés ne sont donc pas forcément localisés au niveau d'un point du maillage. Dans ces cas, des interpolations entre deux points doivent donc être effectuées. La localisation du nœud le plus proche par rapport au point étudié peut grandement influencer la précision du résultat obtenu.

Enfin, il est important de noter qu'à la fois les données mesurées et simulées sont soumises à des incertitudes (Bui et al., 2020). Les incertitudes sur les résultats des simulations sont induites par les hypothèses et la résolution du modèle physique choisi, mais elles sont également étroitement liées aux incertitudes sur les données d'entrée (Goffart et al., 2017). Ainsi, les erreurs effectuées sur les mesures des conditions intérieures et extérieures, ainsi que sur la caractérisation des matériaux impactent la précision des résultats. Pour quantifier l'incertitude apportée par les données d'entrée, il est possible d'effectuer une analyse de sensibilité du modèle à ces différents paramètres (Bui et al., 2020; Goffart et al., 2017; Spitz et al., 2013). Les conclusions de ces analyses montrent que les données d'entrée incertaines sont des sources importantes d'erreur dans la simulation de la performance des bâtiments. Notons que l'initialisation des conditions dans la paroi est également un élément clé, pour correctement simuler l'évolution temporelle des conditions hygrothermiques.

7. Conclusion

En dépit des incertitudes et approximations recensées, les résultats obtenus sont très satisfaisants et la méthode numérique est validée expérimentalement à l'échelle de la paroi, selon les critères de Huerto-Cardenas et al. (2020). Les hypothèses effectuées pour décrire les matériaux et les conditions aux limites sont donc satisfaisantes pour étudier les parois des bâtiments des centres historiques, d'autant plus qu'il est irréaliste d'atteindre un parfait accord entre les données simulées et mesurées (Hens, 2015; Panico et al., 2023). Cette validation expérimentale montre également que la méthode développée est adaptée pour la simulation hygrothermique des parois des centres anciens. La prochaine étape de ce travail consiste donc à intégrer cette méthode dans le modèle de climat urbain TEB.

Chapitre 4 : Intégration des transferts d'humidité à travers les parois dans le modèle de climat urbain TEB

1. Introduction

Le chapitre 1 a montré que les transferts d'humidité à travers les parois sont un élément clé à prendre en compte lors de la simulation des centres historiques, mais également que les modèles de climat urbain sont un outil particulièrement pertinent pour évaluer la rénovation des centres anciens par rapports aux nombreux enjeux qu'ils recèlent.

Une méthode spécifiquement adaptée pour la simulation des transferts hygrothermiques à l'échelle urbaine a été développée et validée numériquement dans le Chapitre 2. Ensuite, le Chapitre 3 a présenté une validation expérimentale de cette méthode dans le contexte du centre-ville médiéval de Cahors. En s'appuyant sur les instrumentations in-situ, une comparaison des données mesurées et simulées a été effectuée et a mené à des résultats satisfaisants. La prochaine étape consiste donc à intégrer la méthode développée dans le modèle de climat urbain TEB.

Ce chapitre détaille les modifications à apporter à TEB, pour intégrer les transferts couplés de masse et de chaleur. Les adaptations effectuées concernent : la définition des propriétés des matériaux, le maillage, les conditions aux limites et la résolution numérique des transferts à travers la paroi. Dans un second temps, la pertinence de TEB pour simuler les centres historiques est vérifiée, par comparaison des résultats des simulations de TEB avec les mesures réalisées dans le centre médiéval de Cahors.

La nouvelle version de TEB ainsi obtenue, permettra de quantifier l'impact des transferts d'humidité, dans le cas étudié. L'impact de la modification de la conductivité thermique, de la capacité de tampon hydrique et du potentiel de rafraîchissement par évaporation sera étudié. Ainsi, les effets seront discutés à plusieurs échelles : paroi, bâtiment, rue et ville.

2. Description de TEB

Le modèle de climat urbain TEB sera utilisé pour simuler le centre-ville médiéval de Cahors. Ce modèle a été développé à la fin des années 1990, dans le but initial de modéliser les surfaces urbaines pour des applications en météorologie ou prévision du temps, à l'échelle kilométrique. Il a notamment permis de simuler les ICU ou encore l'impact des surfaces urbanisées sur la structure verticale de la couche limite atmosphérique (Lemonsu et Masson, 2002).

2.1. SURFEX

SURFEX (Surface Externalisée) est un schéma de surface continentale développée par Météo France (Masson et al., 2013a). Cette plateforme permet la paramétrisation physique des surfaces.

Des modèles indépendants permettent de paramétrer les surfaces en fonction de leur type :

- TEB (Town Energy Balance) pour les surfaces urbanisées (Masson, 2000);
- ISBA (Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere) pour les surfaces naturelles et agricoles (Noilhan et Mahfouf, 1996);
- Flake pour les surfaces d'eaux douces (lac et rivière) (Salgado et Le Moigne, 2010);
- Un modèle pour les mers et océans.

Ainsi, à partir des caractéristiques des surfaces, SURFEX calcule les échanges de chaleur sensible, de chaleur latente, de quantité de mouvement, de dioxyde de carbone, d'espèces chimiques entre les surfaces et l'atmosphère. SURFEX détermine également les propriétés radiatives des surfaces (albedo, émissivité, température de surface radiative). Ces informations servent ensuite de conditions aux limites inférieures, lorsque SURFEX est couplé à des modèles atmosphériques.

Une autre utilisation de SURFEX est possible en mode forcé. Pour cela, il faut disposer d'observations fournissant les données de forçage atmosphériques et radiatives nécessaires (Figure 4.1). Les éléments de forçage doivent être représentatifs des conditions météorologiques au-dessus de la hauteur moyenne des bâtiments, dans la couche limite urbaine. SURFEX peut être utilisé pour divers objectifs comme la prévision météorologique, la modélisation de climat et différentes applications de recherche.

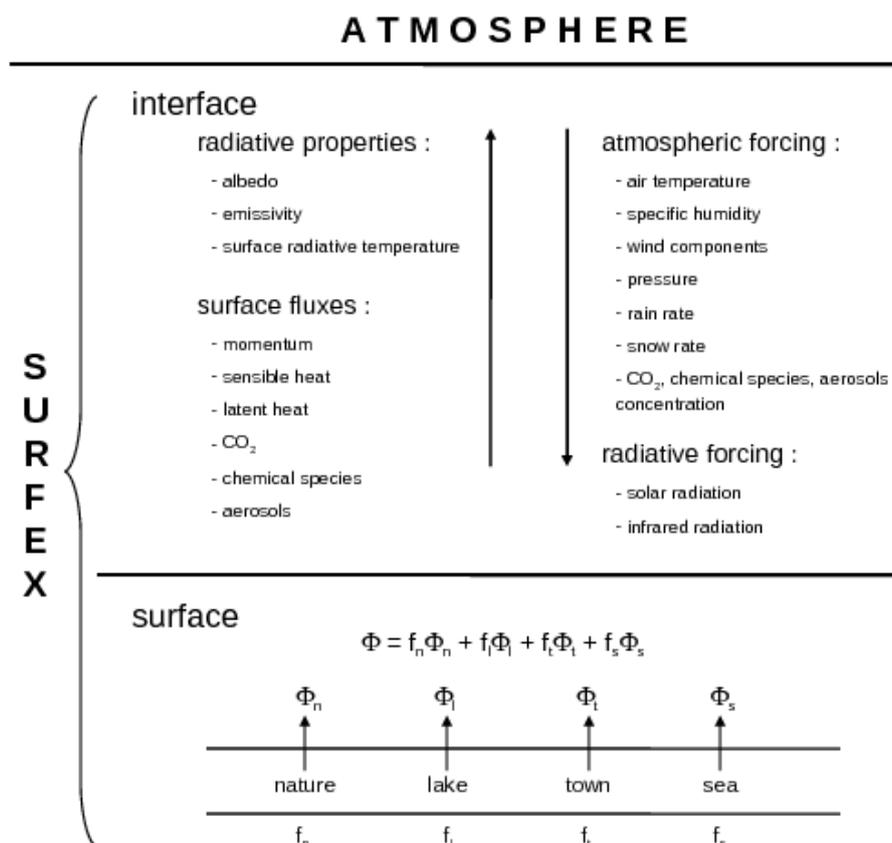


Figure 4.1 – Description des échanges entre un modèle atmosphérique et SURFEX, qui est composé de plusieurs modèles physiques, représentant chacun une fraction f^* de la tuile étudiée (Météo France)

2.2. TEB

TEB (Town Energy Balance) est le modèle de surfaces urbanisées de SURFEX (Masson, 2000). Il permet de paramétrer les échanges énergétiques, radiatifs, hydriques et turbulents entre les surfaces bâties et l'atmosphère (Figure 4.2). Un quartier est considéré homogène et est décrit par une rue moyenne composée d'une surface au sol entourée par deux bâtiments à toit plat. L'utilisateur doit fournir les caractéristiques moyennes représentant la forme urbaine et les couches de matériaux composant les différentes surfaces verticales et horizontales (Tableau 4.1). Ces simplifications sont en accord avec l'objectif général du modèle. En effet, TEB est conçu pour être aussi simple que possible pour garantir un temps de calcul réduit, tout en étant représentatif des phénomènes physiques.

Les phénomènes pris en compte dans la version historique de TEB sont les flux associés aux toits et aux façades des bâtiments, aux sols ou encore aux rejets anthropiques induits par le trafic routier ou l'industrie. Les phénomènes de piégeages radiatifs et d'ombrage sont également considérés dans TEB. Depuis la création de TEB, d'autres processus ont été paramétrés dans le but de mieux représenter le climat urbain, la consommation énergétique des bâtiments et certains aménagements envisageables pour l'adaptation des villes face au changement climatique.

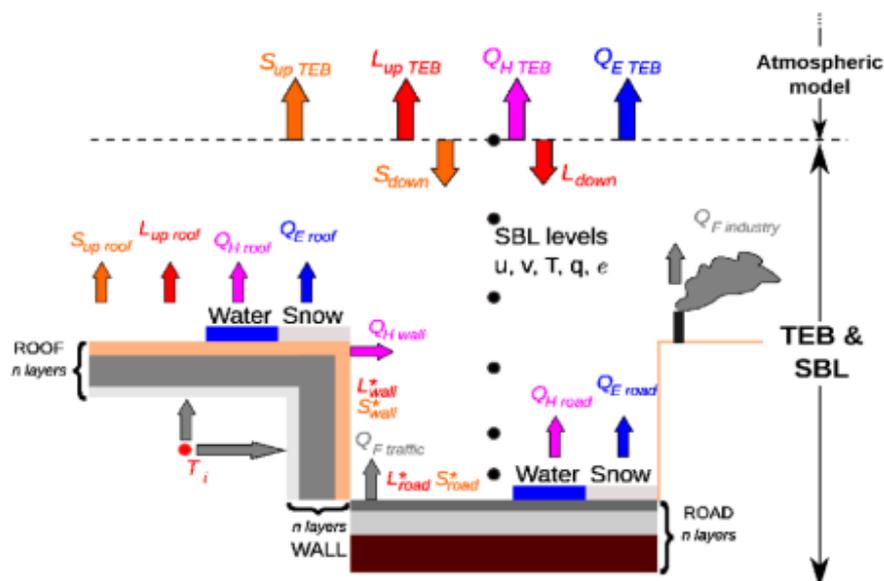


Figure 4.2 – Schéma d'une rue canyon typique et des principaux processus paramétrés dans TEB (Météo France)

Tableau 4.1 – Principaux paramètres d'entrée décrivant la géométrie et les matériaux urbains dans TEB

	Paramètre	Symbole	Unité
Paramètres d'occupation du sol et géométriques	Fraction de recouvrement des bâtiments et des routes	f_{bld}, f_{road}	-
	Densité surfacique des murs par rapport à la surface totale du sol	r_w	-
	Rapport d'aspect	h/W	-
	Hauteur moyenne des bâtiments	H	m
	Direction de la rue	Dir	$^\circ$
	Longueur de rugosité dynamique	z_0	m
Propriétés des matériaux	Albédo (toit, murs, route)	$\alpha_{roof}, \alpha_{wall}, \alpha_{road}$	-
	Emissivité (toit, murs, routes)	$\varepsilon_{roof}, \varepsilon_{wall}, \varepsilon_{road}$	-
	Conductivité thermique des matériaux (toit, murs, routes)	$\lambda_{roof}, \lambda_{wall}, \lambda_{road}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
	Capacité calorifique volumique des matériaux (toit, murs, route)	$C_{roof}, C_{wall}, C_{road}$	$kJ \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$

TEB comprend un modèle thermique pour évaluer les transferts de chaleur par conduction à travers l'enveloppe du bâti. Les parois et les toits comportent plusieurs couches de matériaux, dont le nombre et les caractéristiques sont définis par l'utilisateur.

2.3. TEB-SBL

La version originale de TEB était un modèle monocouche, c'est-à-dire que l'air dans le canyon urbain était considéré comme un volume homogène. Cette simplification ne permettait donc pas d'évaluer les variables climatiques en plusieurs points du canyon. Hamdi et Masson (2008) et Masson et Seity (2009) ont développé une paramétrisation multicouche de la couche à l'intérieur du canyon urbain. Ce développement se nomme TEB-SBL (Surface Boundary Layer) et s'appuie sur la force de traînée à partir des travaux de Yamada (1982).

Ainsi, ce modèle multicouche permet la détermination d'une distribution verticale des données microclimatiques entre la surface du sol et le haut du canyon urbain (Figure 4.3). Les profils verticaux de température et d'humidité sont influencés par les conditions de la route, des parois et des toits. Le principal avantage est la possibilité d'étudier le confort au niveau des piétons. En revanche, les parois urbaines ne sont pas discrétisées verticalement. Les échanges entre les parois et le canyon urbain sont donc toujours calculés à partir des conditions microclimatiques moyennes du canyon.

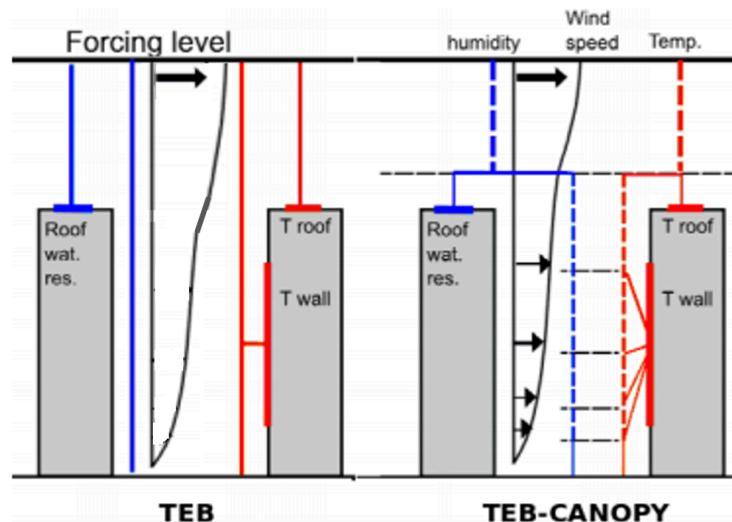


Figure 4.3 – Représentation schématique de la version originale de TEB et de TEB-SBL (Masson et al. 2013)

2.4. TEB-BEM

TEB a été amélioré dans le but de mieux décrire les processus physiques des bâtiments (Figure 4.4). Cette paramétrisation est appelée TEB-BEM (Building Energy Model) et a été développée par Bueno et al. (2012), dans l'objectif double d'évaluer la demande énergétique des bâtiments et de quantifier les interactions entre le microclimat du canyon et le bâtiment. Ce développement a été conçu dans la continuité de TEB, en conservant des hypothèses physiques et géométriques simples. Les principales hypothèses simplificatrices effectuées sur le bâtiment sont les suivantes :

- Le bilan d'énergie interne du bâtiment est effectué pour une zone thermique unique ;
- L'inertie thermique des matériaux est représentée par une masse thermique unique ;
- Le sol sous le bâtiment est considéré adiabatique ;
- Le pourcentage de surfaces vitrées est identique pour l'ensemble des façades.

Cette paramétrisation des bâtiments considère :

- Les gains internes liés aux équipements ;
- La pénétration du rayonnement dans le bâtiment à travers les vitrages ;
- Les échanges de chaleur sensible et latente engendrés par l'infiltration et la ventilation ;
- Le réchauffement ou rafraîchissement induit par les systèmes de chauffage et de climatisation en fonction des températures de consigne ;
- Les effets des méthodes passives comme la ventilation naturelle et les stores sur les fenêtres ;
- Le phénomène de convection au niveau de chaque surface intérieure.

TEB-BEM inclut également les échanges thermiques avec le sous-sol, ce qui permet de prendre en compte l'inertie thermique du sol et donc d'éviter des échauffements ou refroidissements trop rapides du bâtiment et notamment des parois.

Ainsi, TEB-BEM calcule l'évolution dynamique de la température et de l'humidité de l'air intérieur ainsi que la demande énergétique liées aux systèmes de CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation), qui sera ensuite intégrée sur l'année. Cette paramétrisation permet également d'évaluer les rejets de chaleur sensible et latente de ces systèmes vers l'extérieur qui peuvent se faire au niveau des façades ou des toits. Ceci rend possible l'étude de l'impact des aménagements urbains sur la demande énergétique des bâtiments et les effets de rétroaction de l'usage du chauffage ou de la climatisation sur les conditions microclimatiques (De Munck, 2013).

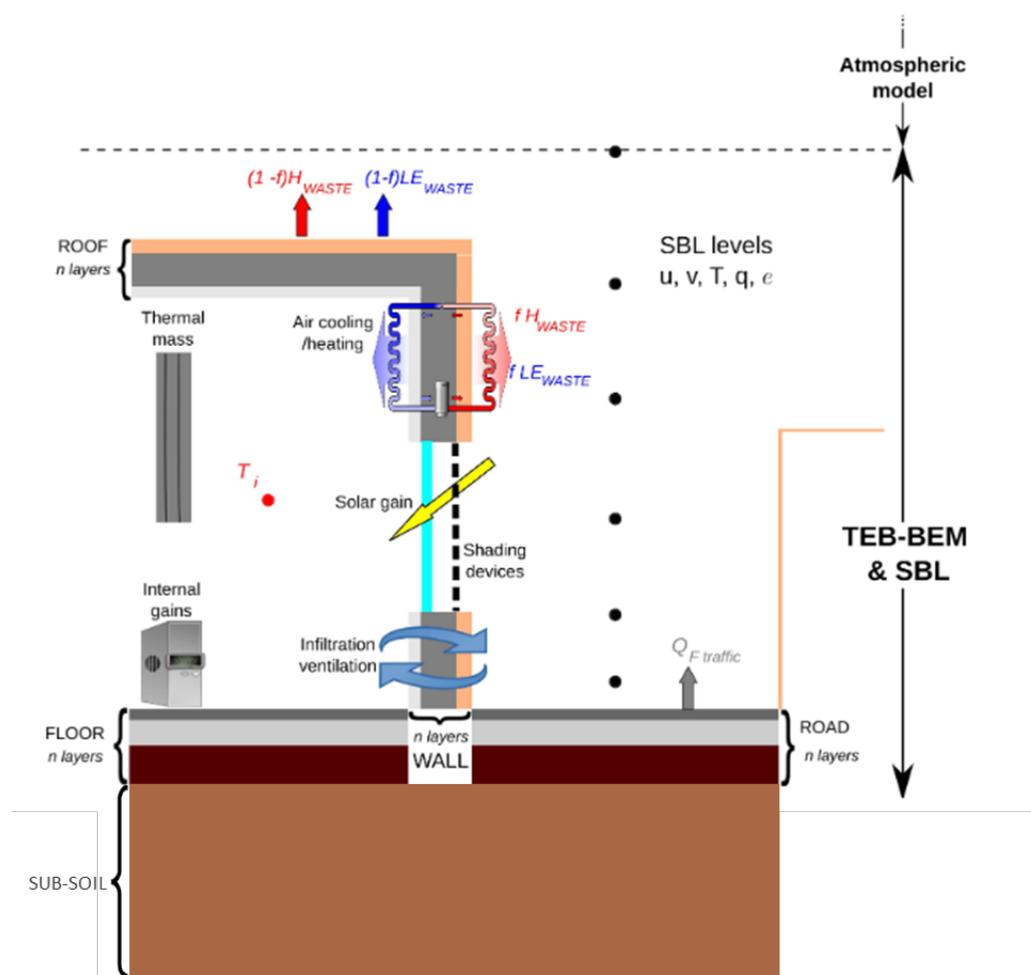


Figure 4.4 – Représentation schématique d'une rue canyon dans TEB, intégrant les principaux processus considérés par BEM (Météo France)

Les travaux de Schoetter et al. (2017) ont permis de paramétrer la variabilité des comportements énergétiques dans TEB-BEM. En effet, ils intègrent la possibilité de définir différents compartiments, qui soient chacun représentatif d'un type d'usage des bâtiments et des comportements humains associés. De plus, Schoetter et al. (2017) proposent des grandeurs pour définir le comportement humain, en fonction de l'usage. Les configurations proposées sont basées sur des données administratives et sur différentes enquêtes. Elles fournissent des valeurs concernant les scénarios d'occupation, les températures de consignes utilisées pour les équipements de CVC, les gains internes, l'ouverture des fenêtres et la gestion des dispositifs d'ombrage. Des facteurs sont également fournis pour moduler ces éléments en fonction du niveau d'occupation (présence, absence de courte ou longue durée) et du moment de la journée (jour ou

nuits). Ces ajouts permettent une description plus détaillée des bâtiments dans TEB-BEM et donc l'amélioration des simulations énergétiques à l'échelle urbaine.

2.5. TEB-UTCI

TEB calcule les variables microclimatiques. L'analyse de ces variables par le prisme du confort thermique permet d'étudier les aménagements urbains en se basant non plus seulement sur les consommations énergétiques, mais également sur les sensations thermiques des usagers.

Lors du projet VURCA, un nouveau module a été intégré à TEB pour calculer l'UTCI (Universal Thermal Comfort Index) (Hallegatte et al., 2013). L'UTCI est un indice de confort thermique extérieur instationnaire. Il a été développé dans le cadre du COST Action 730 (Jendritzky et al., 2008), dans le but de prédire le confort et la santé des individus à partir de données météorologiques.

Pour cela, il prend en compte les principales variables météorologiques impactant le confort : la température et la pression de vapeur d'eau de l'air à 2 m au-dessus du sol, la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol et la température radiative moyenne (T_{mrt}). Dans TEB, la température radiative moyenne est calculée à partir des contributions du rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi incident à la personne, du rayonnement infrarouge incident et des émissions infrarouges des surfaces environnantes (Redon, 2017).

L'UTCI comprend également un modèle de thermorégulation du corps humain : le modèle dynamique à 340 nœuds de Fiala (2001), permettant notamment de calculer l'état thermique de plusieurs segments du corps et d'évaluer leur réponse physiologique. Ce modèle de thermorégulation étant trop complexe et coûteux pour être intégré, son approche par une équation de régression polynomiale du 6^{ème} ordre proposée et validée par Bröde et al. (2012, 2009), a été utilisée dans TEB (Redon, 2017).

La méthode de calcul de l'indice est ensuite basée sur un concept d'environnement « équivalent ». Cet environnement équivalent se caractérise par une humidité relative à 50%, une pression de vapeur d'eau de 2 kPa, une vitesse d'air de l'ordre de 0,5 m/s et enfin une température de l'air égale à la température radiante. Dans ces conditions, l'activité de référence d'un individu « standard » est la marche à 4 km/h, qui équivaut à un métabolisme de $135 W \cdot m^{-2}$. Notons que cette hypothèse considère que tous les individus sont équivalents vis-à-vis du confort thermique, ce qui correspond à une forte approximation.

Cette méthode d'environnement « équivalent » permet de déduire une température de référence qui provoquerait la même réponse physiologique dynamique et donc la même sensation de confort (ou d'inconfort) thermique que l'environnement étudié (Bröde et al., 2010). L'échelle d'interprétation de cette température de référence est présentée dans la Figure 4.5. Les conditions sont jugées confortables pour l'individu lorsque la température équivalente UTCI est comprise en 9 et 26 °C.

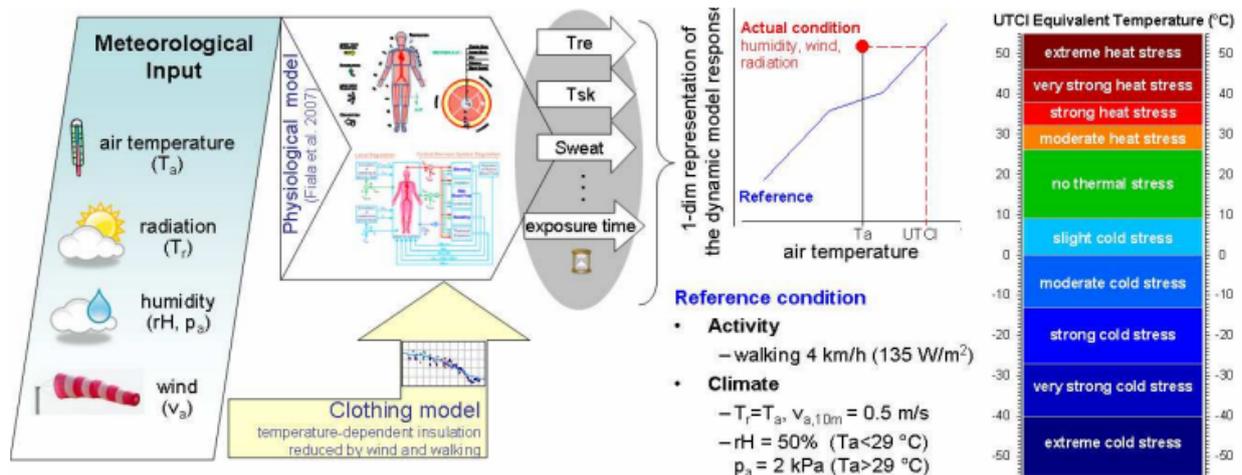


Figure 4.5 – Schéma représentant le concept du calcul de l'UTCI (Bröde et al., 2010)

TEB s'appuie sur l'UTCI pour évaluer le confort thermique dans trois situations définies (Figure 4.6) :

- Un individu à l'extérieur et exposé au soleil, dont le confort est influencé par la température et l'humidité de l'air dans la rue, la vitesse du vent, la somme des rayonnements solaires (direct, diffus et réfléchis) et infrarouges reçus ;
- Un individu à l'extérieur et à l'ombre, impacté par les mêmes variables sauf le rayonnement solaire direct ;
- Un individu, situé à l'intérieur du bâtiment, dont le bilan thermique tient compte de la température et de l'humidité de l'air intérieur ainsi que des flux radiatifs.

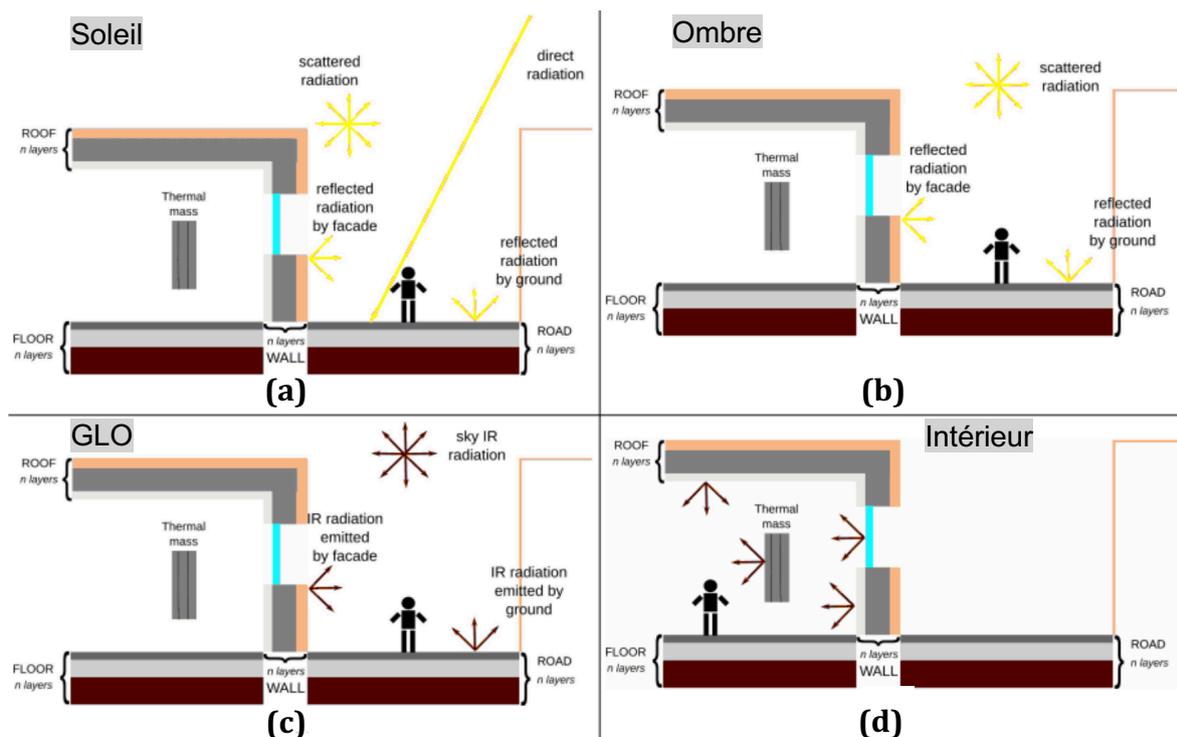


Figure 4.6 – Représentation schématisée des trois environnements dans lesquels l'UTCI est calculé dans TEB. (a) et (b) décrivent l'influence du rayonnement solaire pour un individu à l'extérieur au soleil et à l'ombre respectivement, (c) montre l'impact du rayonnement infrarouge pour les deux situations à l'extérieur et (d) correspond à la situation intérieure (Pigeon 2011)

2.6. Les autres modules de TEB

Plusieurs améliorations successives de TEB ont permis la prise en compte de la végétation. Ainsi, la paramétrisation des processus énergétiques, hydrologiques et radiatifs a été réalisée pour la végétation basse (Lemonsu et al., 2012), les toitures végétalisées (De Munck et al., 2013), les arbres urbains (Redon et al., 2020, 2017). Les systèmes d'arrosage sont également simulés pour évaluer la consommation en eau nécessaire pour l'irrigation des végétaux.

De plus, un module nommé TEB-HYDRO a été développé dans l'objectif de considérer les infiltrations et les processus de stockage et déstockage d'eau dans les sous-sols urbains (Stavropoulos-Laffaille et al. 2018).

Le schéma de rayonnement urbain SPARTACUS (Hogan, 2019a, 2019b) faisant des simplifications géométriques plus réalistes a été intégré récemment. TEB n'est donc ainsi plus basé sur le concept simplifié de rue canyon de longueur infinie (Oke, 1982).

3. Implémentation des transferts d'humidité dans TEB

3.1. Prise en compte de l'humidité dans TEB

Le modèle initial considère déjà plusieurs phénomènes liés à l'humidité dans le canyon et à l'intérieur des bâtiments. En effet, TEB effectue un bilan massique permettant de calculer l'humidité spécifique dans le canyon urbain en considérant l'émission d'humidité anthropique (due aux bâtiments et au trafic routier), les échanges d'humidité avec l'atmosphère, la végétation, les routes et les sols. En parallèle, le module BEM calcule l'humidité spécifique de l'air intérieur, en considérant les gains internes hydriques, les échanges de vapeur d'eau liés à l'ouverture des fenêtres, à l'infiltration d'air et aux équipements de CVC (Chauffage Ventilation Climatisation).

Finalement, le modèle TEB considère les principaux phénomènes impactant l'humidité à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. Cependant, il néglige actuellement les transferts d'humidité à travers les parois.

3.2. Modification du modèle de paroi

L'outil TEB comprend un modèle thermique pour décrire les transferts de chaleur en 1D à travers des parois multicouches. Actuellement, seuls les transferts thermiques par conduction sont modélisés et les matériaux sont supposés secs. L'équation de la chaleur utilisée pour décrire les parois est la suivante :

$$C_{mat} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4-1)$$

Avec C_{mat} la capacité calorifique volumétrique du matériau ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)

TEB considère les variations spatiales des propriétés thermiques, en fonction des couches de matériaux. En revanche, il néglige l'évolution temporelle des propriétés thermiques en fonction

de la quantité d'humidité dans chaque couche. Le modèle actuel ne prend en compte aucun processus hydrique.

Le modèle de transferts couplés de masse et de chaleur, utilisé pour intégrer les échanges d'humidité à travers les parois, est décrit en détail dans la section 2.2 du Chapitre 2. Il se compose de deux équations : une pour la conservation de l'énergie et l'autre pour la conservation de la chaleur. Actuellement, TEB comprend seulement une équation résolvant les transferts thermiques par conduction. Pour implémenter les transferts hydriques dans TEB, il est donc nécessaire d'ajouter une seconde équation pour résoudre le bilan massique. L'équation de la chaleur doit également être complétée en ajoutant les processus hydriques, ce qui équivaut à intégrer le stockage de chaleur dans la phase liquide, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau et les transferts de chaleur avec la phase vapeur.

Ainsi, l'unique équation de TEB est remplacée par un système d'équation plus complexe à résoudre. La méthode de résolution a donc également dû être modifiée. Le Chapitre 2 propose une méthode originale issue d'un compromis entre la méthode de résolution initialement utilisée pour résoudre les transferts à travers les parois dans TEB et les méthodes plus complexes des modèles hygrothermiques à l'échelle de la paroi. La méthode numérique développée est intégrée à l'outil TEB. L'implémentation de cette méthode nécessite également de modifier les échelles de discrétisation spatiotemporelle.

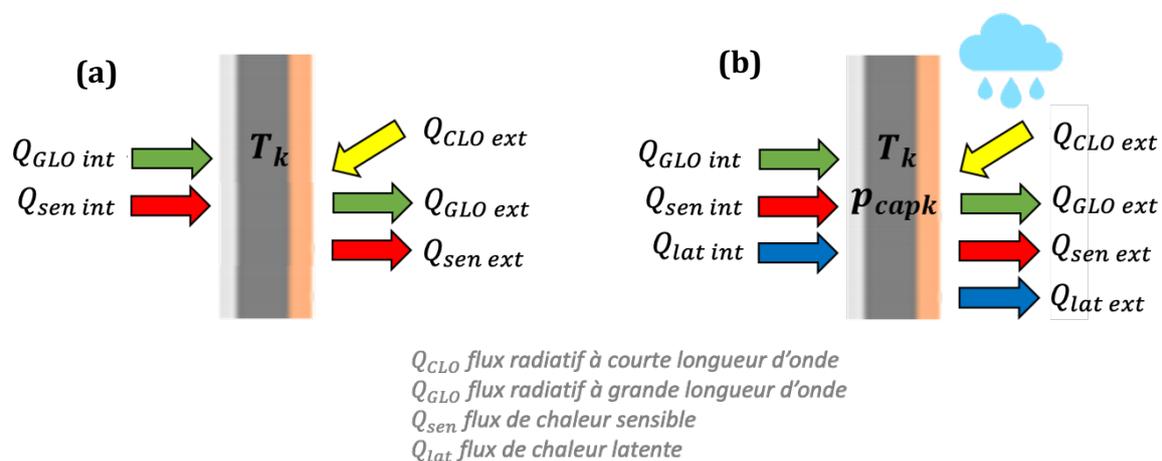


Figure 4.7 – Simulation des parois dans TEB avant (a) et après (b) intégration des transferts d'humidité

3.3. Technique de maillage des parois

La technique de maillage appliquée dépend des objectifs de l'étude. L'analyse de sensibilité effectuée dans le Chapitre 2 a montré que la version 3 du maillage est suffisante, lorsqu'on souhaite étudier l'impact des échanges entre la paroi et son environnement. Cette version de maillage a la spécificité de ne pas comporter d'affinement du maillage à l'interface entre deux couches de matériaux. En revanche, si l'étude vise à étudier le risque de développement de moisissures à l'interface entre le mur et l'isolant, il est alors nécessaire d'appliquer la version 4 du maillage, qui comprend un affinement du maillage entre les couches de matériaux.

3.4. Propriétés des matériaux

Les parois simulées dans TEB sont des parois multicouches, c'est-à-dire qu'elles sont composées de plusieurs matériaux. Jusqu'à présent les données d'entrée pour définir les matériaux étaient restreintes à l'épaisseur de la couche de chaque matériau, la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique (Tableau 4.1). Pour décrire le comportement hydrique des matériaux, il est primordial d'ajouter des paramètres. En effet, il est nécessaire de fournir en entrée du modèle des indications sur la capacité de stockage d'humidité, la conductivité d'eau liquide et la diffusion de vapeur d'eau. De plus, certaines de ces caractéristiques varient en fonction du niveau d'humidité de la couche de matériaux. Ces propriétés ne doivent donc pas être définies par une seule grandeur mais par une courbe. Deux méthodes ont été implémentées dans TEB pour décrire l'évolution des caractéristiques en fonction de l'humidité : une liste de points ou la définition d'une fonction. La méthode est ensuite sélectionnée en fonction de la disponibilité des données et des caractéristiques des matériaux.

Premièrement, la conductivité thermique des matériaux évolue en fonction de la teneur en eau. La conductivité thermique du matériau humide est calculée en fonction de la teneur en eau et de la conductivité thermique de l'eau liquide (voir équation (1-22) du Chapitre 1) (Nicolai, 2007).

Le modèle appliqué ne permet pas de connaître directement la valeur de la teneur en eau. Elle doit être calculée à partir de la courbe de rétention d'humidité, qui relie la teneur en eau à la pression capillaire. Le modèle intégré dans TEB pour décrire la courbe de rétention d'humidité est basée sur les travaux de Durner (1994). Il se présente sous la forme de l'expression multimodale suivante :

$$w(p_c) = \sum_{i=1}^N w_i [1 + \alpha_i |p_c|^{n_i}]^{-m_i} \quad (4-2)$$

Avec $\sum w_i = 1$ et $m_i = 1 - \frac{1}{n_i}$

La conductivité de l'eau liquide peut être calculée en utilisant le modèle de Mualem, qui a initialement été conçu pour calculer la conductivité hydraulique du sol (Mualem, 1976; Priesack et Durner, 2006) :

$$K_l = K_{l,sat} s^\tau \left[\frac{\sum_i l_i \alpha_i (1 - (1 - s_i^{1/m_i})^{m_i})}{\sum_i l_i \alpha_i} \right]^2 \quad (4-3)$$

Avec $K_{l,sat}$ la conductivité d'eau liquide à saturation (s), $s = \frac{w}{w_{sat}}$ et $s_i = \frac{w_i}{w_{sat}} = l_i [1 + (\alpha_i |p_c|)^{n_i}]^{-m_i}$

Finalement, l'utilisateur de TEB a le choix entre fournir les coefficients des fonctions présentées ci-dessus ou directement donner une liste de points reliant la variable à calculer au niveau d'humidité. Dans ce cas, les valeurs sont alors calculées par interpolation. La liste de points doit donc être d'une longueur raisonnable pour éviter de trop augmenter le temps de calcul de TEB.

Le dernier paramètre évoluant en fonction de la teneur en eau est la perméabilité à la vapeur d'eau. Künzle (1995) propose de considérer le coefficient de diffusion de vapeur constant. En effet, il est presque constant dans la région de sorption et les transferts de vapeur d'eau ont principalement lieu dans cette région.

3.5. Calcul des conditions aux limites en évolution dynamique

Le modèle TEB calcule l'évolution dynamique des conditions aux limites pendant la simulation, en tenant compte de l'impact de la paroi sur son environnement. En effet, le modèle TEB détermine les conditions hygrothermiques dans le canyon urbain et à l'intérieur des bâtiments à chaque pas de temps et ces données sont ensuite utilisées pour calculer les conditions limites du mur au pas de temps suivant.

Comme expliqué dans la section 2, le modèle TEB simule une seule zone thermique de bâtiment, ce qui signifie que les parois ne sont pas discrétisées en fonction des étages. Les conditions aux limites moyennes sont donc déterminées pour l'ensemble de la façade, en utilisant la température moyenne, la vitesse moyenne du vent et l'humidité spécifique moyenne dans le canyon urbain.

3.5.1. Conditions aux limites thermiques

La section 2 a présenté TEB et ces différents modules et a ainsi montré que TEB permet de simuler de manière complète le microclimat urbain et le comportement énergétique du bâtiment. La version de TEB avant intégration des transferts d'humidité tient donc compte de manière très détaillée des conditions aux limites thermiques et radiatives.

Ainsi, au niveau de la surface intérieure, les échanges suivants sont considérés :

- Les échanges radiatifs à grande longueur d'onde entre la surface de la paroi étudiée et les autres surfaces intérieures (masse interne, plancher, autres murs et fenêtres) ;
- Les gains internes radiatifs ;
- La charge due aux apports solaires ;
- La convection thermique entre la surface de la paroi et l'air intérieur.

A la surface du mur extérieur, les conditions aux limites sont calculées en tenant compte des phénomènes suivants :

- La convection thermique entre la façade et l'air extérieur ;
- Le rayonnement solaire ;
- Les échanges radiatifs à grande longueur d'onde entre la façade étudiée et les autres façades (y compris les fenêtres), le sol, la neige mais aussi l'atmosphère.

3.5.2. Conditions aux limites hydriques

L'intégration des transferts d'humidité à travers les parois implique d'ajouter les conditions aux limites reliées à l'humidité. L'objectif est donc d'intégrer les échanges massiques entre la paroi et les ambiances intérieures et extérieures. Il faut donc ajouter deux phénomènes : la convection massique et la pluie battante.

Convection massique

La convection massique est un échange d'humidité induit par un gradient de pression de vapeur entre la surface de la paroi et son environnement. Elle peut avoir lieu au niveau de la surface intérieure ou extérieure. Ce phénomène implique une condition aux limites massique ($J_{conv,surf,m}$) et une condition aux limites thermique ($q_{conv,surf,m}$), qui est reliée à la chaleur latente de la vapeur d'eau :

$$j_{conv,surf,m} = h_{conv,m} \left[p_{v,env} - p_{v,sat}(T_{surf}) \exp\left(\frac{p_{c,surf}}{\rho_l R_v T_{surf}}\right) \right] \quad (4-4)$$

$$q_{conv,surf,m} = L_v \cdot h_{conv,m} \left[p_{v,env} - p_{v,sat}(T_{surf}) \exp\left(\frac{p_{c,surf}}{\rho_l R_v T_{surf}}\right) \right] \quad (4-5)$$

La pression de vapeur de l'air ambiant intérieur ou extérieur est déduite de l'humidité spécifique qui est calculée à partir des bilans massiques intérieur ou extérieur. Le coefficient de convection massique peut être facilement déterminé à partir du coefficient de convection thermique, en utilisant la relation de Lewis (Janssen et al., 2007a).

Pluie battante

La paroi intercepte une partie de la pluie battante. La quantité de pluie incidente à la paroi dépend de plusieurs paramètres, comme la quantité de précipitations, l'orientation de la paroi, la vitesse et la direction du vent. L'outil TEB permet d'estimer la vitesse locale du vent à l'intérieur du canyon, qui est un critère important pour l'estimation de la pluie battante. En effet, TEB simule un profil de vent unidimensionnel, à l'intérieur du canyon urbain en utilisant une approche basée sur la force de traînée et en considérant l'effet de la végétation et les canopées urbaines (Hamdi et Masson, 2008; Masson et Seity, 2009). La méthode choisie pour calculer la pluie incidente est basée sur les travaux de Straube et Burnett (2000), car cette formule s'appuie sur la vitesse du vent local.

$$j_{pluie,inc} = \frac{1}{v_t} \cdot RAF \cdot v(z) \cdot j_{pluie} \cdot \cos(D - \theta) \quad (4-6)$$

Avec $j_{pluie,inc}$ le flux de pluie incident à la façade ($kg \cdot m_{paroi}^{-2} \cdot s^{-1}$), v_t la vitesse terminale de chute des gouttes de pluie (m/s), RAF Rain Admittance Factor (-), $v(z)$ la vitesse du vent local à la hauteur du point étudié z (m/s), j_{pluie} la quantité de précipitations ($kg \cdot m_{sol}^{-2} \cdot s^{-1}$), D la direction du vent horaire moyenne ($^\circ$) et θ l'orientation de la paroi ($^\circ$).

La vitesse de chute d'une goutte de pluie dépend de son diamètre et est calculée en utilisant l'équation de Dingle et Lee (1972) :

$$v_t(d) = -0.166033 + 4.91844 d - 0.888016 d^2 + 0.054888 d^3 \quad (4-7)$$

Avec d le diamètre des gouttes d'eau (m).

La vitesse terminale d'une goutte de pluie moyenne est estimée à partir du diamètre moyen de la goutte. Blocken et Carmeliet (2010) proposent la formule suivante pour calculer le diamètre moyen des gouttes de pluie, d'après les travaux de Best (1950) :

$$\bar{d} = 1.105r^{0.232} \quad (4-8)$$

Les parois n'étant pas discrétisées verticalement, un seul flux de pluie absorbé est utilisé par TEB pour l'ensemble de la paroi. Il correspond au flux moyen absorbé par la paroi. La vitesse du vent utilisée dans l'équation n'est donc pas la vitesse du vent à une hauteur spécifique, mais la vitesse moyenne du vent simulée à l'intérieur du canyon. En ce qui concerne la direction locale du vent, TEB ne permet pas de simuler une direction de vent à l'intérieur du canyon urbain, elle est donc supposée égale à celle au-dessus du canyon.

Cependant, la vitesse locale du vent généralement utilisée dans l'équation de Straube et Burnett (2000), correspond à la vitesse du vent dans une région de vent libre et donc en dehors de la région perturbée par les bâtiments. En effet, le coefficient RAF permet de passer de l'intensité de pluie battante en champ libre à la déposition de la pluie sur la façade du bâtiment (Straube, 2010). Ce coefficient dépend de l'écoulement du vent local, mais aussi du diamètre des gouttes de pluie, de la forme du bâtiment et de l'angle d'attaque du vent. Dans notre cas, la vitesse locale du vent prend déjà en compte une partie de l'écoulement du vent local, mais les autres facteurs doivent encore être considéré par un coefficient. Le choix de la valeur du coefficient RAF est complexe. Des valeurs de coefficients sont proposées par Straube et Burnett (2000) pour seulement quelques configurations typiques. La section 4.1 présentera la manière dont le coefficient RAF a été déterminé à partir des données expérimentales.

Cette méthode semi-empirique permet de calculer le flux de pluie incident à la paroi, dont une partie est absorbée par la paroi et l'autre ruisselle le long de la façade (Figure 4.8). Le flux de pluie réellement absorbé par la paroi dépend également des conditions hydriques du matériau et est calculé en appliquant la formule (1-34) présentée dans la section 3.5.3 du Chapitre 1.

Par ailleurs, la pluie absorbée par la paroi entraîne également un flux de chaleur, qui peut être calculé de la manière suivante :

$$q_{pluie} = c_l(T_{can} - T_{surf}) \cdot j_{pluie,abs} \quad (4-9)$$

Cette équation traduit le passage de l'eau de pluie absorbée de la température du canyon à la température de surface de la paroi.

3.6. Modification de la répartition de la pluie dans la rue canyon

L'ajout de la pluie absorbée par les parois dans TEB, implique une modification de la répartition de la pluie entrant dans le canyon urbain. En effet, avant intégration des transferts d'humidité à travers les parois, la totalité de la pluie entrant dans le canyon était considérée comme reçue par le sol et répartie horizontalement de manière uniforme, quelles que soient la direction du vent et

la forme du canyon urbain. Désormais, une partie de la pluie battante incidente à la paroi est absorbée et la pluie incidente non absorbée ruisselle le long du mur (Figure 4.8).

$$J_{ruissellement} = J_{pluie,inc,paroi} - J_{pluie,abs,paroi} \quad (4-10)$$

Avec $J_{ruissellement}$ le ruissellement le long de la paroi ($kg \cdot m_{paroi}^{-2} \cdot s^{-1}$).

Finalement, le sol perçoit désormais la différence entre la pluie totale entrant dans le canyon et la pluie absorbée par la paroi. Le flux de pluie reçu par le sol est toujours réparti horizontalement de manière uniforme.

$$J_{pluie,sol} = J_{pluie} - 0.5(J_{pluie,abs,paroiA} + J_{pluie,abs,paroiB}) * r_{paroi/sol} \quad (4-11)$$

Avec $J_{pluie,sol}$ le flux de pluie reçue par le sol (route et jardin) ($kg \cdot m_{sol}^{-2} \cdot s^{-1}$) et $r_{paroi/sol}$ le rapport entre la surface du mur et celle de sol.

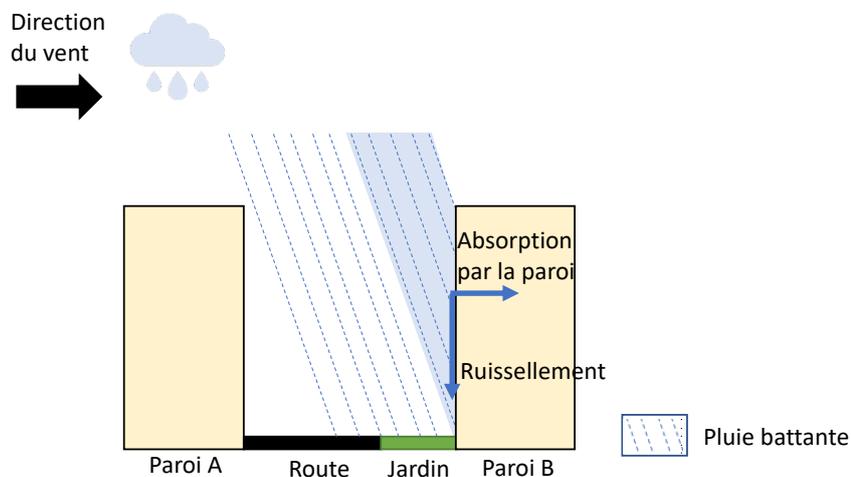


Figure 4.8 – Schéma de la répartition de pluie battante à l'intérieur du canyon urbain

3.7. Gestion de la variation du pas de temps

Comme expliqué dans le Chapitre 2, la méthode développée pour la résolution des transferts couplés, s'appuie sur un pas de temps fixé à cinq minutes (qui correspond au pas de temps habituel de TEB). Néanmoins, dans les moments critiques pour la convergence, le pas de temps est réduit à dix secondes. Le modèle de climat urbain TEB est numériquement stable avec un pas de temps de cinq minutes et ne nécessite pas de réduction du pas de temps. Le mécanisme d'ajustement du pas de temps est donc uniquement appliqué aux transferts dans la paroi et non pas à l'ensemble du modèle TEB.

Cette gestion du pas de temps permet de conserver un temps de calcul raisonnable pour le modèle global, mais pose la question de la gestion des conditions aux limites. En effet, lors des réductions

de pas de temps, les éléments nécessaires pour le calcul des conditions aux limites (température et humidité de l'environnement, flux radiatifs et pluie battante) continuent à être calculés toutes les cinq minutes. Les conditions aux limites sont donc constantes pour tous les sous pas de temps de dix secondes et ce jusqu'à la fin du pas de temps de cinq minutes.

3.8. Ajout d'un modèle de développement de moisissures

L'intégration des transferts hydriques permet également de connaître l'évolution temporelle de l'humidité à l'intérieur de la paroi. Une donnée indispensable pour évaluer la croissance de moisissures. Il existe plusieurs modèles permettant d'évaluer le risque de moisissures et Vereecken et Roels (2012) en proposent une revue. Ces modèles sont divisés en deux catégories : les modèles statiques et les modèles dynamiques. Les seconds ont l'avantage de représenter dynamiquement les phénomènes physiques impactant la croissance et la décroissance de moisissures. Le modèle VTT est un des modèles dynamiques les plus utilisés (Vereecken et al., 2015b). Ce modèle est intégré dans l'outil TEB pour évaluer le risque de développement de moisissures. La suite de la section décrit les équations et les options à implémenter.

Le modèle VTT est un modèle empirique développé par Hukka et Viitanen (1999) pour prédire le développement de moisissures. Le taux de croissance est décrit à partir d'un indice de moisissure (M), allant de 0 à 6 (Tableau 4.2). Ce modèle a été initialement développé pour des matériaux en bois et a ensuite été amélioré pour fonctionner avec d'autres matériaux de construction (Ojanen et al., 2011, 2010). Les matériaux sont classifiés en quatre catégories en fonction de leur niveau de sensibilité au développement de moisissures (Tableau 4.3). Chaque classe de sensibilité est associée à des valeurs de paramètres, qui seront utilisés pour le calcul de la croissance de moisissures (Tableau 4.4).

Tableau 4.2 – Indice de moisissures (M) (Vereecken et Roels, 2012)

Indice	Taux de croissance	Description		
0	Pas de croissance de moisissures	Spores non activées		
1	Faible quantité de moisissures à la surface (microscope)	Phase initiale de croissance	Niveau microscopique	Visuellement détectable
2	Moins de 10% de surface couverte de moisissures (microscope)			
3	10% à 30% de surface couverte de moisissures (visuel) ou moins de 50% de couverture de moisissures (microscope)	Production de nouvelles spores		
4	30% à 70% de surface couverte de moisissures (visuel) ou plus de 50% de couverture de moisissures (microscope)	Croissance modérée		
5	Plus de 70% de surface couverte de moisissures (visuel)	Croissance élevée		
6	Des moisissures denses couvrent près de 100 % de la surface	Couverture autour de 100%		

Tableau 4.3 – Classe de sensibilité à la moisissure (Ojanen et al., 2011, 2010)

Classe de sensibilité	Groupes de matériaux
Très sensible	Bois non traités
Sensible	Bois rabotés, produits revêtus de papier, panneaux de bois
Moyennement résistant	Matériaux à base de ciment ou de plastique
Résistant	Produits en verre ou en métal, matériaux protégés à partir de traitements efficaces

La croissance de moisissures nécessite des conditions spécifiques, notamment en termes de température et d'humidité relative. Le modèle VTT s'appuie sur une humidité relative critique (HR_{crit}), qui équivaut au plus faible niveau d'humidité pour la croissance de moisissures :

$$HR_{crit} = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100,0 & \text{si } T < 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ HR_{min} & \text{si } T \geq 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4-12)$$

Lorsque l'humidité relative est supérieure à HR_{crit} , on estime que les conditions sont favorables à la croissance de moisissures. L'augmentation de l'indice de moisissures est alors calculée en appliquant une équation différentielle, qui tient notamment compte de l'évolution de la température et de l'humidité relative :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \exp(-0,68 \cdot \ln(T) - 13,9 \cdot \ln(HR) + 0,14 \cdot W - 0,33SQ + 66,02)} k_1 k_2 \quad (4-13)$$

Avec T la température ($^\circ\text{C}$), HR l'humidité relative (%), W l'espèce de bois et SQ le terme traduisant la qualité de la surface. Ces deux derniers termes sont fixés à 0, pour les autres matériaux que le bois (Viitanen et al., 2011)

Le coefficient k_1 traduit le taux de croissance en conditions favorables et le coefficient k_2 représente la modération de l'intensité de croissance, lorsque l'indice de moisissures M s'approche des valeurs maximales :

$$k_2 = \max(1 - \exp(2,3 * (M - M_{max})); 0) \quad (4-14)$$

M_{max} est l'indice de croissance de moisissures maximal et est calculé de la manière suivante :

$$M_{max} = A + B \frac{HR_{crit} - HR}{HR_{crit} - 100} - C \left(\frac{HR_{crit} - HR}{HR_{crit} - 100} \right)^2 \quad (4-15)$$

Tableau 4.4 – Valeurs des paramètres en fonction de la classe de sensibilité (Ojanen et al., 2011, 2010)

Classe de sensibilité	k_1 (si $M < 1$)	k_1 (si $M \geq 1$)	M_{max} (influence sur k_2)			HR_{min} (%)
			A	B	C	
Très sensible	1	2	1	7	2	80
Sensible	0,578	0,386	0,3	6	1	80
Moyennement résistant	0,072	0,097	0	5	1,5	85
Résistant	0,033	0,014	0	3	1	85

Lorsque les conditions sont défavorables pour la croissance de moisissures, l'équation différentielle suivante permet de décrire la décroissance de moisissures, variant en fonction de la durée d'exposition à des conditions défavorable :

$$\frac{dM}{dt_{pin}} = \begin{cases} -0,00133 & \text{si } t - t_1 \leq 6h \\ 0 & \text{si } 6h \leq t - t_1 \leq 24h \\ -0,000667 & \text{si } t - t_1 > 24h \end{cases} \quad (4-16)$$

Avec $t - t_1$ la durée d'exposition à des conditions défavorables.

Cependant, cette équation est seulement adaptée pour la décroissance de moisissures dans le pin. Pour la transposer à d'autres matériaux, il est nécessaire d'appliquer un coefficient de décroissance à l'équation originale. Ce coefficient C_{mat} varie en fonction du matériau et il existe plusieurs classes de décroissance (Tableau 4.5).

$$\frac{dM}{dt_{mat}} = C_{mat} \frac{dM}{dt_{pin}} \quad (4-17)$$

Tableau 4.5 – Classes de décroissance (Ojanen et al., 2011, 2010)

C_{mat}	Description
1	Pin dans le modèle original, courtes périodes
0,5	Décroissance significative
0,25	Décroissance relativement faible
0,1	Presque aucune décroissance

Le modèle VTT a ainsi été intégré en tant que nouvelle option dans TEB. L'utilisateur devra fournir plusieurs données d'entrée :

- La localisation du point de la paroi étudiée ;
- La classe de sensibilité ;
- La classe de décroissance.

L'outil TEB donnera alors en sortie l'évolution temporelle de l'indice de moisissures M , sur toute la durée de la simulation. Des indices différents seront calculés pour chaque orientation de paroi.

4. Simulation hygrothermique du centre médiéval de Cahors dans TEB

Cette section met en place une simulation hygrothermique du centre-ville médiéval de Cahors, qui sera effectuée à partir du modèle de climat urbain TEB. L'objectif de cette simulation est double : vérifier la fiabilité du modèle pour représenter les centres historiques et évaluer l'impact de la version modifiée de TEB.

4.1. Configuration de TEB

La version améliorée de TEB est utilisée pour simuler le cas d'étude : le centre-ville médiéval de Cahors, dont les spécificités sont présentées en détail dans la section 2 du Chapitre 3. Des données d'entrée adaptées doivent être utilisées pour configurer la simulation du centre ancien. Les paramètres pour décrire la forme urbaine de Cahors sont définis à partir des indicateurs calculés par Claude (2018). Elle souligne également que deux orientations principales de rue coexistent dans le quartier étudié : nord-sud et est-ouest. TEB a donc été configuré pour simuler séparément ces deux orientations de rue (Figure 4.9).

La prise en compte des transferts d'humidité dans la paroi nécessite de fournir une donnée d'entrée supplémentaire : le coefficient RAF, qui traduit l'exposition des parois à la pluie (section 3.5.2). Ce coefficient a été fixé à 0,2 pour faire correspondre les résultats simulés aux humidités relatives mesurées dans les parois étudiées. Dans les chapitres 2 et 3, la pluie battante était calculée à partir de la norme (NF EN ISO 15927-3, 2009), et un coefficient d'atténuation de la pluie égal à 0,07 était utilisé. Le coefficient appliqué dans TEB est donc supérieur, ce qui s'explique par l'usage d'une autre méthode pour le calcul de la pluie battante (Straube et Burnett, 2000). De plus, dans ce chapitre, la pluie battante est estimée à partir de la vitesse de vent local (calculé au milieu du canyon urbain par TEB), tandis que précédemment la vitesse de vent en champ libre à une hauteur de 10 m était utilisée. Considérer la vitesse du vent dans le canyon permet de prendre en compte un certain nombre d'éléments, comme les obstacles, la rugosité et la forme urbaine. De ce fait, le coefficient d'atténuation de la pluie n'a plus besoin d'inclure ces paramètres et est donc logiquement plus élevé.

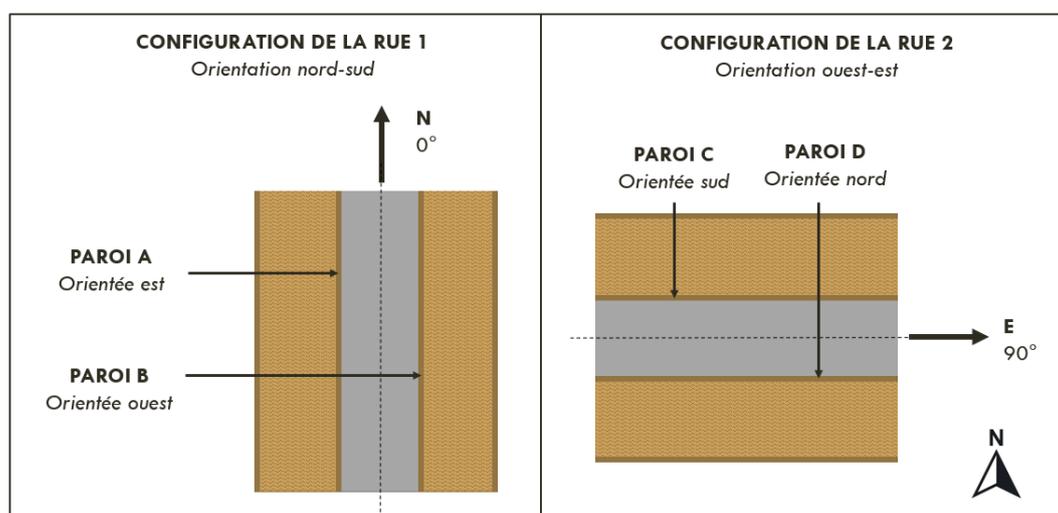


Figure 4.9 – Description des deux orientations de rue simulées (vue du haut)

Les bâtiments présentés dans le chapitre précédent, sont supposés être représentatifs du centre-ville médiéval de Cahors. La configuration des bâtiments dans TEB est donc effectuée à partir de leurs caractéristiques (Tableau 4.6). Ce travail suppose donc que les bâtiments ont déjà subi une première rénovation avec des matériaux contemporains, comme l'isolation du toit à partir de laine minérale, l'installation de double vitrage et une réduction de la perméabilité à l'air. En revanche, le chapitre précédent a mis en avant une plus grande variabilité de compositions de parois. En effet, il existe deux principales typologies de parois à Cahors : briques massives et pans de bois remplis de briques. De plus, différentes méthodes d'isolation sont utilisées en fonction des étages et des bâtiments étudiés. La paroi sera définie de manière différente dans TEB, en fonction des objectifs de la simulation. Ce chapitre se concentre sur l'étude d'une paroi en briques massives isolées par l'intérieur à partir d'un mélange de chaux/chanvre. Par ailleurs, l'inertie interne et le plancher du RDC sont modélisés à partir de bois (Tableau 4.7).

Tableau 4.6 – Propriétés du canyon urbain moyen simulé par TEB

Propriété	Valeur	Unité
Rapport vertical/horizontal de la zone construite	1,8	
Hauteur de bâtiment	12	<i>m</i>
Densité du bâti	0,589	
Longueur de rugosité	1,5	<i>m</i>
Coefficient RAF	0,2	
Gains internes	0	W/m^2
Rapport vitrage/paroi	0,1	
Type de fenêtre	Double-vitrage	
Transmission thermique des fenêtres	2	$W/(m^2/K)$
Dispositifs d'ombrage	Permanent	
Transmission solaire de la protection solaire	0	
Infiltration	4	<i>Vol/h à 50 Pa</i>
Ventilation mécanique	Aucune	
Système de chauffage	Variable (Figure 4.10)	
Système de climatisation	Aucun	

Comme expliqué dans la section 3.4, la version modifiée de TEB nécessite davantage de propriétés pour décrire le comportement hygrothermique des parois. Les caractéristiques hygrothermiques des matériaux constituant les parois sont définies à partir de la caractérisation de l'isolant à base de chaux-chaivre et d'une brique du 16^{ème} siècle, réalisée par Claude (2018). Les valeurs utilisées pour la conductivité et la capacité calorifique volumique sont données dans le Tableau 4.7. L'Annexe B détaille les fonctions utilisées pour décrire le comportement hydrique.

Tableau 4.7 – Caractéristiques thermiques et radiatives des matériaux constituant le bâtiment

Propriété	Matériau	Épaisseur (m)	Capacité calorifique volumétrique ($J.m^{-3}.K^{-1}$)	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Albedo (-)	Émissivité (-)
Toit						
Couche 1 (ext)	Tuile	0,02	1422900	1	0,25	0,8
Couche 2	Laine minérale	0,2	42500	0,04		
Couche 3 (int)	Plaque de plâtre	0,02	765000	0,21		
Paroi						
Couche 1	Brique	0,4	1292800	0,49	0,3	0,9
Couche 2	Chaux- chanvre	0,15	440000	0,107		
Plancher						
Couche 1	Bois	0,2	800000	0,29		
Masse						
Couche 1	Bois	0,15	800000	0,29		

De plus, le centre-ville médiéval de Cahors fait face à un départ des habitants vers des résidences plus modernes, ce qui s'explique principalement par le manque de confort des logements anciens et la précarité énergétique. Par conséquent, de nombreux logements restent vacants. Dans cette étude, les bâtiments sont donc considérés inoccupés, ce qui implique que :

- Aucun équipement de ventilation ni de climatisation ne fonctionne ;
- Les charges internes sont toujours nulles ;
- Les volets sont toujours fermés.

Seul un système de chauffage est activé durant les périodes froides, avec une température de consigne de 19°C, pour plus de détails (voir la section 4.3).

Par ailleurs, notons que les options de TEB suivantes ont été choisies pour simuler le centre ancien :

- Le modèle multicouche (TEB-SBL) est utilisé pour représenter l'évolution verticale des variables dans le canyon urbain ;
- Les échanges radiatifs dans la scène urbaine sont décrits à partir du mode Spartacus ;
- Le modèle TEB calcule le coefficient d'échange de convection thermique à la surface extérieure, en utilisant le modèle de Rowley et al. (1930) et Rowley et Eckley (1932), tandis qu'au niveau de la surface intérieure, le modèle DOE-2 (Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), 1994) est appliqué ;
- La version 3 du maillage est utilisée, puisque ce chapitre n'étudie pas le développement de moisissures.

4.2. Méthodologie de la comparaison avec les données mesurées in-situ

La validation expérimentale des modèles numériques est un élément clé pour obtenir des résultats robustes, lors de la simulation des bâtiments historiques (Costa-Carrapiço et al., 2022a; Huerto-Cardenas et al., 2020; Panico et al., 2023). Ainsi, plusieurs travaux utilisent des données mesurées sur site dans des bâtiments anciens pour calibrer et/ou valider les modèles de parois ou de bâtiments (Andreotti et al., 2022; Hansen et al., 2018; Panico et al., 2023; Roberti et al., 2015; Şahin et al., 2015; Saïd et al., 1999). Une bonne pratique consiste à valider les simulations sur des périodes d'usage pour vérifier la bonne représentation des charges d'occupation et de CVC, mais également des périodes d'évolution libre pour concentrer la validation sur la définition de l'enveloppe du bâti et des conditions aux limites (Kompatscher et al., 2019).

Cette section propose donc une méthode permettant de vérifier la fiabilité de la nouvelle version de TEB et des données d'entrées sélectionnées, pour définir le quartier, le bâtiment et les parois du centre ancien de Cahors. Pour cela, les conditions hygrothermiques simulées dans le bâtiment sont comparées aux mesures in-situ. Cette comparaison s'appuie sur les données enregistrées dans le bâtiment 1 (voir section 3.2 du Chapitre 3), c'est-à-dire le bâtiment composé de briques massives d'une épaisseur de 40 cm. Il est important de noter la forte hétérogénéité concernant la composition des parois. En effet, toutes les parois anciennes ne sont pas rénovées à partir de la même technique. La plupart des parois du bâtiment sont isolées par l'intérieur à partir de polystyrène, alors que la façade du premier étage orientée ouest (Paroi B sur la Figure 4.9) a été rénovée en appliquant 15 cm de chaux-chanvre, côté intérieur. Cependant, cette paroi est l'unique paroi du bâtiment qui est instrumentée. Elle est donc utilisée pour vérifier la fiabilité du modèle. Ainsi, l'hypothèse effectuée pour la configuration de TEB est qu'une paroi composée de 40 cm de briques et isolée par l'intérieur avec 15 cm de chaux-chanvre est représentative du quartier. En réalité, cette composition de paroi n'est pas totalement représentative du centre médiéval de Cahors. Cependant, l'objectif de ce chapitre est de valider la méthode et non pas d'étudier précisément le comportement du centre médiéval de Cahors.

Tout d'abord, la simulation est divisée en deux phases : une phase d'initialisation suivi d'une phase de comparaison. L'étape d'initialisation s'étend sur une année du 17 juin 2020 au 17 juin 2021. L'objectif de cette phase est d'obtenir des conditions initiales dans la paroi, qui soient représentatives dès le début de la phase de comparaison. L'étape de comparaison débute le 17 juin 2021 et se termine le 1^{er} janvier 2022, elle dure donc plus de six mois.

Sur la période de comparaison, les valeurs simulées sont comparées aux mesures en suivant la même méthode que celle utilisée dans la section 4.4 du Chapitre 3. Ainsi, l'écart entre les mesures et les simulations est évalué aux travers de deux indicateurs : EAM (Erreur Absolue Moyenne) et le coefficient de Pearson. Les seuils de validation détaillés dans le chapitre précédent sont utilisés (voir Tableau 2.6). La fiabilité de TEB est vérifiée aux mêmes points de la paroi que dans le chapitre précédent : à l'interface entre la brique et le chaux-chanvre, au milieu de l'isolant et au niveau de la surface intérieure. La principale différence avec la comparaison précédente est que dans ce cas les conditions intérieures ne sont pas des conditions aux limites fixées en fonction des mesures. En effet, TEB à l'aide du module BEM permet de simuler la température et l'humidité dans le bâtiment. Les données ainsi simulées par TEB sont donc comparées aux mesures enregistrées dans la pièce adjacente à la paroi B.

4.3. Données de forçage

Le modèle TEB nécessite un forçage météorologique appliqué au-dessus du canyon. Pendant la phase d'initialisation, les données de la station météorologique localisées sur un toit du centre-ville de Cahors ne sont pas disponibles. Le forçage est donc effectué à partir des données météorologiques enregistrées par des stations proches de Cahors. Les données de forçages pour la température, l'humidité spécifique, la pluie horizontale, le rayonnement solaire, la pression, la vitesse et la direction du vent sont calculées en utilisant les mesures de la station météorologique de Le Montat, qui est située à environ 10 km du centre de Cahors.

La seule donnée manquante est le rayonnement à grande longueur d'onde descendant de l'atmosphère. Une méthode alternative a été utilisée, elle consiste à le calculer en appliquant les formules de Martin et Berdahl (1984) et Walton (1980). Ces équations font appel à la température et la température de rosée, qui sont obtenues à partir des mesures de la station de Le Montat. En revanche, il est également nécessaire de connaître la couverture nuageuse, qui n'est pas une grandeur mesurée dans cette station. Finalement, la valeur de la couverture nuageuse enregistrée par la station météorologique du Gourdon (à environ 40 km de Cahors) est utilisée.

Par ailleurs, ces stations météorologiques mesurent la vitesse du vent à une hauteur de 10 m en conditions rurales, ce qui ne correspond pas au forçage requis par TEB. Une approximation de la vitesse du vent au-dessus du canyon urbain est calculée en utilisant la formule de Tennekes et Lumley (1972), décrivant le profil semi-logarithmique du vent. Notons que la valeur de la pression atmosphérique nécessite également d'être adaptée. Elle est modulée en fonction de l'altitude de mesure et de forçage.

Durant l'étape de comparaison, les données de la station localisée sur le toit de la mairie de Cahors sont disponibles et peuvent être utilisées directement. Cette station fournit la plupart des variables nécessaires pour le forçage (température, humidité spécifique, pluie horizontale, rayonnement solaire, pression, vitesse et direction du vent). Cependant, les variables mesurées par cette station urbaine ne permettent pas le calcul du rayonnement à grande longueur d'onde. La même méthode que pour la phase d'initialisation, est alors appliquée.

Le chauffage a été programmé dans TEB, de sorte qu'il soit allumé sur les mêmes périodes dans la simulation et dans le bâtiment réel. Il est donc activé du 17 juin 2020 au 17 mai 2021 et du 17 novembre au 1 janvier 2022 (Figure 4.10). Le fait que le chauffage soit allumé ne signifie pas qu'il fonctionne en continu. Il chauffe seulement lorsque la température intérieure passe en dessous de la température de consigne (19°C).

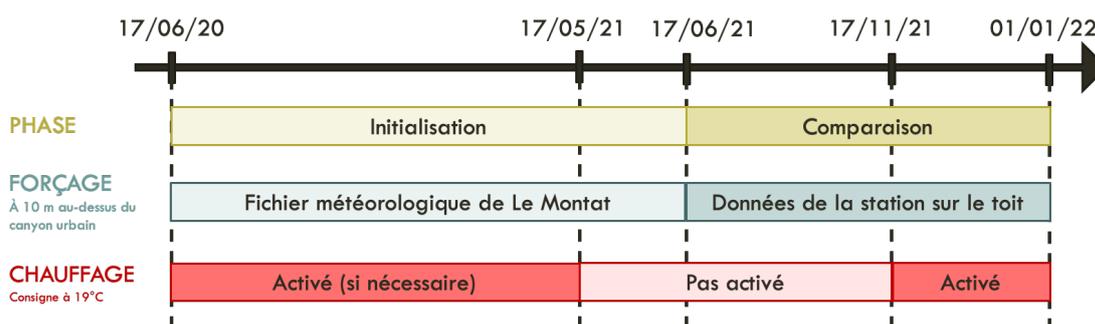


Figure 4.10 – Représentation temporelle des différentes phases et des données de forçage utilisées

La Figure 4.11 présente les principales variables (température, humidité relative, rayonnement solaire horizontal et la quantité de pluie sur un plan horizontal), enregistrées par la station météorologique urbaine et utilisées pour le forçage de TEB au-dessus du canyon urbain pendant la phase de comparaison.

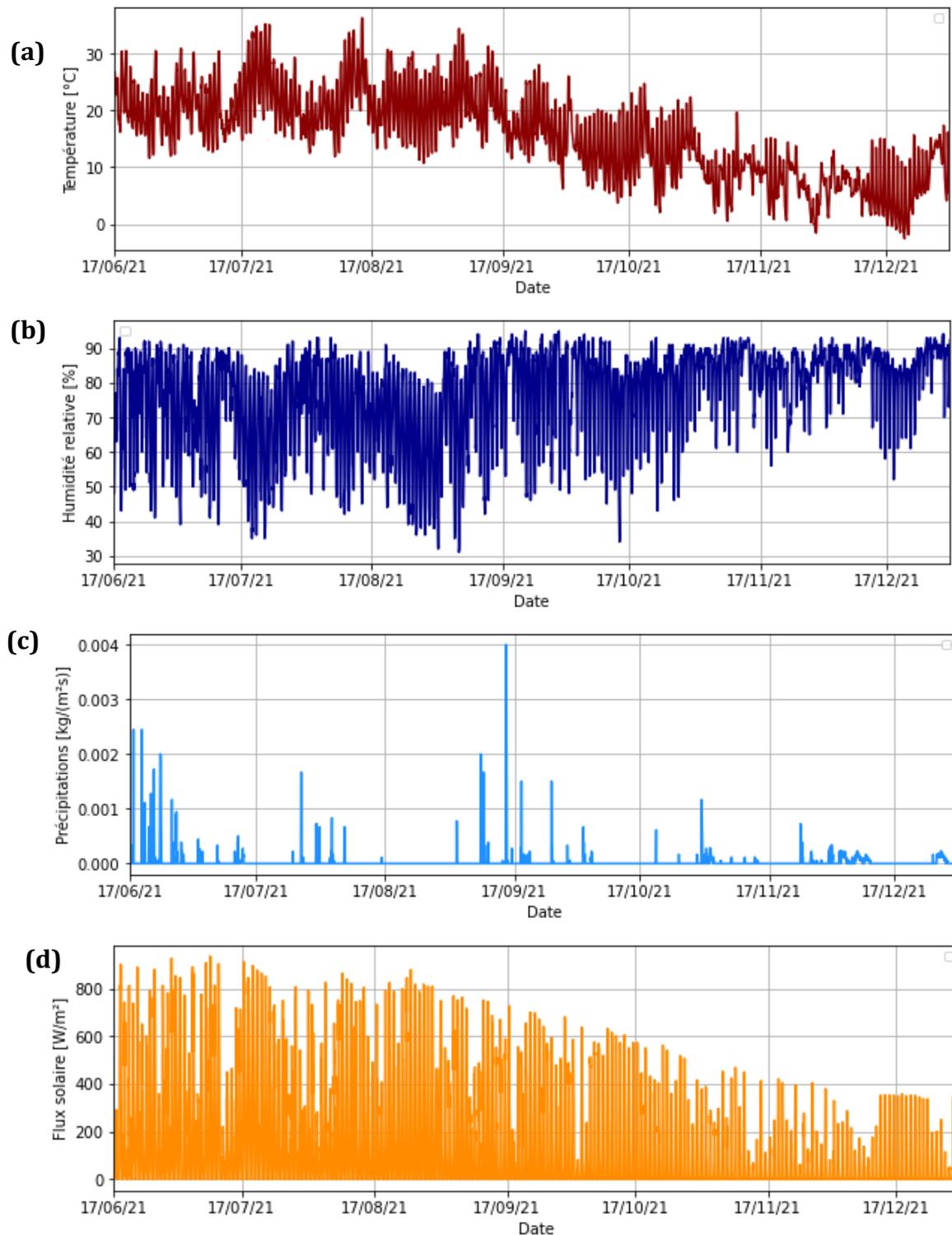


Figure 4.11 – Température (a), humidité relative (b), rayonnement solaire (c) et quantité de précipitations (d) utilisés pour le forçage au-dessus du canyon urbain

5. Résultats

Cette section compare les résultats des simulations effectuées en utilisant TEB avec les mesures réalisées dans les bâtiments instrumentés de Cahors. Les résultats de TEB sont ainsi évalués, ce qui permet de vérifier la pertinence du modèle, de la méthode numérique et des hypothèses effectuées lors de la configuration du centre médiéval.

Les deux versions de TEB, avec et sans transferts d'humidité à travers les parois, sont comparées. L'intérêt de l'intégration des transferts hydriques est alors évalué. En effet, la comparaison des deux versions de TEB permet de quantifier l'impact des transferts d'humidité en différents points d'étude : à l'interface brique/isolant, au milieu de l'isolation, au niveau de la surface intérieure de la paroi et à l'intérieur du bâtiment mais aussi dans le canyon urbain et au niveau des échanges avec l'atmosphère.

5.1. Conditions hygrothermiques dans la paroi

Le premier point étudié est l'interface entre la brique et le chaux-chanvre. La Figure 4.12 (a) montre un très bon accord entre les données simulées et mesurées et une tendance d'évolution similaire pour les deux courbes. L'EAM est environ égale pour les deux versions de TEB (Tableau 4.8), ce qui montre que la prise en compte des transferts d'humidité à travers les parois n'a pas un fort impact sur la température à l'interface. L'EAM pour la version modifiée de TEB est de 1,18 °C et donc supérieure à 1 °C, ce qui signifie que la validation est seulement de niveau 2. Cependant, les résultats restent satisfaisants avec un coefficient de Pearson élevé de 0,992. Le modèle TEB tend à sous-estimer la température à l'interface en été, ce qui peut s'expliquer par une sous-estimation du rayonnement solaire réellement incident à la paroi. En effet, la paroi étudiée (Figure 3.3 du Chapitre 3) semble être davantage exposée au soleil qu'une façade typique du centre médiéval de Cahors. La hauteur du bâtiment en face de la façade est plus faible que celles des autres bâtiments du quartier et ce bâtiment crée donc moins d'ombre.

Concernant l'humidité, bien que le modèle tende à surestimer l'humidité relative en été et à la sous-estimer en hiver, les résultats restent satisfaisants. En effet, le calcul des indicateurs mène à une validation de niveau 1 (Tableau 4.8), ce qui correspond au niveau de validation le plus précis. La quantité d'humidité à l'interface est fortement influencée par la quantité de pluie battante absorbée. Le modèle et le coefficient utilisés pour le calcul de la pluie incidente sont donc adaptés dans le cas du premier étage de la façade étudiée. Par ailleurs, il n'a pas été possible de comparer l'humidité relative entre les deux versions de TEB, puisque la version avant intégration ne permet pas de calculer l'évolution de l'humidité à l'intérieur de la paroi.

Pour rappel, TEB ne différencie pas les étages lors du calcul des conditions aux limites, ce qui signifie que la totalité de la paroi reçoit la même quantité de pluie et le même flux radiatif. En tenant compte de cette forte simplification, les résultats obtenus sont tout de même très satisfaisants. De plus, l'interface entre la brique et l'isolant correspond au point le plus influencé par la définition des conditions aux limites extérieures. La définition des conditions aux limites urbaines semble donc être adaptée. Afin de mieux vérifier la pertinence des conditions limites urbaines, il aurait été utile de positionner un capteur pour mesurer les conditions à l'intérieur de la brique, plus près de la surface extérieure. Cependant, le mur de briques était trop fragile pour être percé, cela aurait pu affecter la stabilité du mur.

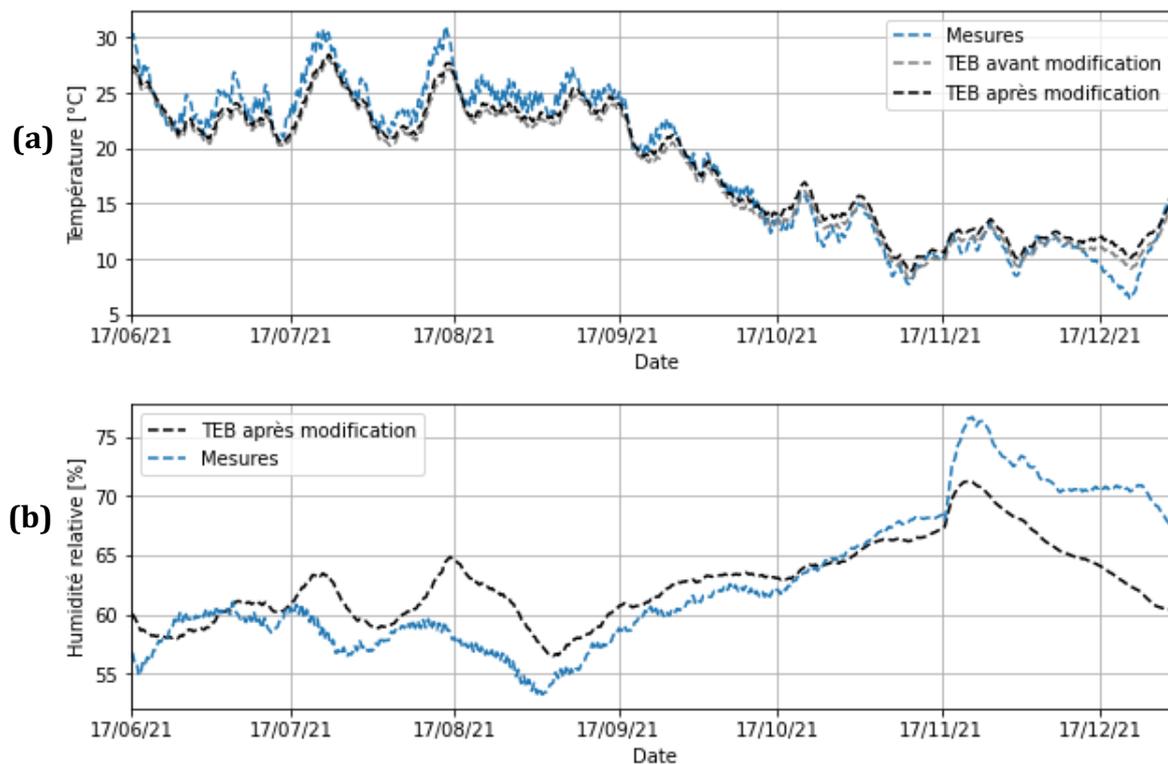


Figure 4.12 – Évolution temporelle de la température (a) et de l'humidité relative (b) simulées et mesurées à l'interface entre la brique et l'isolant du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022

La Figure 4.13 montre un très bon accord entre les données simulées et mesurées pour la température et l'humidité relative, au milieu de l'isolant à base de chaux-chanvre. La validation est de niveau 2 pour la version de TEB non modifiée et de niveau 1 pour la version améliorée de TEB. Ainsi, l'EAM de la température est légèrement inférieure, en considérant les transferts d'humidité (Tableau 4.8). Les propriétés hygrothermiques utilisées pour décrire le chaux-chanvre semblent donc être adaptées.

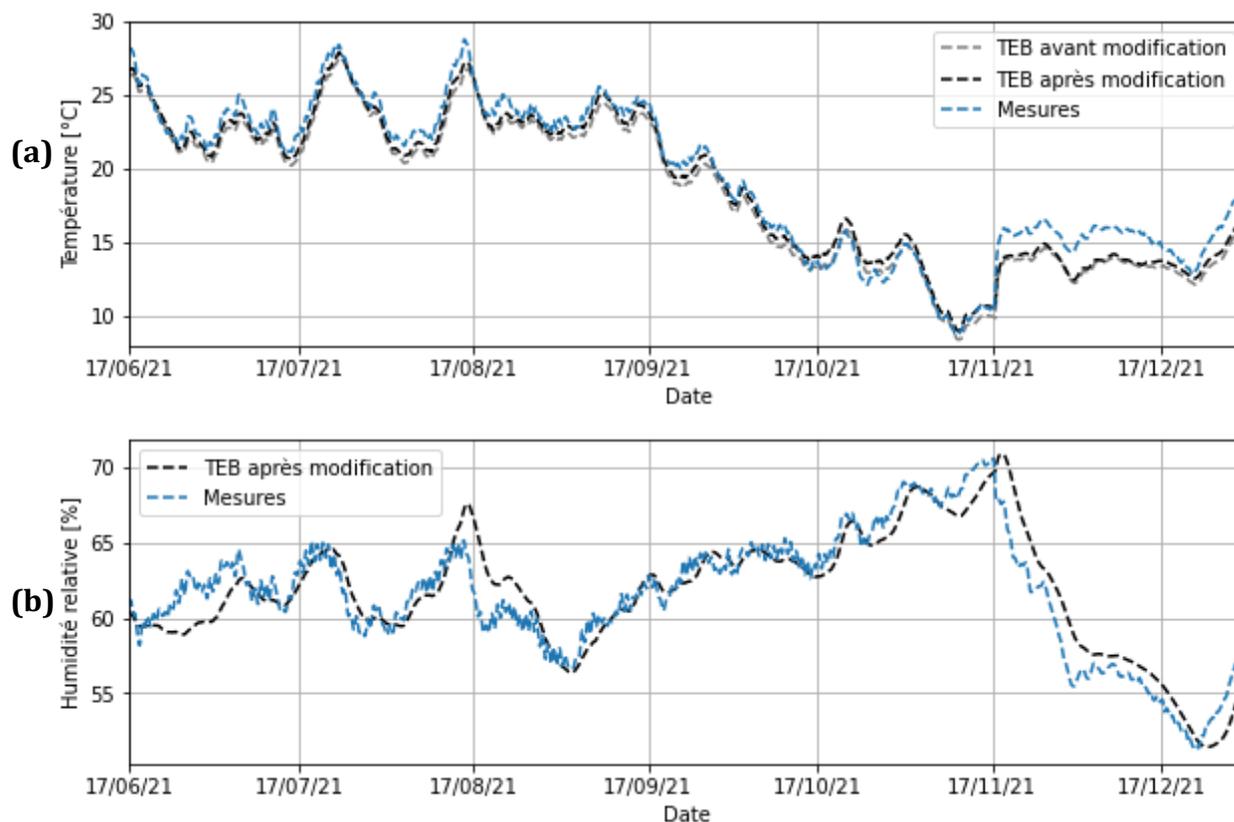


Figure 4.13 – Évolution temporelle de la température (a) et de l'humidité relative (b) simulées et mesurées au milieu de l'isolant du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022

La surface intérieure de la paroi est instrumentée à partir d'un thermocouple qui permet seulement de mesurer la température. Les résultats de la simulation sont très proches des mesures (Figure 4.14). L'EAM est d'environ 0,5°C et le coefficient de Pearson de l'ordre de 0,99, ce qui montre une forte corrélation entre les données simulées et mesurées (Tableau 4.8). La température de surface de la paroi est très fortement influencée par les conditions aux limites intérieures. Or dans cette section, les conditions intérieures ne sont pas fixées à partir des mesures, mais simulées par TEB, ce qui montre que le bâtiment est correctement défini et que les hypothèses utilisées sont pertinentes.

Quasiment aucune différence n'est observée entre les données de température simulées avec et sans prendre en compte les transferts d'humidité à travers les parois. Le phénomène d'évaporation, qui devrait réduire la température de surface intérieure et améliorer le confort, est négligeable dans la configuration étudiée.

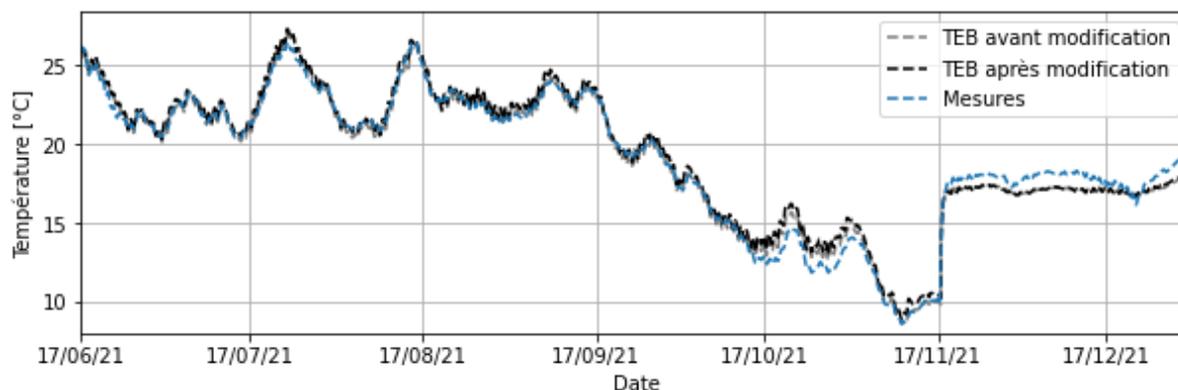


Figure 4.14 – Évolution temporelle de la température simulée et mesurée au niveau de la surface intérieure du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022

Tableau 4.8 – Indicateurs sur l'écart entre les données mesurées et simulées en trois points de la paroi du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022 (na = non applicable)

			Température	Humidité relative
INTERFACE	EAM	TEB avant modification	1,24 °C	na
		TEB après modification	1,18 °C	2,92 %
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,992	na
		TEB après modification	0,992	0,823
	Niveau de validation	TEB avant modification	2	na
		TEB après modification	2	1
ISOLANT	EAM	TEB avant modification	1,07 °C	na
		TEB après modification	0,82 °C	1,22 %
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,989	na
		TEB après modification	0,987	0,923
	Niveau de validation	TEB avant modification	2	na
		TEB après modification	1	1
SURFACE	EAM	TEB avant modification	0,41 °C	na
		TEB après modification	0,53 °C	na
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,992	na
		TEB après modification	0,989	na
	Niveau de validation	TEB avant modification	1	na
		TEB après modification	1	na

Une étude similaire avait été réalisée dans le chapitre précédent. Elle consistait à comparer les résultats de la méthode numérique développée avec les mesures expérimentales, au niveau des trois mêmes points de la paroi. Dans cette étude, les conditions aux limites intérieures et extérieures étaient fixées directement à partir des mesures in-situ, alors que dans ce chapitre elles sont calculées dynamiquement en fonction de l'évolution des conditions dans le canyon et dans le bâtiment simulées par TEB. Les deux études (du Chapitre 3 et du Chapitre 4) mènent à des résultats satisfaisants et de qualité équivalente, ce qui montre que les deux approches sont

valables, malgré les techniques d'initialisation, de définition des matériaux et de calcul des conditions aux limites différentes. En fonction du point de la paroi étudiée, le Chapitre 3 ou le Chapitre 4 peut mener à des résultats légèrement plus satisfaisants. Par exemple, le Chapitre 3 différencie le flux radiatif perçu par les parois en fonction des étages, ce qui conduit à une meilleure estimation de la température à l'interface. En revanche, à maillage équivalent, TEB permet de mieux prédire l'humidité relative aussi bien à l'interface, qu'au milieu de l'isolant, ce qui peut éventuellement s'expliquer par une meilleure prise en compte de la vitesse du vent local, lors de la détermination de la pluie battante incidente à la paroi et du calcul des coefficients de convection massique. Concernant la surface intérieure, le chapitre précédent calculait les conditions aux limites à partir des données mesurées dans la pièce adjacente à la paroi étudiée, tandis qu'ici les conditions aux limites sont calculées par rapport au comportement hygrothermique du bâtiment simulé par TEB, ce qui mène à un écart très légèrement supérieur entre simulation et mesures. La section suivante détaille la comparaison entre les conditions intérieures simulées et mesurées.

5.2. Conditions intérieures

Un accord satisfaisant entre les données simulées et mesurées est également observé pour la température intérieure (Figure 4.15 (a)). Le modèle TEB est donc capable de décrire correctement la température intérieure dans des bâtiments d'un centre historique. Les valeurs de l'EAM sont très satisfaisantes pour les deux versions de TEB, bien que l'EAM soit légèrement plus élevée après intégration des transferts d'humidité à travers les parois (Tableau 4.9). La différence entre les résultats simulés à partir des deux versions de TEB est très faible, ce qui montre que les transferts hydriques ont peu d'impact sur la température intérieure dans la configuration étudiée, c'est-à-dire un bâtiment inoccupé.

Notons qu'une évolution différente des températures simulées et mesurées est observée lorsque le chauffage est activé. Ceci s'explique facilement par le fait que TEB simule une régulation parfaite du chauffage à la température de consigne, tandis qu'en conditions réelles, la température intérieure fluctue autour de la température de consigne.

Concernant l'humidité relative, les deux versions de TEB fournissent des résultats très différents (Figure 4.15). Ainsi, la validation est de niveau 1 (le plus précis) pour la version considérant les transferts d'humidité à travers les parois, tandis qu'elle est seulement de niveau 2 pour la version de TEB les négligeant. De plus, ne pas considérer les transferts d'humidité à travers les parois mène à des valeurs incohérentes d'humidité relative, puisqu'elle dépasse parfois 100%. Dans ce type de cas, de la condensation devrait avoir lieu, mais TEB ne modélise pas la condensation à l'intérieur du bâtiment. La version considérant les transferts hydriques à travers les parois fournit des résultats qui sont plus proches des valeurs mesurées sur site. En effet, les variations sont plus faibles et les pics d'humidité relative sont réduits, ce qui s'explique par le comportement de tampon hydrique du chaux-chanvre. En effet, l'isolant à base chaux-chanvre se caractérise par sa forte hygroscopicité.

Dans la simulation de ce bâtiment inoccupé, le bilan massique intérieur comprend seulement l'infiltration d'air à travers l'enveloppe du bâti et les échanges hydriques à travers les parois. En réalité, d'autres phénomènes interviennent : les échanges hydriques avec les composants internes (mobilier, parois et planchers internes par exemple), les transferts hydriques au niveau

du toit et du sol ou encore les remontées capillaires du sol vers les parois. Ces phénomènes sont actuellement négligés dans TEB. Par conséquent, pour améliorer la précision de la prédiction de l'humidité relative intérieure, il faudrait intégrer ces phénomènes au modèle TEB. Dans cette étude, le niveau de précision obtenu est considéré comme satisfaisant.

Par ailleurs, il est pertinent de remarquer que les mesures sont effectuées dans une pièce donnée, localisée au premier étage du bâtiment étudié et adjacente à la façade orientée ouest, alors que TEB ne simule pas les conditions pièce par pièce. Il considère le bâtiment comme une zone thermique unique. Finalement, la version améliorée de TEB fournit des résultats satisfaisants et permet ainsi de représenter correctement le comportement hygrothermique des bâtiments anciens. Les hypothèses effectuées sont donc adaptées pour représenter le centre médiéval de Cahors.

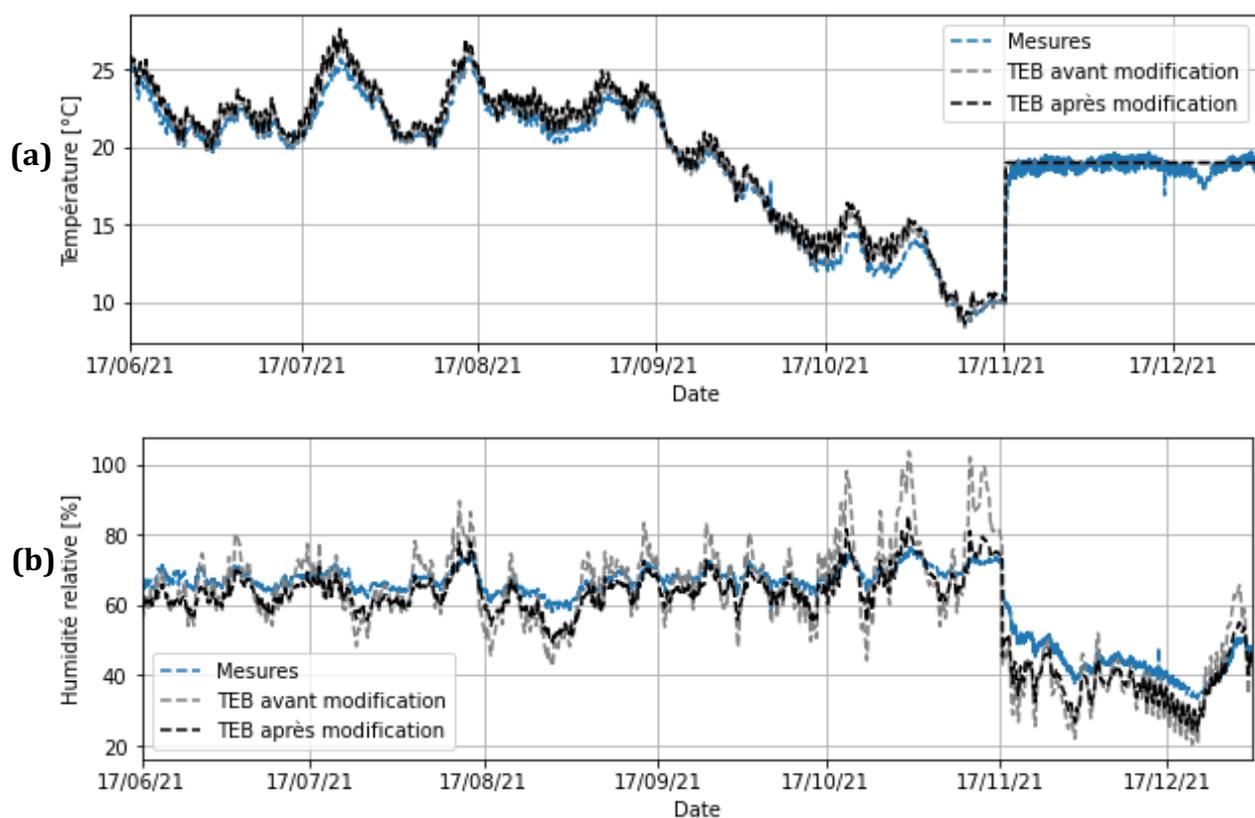


Figure 4.15 – Évolution temporelle de la température (a) et de l'humidité relative (b) simulées et mesurées dans la pièce étudiée du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022

Tableau 4.9 – Indicateurs sur l'écart entre les données mesurées et simulées dans la pièce étudiée du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022

		Température	Humidité relative
EAM	TEB avant modification	0,54 °C	6,74 %
	TEB après modification	0,73 °C	4,43 %
Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,992	0,878
	TEB après modification	0,990	0,967
Niveau de validation	TEB avant modification	1	2
	TEB après modification	1	1

Cette section a mis en avant un faible impact de la prise en compte des transferts d'humidité, sur la température intérieure simulée. En revanche, des précédents travaux ont montré un effet important de la capacité de tampon hydrique des matériaux hygroscopiques comme le chaux-chanvre, sur la température intérieure (Maalouf et al., 2014; Zhou et al., 2020). Pour cette raison, il serait pertinent d'effectuer une nouvelle étude supposant le bâtiment comme occupé, ce qui permettrait d'évaluer l'impact réel de ce phénomène dans le centre médiéval de Cahors. Par ailleurs, considérer le bâtiment occupé permettrait d'évaluer le confort des occupants et les consommations énergétiques. Le système de ventilation installé est également un élément clé, pour l'étude de la capacité de tampon hydrique des matériaux. Il serait particulièrement intéressant d'étudier l'effet d'une ventilation régulée en fonction de l'humidité relative intérieure (Woloszyn et al., 2009).

5.3. Conditions dans le canyon urbain

De premières études ont montré que le séchage de la paroi après un évènement de pluie peut engendrer un phénomène de refroidissement par évaporation et ainsi mener à une diminution de la température dans le canyon urbain et de l'UTCI, ce qui améliorerait le confort des piétons (Saneinejad et al., 2014, 2012). Cependant, cette expérience a été réalisée dans des conditions météorologiques simplifiées, puisque ces travaux supposent que la paroi face au vent devient soudainement capillairement saturée.

Cette section a pour but de quantifier l'impact des transferts hydriques à travers les parois, sur les conditions dans le canyon urbain du centre médiéval de Cahors, en conditions météorologiques réelles. Cette étude se concentre donc sur le cas spécifique de rues très étroites. Pour cela, le potentiel de rafraîchissement par évaporation de la paroi C, orientée sud et localisée dans la deuxième configuration de rue (Figure 4.9), est étudié, sur la période allant du 23 au 26 juin 2021. Ce cas d'étude a été choisi, car il correspond au flux de pluie absorbé le plus élevé durant l'été 2021.

L'évènement de pluie a lieu dans la nuit du 23 au 24 juin. La façade C est face au vent et absorbe donc une partie de la pluie battante (Figure 4.16 (a)). La teneur en eau au niveau de la surface extérieure augmente (Figure 4.16 (b)). L'humidité relative est de presque 100% jusqu'à 9h30. Ensuite, la phase de séchage débute et l'humidité relative diminue (Figure 4.16 (c)).

La comparaison des deux versions de TEB, avec et sans transfert d'humidité à travers les parois, permet d'évaluer l'impact des échanges hydriques sur les conditions à l'intérieur du canyon

urbain. La diminution de la température de surface de la paroi face au vent, va jusqu'à environ $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, pendant les phases de mouillage et de séchage (Figure 4.16 (d)). Ainsi, la version de TEB qui considère les transferts d'humidité à travers les parois, simule des flux de chaleur sensible et radiatifs plus faibles de la façade vers le canyon. La Figure 4.16 (e) et (f) montre des diminutions allant jusqu'à 24 W/m^2 pour le flux sensible et jusqu'à 7.5 W/m^2 pour le flux radiatif à GLO.

Cependant, la réduction de la température de surface de la paroi C et des flux allant de la paroi vers le canyon mène à des écarts entre les deux versions de TEB ne dépassant pas $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température du canyon, $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'UTCI et $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température radiative moyenne. La conclusion est donc que le rafraîchissement par évaporation a un impact négligeable sur la température et plus généralement sur le confort dans le canyon, dans le contexte du centre-ville médiéval de Cahors. En effet, les rues très étroites entraînent une très faible pluie battante, donc une quantité de pluie absorbée limitée et un potentiel de rafraîchissement par évaporation réduit. Il est important de souligner que ces résultats sont propres à la morphologie urbaine et au climat étudiés. Il serait donc intéressant de réaliser des études similaires sur d'autres villes.

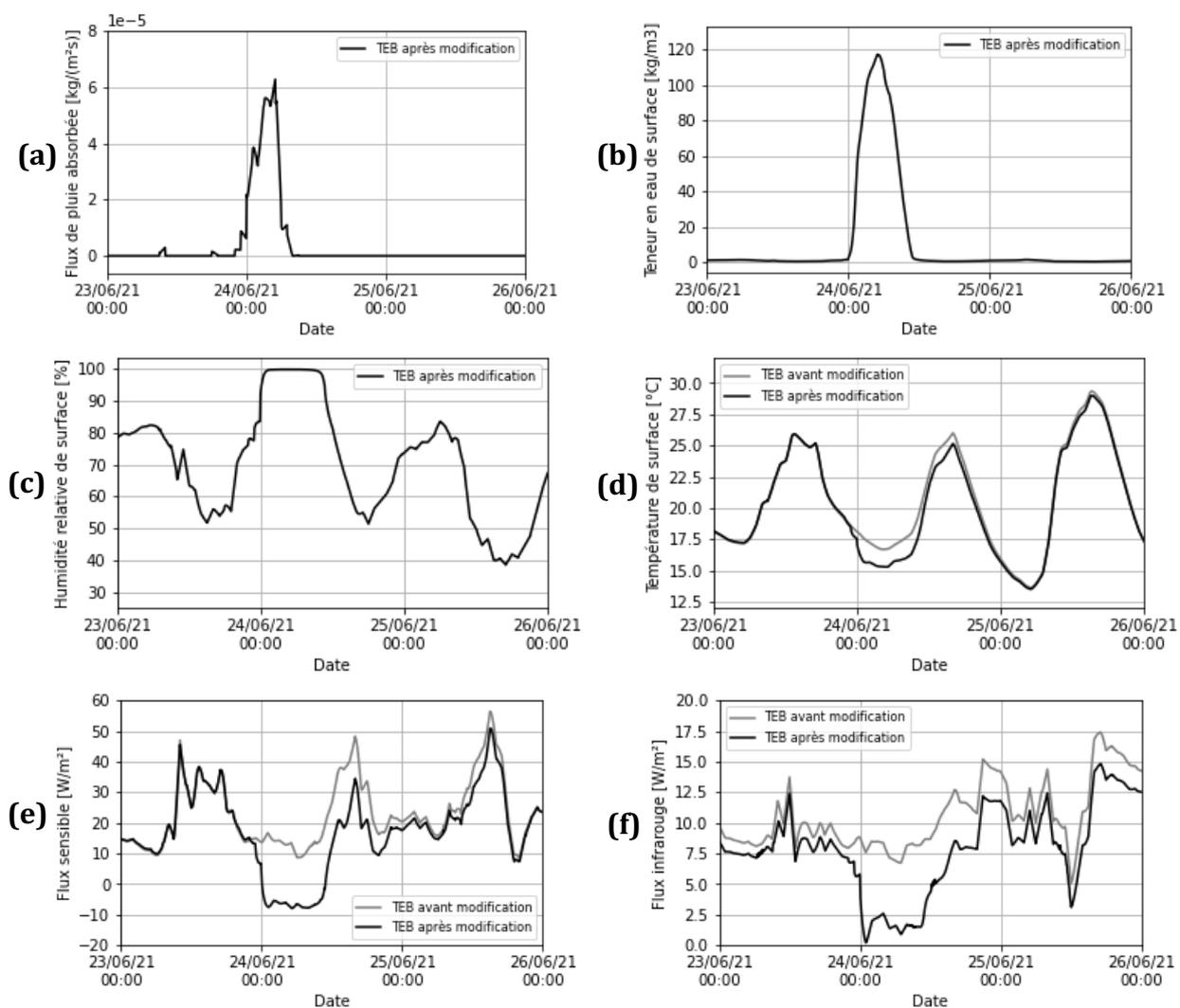


Figure 4.16 – Comportement de la paroi C pendant les phases de mouillage et de séchage : pluie absorbée (a), teneur en eau à la surface extérieure (b), humidité relative à la surface extérieure (c), température à la surface extérieure (d), flux sensible (e) et flux radiatif à grande longueur d'onde allant de la surface vers le canyon (f)

5.4. Échanges entre le canyon urbain et l'atmosphère

La section précédente a montré que les transferts d'humidité à travers les parois impactent les flux échangés entre la paroi et le canyon. L'objectif de cette section est de quantifier l'impact de ce phénomène sur les flux échangés entre la surface urbaine et l'atmosphère. Pour cela, ces flux simulés par les versions avant et après modification de TEB sont comparés pour la deuxième configuration de canyon (est-ouest) du 22 au 26 juin 2021.

Durant les trois premiers jours de l'étude, plusieurs évènements de pluie plus ou moins intenses sont enregistrés, tandis que le dernier jour, les précipitations sont nulles (Figure 4.17 (a)). Contrairement aux toits et aux sols, la quantité de pluie absorbée par les parois est calculée en fonction de la direction du vent. Ainsi, la pluie battante impacte seulement les parois orientées face au vent.

Concernant le flux sensible échangé entre la surface urbaine et l'atmosphère, la Figure 4.17 (b) montre un faible écart entre les résultats obtenus avant et après intégration des transferts hydriques. Le flux radiatif à grande longueur d'onde ascendant est toujours inférieur d'environ 10 W/m^2 , lorsque les transferts d'humidité à travers les parois sont considérés. Dans les deux cas, l'écart entre les deux versions reste faible et le phénomène étudié semble donc avoir un impact limité sur les flux sensibles et radiatifs échangés avec l'atmosphère, dans cette configuration.

Les pics de flux latent élevés correspondent à l'évaporation de la pluie au niveau des différentes surfaces du canyon urbain. Plusieurs pics sont observés durant les quatre jours de l'étude (Figure 4.17 (d)). Sur certains pics, le flux latent simulé à partir de la version améliorée est plus élevé que celui simulé par la version non modifiée de TEB. L'écart maximal enregistré est d'environ 80 W/m^2 .

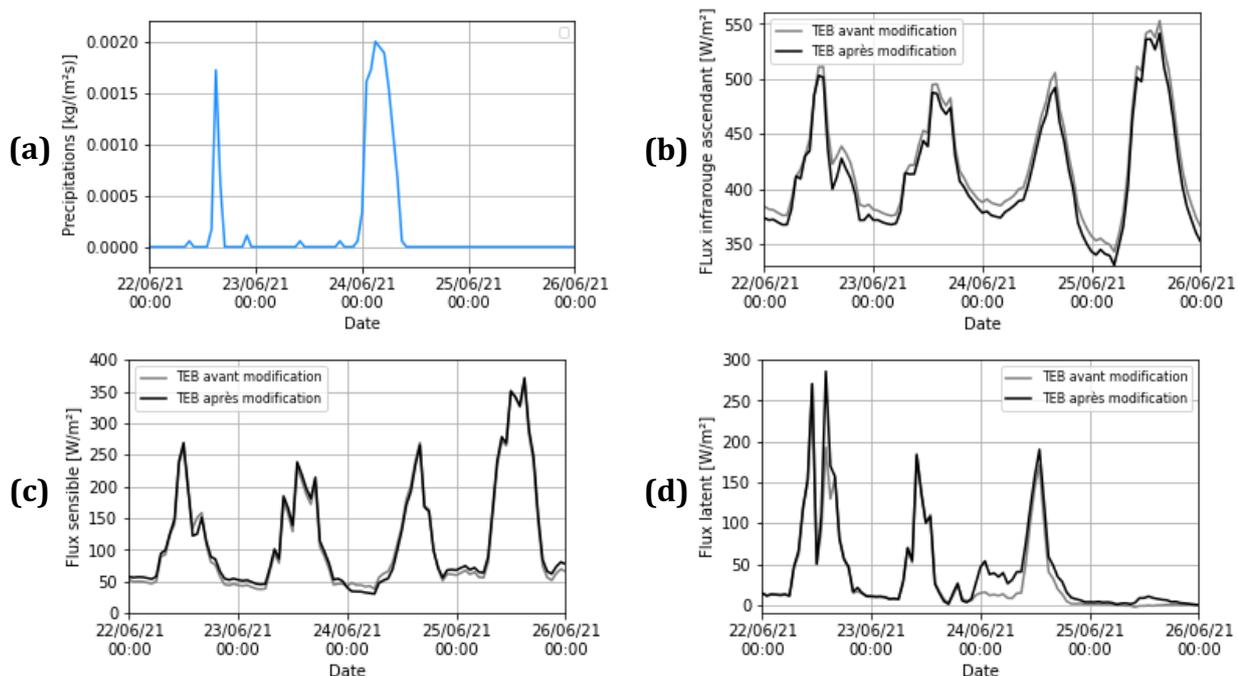


Figure 4.17 – Quantité de précipitations (a), flux sensible (b) flux radiatif à grande longueur d'onde ascendant (c) et flux latent (d) échangés entre la surface urbaine et l'atmosphère du 22 au 26 juin 2021

Pour mieux comprendre les différences entre les deux versions, il est important de s'intéresser à la répartition de l'humidité dans le canyon. Comme expliqué dans la section 3.6, le fait de considérer l'effet de la pluie battante sur les parois et non plus un ruissellement total le long des façades modifie la quantité de pluie reçue par le sol. Désormais, une partie de la pluie est absorbée par les parois face au vent et seule la quantité de pluie restante chute sur la route, ce qui modifie la dynamique de séchage par évaporation de l'eau au sein du canyon.

La Figure 4.18 présente le flux latent induit par l'évaporation de l'eau de pluie au niveau du toit ou du sol mais également par les échanges de vapeur au niveau des parois. Les flux latents les plus élevés sont émis au niveau des toits. Ils sont moins intenses au niveau du sol. Concernant les parois, l'évaporation a lieu seulement après certains événements de pluie, durant lesquels une des parois est face au vent. En revanche, le dernier jour, le flux latent est quasi nul pour le sol et le toit qui sont déjà totalement secs, tandis qu'il est légèrement plus élevé au niveau des façades, où l'évaporation continue durant cette journée sèche. Notons que les commentaires effectués ici sont propres à cette configuration de rue très étroite, qui induit peu de pluie battante au niveau des parois, et à l'évènement spécifique étudié.

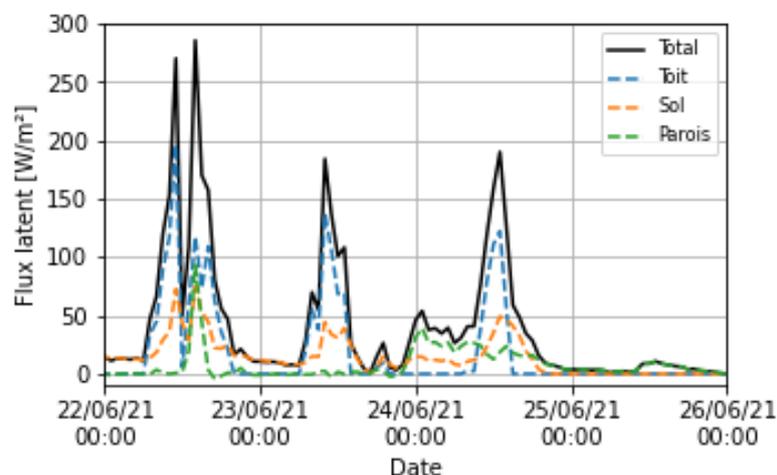


Figure 4.18 – Détail des composantes du flux latent échangé entre les surfaces urbaines et l'atmosphère, simulé à partir de la version améliorée de TEB du 23 au 26 juin 2021

Finalement, sur la période totale de la simulation (du 17 juin 2020 au 1^{er} janvier 2022), le flux latent simulé au niveau de la paroi correspond en moyenne à 18,5% du flux latent total échangé entre les surfaces urbaines et l'atmosphère, alors que les flux latents au niveau du toit et du sol représentent respectivement 49% et 32,5%. Les transferts d'humidité à travers les parois représentent donc une part non négligeable du bilan hydrique du canyon. Il est donc important de les considérer pour simuler correctement la dynamique de la répartition d'humidité dans le canyon, ce qui peut notamment être utile pour étudier le phénomène d'îlot d'humidité urbain (Wang et al., 2021).

6. Sources d'incertitudes

La section 6 du Chapitre 3 recensait quatre types d'incertitudes impactant la validation expérimentale : les erreurs expérimentales, les erreurs sur les conditions aux limites, les erreurs

sur les propriétés des matériaux et les incertitudes du modèle. Ces sources d'erreur ayant déjà été développées dans le chapitre précédent, ne seront pas redétaillées ici, mais elles restent valables dans le cas de la comparaison entre les simulations de TEB et les données mesurées.

Avec l'utilisation de TEB, de nouveaux enjeux sont apparus, puisque l'utilisateur ne fournit plus directement les données utilisées pour le calcul des conditions aux limites. En effet, le forçage météorologique est effectué au-dessus du canyon, à partir des données enregistrées par la station installée à Cahors. Le modèle TEB calcule ensuite l'évolution des conditions dans le canyon urbain, et la répartition du rayonnement et il en déduit les conditions aux limites extérieures de la paroi.

De manière similaire, les conditions intérieures ne sont plus fixées à partir des mesures in-situ. Elles sont désormais calculées à partir d'un bilan énergétique effectué sur l'air intérieur par TEB, en fonction des données fournies concernant la composition du bâtiment, les équipements de CVC, l'infiltration d'air ou encore les scénarios d'occupation. Ces informations doivent être représentatives du dispositif expérimental et leur définition correspond donc à une source d'incertitude supplémentaire.

Le modèle de climat urbain TEB effectue également des hypothèses sur la forme urbaine et la composition des bâtiments et des parois. En effet, chaque quartier est représenté par une rue typique, dont les bâtiments sont de même hauteur et les parois ont toutes la même composition. Cette approximation s'explique par le coût computationnel trop élevé et le manque d'informations détaillées, pour résoudre chaque bâtiment et chaque paroi individuellement (Masson et al., 2020a). Ainsi, dans ce chapitre, l'environnement urbain est considéré de manière simplifiée et toutes les parois des bâtiments sont supposées avoir la même composition que la paroi instrumentée. Or le bâtiment étudié comporte des parois de compositions différentes, ce qui ajoute une source d'erreur sur les conditions hygrothermiques intérieures simulées.

Une autre hypothèse réalisée par TEB impactant la qualité des résultats simulés est la non-consideration des ponts thermiques. Ils peuvent pourtant représenter une partie non négligeable des déperditions énergétiques, dans le cas des bâtiments anciens (ADEME, 2022).

De plus, le modèle TEB considère une seule zone thermique pour représenter les bâtiments. L'inertie thermique associée aux planchers est modélisée par une masse fictive équivalente, complexe à définir. Dans cette étude, les caractéristiques de cette masse ont été déterminées par calibration à partir des mesures expérimentales réalisées dans une pièce au premier étage du bâtiment.

Le bâtiment comportant une seule zone thermique, les conditions aux limites des parois sont calculées sans différencier les étages, ce qui signifie qu'elles sont supposées égales pour l'ensemble d'une façade. Cette hypothèse simplificatrice ne permet donc pas de considérer les gradients horizontaux et verticaux, qui peuvent pourtant entraîner des écarts significatifs, notamment concernant la pluie battante (Derome et al., 2017).

Par ailleurs, la simulation, à l'échelle urbaine et sur de longues périodes temporelles, nécessite de simplifier la prise en compte de certains processus physiques. Par exemple, la prédiction de la pluie battante incidente à une paroi s'appuie sur une méthode semi-empirique impliquant un fort degré d'incertitude (Derome et al., 2017; Zhou et al., 2023). Un des critères essentiels est la

définition du taux de captation de pluie, qui est difficile à évaluer. Dans ce contexte, il a été défini par calibration à partir des données mesurées. Il n'est pas possible d'appliquer une méthode similaire pour l'ensemble des formes urbaines. De même, il n'est pas envisageable pour des modèles de climat urbain comme TEB, d'utiliser des méthodes CFD pour le calcul de la pluie battante incidente, pour chaque géométrie de quartier étudiée. Il est donc indispensable de mettre à jour ces formules semi-empiriques et de proposer des coefficients fonctionnant avec des vitesses de vent à l'intérieur du canyon urbain et non plus en champ libre à une hauteur de référence de 10 m.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, les transferts couplés de chaleur et de masse ont été implémentés dans le modèle de climat urbain TEB. Pour cela, des modifications ont dû être effectuées au niveau des équations, des données d'entrée pour la définition des matériaux, du calcul des conditions aux limites et de la répartition de la pluie dans le canyon. Un modèle permettant d'évaluer le risque de croissance de moisissures a également été intégré dans TEB. Ces modifications ont permis d'améliorer la capacité de TEB à simuler les centres anciens à réhabiliter.

Le centre-ville médiéval a été configuré et simulé avec TEB, dans un double objectif : la validation par comparaison avec des données expérimentales et l'évaluation de l'impact des transferts hydriques à travers les parois.

- Concernant le premier objectif, la comparaison des résultats simulés avec les données mesurées à Cahors a permis de valider la méthode numérique, les hypothèses, la définition des matériaux, des bâtiments et du quartier. Ce chapitre présente les résultats obtenus pour le bâtiment 1 constitué de briques massives. Une étude similaire a été réalisée sur le second bâtiment constitué de pans de bois et les résultats sont présentés dans l'Annexe C.
- Le second objectif était d'évaluer l'impact de trois phénomènes clés : l'augmentation de la conductivité thermique des parois en fonction de la teneur en eau, la capacité de tampon hydrique et le potentiel de rafraîchissement par évaporation. Bien que des variations aient été observées sur les flux thermiques échangés, quasi aucun impact n'a été constaté sur les températures que ce soit dans la paroi, à l'intérieur du bâtiment ou dans le canyon urbain. De même, aucune modification significative n'a été notée sur le confort thermique extérieur. En revanche, l'intégration des transferts d'humidité à travers les parois améliore considérablement l'estimation de l'humidité relative intérieure, en permettant la prise en compte de la capacité de tampon hydrique des matériaux.

Néanmoins, ces résultats sont uniquement valables dans le contexte très spécifique de cette étude : des bâtiments inoccupés dans des rues très étroites. Étudier des bâtiments en conditions occupées permettrait d'évaluer l'impact des transferts d'humidité à travers les parois sur le confort des habitants, mais également sur les consommations énergétiques. La simulation énergétique de bâtiments occupés peut également être utilisée dans le but de comparer la performance de différents scénarios de rénovation. Ainsi, le chapitre suivant s'appuiera sur la version de TEB incluant les transferts d'humidité à travers les parois, pour étudier la rénovation des bâtiments du centre-ville médiéval de Cahors.

Chapitre 5 : Évaluation multicritère de scénarios de rénovation du centre-ville médiéval de Cahors

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de proposer des solutions de rénovation des parois anciennes du centre-ville médiéval de Cahors. L'approche choisie est la simulation énergétique à l'échelle urbaine. L'outil TEB est utilisé pour modéliser le centre ancien de Cahors, car il permet de simuler à la fois le comportement énergétique des bâtiments et le microclimat du canyon urbain. Le chapitre précédent a complété le modèle en intégrant les transferts hygrothermiques à travers les parois et le calcul de l'indice de moisissures. TEB considère donc désormais la majorité des phénomènes nécessaires à l'évaluation de solutions de rénovations des centres anciens.

Le chapitre précédent a également permis de calibrer un certain nombre d'éléments et ainsi d'obtenir une configuration de référence, représentative du centre-ville médiéval de Cahors, en conditions inoccupées. Ce chapitre supposera les bâtiments du centre-ville ancien occupés. Plusieurs solutions de rénovation sont simulées et comparées, au vu de différents critères. Il faut donc définir les compositions de parois à étudier et les paramètres à évaluer. Ils doivent être en accord avec les problématiques locales et les spécificités des centres anciens.

2. Réhabilitation énergétique des centres anciens

Cette section vise à comprendre le fonctionnement du bâti ancien, ainsi que ses points forts et ses points faibles. L'objectif est de proposer des solutions de rénovation en tenant compte de ses spécificités ainsi que des enjeux actuels : l'urgence climatique, la conservation et la durabilité du bâti historique, le confort intérieur et extérieur. Cette étude se centre sur les bâtiments historiques localisés en France, en climat tempéré et dans le contexte de la réglementation française.

2.1. Contexte réglementaire

La fin de la seconde guerre mondiale marque le passage du bâti ancien au bâti moderne. Cette période charnière est le résultat de l'industrialisation et de la systématisation des constructions, ce qui a engendré à l'époque une modification profonde des logiques constructives. Ces changements s'expliquent par une pénurie de logements, due à la réduction de la construction depuis la fin de la première guerre mondiale à cause de la récession économique, ainsi qu'aux destructions massives pendant la seconde guerre mondiale.

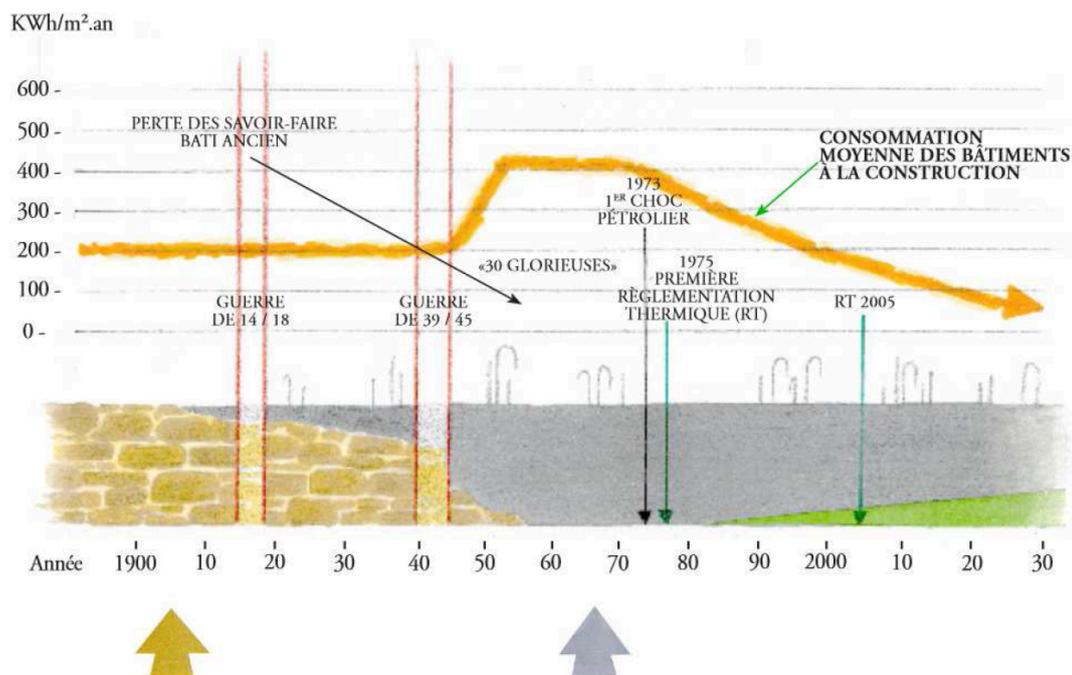


Figure 5.1 – Évolution de la consommation des bâtiments résidentiels de 1900 à aujourd’hui (ATHEBA, 2010)

Ces changements ont un impact très important sur le comportement hygrothermique des bâtiments. En effet, lors de la construction des bâtiments modernes, des matériaux manufacturés, plus simples à mettre en place, sont employés, au détriment des savoir-faire locaux. Les matériaux industriels ont des propriétés très différentes de ceux utilisés pour le bâti ancien (Camuffo, 2019; Cantin et al., 2010). Ainsi, le bâti moderne n’est plus conçu pour interagir de manière optimale avec son environnement, mais davantage pour fonctionner indépendamment de celui-ci. Les logements sont désormais ventilés, chauffés, éclairés voire rafraîchis artificiellement (DGHUC et al., 2007).

Les consommations énergétiques ont donc doublé pour les bâtiments construits entre 1940 et 1955 (ATHEBA, 2010). Finalement, après le 1^{er} choc pétrolier, la première réglementation thermique (RT) est apparue. Elle a été suivie par la RT2005, la RT2012 et la RE2020. Ces réglementations ont permis d’encadrer les performances thermiques des bâtiments et donc de faire diminuer petit à petit leur consommation énergétique annuelle. Elles concernent les logements neufs, mais également dans certains cas les travaux de rénovation. En Europe, le taux annuel de nouvelles constructions pour le secteur du résidentiel est de seulement 1% (Economidou et al., 2011), d’où la nécessité d’agir en rénovant thermiquement le parc de bâtiment existant.

De plus, les bâtiments construits avant 1948 disposent d’une réglementation thermique spécifique (définie par l’arrêté du 3 mai 2007, modifié par l’arrêté du 22 mars 2017), permettant de tenir compte des contraintes de rénovation de ce type de bâti. Par ailleurs, aucune contrainte de performance n’est appliquée aux parois opaques des bâtiments situés dans un secteur protégé au titre du patrimoine (Claude, 2018). Dans ce cas, la seule exigence est bien souvent la non-modification de l’aspect extérieur des parois.

2.2. Spécificités des centres anciens

Les bâtiments des centres anciens se différencient des bâtiments plus récents à plusieurs échelles : quartier, bâtiment et matériau. Ces spécificités impactent le confort des habitants, les performances énergétiques et la durabilité des bâtiments.

2.2.1. Impact de la forme urbaine

Les caractéristiques morphologiques des centres historiques sont très liées au climat local, comme le montre l'étude détaillée de Golany (1996). Ainsi, dans le contexte étudié une forme compacte est privilégiée, car elle permet de conserver la chaleur et de protéger des intempéries (APUR, 2014; Doya, 2010). Dans les rues très étroites, l'effet Venturi devient négligeable (Blocken, Moonen, et al. 2008 ; Blocken, Stathopoulos, et al. 2008 ; Blocken, Carmeliet, et al. 2007). La vitesse du vent est ainsi réduite, ce qui minimise la dissipation de chaleur par la ventilation des rues. La forte mitoyenneté permet de réduire les pertes énergétiques à travers les parois. Selon le projet APUR de Bruxelles (APUR, 2014), le passage de « 4 façades » à « 2 façades » permet une économie sur les consommations d'énergie de 20 %. De plus, une morphologie compacte favorise le piégeage radiatif. Le principal inconvénient d'une forme compacte pour ce type de climat est qu'elle diminue l'accès au rayonnement solaire en hiver et qu'elle peut favoriser le phénomène d'ICU en été.

2.2.2. Conception bioclimatique

Le bâti ancien, défini comme les bâtiments construits avant 1948, devait s'adapter aux contraintes régionales et climatiques, notamment car les systèmes de chauffage et de rafraîchissement étaient peu efficaces voire quasi-inexistants (Cantin et al., 2010). Le bâti historique est donc conçu pour profiter des sources naturelles de chaleur, d'éclairage et de ventilation (Webb, 2017).

Ainsi, l'absence d'équipement performant pour assurer le confort à l'intérieur du bâtiment, a incité à une conception bioclimatique. De ce fait, le bâti ancien répond généralement à un certain nombre de principes, dont le but est de réduire les déperditions énergétiques (Stephan, 2014). Premièrement, les parois disposent en général d'une forte inertie surtout celles orientées vers le nord, ce qui permet de stocker la chaleur et de la restituer plus tard. Les ouvertures tendent à être de faibles tailles et sont majoritairement orientées vers le sud, pour tirer profit du rayonnement solaire. Enfin, des espaces tampons (des pièces de service) sont généralement positionnés au niveau des parois nord et à l'inverse les pièces de vie sont souvent côté sud.

2.2.3. Confort d'hiver

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, les murs sont épais et disposent donc d'une résistance thermique plutôt élevée, ce qui les rend relativement performants thermiquement. Cependant, la forte hétérogénéité des matériaux et liants composant les parois et la présence de vide d'air dans celles-ci rendent compliquées l'évaluation précise des déperditions thermiques au niveau de ces parois. Les pertes thermiques du bâti ancien ont également lieu par les toitures, les planchers mais aussi à travers les infiltrations et défauts d'étanchéité à l'air notamment au niveau des fenêtres (ATHEBA, 2010) (Figure 5.2).

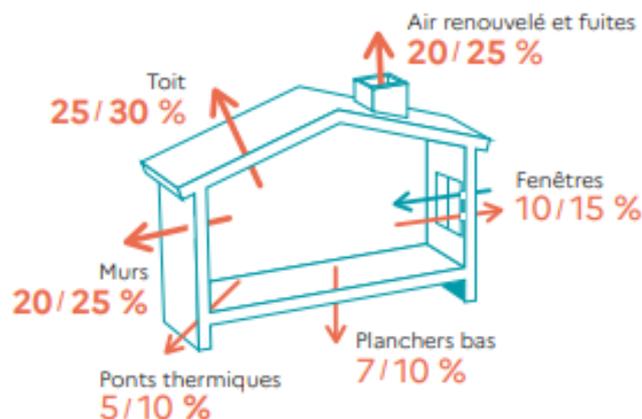


Figure 5.2 – Schéma de la répartition des pertes thermiques à travers l'enveloppe d'un bâtiment non rénové, datant d'avant 1974 (ADEME, 2022)

Le confort d'hiver est altéré par le phénomène de paroi froide. En effet, les parois non isolées ont des températures de surface généralement faibles, qui augmentent l'inconfort des occupants et donc leur besoin en chauffage. Ainsi, ce phénomène peut augmenter les consommations énergétiques (APUR, 2011). Par exemple, le projet ATHEBA (2010) propose d'ajouter un enduit intérieur spécifique permettant d'atténuer fortement ce phénomène de paroi froide.

2.2.4. Confort d'été

En ce qui concerne le confort d'été, l'inertie des murs et planchers permet de stocker une grande quantité de chaleur puis de la restituer avec un certain déphasage qui varie en fonction du matériau et de son épaisseur. Ainsi, l'inertie permet d'assurer un bon confort intérieur durant l'été, en protégeant les occupants des fortes variations de température entre le jour et la nuit. De même, lors des premiers jours d'une vague de chaleur, le bâtiment restera confortable thermiquement en s'échauffant peu à peu (APUR, 2011). La comparaison de deux écoles, une ancienne et une neuve, effectuée par Orosa et Oliveira (2012), a montré un meilleur confort dans le bâtiment ancien que dans le récent. Ainsi, les bâtiments anciens semblent plus résilients face au changement climatique que des bâtiments plus récents.

2.2.5. Ventilation naturelle

En l'absence de systèmes de ventilation mécanique, le bâti ancien est ventilé de façon naturelle notamment à travers les infiltrations et surtout par les fuites d'air présentes au niveau des ouvertures (ATHEBA, 2010). En effet, les bâtiments datant d'avant 1948 ont une perméabilité à l'air moyenne de $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, alors que celle des bâtiments datant de 2013 est en moyenne de $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (Bailly et al., 2013).

2.2.6. Durabilité des parois

Les matériaux constituant le bâti ancien, sont généralement des matériaux poreux, qui permettent les échanges d'eau à travers la paroi. Les parois anciennes sont dites « perspirantes ». Il existe quatre sources d'humidité pour les parois qui sont la pluie, la vapeur d'eau dans l'air, l'humidité stockée ou liée à la construction et les eaux souterraines (Straube et Schumacher, 2007). L'humidité peut être présente sous forme liquide ou vapeur dans la paroi. Plusieurs

mécanismes de transports d'humidité coexistent au sein des parois, ils ont été présentés en détail dans la partie 3 du Chapitre 1.

L'étude des transferts d'humidité ne doit pas être négligée, car une humidité trop élevée dans la paroi peut engendrer l'apparition de pathologies. Les principaux risques sont liés aux cycles gel/dégel et à l'accumulation d'humidité (Straube et Schumacher, 2007).

Les cycles de gel et de dégel de l'eau interstitielle peuvent entraîner des dommages lorsqu'ils sont répétés et qu'une certaine densité de masse de glace est dépassée. En effet, ces cycles engendrent des contraintes sur la structure des pores, qui peuvent induire un effritement des briques. Ce phénomène a généralement lieu dans la maçonnerie, proche de la surface extérieure (Vandemeulebroucke et al., 2023).

L'accumulation d'humidité peut engendrer la formation de moisissures. Il existe des zones particulièrement sensibles, qui sont les éléments en bois (pans de bois ou poutres) (Harrestrup et Svendsen, 2016), le coin des fenêtres et les ponts thermiques. Ces points se caractérisent par des matériaux plus sensibles à l'humidité et/ou par une température plus faible qui favorise la condensation et donc l'accumulation d'humidité (Hansen et al., 2019).

De plus, les surfaces extérieures des parois des bâtiments anciens sont généralement composées de matériaux perméables à l'eau et permettent ainsi la pénétration de pluie, notamment de pluie battante. Lorsque les surfaces extérieures sont saturées en eau, le film d'eau de ruissellement sur la façade augmente. Il peut pénétrer dans les parois historiques à travers les fissures, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur la durabilité des murs. Les façades comportant des défauts et fissures et/ou étant mises à nu pour rendre visible les briques anciennes sont donc plus sensibles et impactées par la pluie battante (APUR, 2014; Calle et Van Den Bossche, 2017).



Figure 5.3 – Exemple de façade ancienne dont les briques sont mises à nue en certains points (44 Rue Saint-Urcisse à Cahors)

Cependant, selon le rapport ATHEBA (2010), lorsque le bâti ancien est bien conçu et entretenu, il sait gérer l'équilibre hydrique et de ce fait il ne comporte généralement pas de problèmes associés à l'humidité. Ces bâtiments ont donc l'avantage de réguler de manière naturelle l'humidité de la paroi et de l'air intérieur.

2.3. Précautions à prendre

Les sections précédentes ont souligné la différence entre le comportement hygrothermique du bâti ancien et du bâti moderne et ont mis en avant un certain nombre d'avantages du bâti ancien qu'il convient de conserver lors de sa réhabilitation. Le bâti ancien se démarque notamment par son confort d'été lié à la forte inertie thermique des parois et par leur capacité à réguler l'humidité. Or, l'utilisation de solutions d'isolation contemporaines pourrait diminuer l'accès à l'inertie thermique des parois et/ou nuire à leur équilibre hydrique.

En effet, la mise en place de solutions anachroniques sur une paroi ancienne perturbe son équilibre hydrique et peut ainsi réduire la durabilité de la paroi (voir Figure 5.4). Par exemple, dans le cas où la rénovation induit l'étanchéisation des deux faces de la paroi, les remontées capillaires peuvent entraîner l'accumulation d'humidité au sein des parois en contact avec le sol. Ainsi, l'enduit extérieur doit être perméable pour éviter les risques de pathologies associées à l'humidité.



Figure 5.4 – Fonctionnement hygrométrique d'une paroi traditionnelle non isolée (à gauche) et de la même paroi isolée avec une solution moderne (à droite) (ATHEBA, 2010)

Cependant, l'ajout d'un enduit extérieur perméable combiné à l'isolation par l'intérieur peut augmenter la sensibilité à la pluie des parois anciennes. En effet, le transfert capillaire de cette pluie à travers ce type de paroi peut entraîner une accumulation d'humidité à l'interface entre la maçonnerie et l'isolant. La teneur en humidité en ce point dépend des caractéristiques des matériaux, des conditions d'humidité extérieures et intérieures, des variations saisonnières, du rayonnement solaire, de l'écoulement d'air (Hansen et al., 2019), qui sont autant de facteurs à prendre en compte lors de l'évaluation des risques liés à l'accumulation d'humidité.

Par ailleurs, si la réhabilitation des murs mène à une étanchéisation des parois à l'air et l'humidité, il devient indispensable d'installer un système de ventilation mécanique, pour évacuer l'humidité alors bloquée à l'intérieur (APUR, 2011).

Enfin, une bonne connaissance du comportement de la façade, de son état, des sollicitations extérieures et du climat est indispensable, pour mettre en place une solution de réhabilitation adaptée. Lors du processus décisionnel de la rénovation de bâtiment historique, il est primordial d'étudier aussi bien le confort d'hiver, que l'équilibre hydrique et le confort d'été après rénovation (APUR, 2011; ATHEBA, 2010). Prendre ces précautions permettra d'assurer la pérennité du bâtiment et d'éviter de réaliser des travaux de réhabilitation (parfois coûteux) qui soient peu rentables voire inadaptés. L'objectif est de trouver un équilibre entre performance énergétique, confort des occupants et maintien de la salubrité du bâti (APUR, 2014).

Certaines études vont plus loin en étudiant la vulnérabilité du bâti ancien face au changement climatique, qui dépend principalement de l'exposition et de la sensibilité du bâti aux conditions impliquant des risques ainsi que de sa capacité d'adaptation (Smit et Wandel, 2006). La durabilité de la paroi peut notamment être impactée par des phénomènes climatiques locaux et globaux (Vandemeulebroucke et al., 2023, 2021). Par exemple, Vandemeulebroucke et al. (2019) étudient l'influence de l'ICU, de la zone climatique et du changement climatique sur les cycles de gel/dégel et la croissance de moisissures dans les parois. Une diminution claire du risque associé à ces deux phénomènes est observée dans les zones les plus urbanisées de Gand (Belgique) par rapport aux zones rurales. En revanche, il est difficile d'établir une conclusion générale concernant l'impact du changement climatique sur la durabilité des parois en plusieurs localisations européennes. En effet, l'évolution du risque de moisissures dépend des climats, mais pas seulement : pour une même localisation, une diminution ou une augmentation peut être observée en fonction du scénario de changement climatique RCP (Representative Concentration Pathway) choisi (Vandemeulebroucke et al., 2021). Concernant le risque de cycle de gel/dégel, une augmentation de ce risque est généralement observée en Europe du Nord, tandis qu'une diminution est prédite dans plus de 50% des climats européens tempérés étudiés (Vandemeulebroucke et al., 2023).

Face à la potentielle intensification des vagues de chaleur en climat futur, plusieurs travaux mettent en avant des risques de surchauffe dans les bâtiments anciens (Baba et al., 2022; Baglivo et al., 2023). Dans ce contexte, des travaux de réhabilitation inadaptés pourraient augmenter leur vulnérabilité face au changement climatique (Hao et al., 2020). Il devient donc indispensable de considérer le confort d'été des habitants, lors du choix de la solution de rénovation mise en place.

2.4. Techniques d'isolation

L'isolation permet d'augmenter la résistance thermique des parois et ainsi de diminuer les déperditions thermiques par les parois. Les consommations énergétiques en hiver sont donc réduites, après isolation. Cependant, l'isolant doit être choisi et positionné en tenant compte des précautions énoncées précédemment. Cette partie traite de l'application des deux positionnements d'isolants possibles et des différents types d'isolants utilisés.

2.4.1. Positionnement de l'isolant thermique

L'isolation thermique par l'extérieur (ITE) a l'avantage de diminuer le risque de condensation de vapeur d'eau, de minimiser les ponts thermiques et de conserver l'inertie thermique du bâti ancien. Ainsi, l'ITE conduit généralement à des consommations énergétiques plus faibles (Kolaitis et al., 2013) et un meilleur confort d'été (Posani, 2021), que l'isolation thermique par l'intérieur (ITI). Toutefois, cette technique nécessite de déborder sur la voirie et de modifier la façade

extérieure, ce qui est souvent impossible pour les façades historiques (APUR, 2011). Malgré cet argument, plusieurs études continuent à considérer la réhabilitation des parois en isolant par l'extérieur (Pickles, 2016; Posani, 2021). En effet, les interventions sur les façades extérieures sont considérées acceptables dans certains cas, par exemple si la paroi est très abîmée et si l'intérêt culturel n'est pas lié à ce bâtiment individuel, mais plus globalement au groupe de bâtiments (Posani, 2021). Toutefois, la façade du bâtiment doit être rénovée de sorte à conserver l'identité du bâtiment, c'est-à-dire que l'apparence extérieure du bâtiment rénové ne doit pas dénoter par rapport aux autres bâtiments environnants.

L'ITI a l'avantage de ne pas modifier l'apparence extérieure du bâtiment et d'être moins coûteuse à mettre en place (ADEME, 2022). Cependant, elle engendre des ponts thermiques et une perte de la surface habitable (APUR, 2011). De plus, ce type d'isolation peut entraîner une diminution de l'inertie thermique du bâtiment ancien (Maalouf et al., 2014), ce qui entraîne une potentielle surchauffe durant l'été, notamment si aucune ventilation nocturne n'est prévue (Mavrogianni et al., 2012).

Plusieurs études ont montré que l'isolation des parois par l'intérieur, associé à l'isolation du toit et le remplacement des fenêtres, peut théoriquement mener à des économies sur les consommations d'énergie allant jusqu'à 61 voire 68% en fonction des études (Harrestrup et Svendsen, 2015; Morelli et al., 2012; Rasmussen, 2011). Pour effectuer davantage d'économies d'énergie, il peut être nécessaire de dégrader le patrimoine en isolant par l'extérieur (Roberti et al., 2017). Les économies d'énergie sont également fortement conditionnées par la résistance thermique de l'isolant appliqué.

Comme vu dans la partie précédente, il est primordial d'étudier l'équilibre hydrique de la paroi. L'ajout d'une isolation, qu'elle soit intérieure ou extérieure, modifie la répartition des températures au sein de la paroi, ce qui peut notamment avoir un impact sur l'humidité dans la paroi et sur le risque de croissance de moisissures associé.

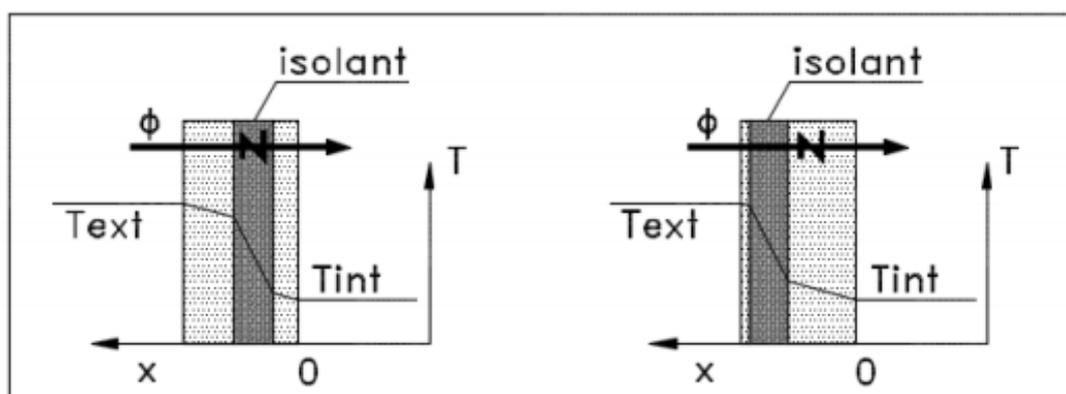


Figure 5.5 – Profil de température dans la paroi en fonction de la position de l'isolant (Fahed, 2018)

La Figure 5.5 montre une faible différence de température dans l'épaisseur de maçonnerie isolée par l'intérieur, ce qui réduit fortement la capacité de séchage de la paroi (Straube et Schumacher, 2007). De plus, une diminution brutale de la température est constatée au niveau de l'isolant ce qui peut entraîner la condensation de vapeur dans le mur, lors des transferts de vapeur d'eau s'effectuant généralement de l'intérieur vers l'extérieur (ATHEBA, 2010).

2.4.2. Comportements hydriques des différents types d'isolants

Compatibilité hydrique

Les isolants dominant le marché européen sont les mousses expansives, qui sont imperméables ou les laines minérales qui sont généralement associées à des pare-vapeurs (Papadopoulos, 2005). Ces matériaux empêchent les transferts d'humidité et rendent par exemple impossible d'évacuer vers l'intérieur l'eau liquide infiltrée lors des épisodes de pluies battantes (APUR, 2014; Hansen et al., 2019). Ces solutions favorisent donc l'accumulation d'humidité à l'interface brique/isolant, ce qui peut engendrer un risque d'apparition de pathologies.

De ce fait, de nombreuses études s'intéressent à l'utilisation de matériaux biosourcés en tant qu'isolant sur la face intérieure de la paroi. Ces matériaux sont issus de la biomasse d'origine végétale ou animale, comme le bois, la paille, le chanvre, le lin, la laine de mouton, etc. Au-delà de leurs avantages environnementaux, ils se distinguent des autres matériaux par leurs propriétés hydriques. En effet, ces matériaux fortement hygroscopiques permettent alors de conserver la perméabilité de la paroi (Lawrence et al., 2013). Ainsi, en isolant avec ces matériaux biosourcés plutôt qu'en utilisant des isolants plus classiques, les risques de pathologies peuvent être atténués (Claude et al., 2019).

De manière plus générale, il existe de nombreux isolants pour la réhabilitation énergétiques des parois anciennes, applicables en ITI et/ou en ITE. Posani et al. (2019) s'attachent à fournir un cadre théorique à l'évaluation de la compatibilité hydrique des isolants avec la brique, en se basant sur une classification de matériaux en fonction de leurs propriétés hydriques.

Dans cette classification, la perméabilité à la vapeur d'eau est évaluée, en répartissant les isolants en quatre classes allant d'élevée à faible en fonction de leur coefficient de résistance à la vapeur (Tableau 5.1). De manière similaire, la capacité des isolants à absorber l'eau liquide est comparée en fonction de leur coefficient d'absorption d'eau (Tableau 5.2).

Tableau 5.1 – Classification des matériaux en fonction de leur perméabilité à la vapeur d'eau (Posani et al., 2019)

Classe de perméabilité à la vapeur d'eau	Coefficient de résistance à la vapeur μ (-)
Élevée	$\mu \leq 11,2$
Modérément élevée	$11,2 < \mu \leq 16,8$
Modérément faible	$16,8 < \mu \leq 33,3$
Faible	$\mu > 33,3$

Tableau 5.2 – Classification des matériaux en fonction de leur capacité à absorber l'eau liquide (Posani et al., 2019)

Classe d'absorption d'eau	Coefficient d'absorption d'eau A_w ($kg/(m^2s^{0.5})$)
Élevée	$A_w \geq 0,60$
Modérément élevée	$0,36 \leq A_w < 0,60$
Modérément faible	$0,11 \leq A_w < 0,36$
Faible	$A_w < 0,11$

En s'appuyant sur les classes ci-dessus, Posani et al. (2019) proposent de diviser les isolants en trois catégories (Tableau 5.3). Bien que les propriétés hygrothermiques soient des éléments clés pour vérifier la compatibilité hydrique de l'isolant avec la brique ancienne, il est impossible d'effectuer une recommandation générale, concernant la catégorie d'isolant la mieux adaptée pour la rénovation des parois anciennes. En effet, la compatibilité hydrique est fortement liée à l'exposition à la pluie battante de la paroi, qui varie notamment en fonction du climat, de l'orientation de la paroi, de la morphologie urbaine ou encore de l'épaisseur de la brique et de l'isolant (Hansen et al., 2018; Vandemeulebroucke et al., 2021, 2019; Vereecken et al., 2015a).

Tableau 5.3 – Classification des matériaux en trois catégories (Posani et al., 2019)

Catégories de matériaux	Classe de perméabilité à la vapeur	Classe d'absorption d'eau
Cat 1	Élevée ou modérément élevée	Élevée ou modérément élevée
Cat 2	Élevée ou modérément élevée	Faible ou modérément faible
Cat 3	Faible ou modérément faible	Faible ou modérément faible

Capacité de tampon hydrique

Les propriétés hydriques des matériaux biosourcés leur confèrent d'autres avantages. Leur porosité ouverte les rend perméables à l'eau sous forme liquide et vapeur. Ainsi, ces matériaux hygroscopiques se caractérisent par leur capacité à fixer l'humidité de l'environnement, puis à la restituer. Cette capacité de tampon hydrique est le résultat de deux phénomènes successifs : l'adsorption et la désorption se produisant au niveau de toutes surfaces hygroscopiques (paroi ou meubles). Ainsi, lorsque que l'humidité relative de l'air intérieur augmente, les surfaces des matériaux hygroscopiques absorbent de la vapeur d'eau. Au contraire, lorsque l'humidité de l'air diminue, les matériaux libèrent de la vapeur d'eau dans l'air (El Diasty et al., 1992). Cet effet de tampon d'humidité est largement étudié. Il traduit l'aptitude de ces matériaux à atténuer les fluctuations de l'humidité intérieure et donc à réduire considérablement les pics d'humidité intérieure (Ge et al., 2014; Maalouf et al., 2014; Woloszyn et al., 2009).

L'humidité est un facteur clé dans l'étude de l'environnement intérieur, puisqu'il impacte à la fois le confort thermique, les charges du bâtiment, la qualité de l'air intérieur mais également l'efficacité au travail des occupants (Atthajariyakul et Leephakpreeda, 2004; Fang et al., 1998). Ainsi, la capacité des matériaux biosourcés à réguler l'humidité intérieure améliore la sensation de confort ainsi que la qualité de l'air (Padfield, 1999).

De plus, le phénomène d'absorption de vapeur d'eau s'accompagne du rejet de chaleur et donc de l'augmentation de la température. A l'inverse, lors du phénomène de désorption de vapeur d'eau dans l'air, le changement de phase implique l'absorption de chaleur provenant de l'air et donc une diminution de la température intérieure (Maalouf et al., 2014) et de la température opérative (Zhou et al., 2020). D'autres travaux ont souligné l'impact de la capacité de tampon hydrique des matériaux sur les consommations énergétiques des équipements de CVC, en constatant une diminution allant jusqu'à 30 % (Osanyintola et Simonson, 2006; Zhang et al., 2017).

Le phénomène de tampon hydrique est extrêmement lié aux conditions intérieures ainsi qu'au climat et à la saison. L'étude de Zhang et al. (2017) montre des résultats très positifs sur la réduction des consommations énergétiques à Paris et Madrid et conclut que les matériaux

hygroscopiques sont particulièrement efficaces, pour des climats connaissant des différences importantes d'humidité entre le jour et la nuit. En effet, l'air extérieur doit être suffisamment sec durant la période non occupée pour éliminer l'humidité absorbée par le matériau durant la période occupée.

2.5. Rénovation des centres-villes anciens vis-à-vis de l'ICU

De nombreuses études ont suggéré des leviers d'actions face au phénomène d'ICU. Ainsi, des stratégies d'adaptation aux contraintes climatiques dans les villes ont été mises en place à plusieurs échelles : celle de l'aménagement urbain, celle du bâti ou encore celles des pratiques individuelles (Figure 5.6). Cependant, elles ne sont pas toutes applicables au contexte spécifique des centres historiques.

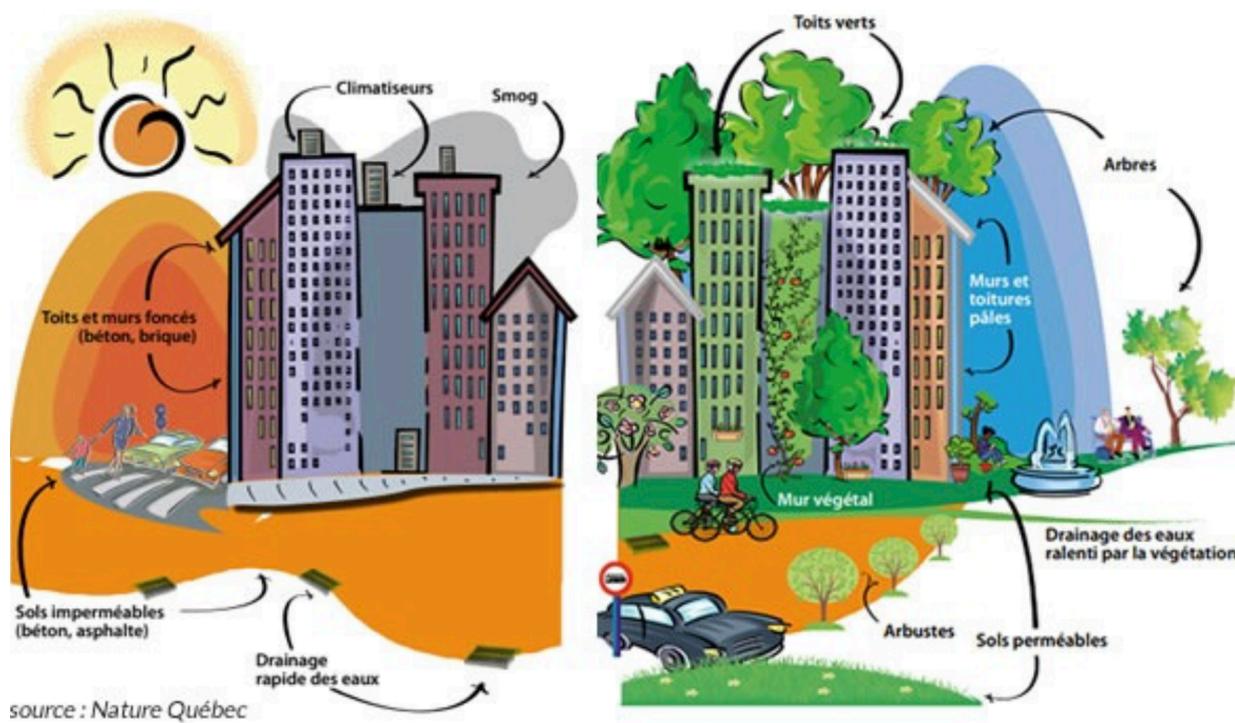


Figure 5.6 – Les principales causes de l'ICU (à gauche) et les principales stratégies d'atténuation (à droite) (Nature Québec)

2.5.1. Géométrie urbaine

Tout d'abord, la forme urbaine impacte fortement l'écoulement du vent et la répartition du rayonnement, qui jouent un rôle majeur dans le phénomène d'ICU. Cependant, dans le cadre de la réhabilitation de centre historique, il est difficile d'agir sur ces éléments, puisque la morphologie des centres-villes et les bâtiments doivent être conservés. Dans certains contextes, des surélévations ou des extensions peuvent être envisagées dans les centre anciens, ce cas de figure ne sera cependant pas considéré dans ces travaux.

2.5.2. Propriétés radiatives des surfaces urbaines

L'utilisation de matériaux clairs (à fort albedo) est une technique ancestrale d'adaptation face à la chaleur en zone urbaine, comme en témoigne certains centres anciens aux revêtements

totallement blancs dans les pays chauds. L'objectif de ce type de surface est de réduire l'énergie absorbée et stockée par les matériaux et ainsi de diminuer le rejet de chaleur en ville durant la nuit. Ainsi, la rénovation des bâtiments en appliquant des peintures réfléchissantes contribue à atténuer le phénomène d'ICU (Masson et al., 2013b). Dans le contexte des centres historiques, Rosso et al. (2018) montrent un impact limité des parois réfléchissantes sur les conditions extérieures dû au faible facteur de vue du ciel et aux multiples réflexions. En revanche, ces peintures réfléchissantes permettent une diminution de la demande énergétique en rafraîchissement allant jusqu'à 3,6% (Rosso et al., 2017a). Par ailleurs, cette étude montre des effets positifs sur le microclimat urbain, lorsque les surfaces très réfléchissantes sont les pavés.

L'application de peintures claires n'est pas toujours possible, car le principe de conservation empêche la modification de la couleur des façades et des pavés qui caractérisent chaque centre-ville historique. Les travaux de Rosso et al. (2017c, 2017b) adaptent cette solution pour l'appliquer aux centres historiques. Ceux-ci ont développé des mortiers réfléchissants, dont la couleur est adaptée à celle de la façade en utilisant des pigments colorés. La méthode consiste à ajouter au mélange du mortier d'autres pigments ayant des propriétés infrarouges. Cet ajout permet de réfléchir une partie du rayonnement solaire émise dans le spectre du proche infrarouge.

Ichinose et al. (2017) proposent également une méthode pour agir sur la répartition du rayonnement dans le canyon urbain. En effet, ils suggèrent d'appliquer aux fenêtres un film de protection thermique avec une propriété de rétro réflexion. Ces filtres ayant le même degré de transparence que le verre, ne modifient pas l'apparence du bâtiment et permettent de réorienter le rayonnement vers le haut du canyon. Cette méthode réfléchit davantage de rayonnements solaires directement vers le ciel et évite ainsi qu'ils réchauffent les différentes surfaces du canyon.

2.5.3. Évaporation au niveau des surfaces urbaines

Plusieurs leviers d'action s'appuient sur le concept de rafraîchissement par évaporation. L'évaporation peut avoir lieu au niveau des surfaces urbaines poreuses après un évènement de pluie par exemple. Ainsi, les matériaux perméables sont une solution qui peut se décliner au niveau des toits (Shokri Kuehni et al., 2016), des façades (Saneinejad, 2013), ainsi que des pavés (Ferrari et al., 2020; Li et al., 2014; Wang et al., 2018). Les pavés perméables sont la configuration la plus étudiée dans la littérature. Les études proposent des pavés aux propriétés de plus en plus optimisées pour l'atténuation de l'ICU (Liu et al., 2018; Wardeh et al., 2022). De plus, dans la configuration de rue canyon, le potentiel de rafraîchissement de l'air extérieur semble être plus élevé pour les sols poreux que pour les surfaces verticales (Kubilay et al., 2018). Dans le contexte des centres-villes historiques, les matériaux urbains sont généralement poreux, notamment les façades qui se caractérisent par leur perméabilité à l'humidité. De plus, les contraintes patrimoniales sont fortes au niveau des façades, mais elles sont moins importantes au niveau des sols. Ainsi, il serait envisageable de remplacer les pavés anciens par des pavés rafraîchissants.

Par ailleurs, dans le but de déclencher ce phénomène d'évaporation, plusieurs projets de recherche s'intéressent aux bénéfices de l'arrosage des chaussées, qui est une pratique traditionnelle dans certains pays comme le Japon. Plusieurs expériences d'humification des chaussées ont été réalisées en laboratoire (Parison et al., 2020), à Lyon (Musy et al., 2017) et à Paris (EPICEA, 2012; Hendel, 2015; Hendel et al., 2016). Par exemple, à Lyon la comparaison entre

une rue humidifiée et une rue témoin a permis d'observer une diminution de 6°C pour la température de surface et de 2°C pour WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature en anglais, soit la température humide et de globe noir), en cas d'arrosage de la chaussée (Musy et al., 2017).

2.5.4. Espace en eau et végétalisation

D'autres leviers d'action basés sur le potentiel de rafraîchissement par évaporation existent. Ils consistent à ajouter des espaces en eau tels que des bassins, fontaines (Bonhomme et al., 2015; Krüger et Pearlmutter, 2008) ou encore des brumisateurs (Ishii et al., 2009; Yamada et al., 2008). Par ailleurs, une autre stratégie largement étudiée est la stratégie de verdissement qui peut être mise en place à plusieurs échelles urbaines : la ville, le quartier, les rues, les jardins et également à l'échelle du bâtiment (toit ou façade végétalisés) (Masson et al., 2014). Néanmoins, ces stratégies sont difficilement applicables au vu de la forte emprise au sol des centres anciens et de la contrainte de non-modification de l'apparence extérieure des bâtiments.

2.5.5. Comportement énergétique des bâtiments

La diminution des rejets anthropiques, notamment ceux liés aux consommations énergétiques des bâtiments, est également étudiée comme un levier d'action face à l'ICU. Ainsi, la rénovation du bâti peut avoir un impact sur le microclimat urbain (Yang et al., 2017).

Pour l'ICU en saison chaude, une des principales problématiques est l'utilisation de la climatisation, qui engendre un phénomène d'auto-amplification. En effet, plus il fait chaud, plus les systèmes de climatisation sont utilisés et plus ils dégagent des charges thermiques à l'extérieur (Santamouris et Adnot, 2004). Par exemple, l'usage intensif de la climatisation à Paris a mené à une augmentation de la température extérieure d'environ 1°C la nuit (de Munck et al., 2013). Si aucune mesure n'est prise, la température nocturne continuera d'augmenter (de Munck et al., 2010). Un levier d'action potentiel consiste à agir pour améliorer les comportements énergétiques des usagers. Selon le rapport ACCLIMAT, une augmentation de la température de consigne de la climatisation de 3°C permettrait de diviser par trois la consommation liée à la climatisation (Masson et al., 2013b). Une autre solution pour limiter l'usage de la climatisation consiste à appliquer des méthodes de rafraîchissement passive telle que fermer les volets la journée et utiliser la ventilation naturelle la nuit. Cependant, ce potentiel de ventilation nocturne est très réduit en ville, car la température nocturne y est plus élevée et la vitesse d'écoulement du vent y est plus faible qu'à la campagne (Geros et al., 2005).

L'enveloppe du bâti participe au stockage de la chaleur durant la journée, qui sera ensuite restituée durant la nuit. Les rapports IFU et ACCLIMAT proposent d'isoler les parois par l'extérieur et d'appliquer une peinture réfléchissante, ce qui permet de limiter le stockage de chaleur durant la journée et ainsi d'atténuer le phénomène d'ICU (Bonhomme et al., 2015; Masson et al., 2013b). En revanche, cette stratégie peut engendrer le piégeage de la chaleur à l'intérieur des bâtis, si aucun système de rafraîchissement nocturne n'est mis en place (Masson et al., 2013b). De plus, en été, le principal apport de chaleur n'a pas lieu par les parois mais est plutôt induit par les apports solaires à travers les surfaces vitrées (Sidler, 2003). Horn et al. (2020) proposent alors une solution pour la rénovation des fenêtres historiques pour améliorer le confort d'été tout en profitant de la ressource solaire.

Enfin, la plupart des leviers d'action pour l'atténuation de l'ICU ne sont pas applicables dans le contexte des centres historiques du fait de leur morphologie compacte et de la contrainte de préservation du patrimoine. Néanmoins, la piste de la réhabilitation des parois semble intéressante à explorer, notamment dans le but d'étudier l'impact potentiel de la mise en place d'une isolation thermique par l'intérieur.

2.6. Rôle du comportement hygrothermique des parois dans l'évaluation des scénarios de rénovation

Les sections précédentes ont montré que le comportement hygrothermique des parois anciennes est un élément clé à considérer lors de la rénovation des bâtiments des centres-villes historiques. En effet, les transferts hydriques à travers les parois interviennent à plusieurs niveaux. Premièrement, les façades interceptent une partie de la pluie battante. Ensuite, la pluie s'évapore et peut engendrer un rafraîchissement local, bien que dans le contexte étudié, ce potentiel semble être moindre (voir section 5.3 du Chapitre 4). En revanche, la gestion de l'eau absorbée par la paroi peut avoir un effet significatif sur la durabilité des parois et plus particulièrement sur le risque de croissance de moisissures (voir section 2.2.6). L'équilibre hydrique est fortement impacté par le choix de la technique d'isolation. Les travaux de Claude et al. (2019) ont montré que les matériaux biosourcés, comme le chaux-chanvre, permettent de limiter le risque d'apparition de moisissures.

Par ailleurs, la section 2.4.2 a souligné l'impact favorable de la capacité de tampon hydrique de certains matériaux sur les conditions hygrothermiques intérieures. De plus, la modification des conditions intérieures fait varier les consommations énergétiques des bâtiments. D'ailleurs, Osanyintola et Simonson (2006) ont estimé que les matériaux hygroscopiques peuvent réduire les consommations de chauffage et de refroidissement de plus de 5 et 30 % respectivement. Généralement, plus la capacité de tampon hydrique est élevée, plus les économies potentielles sont élevées. L'association des matériaux hygroscopiques à des systèmes de ventilation bien conçus et régulés peut réduire la consommation d'énergie totale de 25 à 30 % dans les climats tempérés ou semi-arides (Zhang et al., 2017).

Cependant, les réglementations thermiques ne considèrent pas encore la performance hydrique des matériaux. Les comparaisons entre les matériaux isolants se basent principalement sur la conductivité thermique. Or du fait de leur densité plus élevée, les matériaux biosourcés ont généralement une conductivité thermique supérieure à celle des isolants conventionnels (Claude, 2018). De ce fait, malgré leurs qualités, les isolants biosourcés sont actuellement peu valorisés pour la rénovation thermique (APUR, 2014).

3. Méthode pour l'évaluation de la rénovation du centre médiéval de Cahors

3.1. Méthodologie générale

Dans le but de proposer des solutions de réhabilitation adaptées, une analyse multicritère peut être réalisée. Dans la littérature, il existe plusieurs exemples, appliqués à la rénovation de bâtiments existants (Daniel et Ghiaus, 2023; Ongpeng et al., 2022) et certains étudient plus

spécifiquement la rénovation des bâtiments historiques (Cho et al., 2022; Roberti et al., 2017; Şahin et al., 2015). Chaque analyse se base sur des critères différents, qui sont définis en fonction des enjeux locaux, des objectifs de l'étude mais également des informations disponibles et des outils utilisés. Au-delà des critères d'évaluation, les travaux se différencient également par les scénarios de rénovation étudiés.

Ces études sont généralement effectuées à l'échelle du bâtiment et comparent l'impact de la rénovation de différents éléments, comme l'isolation des parois et des toits, le remplacement des fenêtres, le changement des équipements de CVC et d'éclairage ou encore l'installation de sources d'énergie renouvelable. Par exemple, selon Şahin et al. (2015), l'isolation des parois, qu'elle soit effectuée par l'intérieur ou l'extérieur, permet de réduire les consommations énergétiques et d'améliorer le confort thermique intérieur. Cependant, ces travaux ne se concentrent pas sur la rénovation des parois et étudient souvent un seul type d'isolant. Or le choix du type d'isolant est déterminant pour la compatibilité hydrique avec la paroi ancienne (Claude et al., 2019; Posani, 2021).

La rénovation des parois anciennes est un élément à fort enjeu, comme le montre le grand nombre d'études à ce sujet (Posani et al., 2019). Ainsi, dans la littérature, il existe de nombreux travaux comparant l'application de différents isolants côté intérieur ou extérieur de parois en briques anciennes (Densley Tingley et al., 2015; Lu et al., 2021; Vereecken et al., 2015a; Walker et Pavía, 2015). Chaque étude compare plusieurs solutions au vu d'un ou plusieurs critères. Néanmoins, le nombre de critères étudié est limité, par les capacités des outils utilisés. Par exemple, ils ne considèrent généralement pas les effets des bâtiments sur le microclimat urbain.

Des méthodologies complètes pour aider à la décision lors de la réhabilitation énergétique des bâtiments résidentiels ont été proposées. Ces méthodes évaluent plusieurs scénarios au vu de différents critères définis par l'utilisateur, et des algorithmes complexes ont été développés pour pondérer les critères et/ou classer les scénarios (Daniel et Ghiaus, 2023; Thorel, 2014). D'autres algorithmes ont été pensés pour effectuer des analyses de sensibilité et optimiser les scénarios de réhabilitation (Costa-Carrapiço et al., 2020; Ongpeng et al., 2022).

L'objectif de ce travail n'est pas de trouver la solution la mieux optimisée, ni d'obtenir un classement strict des scénarios comparés. Cette thèse vise plutôt à discuter de l'impact de chaque solution de rénovation des parois sur chaque critère étudié. L'utilisation du modèle de climat urbain TEB permet de considérer à la fois le confort intérieur des habitants, le confort des piétons, les consommations énergétiques liées aux équipements de CVC et le risque de croissance de moisissures dans les parois, à l'échelle urbaine. D'autres critères, ne nécessitant pas de simulation énergétique, pourront être ajoutés. Finalement, une approche simplifiée est appliquée. Elle comporte les étapes suivantes :

- 1) Définition des scénarios de réhabilitation envisageables
- 2) Définition des critères d'évaluation
- 3) Évaluation de la performance de chaque scénario par rapport aux critères définis
- 4) Recommandations

3.2. Définition des scénarios de rénovation

Ce travail se concentre sur la rénovation des parois verticales donnant sur l'extérieur, désignées comme « parois » dans la suite du mémoire. Cette section présente le cas de référence, qui correspond à une paroi constituée de briques et non rénovée. Ensuite, plusieurs scénarios de rénovation des parois sont proposés. Les différentes solutions étudiées se différencient par les types d'isolants et leur positionnement par rapport à la brique.

3.2.1. Cas de référence

Deux typologies principales de bâtiments coexistent à Cahors : les parois « massives » composées de briques épaisses d'environ 40cm et les parois « fines » avec des structures à pans de bois remplies de briques d'environ 14cm d'épaisseur. Cette thèse propose d'étudier séparément ces deux types de parois, car leur comportement hygrothermique est différent (Cantin et al., 2010). En effet, les parois massives ont une inertie beaucoup plus importante que les parois à pans de bois (Claude, 2018). De plus, l'épaisseur de la paroi joue un rôle crucial dans sa vulnérabilité vis-à-vis de la croissance de moisissures (Claude et al., 2019; Vandemeulebroucke et al., 2021; Vereecken et al., 2015a). Or, l'ajout d'un isolant impacte particulièrement ces deux phénomènes. Ainsi, l'étude d'une paroi moyenne n'aurait pas de sens, puisqu'elle ne permettrait pas de prendre en compte les spécificités des deux typologies et mènerait donc à des solutions de rénovation qui ne seraient réellement adaptées à aucun des deux cas étudiés.

Deux simulations à l'échelle urbaine sont donc effectuées séparément, une pour chaque typologie de paroi : la première configuration suppose que toutes les parois ont une typologie de briques massives et la seconde que toutes les parois sont à pans de bois. Deux cas de référence sont ainsi obtenus. Ils se différencient seulement par la composition des parois. Toutes les autres données d'entrée sont configurées de la même manière.

La durée de simulation est fixée à cinq ans, ce qui correspond à une durée suffisante pour étudier la croissance de moisissures (Viitanen et al., 2015). Les simulations s'étendent du 1^{er} janvier 2018 au 31 décembre 2022. Le forçage météorologique est effectué à partir des données enregistrées à la station météorologique de l'aérodrome de Cahors-Le Montat. La méthode utilisée pour la définition du forçage correspond à celle présentée dans la section 4.3 du Chapitre 4. Les options de TEB, sélectionnés dans le Chapitre 4, sont utilisées notamment concernant le calcul radiatif urbain, les coefficients d'échanges convectifs, le modèle multicouche de la canopée urbaine. De même, les données sur la forme urbaine restent inchangées et les deux orientations de rue sont simulées. Concernant la technique de maillage, ce chapitre évalue le risque de croissance de moisissures, la version 4 de maillage est donc appliquée aux parois.

Dans ces cas de référence, nous supposons que les bâtiments ont subi une première rénovation. Comme dans le Chapitre 4, le toit est isolé à partir de 20 cm de laine minérale, les fenêtres ont un double vitrage et l'infiltration a été réduite à 4 vol/h à 50 Pa. Seules les parois sont considérées non rénovées et donc composées uniquement de briques, ce qui permettra de concentrer notre étude spécifiquement sur l'impact de la rénovation des parois.

Concernant les équipements de CVC, un système de chauffage est installé, avec une température de consigne 19°C. Le système de ventilation choisi est un système régulé en fonction de l'occupation. TEB ne permet pas de calculer l'évolution du CO₂ à l'intérieur du bâtiment, donc le

débit est régulé en fonction de l'humidité relative (Woloszyn et al., 2009). Aucun système de climatisation n'est installé.

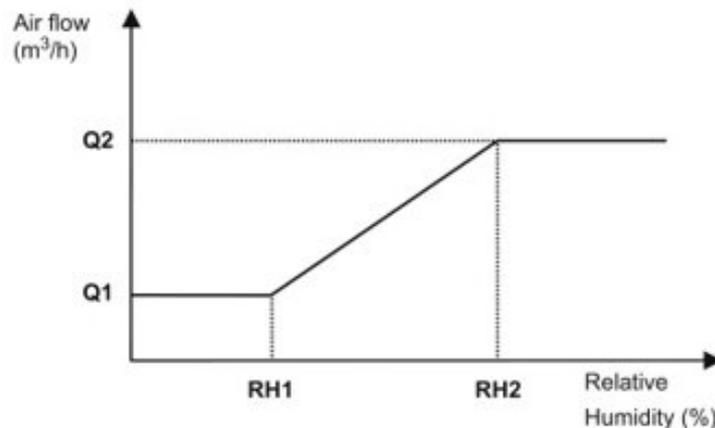


Figure 5.7 – Système de ventilation régulé en fonction de l'humidité relative (Woloszyn et al., 2009). Dans cette étude : $Q1 = 0,075 \text{ vol/h}$, $Q2 = 0,3 \text{ vol/h}$, $RH1 = 25 \%$ et $RH2 = 60 \%$.

Ce travail suppose que tous les bâtiments sont utilisés pour le logement et que les habitants suivent les bonnes pratiques, pour améliorer le confort intérieur, en fermant les volets lors des journées ensoleillées d'été et en ouvrant les fenêtres, lorsque l'air extérieur est plus frais. L'Annexe D fournit davantage de détails sur la configuration de ces méthodes passives mais également sur les gains internes et les scénarios d'occupation appliqués.

3.2.2. Solutions de rénovation comparées

L'objectif de cette section est de définir les scénarios de rénovation à étudier. L'ensemble des scénarios est appliqué aux deux cas de référence. Les solutions envisagées dans cette étude se concentrent uniquement sur des méthodes d'isolation des parois anciennes. Ainsi, les seules modifications effectuées par rapport aux cas de référence concernent la composition des parois. Les autres paramètres d'entrée restent inchangés.

Comme souligné par la revue de littérature de Posani et al. (2019), il existe une grande variété d'isolants pour la réhabilitation énergétiques des parois anciennes, applicables en ITI et/ou en ITE. Le but est de choisir un nombre restreint d'isolants, tout en obtenant une sélection représentative de la multitude de possibilité. Pour cela, des matériaux isolants d'origine différentes (naturelles ou organiques) sont testés. Les isolants étudiés doivent également être représentatifs de la variété de propriétés hygrothermiques existantes. Pour vérifier cet aspect, cette thèse se base sur la classification de Posani et al. (2019), présentée dans la section 2.4.2 (voir Tableau 5.3). Des isolants appartenant aux trois catégories sont étudiés :

- La première catégorie d'isolant se définit par une perméabilité à la vapeur modérée à élevée et une absorption d'eau liquide modérée à élevée. Cependant, lors de la mise en place d'une ITE, il est généralement conseillé de réduire la quantité de pluie absorbée (Posani et al., 2019). Pour cette raison, aucun isolant de la première catégorie n'est testé en ITE. Pour représenter cette première catégorie, la ouate de cellulose a été retenue en

ITI, car elle a l'avantage d'être issue du recyclage du papier et a donc un impact environnemental réduit (Bottino-Leone et al., 2019).

- La deuxième catégorie de matériaux se caractérise par une forte perméabilité à la vapeur et une faible capacité à absorber l'eau. Dans cette catégorie, deux types d'isolants sont étudiés en ITI : la fibre de bois et un mélange de chaux-chanvre. Les panneaux isolant en fibre de bois ont été retenus, car ils ont un impact environnemental particulièrement faible par rapport à d'autres isolants (Bottino-Leone et al., 2019; Densley Tingley et al., 2015). Les isolants à base de chaux-chanvre sont particulièrement recommandés pour leur compatibilité avec les parois historiques (Agliata et al., 2020; Claude et al., 2019). Par ailleurs, dans le cadre du projet ENERPAT, la mairie de Cahors a entrepris la réhabilitation d'un bâtiment ancien localisé dans le centre-ville médiéval de Cahors. Pour ce bâtiment démonstrateur, la solution d'isolation retenue, en accord avec un architecte des Bâtiments de France, est une ITE à partir d'un mélange de chaux-chanvre. Ce scénario de réhabilitation est donc également intégré à notre étude.
- Les isolants de la troisième catégorie correspondent à des matériaux peu perméables à l'eau liquide et vapeur. L'exemple choisi pour cette catégorie est un isolant organique : le polystyrène expansé (EPS). L'étude effectuée par Posani et al. (2019) montre que dans la littérature, cet isolant est aussi bien étudié en ITI qu'en ITE pour la rénovation des parois historiques.

Finalement, quatre scénarios de rénovation par l'intérieur et deux scénarios de rénovation par l'extérieur sont étudiés et comparés (Tableau 5.4).

Tableau 5.4 – Catégories et positionnement des isolants étudiés

Matériau	Origine	Perméabilité à la vapeur		Absorption d'eau		Catégories	Positionnement étudié	
		Valeur de μ (-)	Classe	Valeur de A_w ($kg/(m^2s^{0.5})$)	Classe		Intérieur	Extérieur
Ouate de cellulose	Végétale	2,05	Élevée	0,56	Modérément élevée	Cat 1	Oui	Non
Chaux chanvre	Végétale	6,5	Élevée	0,2	Modérément faible	Cat 2	Oui	Oui
Fibre de bois	Végétale	3	Élevée	0,07	Faible	Cat 2	Oui	Non
EPS	Organique	96	Faible	0	Faible	Cat 3	Oui	Oui

Le dernier élément à prendre en compte lors de la définition des compositions des parois est la résistance thermique totale de la paroi. Ce paramètre influence fortement les conditions intérieures et par voie de conséquence, les consommations énergétiques et le confort. La résistance thermique dépend de la conductivité thermique (Tableau 5.5) et de l'épaisseur de chaque couche de matériaux.

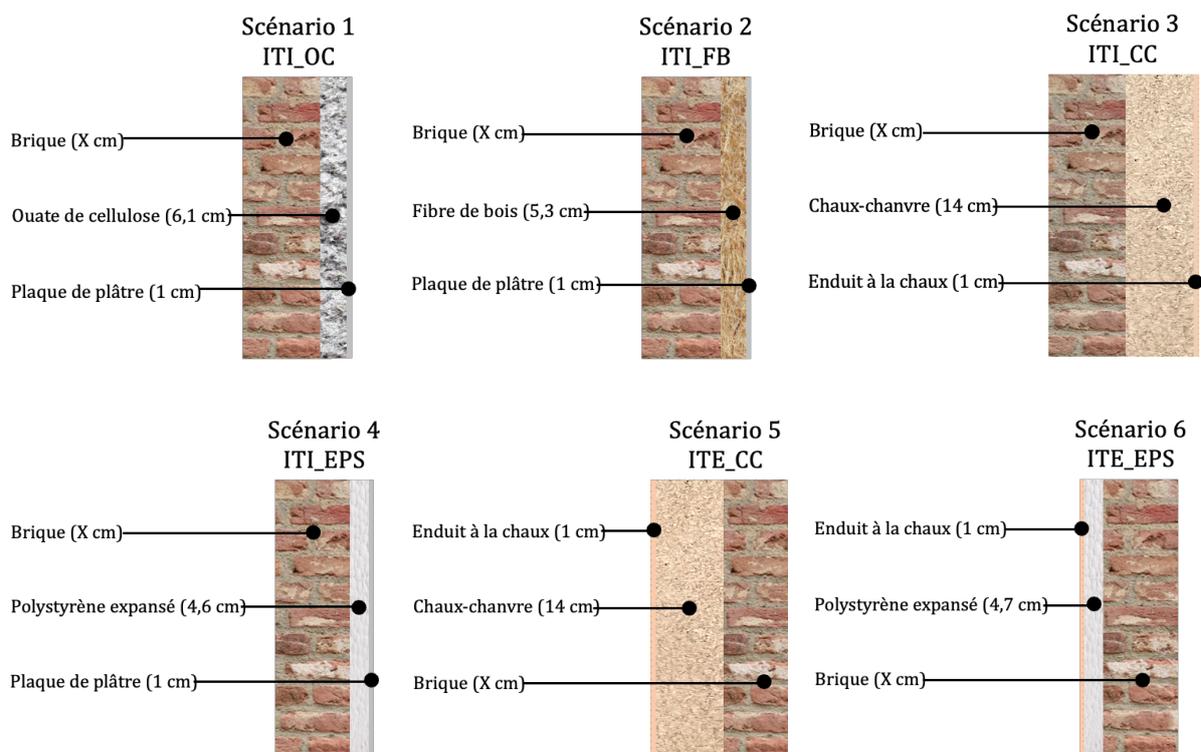
Certains isolants biosourcés ont des conductivités thermiques élevées, mais ont d'autres avantages notamment concernant leur capacité de tampon hydrique (voir section 2.4.2). Finalement, il a été décidé de comparer des parois rénovées ayant des résistances thermiques

équivalentes, dans le but de concentrer l'étude sur l'impact des transferts hydriques et de l'inertie thermique. Les épaisseurs des isolants ont été définies de sorte à obtenir une résistance thermique sèche égale à $2,1 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour les parois en briques massives rénovées et à $1,6 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour les parois à pans de bois isolées (Figure 5.8).

La Figure 5.8 récapitule les compositions des parois associées aux six scénarios étudiés et le Tableau 5.5 présente les propriétés hygrothermiques utilisées pour définir la brique, les différents isolants, la plaque de plâtre et l'enduit à la chaux. Les valeurs sont issues des travaux de caractérisation de Claude (2018) et de la base de données de Delphin. Les fonctions décrivant l'évolution des caractéristiques selon la teneur en eau sont saisies dans TEB, en respectant les contraintes définies dans la section 3.4 du Chapitre 4.

Tableau 5.5 – Propriétés hygrothermiques des matériaux

	Masse volumique	Capacité calorifique	Conductivité thermique sèche	Coefficient de résistance à la vapeur	Coefficient d'absorption d'eau	Teneur en eau à saturation	Source des valeurs
	ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	λ_{dry} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	μ (-)	A_w ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}$)	w_{sat} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	
Brique	1616	800	0,49	9	0,28	388	Claude (2018)
Ouate de cellulose	55,2	2544,4	0,048	2,05	0,56	780	Base de données de Delphin
Fibre de bois	150	2000	0,042	3	0,07	600	Base de données de Delphin
Chaux-chaivre	440	1000	0,07	6,5	0,2	789	Claude (2018)
Polystyrène expansé	23	1500	0,036	96	0	920	Base de données de Delphin
Plaque de plâtre	850	850	0,2	10	0,28	551	Base de données de Delphin
Enduit à la chaux	1249,9	999	0,57	12,14	0,13	452,2	Base de données de Delphin



La valeur de X varie en fonction de la typologie de paroi choisie (40 cm pour une paroi en brique massive et 14 cm pour une structure à pans de bois).

Figure 5.8 – Compositions des parois associées à chaque scénario de rénovation étudié

3.3. Choix des critères d'évaluation

La prochaine étape de ce travail consiste à définir les objectifs à atteindre lors de la rénovation. La définition des objectifs permet d'établir des critères qui facilitent la comparaison de plusieurs scénarios de rénovation. Les critères doivent être sélectionnés de sorte à prendre en compte les enjeux actuels des centres anciens. Webb (2017) présente une liste de critères et des indicateurs associés pour étudier l'impact de la réhabilitation énergétique dans les bâtiments historiques. Les critères suggérés sont classés en quatre catégories : environnement global, structure des bâtiments, environnement intérieur et économie, ce qui permet de recenser de nombreux paramètres. Néanmoins, aucun indicateur n'est proposé au sujet du confort extérieur, qui est pourtant un enjeu majeur dans les centres-villes. De plus, des études ont montré que rénover les parois peut contribuer à l'atténuation de l'ICU (voir section 2.5.5).

Au contraire, certains indicateurs proposés ne correspondent pas à notre étude. En effet, les constructions étudiées à Cahors sont des bâtiments résidentiels, qui ne comportent pas spécifiquement d'objets de collections. Ainsi, aucun indicateur n'est retenu pour évaluer les conditions de conservation. De plus, cette étude se concentre sur la rénovation des parois opaques du bâtiment. De ce fait, seuls des indicateurs sur lesquels les parois opaques peuvent avoir une influence sont retenus. Par exemple, aucun indicateur sur l'éclairage n'est fixé.

Cependant, la liste de critères restants est encore longue et les indicateurs associés sont nombreux. Pour faciliter l'analyse et mener une étude efficace, notre but est d'obtenir une liste de critères réduite et de proposer un unique indicateur par critère, qui soit spécifiquement adapté

aux enjeux du centre-ville médiéval de Cahors. Les prochains paragraphes détaillent les critères et indicateurs choisis.

Il existe trois méthodes pour évaluer les différents critères : qualitative, quantitative ou binaire (oui/non) (Daniel et Ghiaus, 2023). Une approche quantitative et basée sur la simulation sera privilégiée, car cela permet de prendre en compte précisément la configuration étudiée et de comparer facilement les résultats obtenus.

3.3.1. Conservation du patrimoine

La principale spécificité de la réhabilitation des bâtiments historiques, par rapport aux autres bâtiments existants, correspond à la nécessité de conserver le patrimoine. Cette exigence se traduit principalement par une contrainte de non-modification de l'apparence extérieure des façades, situées en zone à fort intérêt culturel.

La méthode d'évaluation appliquée est de type binaire. Ainsi, ce travail considère que l'application d'un isolant par l'intérieur n'a pas d'incidence sur la conservation du patrimoine. En revanche, une isolation par l'extérieur n'est pas idéale, car elle modifie l'apparence extérieure. Cette seconde technique d'isolation ne permet donc pas de respecter ce critère.

3.3.2. Besoins énergétiques

Il est indispensable d'identifier la pertinence des différents scénarios de rénovation à la fois vis-à-vis de l'urgence climatique et de la précarité énergétique des habitants. En effet, une diminution des besoins énergétiques permet de diminuer l'impact environnemental des bâtiments, mais également de réduire les dépenses des habitants liées aux consommations énergétiques.

L'indicateur retenu pour les besoins énergétiques est la consommation énergétique annuelle moyenne liée aux équipements de CVC ($kWh_{eq}/m_{plancher}^2 \cdot an$).

3.3.3. Confort intérieur

La rénovation des parois peut modifier l'inertie thermique et ainsi mener à une dégradation du confort d'été à l'intérieur des bâtiments anciens. De plus, dans le contexte de changement climatique, il est particulièrement important de prendre en compte les risques de surchauffe, après la rénovation des parois (Mavrogianni et al., 2012).

Il existe de nombreux indices pour quantifier le confort intérieur (Carlucci et Pagliano, 2012; Enescu, 2017). Un des plus complets et des plus largement utilisés est le PMV (Predicted Mean Vote)/PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) (Fanger, 1970; NF EN ISO 7730, 2006), mais il ne tient pas compte des mécanismes thermorégulateurs, qui sont pourtant un élément essentiel pour évaluer le confort des habitants.

Par ailleurs, TEB calcule l'indice UTCI à l'intérieur des bâtiments (voir la section 2.5 du Chapitre 4). Cet indice qui permet de considérer la thermorégulation du corps humain, est ici retenu pour le confort intérieur, bien qu'il soit initialement conçu pour évaluer le confort extérieur. Ainsi, l'indicateur utilisé pour l'évaluation du confort intérieur est le nombre d'heure d'inconfort moyen

par an. Il est donc équivalent au nombre d'heure de dépassement du seuil d'inconfort, défini comme supérieur à un UTCI de 26°C (Tableau 5.6).

Tableau 5.6 – Niveau de stress thermique en fonction de la valeur de l'UTCI (Ponsar et al., 2017)

Échelle UTCI (°)	Niveau de stress
au-dessus de +46	Stress thermique extrême
+38 à +46	Stress thermique très élevé
+32 à +38	Stress thermique élevé
+26 à +32	Stress thermique modéré
+9 à +26	Pas de stress thermique

3.3.4. Microclimat extérieur

Le confort des piétons est un enjeu particulièrement important en ville, notamment du fait de l'ICU. De plus, les centres historiques, comme celui de Cahors, se caractérisent par des rues particulièrement étroites, des matériaux urbains fortement minéralisés ainsi que par l'absence de végétaux et d'espace en eau, ce qui les rend particulièrement vulnérables au phénomène d'ICU.

Cette thèse étudie l'impact de plusieurs solutions de rénovation des parois sur le confort thermique des piétons dans le canyon urbain. Pour cela, l'indicateur utilisé est basé sur l'UTCI, qui permet de tenir compte des variables météorologiques et des processus physiologiques de manière simplifiée (voir la section 2.5 du Chapitre 4). TEB calcule une valeur de l'UTCI pour les parties ensoleillées du canyon urbain et une valeur pour les parties à l'ombre. La valeur finale de l'UTCI correspond à une moyenne pondérée en fonction de la part du canyon urbain ombragée et de la part ensoleillée. Finalement, les scénarios de rénovation sont comparés en fonction du nombre d'heure d'inconfort. Il est ici défini par un stress thermique allant de modéré à extrêmement fort, soit un UTCI qui dépasse 26°C (Tableau 5.6).

3.3.5. Durabilité des parois

Les parois sont généralement soumises à deux principaux risques qui sont induits par les cycles de gel/dégel et la croissance de moisissures. Ces phénomènes sont fortement influencés par la variabilité urbaine, le changement climatique et l'intensité de l'ICU (Vandemeulebroucke et al., 2019).

Une étude simplifiée des potentiels dommages causés par le gel est effectuée à partir des températures et teneurs en eau calculées, car le modèle de transferts couplés intégré dans TEB ne prend pas en compte le phénomène de gel/dégel. Cette méthode suppose qu'un risque associé au cycle de gel/dégel apparaît, lorsque la température est inférieure à 0°C et que le degré de saturation critique (S_{crit}) est dépassé (Choidis et al., 2023; van Aarle et al., 2015). Le degré de saturation correspond au rapport entre la teneur en eau actuelle et la teneur en eau à saturation. Le seuil critique est fixé à 25% en accord avec les travaux de Mensinga et al. (2010), il correspond à la valeur expérimentale la plus défavorable. Dans le cas de la brique étudiée, S_{crit} est équivalent à une teneur en eau critique de 97 kg/m³. L'épaisseur critique pour les dommages causés par le gel est généralement fixée à 5 mm (Choidis et al., 2023; Vandemeulebroucke et al., 2021). Durant

les cinq années étudiées, la brique n'est jamais soumise à des conditions à risque dans aucun des scénarios et pour aucune des orientations de parois étudiées. Les dommages causés par les cycles de gel/dégel ne seront donc pas un critère pour comparer les scénarios de rénovation.

En revanche, les travaux de Claude (2018) et Claude et al. (2019) ont montré qu'un risque de croissance de moisissures existe pour certaines parois rénovées des bâtiments du centre-ville médiéval de Cahors.

Trois points de paroi sont particulièrement vulnérables à l'apparition de moisissures (Claude, 2018) :

- L'interface brique/isolant ;
- L'encastrement des poutres dans la brique ;
- La surface intérieure de la paroi.

Parmi ces trois points d'étude, l'interface brique/isolant est particulièrement critique après la rénovation des parois. En effet, ce point est vulnérable à l'apparition de moisissures notamment dans le cas de maçonneries anciennes isolées par l'intérieur (Andreotti et al., 2022; Hansen et al., 2019, 2018; Havinga et Schellen, 2019).

Comme détaillé dans la section 3.8 du Chapitre 4, le calcul de l'indice de moisissures nécessite de fournir plusieurs données d'entrée au modèle VTT. La première concerne le niveau de sensibilité de l'isolant. L'interface entre deux matériaux est étudiée, la classe du matériau la plus défavorable est retenue (Ojanen et al., 2010). La classe de la brique historique est 'sensible' selon (Ojanen et al., 2010; Vandemeulebroucke et al., 2021; Vanderschelden et al., 2022). Les isolants étudiés sont de classes différentes mais toujours d'un niveau de sensibilité égal ou inférieur à celui de la brique ancienne. Finalement, pour toutes les configurations de parois, la classe "sensible" est choisie. Concernant le modèle de décroissance de moisissures il est défini par "presque aucune décroissance" (Claude, 2018; Lu et al., 2021; Vandemeulebroucke et al., 2021).

Finalement, l'indice de moisissure M est calculé à l'interface brique/isolant. L'indicateur retenu correspond à l'indice de moisissures maximal M_{max} enregistré sur les cinq années de simulation et pour les quatre orientations de rue simulées. Une valeur est ainsi obtenue pour chaque scénario de rénovation. Le risque est estimé non acceptable, lorsque l'indice maximal est supérieur à 3 à l'interface ou supérieur à 2 au niveau de la surface de la paroi (Viitanen et al., 2015) (Tableau 5.7).

Tableau 5.7 – Seuils retenus pour l'indice de moisissures (M) en fonction de la localisation étudiée (Claude, 2018)

	Surface intérieure en contact direct avec l'ambiance intérieure	Surface à l'interface entre deux matériaux, sans contact avec l'air extérieur
Acceptable	$M < 1$	$M < 2$
A surveiller	$1 \leq M < 2$	$2 \leq M < 3$
Non acceptable	$M \geq 2$	$M \geq 3$

3.3.6. Energie grise

La plupart des études considèrent la consommation d'énergie lors de la phase d'usage/d'exploitation. La prise en compte du cycle de vie implique de considérer également l'énergie consommée durant la phase avant utilisation (processus de fabrication et transport) et celle après utilisation (démolition, recyclage éventuel ou gestion des déchets). Cette énergie est également appelée énergie grise.

L'énergie grise est fréquemment utilisée pour évaluer la qualité environnementale de la réhabilitation des bâtiments historiques (Guidetti et Ferrara, 2023; Jackson, 2005; Munarim et Ghisi, 2016; Wise et al., 2019). Ainsi, l'énergie grise devient un nouveau critère permettant de comparer les options de rénovation entre elles en fonction de la consommation de ressources liées aux matériaux utilisés (Webb, 2017).

Des bases de données permettent de récupérer l'énergie grise associée à chaque matériau utilisé pour la rénovation. Selon l'AREC (2012), il existe deux principales familles de bases de données pour la construction :

- La base de données française INIES avec les Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES) (Alliance HQE-GBC, 2017) ;
- La base de données suisse, éco-bilans dans la construction de KBOB, qui s'appuie sur la base de données suisse Ecoinvent (KBOB et al., 2016).

Dans cette étude, la base de données KBOB est utilisée pour calculer l'énergie grise, induite par la rénovation des parois. Elle s'appuie sur la définition de l'énergie grise du cahier technique CT 2032 du SIA (2020) : « la quantité d'énergie primaire non renouvelable nécessaire pour tous les processus en amont, depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux procédés de fabrication et de transformation, et pour l'élimination, y compris les transports et les moyens auxiliaires nécessaires à cet effet. » Notons que les valeurs fournies par cette base de données, n'incluent pas le transport à partir de l'usine, l'installation sur chantier et l'entretien pendant l'utilisation. Ainsi, une énergie grise en MJ est fournie en fonction de la masse de matériaux, ce qui permet de calculer l'énergie grise associée à chaque scénario de rénovation et de les comparer facilement.

L'indicateur retenu comprend seulement l'énergie grise liée à la rénovation de la paroi et donc seul l'ajout d'un nouveau matériau est considéré dans le calcul. L'unité utilisée pour la comparaison des scénarios est $kWheq/m^2_{paroi}$.

Le Tableau 5.8 récapitule les critères, ainsi que les méthodes d'évaluation et les indicateurs associés.

Tableau 5.8 – Critères retenus pour l'évaluation des scénarios

Critères	Méthode d'évaluation	Métrique
Conservation du patrimoine	Binaire	Isolation par l'extérieur : oui/non
Besoins énergétiques	Quantitatif	Consommations énergétiques annuelles liées aux équipements de CVC ($kWheq/m^2_{plancher} \cdot an$)
Confort intérieur	Quantitatif	Nombre d'heures de dépassement du seuil d'inconfort de l'UTCI (26°C UTCI)
Microclimat extérieur	Quantitatif	Nombre d'heures de dépassement du seuil d'inconfort de l'UTCI (26°C UTCI)
Durabilité des parois	Quantitatif	Indice de moisissures maximal obtenu sur les 5 années de simulation et les quatre orientations de paroi
Cycle de vie	Quantitatif	Energie grise ($kWheq/m^2_{paroi}$) liée aux matériaux utilisés lors de rénovation de la paroi

4. Résultats

Cette section présente les résultats de la comparaison des différents scénarios de rénovation, pour la paroi en briques massives, puis pour la paroi à pans de bois. Les six critères sont étudiés individuellement et un bilan global est ensuite effectué, dans le but de formuler des recommandations propres à chaque type de parois.

4.1. Paroi « massive » constituée de briques épaisses

4.1.1. Besoins énergétiques

La première paroi étudiée est la paroi constituée de briques massives. Tous les scénarios de rénovation permettent une augmentation de la résistance thermique de la paroi et engendrent ainsi une forte diminution de la puissance de chauffage nécessaire (Figure 5.9). Cette figure met également en avant le fait que les différents scénarios conduisent à un profil de puissance de chauffage journalier quasi identique.

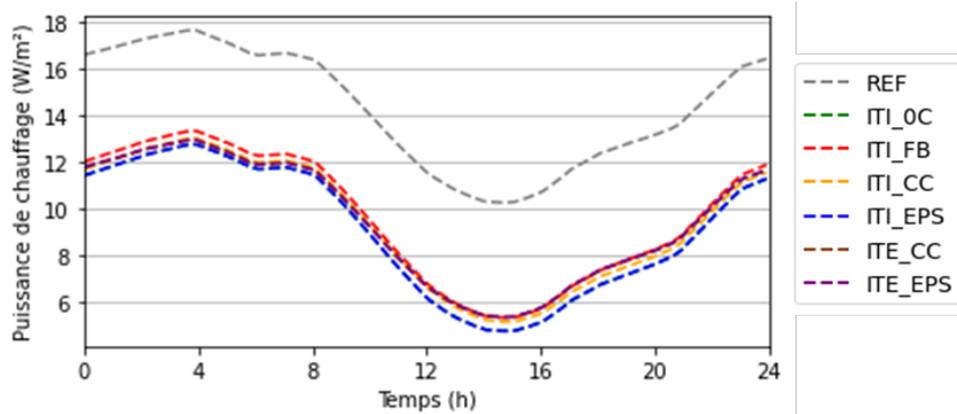


Figure 5.9 – Évolution journalière moyenne de la puissance de chauffage du 1^{er} décembre 2021 au 28 février 2022

De même, la Figure 5.10 montre une diminution des besoins énergétiques en chauffage annuels variant entre 35,75% à 40,20% en fonction des scénarios. Les réductions les plus élevées sont obtenues en isolant par l’intérieur à partir de ouate de cellulose ou de polystyrène expansé, tandis que l’isolation par l’intérieur à partir de fibre de bois conduit à la plus faible diminution. Dans cette configuration, les isolants par l’extérieur ne conduisent pas aux réductions des consommations de chauffage les plus importantes. Cependant, rappelons que TEB ne considère pas les ponts thermiques au niveau des planchers, qui peuvent pourtant représenter une source significative de perte de chaleur, dans le cas de l’isolation par l’intérieur. Finalement, la sélection de résistances thermiques équivalentes pour toutes les parois rénovées, implique que les écarts entre les différents scénarios sont faibles.

Dans cette étude, la ventilation est régulée en fonction de l’humidité relative intérieure. La Figure 5.10 montre une faible variation des consommations de ventilation entre les différents scénarios et la paroi non isolée (de l’ordre de 1%). Ainsi, la capacité de tampon hydrique des parois semble avoir un impact limité sur les besoins de ventilation. Notons également que les consommations énergétiques des ventilateurs sont négligeables par rapport aux consommations en chauffage.

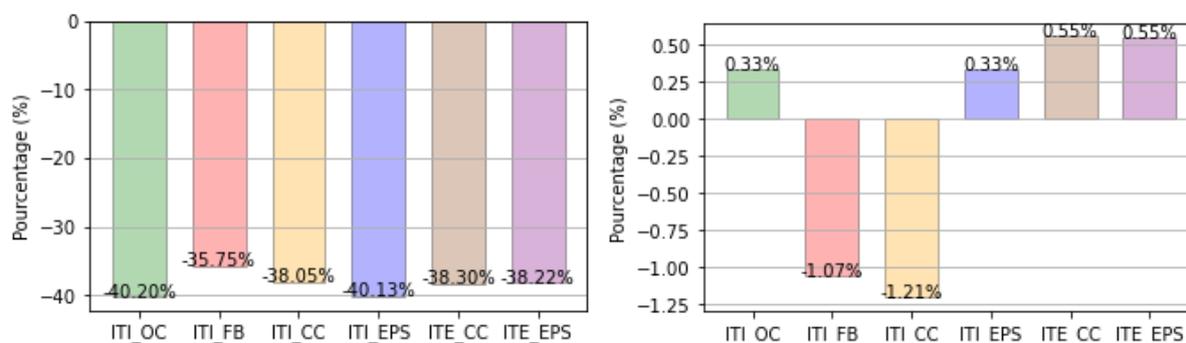


Figure 5.10 – Variation des consommations énergétiques de chauffage (à gauche) et de ventilation (à droite) de chaque scénario par rapport à la référence (la paroi en brique massive non isolée)

4.1.2. Confort intérieur

L’indicateur utilisé pour étudier le confort intérieur est le nombre d’heures d’inconfort. Il s’élève en moyenne à 557 heures par an pour un bâtiment comprenant des parois massives non isolées

(Figure 5.11). Concernant la répartition des heures d'inconfort, en moyenne par an, 476 heures d'inconfort apparaissent la journée (entre 7h00 et 22h00) et 81 heures durant la nuit (entre 22h00 et 7h00). La plupart des périodes inconfortables ont donc lieu la journée, période durant laquelle l'occupation des bâtiments de logement est la plus faible (voir Annexe D).

L'impact de l'isolation des parois sur le nombre d'heures d'inconfort d'été est étudié. Le positionnement d'un isolant à l'extérieur de la paroi en brique permet systématiquement de réduire le nombre d'heures d'inconfort d'environ 11%. Lorsque l'isolant est positionné à l'intérieur, le nombre d'heures d'inconfort diminue de 1,9% pour le chaux-chanvre, tandis qu'il augmente entre 3 et 6%, pour la ouate de cellulose, la fibre de bois et le polystyrène expansé. Parmi les ITI, l'isolant à base de chaux-chanvre conduit donc au meilleur confort d'été.

Le confort intérieur d'été est fortement impacté par l'inertie des parois (section 2.2.4). En effet, les parois massives ont une inertie élevée qui favorise le confort intérieur dans les bâtiments anciens. Or, lors de la rénovation, le positionnement de l'isolant influence fortement l'inertie de la paroi rénovée. Ainsi, l'isolation des parois par l'extérieur permet d'obtenir une inertie plus élevée, que l'isolation par l'intérieur et mène donc théoriquement à un meilleur confort d'été, ce qui correspond aux résultats obtenus.

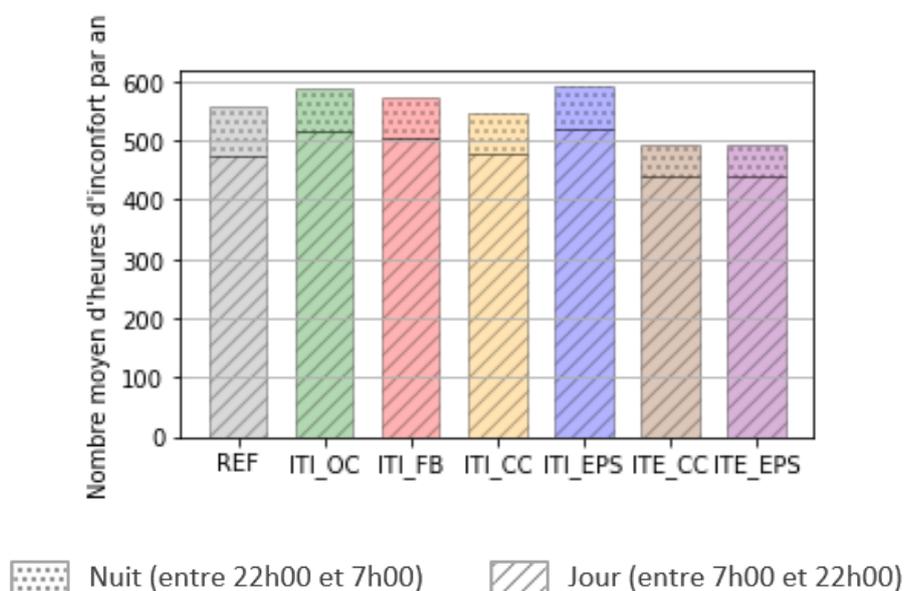


Figure 5.11 – Nombre moyen d'heures d'inconfort intérieur par an pour chaque scénario

Néanmoins, cette comparaison par durée de dépassement des seuils mène à des écarts relativement faibles. Une étude de cas est alors menée sur une période chaude, du 10 au 20 juin 2022, dans le but de mieux comprendre les dynamiques de chaque scénario de rénovation. La Figure 5.12 (a) représente l'évolution temporelle de la température intérieure. Les températures simulées tendent à être plus faibles dans les bâtiments isolés par l'extérieur que dans les bâtiments isolés par l'intérieur ou non isolés. Cet écart entre ces deux groupes se creuse, lorsque la température intérieure augmente et atteint un maximum d'environ 1,5°C. Il est particulièrement élevé durant l'après-midi et en fin de journée. En effet, les fenêtres sont ouvertes durant la nuit, ce qui permet d'abaisser la température intérieure dans tous les scénarios. Ensuite, les bâtiments dont les parois ont une inertie plus élevée, s'échauffent moins vite que les autres

bâtiments. Dès que la période de forte chaleur est passée, l'écart entre les différents scénarios diminue.

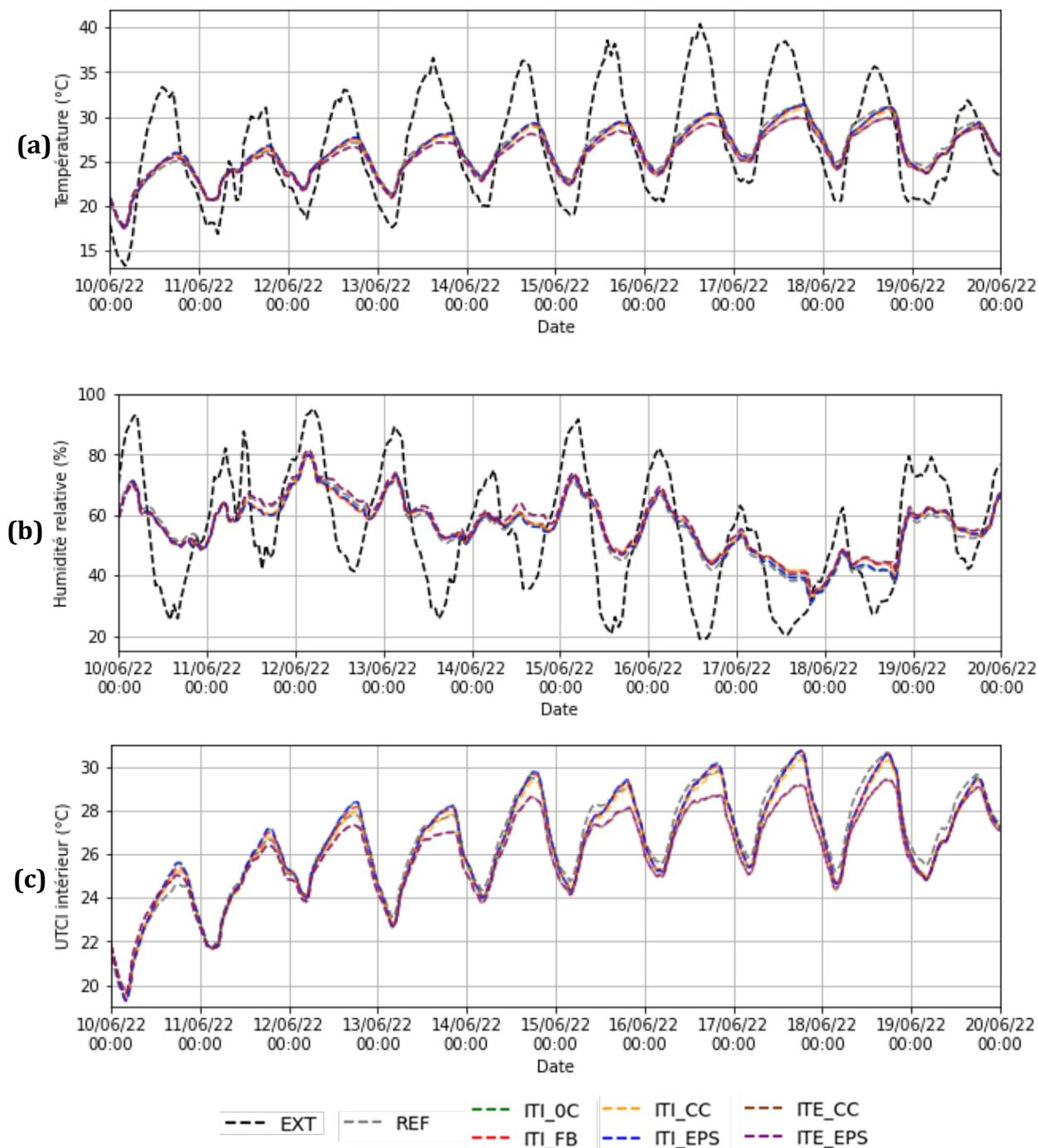


Figure 5.12 – Évolution temporelle de la température (a), de l'humidité relative (b) et de l'UTCI intérieur (c) du 10 juin 2022 au 20 juin 2022

La Figure 5.12 (b) présente l'évolution de l'humidité relative simulée à l'intérieur des bâtiments. De faibles écarts sont constatés entre les scénarios étudiés. Dans cette étude, l'humidité intérieure est fortement impactée par l'ouverture des fenêtres pour rafraîchir durant la nuit, et la ventilation est modulée en fonction de l'humidité relative. Ainsi, la capacité de tampon hydrique, plus ou

moins élevée en fonction des matériaux, n'impacte pas l'humidité relative intérieure, mais plutôt les consommations énergétiques.

Concernant l'indice de confort UTCI, le même constat que pour la température, peut être effectué (Figure 5.12 (c)). Ainsi, l'isolation par l'intérieur ne semble pas dégrader de manière significative le confort intérieur par rapport à la référence, tandis que l'isolation par l'extérieur permet de limiter l'intensité des pics de températures durant les journées de forte chaleur. Il est notamment important de souligner que ces conclusions sont valables dans le contexte étudié, c'est-à-dire, lorsque des méthodes de rafraîchissement passives (fermeture des volets la journée, ouverture des fenêtres la nuit) sont appliquées.

4.1.3. Microclimat extérieur

Le microclimat extérieur est évalué à partir du nombre d'heures où les piétons sont en situation d'inconfort dans la rue. Pour la brique massive non isolée, le nombre d'heure d'inconfort moyen par an est estimé à environ 1049 heures (Figure 5.13).

La rénovation des parois ne semble avoir aucun impact en isolant par l'intérieur et un impact très léger en isolant par l'extérieur (avec une augmentation des heures d'inconfort d'environ 1,9 %). L'impact de l'isolant sur le confort des piétons en été, semble donc être faible dans le contexte étudié.

La répartition des heures d'inconfort entre le jour et la nuit est également étudiée à partir de la Figure 5.13. La grande majorité des heures d'inconfort a lieu durant la journée, moins de 20 heures d'inconfort ont lieu la nuit en moyenne par an.

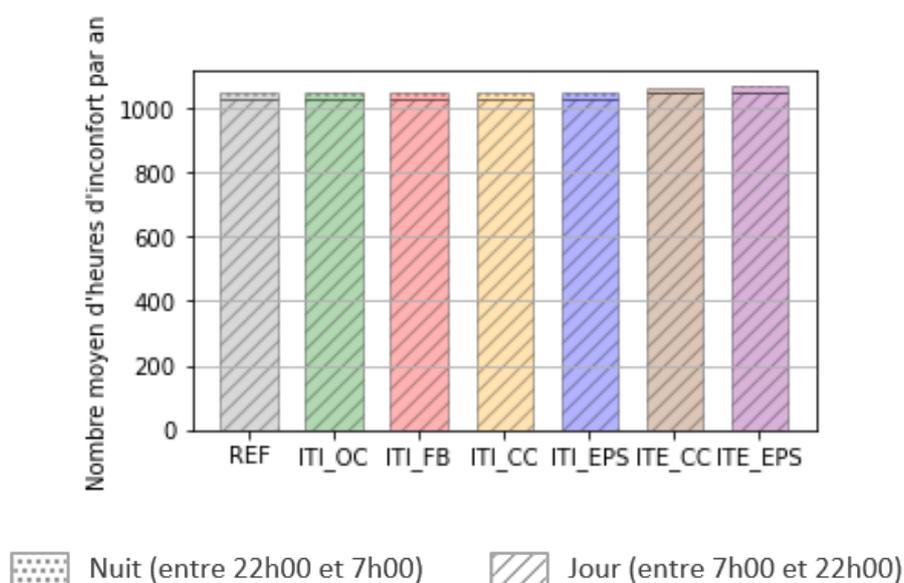


Figure 5.13 – Nombre moyen d'heures d'inconfort extérieur par an pour chaque scénario

De manière plus générale, les conditions extérieures simulées pour les six scénarios sont très proches des conditions simulées pour le cas de référence. En effet, tous scénarios confondus, l'écart observé ne dépasse pas 0,3°C pour la température extérieure, 1°C pour l'UTCI, 2,8°C pour la température radiante moyenne et 1,5% pour l'humidité relative. Ainsi, le positionnement de

l'isolant ou même l'absence d'isolant ne semble pas avoir d'impact significatif sur le confort extérieur, dans le contexte du centre-ville médiéval de Cahors.

4.1.4. Moisissures

L'étude de la moisissure est menée sur cinq années consécutives. L'évolution temporelle de l'indice de moisissure est calculée pour les quatre orientations principales de bâtiments présentes à Cahors : nord, est, sud et ouest. La croissance de moisissures dépend fortement de l'intensité de la pluie battante, qui est elle-même corrélée à l'orientation et la vitesse du vent. Les précipitations annuelles enregistrées sur un plan horizontal à Cahors s'élève à 802,3 mm en moyenne sur les cinq années étudiées. Le Tableau 5.9 présente la quantité de précipitations annuelles incidentes aux parois en fonction de l'orientation. Ainsi, deux orientations de façade (ouest et sud) sont particulièrement critiques pour la croissance de moisissures dans le centre-ville médiéval de Cahors.

Tableau 5.9 – Quantité de précipitations annuelles incidentes aux parois en fonction de l'orientation et moyennées sur les cinq années simulées

Orientation des parois	Nord	Est	Sud	Ouest
Quantité de précipitations annuelles moyennes incidentes aux parois (mm/an)	5,83	4,35	16,96	29,18

Cette première configuration étudiée correspond à une maçonnerie épaisse. L'isolation par l'intérieur n'entraîne aucun risque de moisissures à l'interface brique/isolant. En effet, l'indice de moisissure M est toujours nul en ce point. Ainsi, tous les types d'isolant sont donc adaptés pour rénover cette paroi épaisse par l'intérieur, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Claude (2018).

De même, aucun risque n'est constaté lors de l'isolation thermique par l'extérieur à partir de polystyrène expansé. En revanche, l'indice de moisissures devient inacceptable, lorsque la brique est isolée par l'extérieur à partir de chaux-chanvre (Figure 5.14). Dans cette configuration, il y a donc un risque d'apparitions de moisissures. L'isolation par l'extérieur à partir de chaux-chanvre semble donc favoriser l'absorption de la pluie battante et l'accumulation de l'humidité à l'interface.

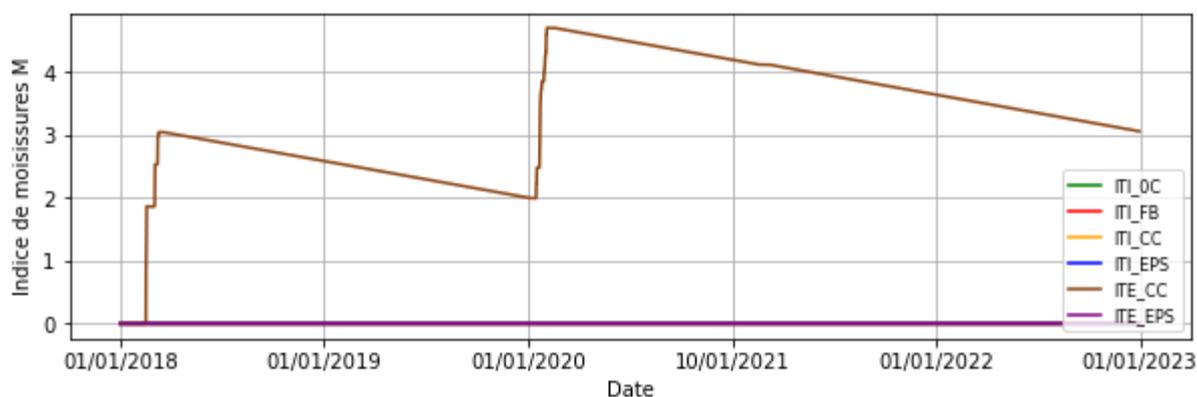


Figure 5.14 – Évolution de l'indice de moisissure à l'interface brique/isolant pour la façade orientée ouest rénovée à partir des différents scénarios au cours des cinq années étudiées

Le risque de moisissures a également été calculé au niveau de la surface intérieure. En ce point, l'indice de moisissures devient inacceptable, lorsqu'il est supérieur à 2 (section 3.3.5). Dans le cas de la brique non isolée, l'indice de moisissures maximal est compris entre 2,16 et 2,31 en fonction de l'orientation de la paroi et un risque de moisissures existe donc pour toutes les orientations de parois. Pour tous les scénarios de rénovation, l'indice de moisissures calculé est toujours inférieur à 2. Ainsi, lorsque la paroi est rénovée, il n'y a plus de risque significatif de moisissures au niveau de la surface intérieure.

4.1.5. Energie grise

L'énergie grise associée à chaque solution de rénovation de la paroi est calculée. Ce calcul se base sur la valeur de l'énergie grise fournie par KBOB en $kWheq/kg_{mat}$. A partir de l'épaisseur et de la masse volumique des matériaux ajoutés lors de la rénovation de la paroi, il est possible de déduire l'énergie grise induite par la rénovation en $kWheq/m^2_{paroi}$. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.10.

Tableau 5.10 – Energie grise associée à chaque scénario de rénovation

Scénarios	Isolant				Revêtement				Total Energie grise de la rénovation ($kWheq/m^2_{paroi}$)
	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Energie grise du matériau (kWheq/kg)	Energie grise de la couche (kWheq/m ²)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Energie grise du matériau (kWheq/kg)	Energie grise de la couche (kWheq/m ²)	
ITI_OC	0,061	55,2	1,03	3,47	0,01	850	1,35	11,48	14,94
ITI_FB	0,053	150	3,53	28,06	0,01	850	1,35	11,48	39,54
ITI_CC	0,14	440	0,984	60,61	0,01	1249,9	1,8	22,50	83,11
ITI_EPS	0,046	23	29,8	31,53	0,01	850	1,35	11,48	43,00
ITE_CC	0,14	440	0,984	60,61	0,01	1249,9	1,8	22,50	83,11
ITE_EPS	0,047	23	29,8	32,21	0,01	1249,9	1,8	22,50	54,71

La comparaison de l'énergie grise par masse d'isolant montre que l'énergie grise la plus élevée est celle du polystyrène expansé et la plus faible celle du chaux-chanvre. Cependant, la conductivité thermique du chaux-chanvre est supérieure à celle du polystyrène expansé. Ainsi, pour obtenir une résistance thermique équivalente, l'épaisseur installée est environ trois fois plus élevée pour le chaux-chanvre que pour le polystyrène expansé. De même, l'isolant à base de chaux-chanvre a une masse volumique presque quinze fois plus élevée. Or, la masse volumique et l'épaisseur entrent en compte dans le calcul de l'énergie grise à l'échelle de la paroi. Ainsi, l'énergie grise de la paroi est deux fois plus élevée pour le chaux-chanvre que pour le polystyrène. Cette problématique est également soulignée dans les travaux de Kinnane et al. (2019).

En revanche à résistance thermique équivalente, le chaux-chanvre a une énergie grise légèrement inférieure à celle d'un béton conventionnel (Florentin et al., 2017). Ainsi, du point de vue de l'énergie grise, les mélanges de chaux-chanvre semble être plus prometteur pour remplacer des bétons conventionnels que pour être utilisé en tant qu'isolant thermique. En revanche, une nouvelle problématique apparaît, elle correspond à la résistance mécanique des bétons de chanvre.

Notons toutefois que le principal avantage du cycle de vie du chaux-chanvre est son empreinte carbone. Cependant, elle est complexe à quantifier et les valeurs varient fortement d'une étude à l'autre. En effet, certaines estiment que le chaux-chanvre séquestre du CO_2 , d'autres qu'il relâche une faible quantité de CO_2 ou encore que son impact carbone est neutre (Kinnane et al., 2019).

Finalement, dans le cadre de notre étude qui se concentre sur l'usage du chaux-chanvre en tant qu'isolant, le mélange de chaux-chanvre ne semble pas être une bonne option, du point de vue de l'énergie grise. Deux autres isolants d'origine végétale sont étudiés : la fibre de bois et la ouate de cellulose. Ils ont une conductivité thermique et une masse volumique plus faibles. Ils semblent donc être de meilleurs compromis vis-à-vis l'énergie grise. La ouate de cellulose mène à une énergie grise à l'échelle de la paroi particulièrement faible.

4.1.6. Bilan

Tous les critères retenus pour l'évaluation des scénarios ont été discutés individuellement et les résultats bruts détaillés sont présentés dans l'Annexe E. Cette section propose d'effectuer un bilan sur la comparaison des scénarios de rénovation. En fonction des critères, des différences plus ou moins marquées ont été obtenues entre les scénarios.

Par exemple, dans le contexte du centre-ville médiéval de Cahors et pour des parois en briques massives, la rénovation ne semble pas avoir un impact significatif sur le confort extérieur. De même, l'ensemble des scénarios de rénovation conduisent à des consommations énergétiques annuelles moyennes similaires, ce qui s'explique en partie par la résistance thermique égale pour toutes les parois rénovées. Ainsi, les transferts d'humidité à travers les parois n'influencent pas de manière conséquente les consommations énergétiques dans le contexte étudié.

Davantage de disparités sont observées lors de l'étude du confort intérieur. Néanmoins, les critères ayant obtenus des différences très significatives entre les scénarios de rénovation sont : la préservation du patrimoine, le développement de moisissures et l'énergie grise. Ils semblent donc judicieux de s'appuyer sur ces critères pour trancher sur la pertinence des différents scénarios.

Tout d'abord, il est pertinent de rénover les parois massives, car cela permet de diminuer de près de 40% les consommations énergétiques et de supprimer le risque de croissances de moisissures, dans la plupart des scénarios. En effet, l'isolation par l'extérieur à partir de chaux-chanvre est la seule qui entraîne un risque d'apparition de moisissures (Figure 5.15.)

De plus, les deux scénarios comprenant une isolation par l'extérieur impliquent une dégradation du patrimoine, en modifiant l'apparence extérieure des façades. Malgré cet aspect, nous avons décidé d'étudier les isolations par l'extérieur, pour leur impact positif sur l'inertie thermique des parois notamment. En effet, elles conduisent à des résultats plus satisfaisants pour le confort d'été. Par exemple, les isolations par l'extérieur permettent de garantir 54 heures de confort supplémentaires par rapport à l'isolant à base de chaux-chanvre positionné à l'intérieur.

Après avoir discuté des conséquences sur le patrimoine et la moisissure, il reste à étudier le troisième critère déterminant qui est l'énergie grise. Les parois isolées à partir de chaux-chanvre ont une énergie grise très élevée du fait de leur masse volumique et de l'épaisseur nécessaire. De plus, cette charge supplémentaire peut être trop lourde pour la structure existante des bâtiments à rénover et mettre en péril la stabilité du bâtiment. Finalement, la ouate de cellulose conduit à une énergie grise entre 2,7 et 2,9 fois plus faible que la fibre de bois et le polystyrène expansé. En priorisant l'énergie grise et la conservation du patrimoine par rapport au confort intérieur, l'isolation à partir de ouate de cellulose apparaît comme une des solutions particulièrement pertinentes pour la rénovation des parois massives du centre-ville médiéval de Cahors.

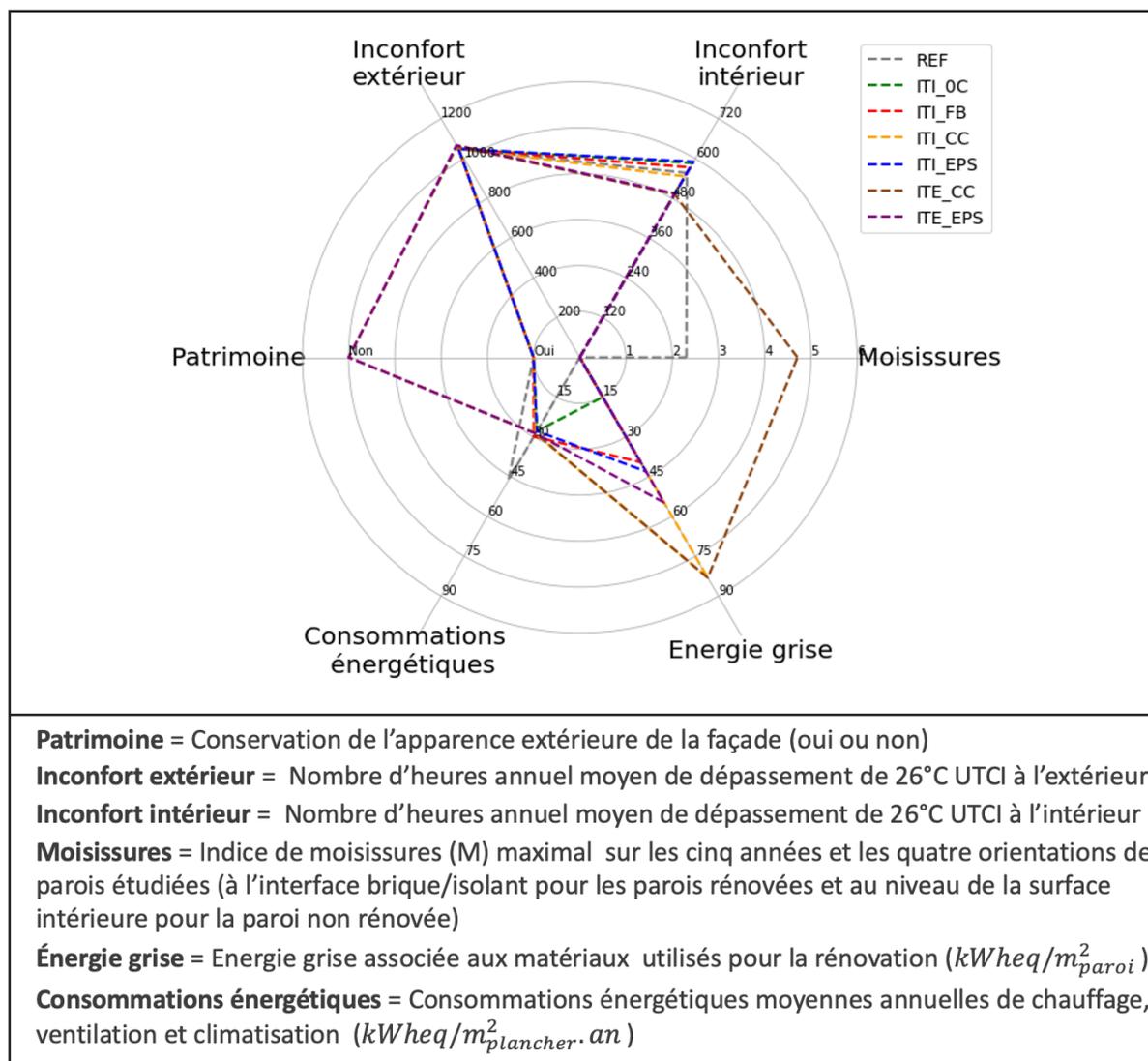


Figure 5.15 – Récapitulatif des résultats pour tous les scénarios étudiés et pour chaque critère

4.2. Paroi « légère » à pans de bois

4.2.1. Besoins énergétiques

La seconde paroi étudiée possède une structure à pans de bois remplie de briques. Elle est composée d'une épaisseur plus fine de briques que la paroi massive et a donc une résistance thermique plus faible. Avant rénovation, les puissances de chauffage sont donc plus élevées pour cette seconde typologie de paroi que pour la première. En revanche, après isolation, les deux typologies de parois mènent à des puissances journalières moyennes comparables. De plus, l'ensemble des scénarios de rénovation conduisent également à des résultats similaires (Figure 5.16).

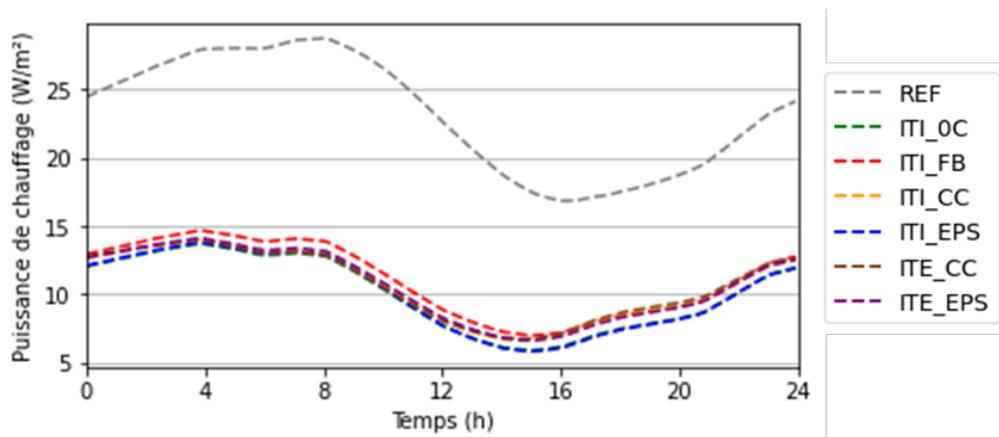


Figure 5.16 – Évolution journalière moyenne de la puissance de chauffage du 1^{er} décembre 2021 au 28 février 2022

La rénovation de cette deuxième paroi mène à des pourcentages de réduction des consommations de chauffage annuelles élevées : allant de 56,2% à 60,61% en fonction des scénarios (Figure 5.17). Ainsi, comme pour la configuration précédente, l'écart des besoins en chauffage entre les différents scénarios reste faible. De plus, une diminution des consommations de ventilation est observée pour tous les scénarios par rapport à la référence. L'écart maximal est obtenu pour les isolants de catégorie 2, positionnés à l'intérieur, mais il reste faible de l'ordre de 2%.

Ainsi, les consommations énergétiques ne semblent pas être un critère déterminant pour différencier les scénarios de rénovation, dans cette étude.

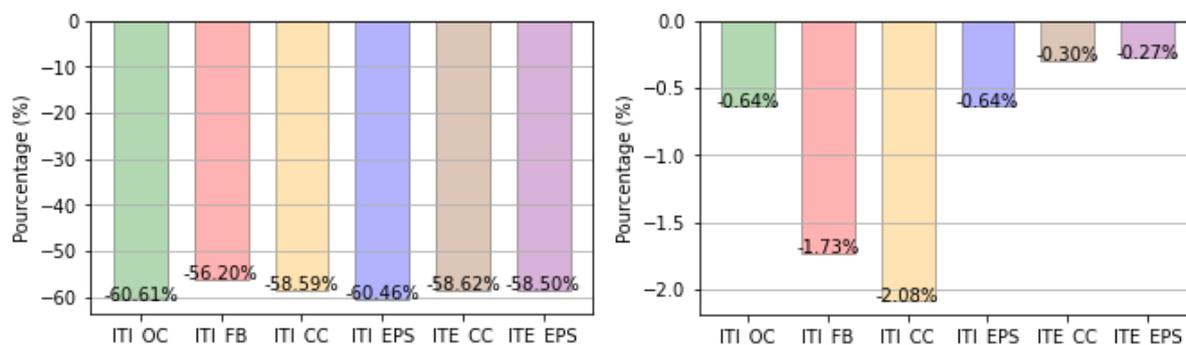


Figure 5.17 – Variation des consommations énergétiques de chauffage (à gauche) et de ventilation (à droite) de chaque scénario par rapport à la référence (la paroi à pans de bois non isolée)

4.2.2. Confort intérieur

Le nombre d'heures d'inconfort intérieur pour la paroi à pans de bois non isolée s'élève à 679 heures, soit 222 heures de plus que pour la paroi massive, ce qui s'explique en partie par sa résistance thermique et son inertie plus faible. Par ailleurs, comme pour la paroi massive, les heures d'inconfort sont principalement enregistrées durant la journée, lorsque l'occupation est plus faible dans les logements.

Pour cette paroi plus fine, l'ensemble des scénarios de rénovation mène à une diminution du nombre d'heures d'inconfort intérieur allant de 11% à 23%. Les plus fortes améliorations du

confort d'été sont obtenues, lorsque l'isolant est positionné à l'extérieur. L'isolation intérieure à partir de chaux-chanvre permet également d'obtenir une amélioration conséquente du confort intérieur (avec une diminution des heures d'inconfort d'environ 18%.) Les résultats les moins satisfaisants sont obtenus pour l'isolation par l'intérieur à partir de polystyrène expansé, mais une diminution de 11% est tout de même constatée.

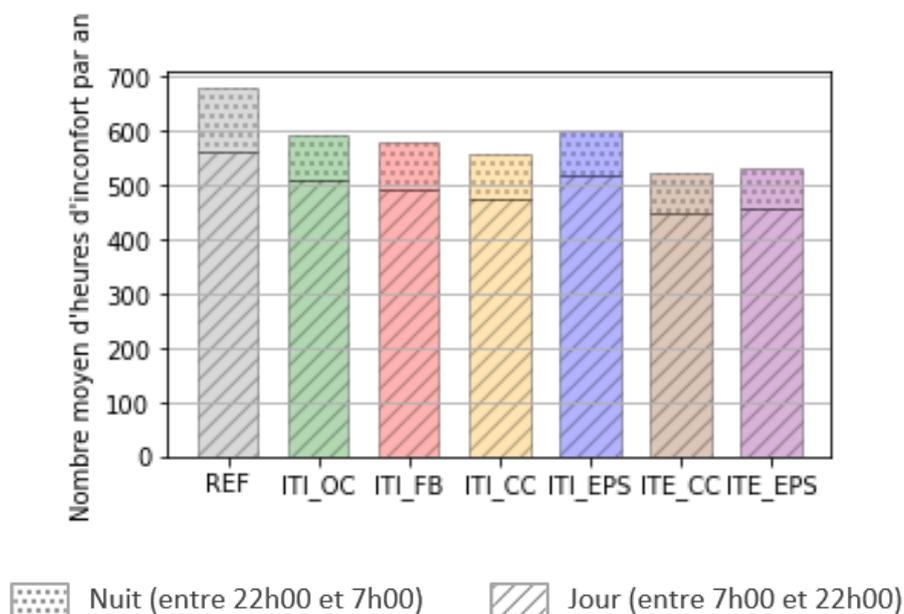


Figure 5.18 – Nombre moyen d'heures d'inconfort intérieur par an pour chaque scénario

Le même constat est effectué en étudiant l'évolution temporelle de la température intérieure entre le 10 et le 20 juin 2022 (Figure 5.12 (a)). En effet, certains scénarios permettent une réduction de la température intérieure de plus de 2°C. Comme pour la paroi massive, les écarts maximums entre les scénarios de rénovation s'observent en fin de journée. Ensuite, l'ouverture des fenêtres durant la nuit, permet de rééquilibrer les écarts. En revanche, la paroi étant plus fine, les deux positions d'isolant (intérieur ou extérieur) permettent de limiter significativement le pic de température qui a lieu dans l'après-midi. Les scénarios les plus performants correspondent aux isolants positionnés à l'extérieur suivi par le chaux-chanvre positionné à l'intérieur.

L'étude de l'indice de confort (UTCI) conduit aux mêmes conclusions que celle de la température intérieure. En effet, des diminutions allant jusqu'à 3°C UTCI sont observés pour certains scénarios, durant les pics les plus chauds (Figure 5.12 (c)).

Concernant l'humidité relative intérieure, elle tend à être plus faible pour le cas de référence, ce qui s'explique principalement par la température plus élevée (Figure 5.12 (b)). Tous les scénarios de rénovation conduisent à des profils d'humidité relative similaires.

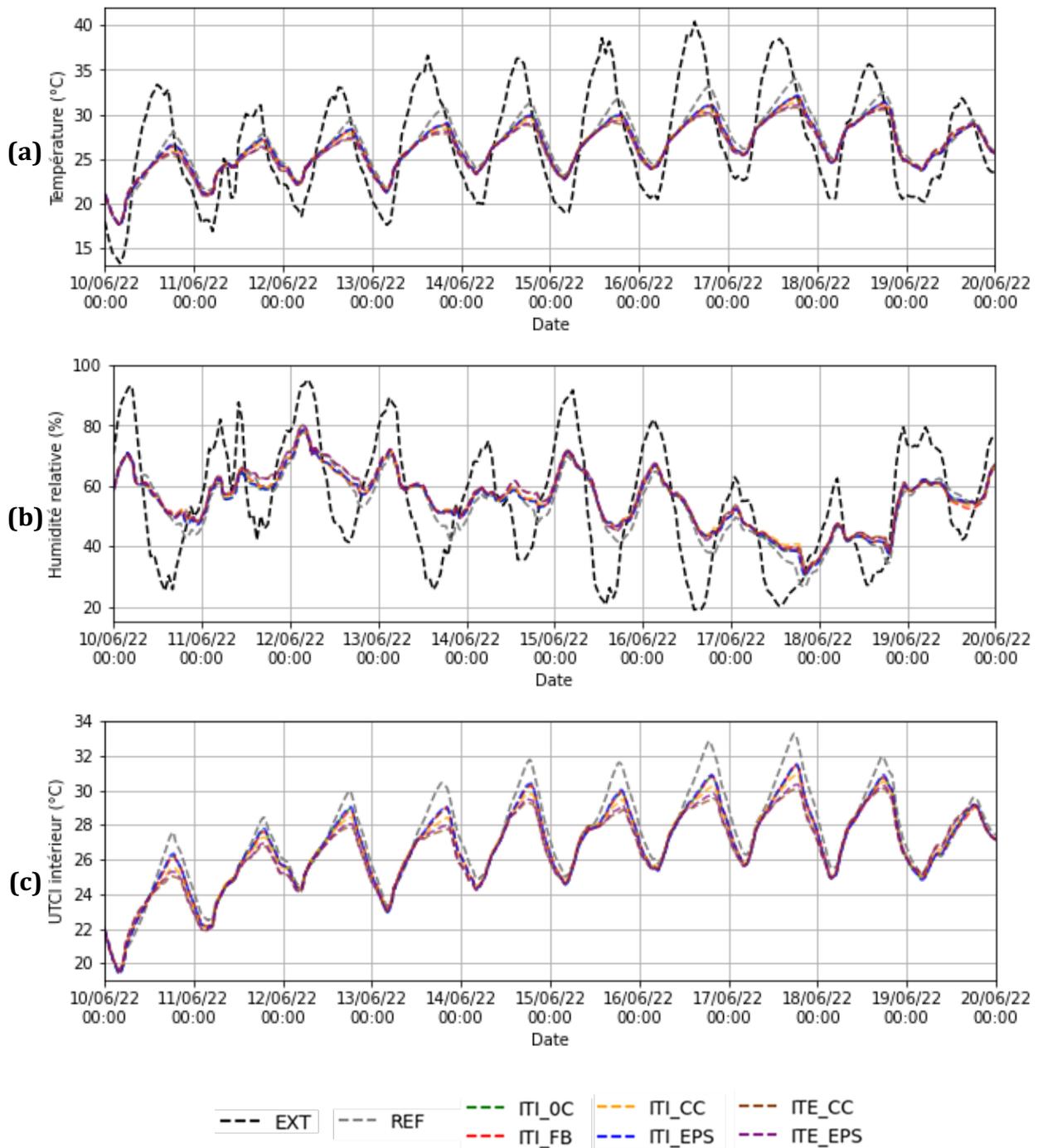


Figure 5.19 – Évolution temporelle de la température (a), de l'humidité relative (b) et de l'UTCI intérieur (c) du 10 juin 2022 au 20 juin 2022

Finalement, pour cette paroi de briques plus fine, l'isolation a systématiquement un impact bénéfique pour le confort d'été, ce qui est valable dans le contexte étudié, qui comprend notamment l'application de mesures de rafraîchissement passif des habitations.

4.2.3. Microclimat extérieur

Le microclimat extérieur est évalué pour cette seconde configuration de paroi. Comme pour la première configuration, l'impact de l'isolation semble très faible sur le confort extérieur des piétons et le nombre d'heure d'inconfort moyen par an reste d'environ 1050 heures. De même, isoler par l'extérieur augmente très légèrement (entre 1,1 et 1,5%) le nombre d'heure d'inconfort, ce qui s'explique par une modification de l'inertie thermique de la paroi. En effet, elle impacte la dynamique de stockage de chaleur par la paroi au cours des cycles journaliers. Néanmoins l'écart reste négligeable dans le contexte du centre-ville médiéval de Cahors. Ce critère n'est donc pas pertinent pour comparer les différents scénarios de rénovation.

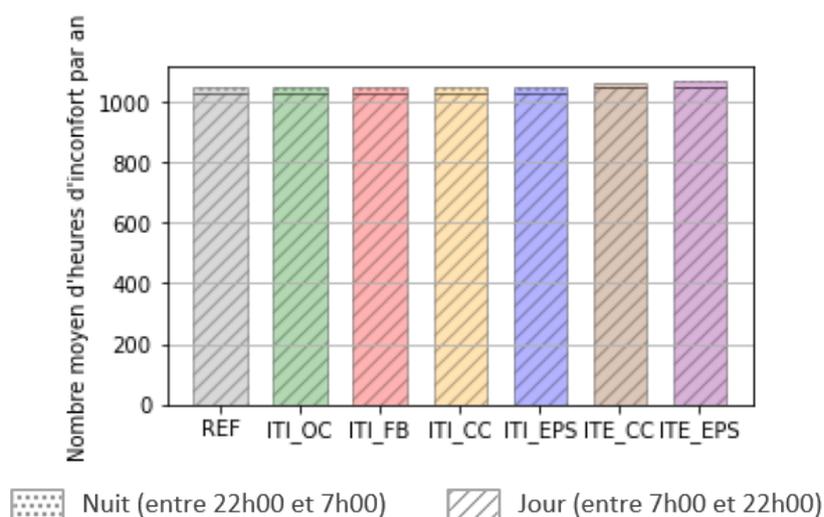


Figure 5.20 – Nombre moyen d'heures d'inconfort extérieur par an pour chaque scénario

4.2.4. Moisissures

Les parois à pans de bois sont composées d'une fine épaisseur de briques, ce qui les rend particulièrement vulnérables au développement de moisissures. Ainsi, l'application de certains isolants au niveau de la surface intérieure entraîne l'apparition de moisissures. La Figure 5.21 présente l'évolution de l'indice de moisissures pour la façade orientée ouest (la plus critique), au cours des cinq années de l'étude.

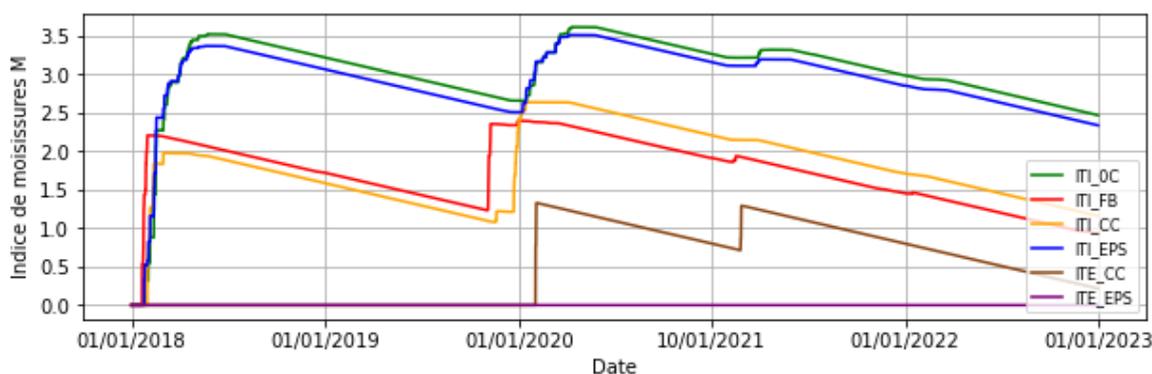


Figure 5.21 – Évolution de l'indice de moisissures à l'interface brique/isolant pour la façade orientée ouest rénovée à partir des différents scénarios au cours des cinq années étudiées

Pour conclure, la Figure 5.22 présente l'indice de moisissures maximal associé à chaque scénario de rénovation. Les scénarios 1 et 4 conduisent à un risque non acceptable d'apparition de moisissures. Dans ces deux cas, l'isolation est effectuée par l'intérieur et les isolants concernés sont la ouate de cellulose et le polystyrène expansé, soit des matériaux de catégories 1 et 3 (voir section 2.4.2). En revanche, pour l'isolation par l'intérieur à partir de fibres de bois et de chaux-chanvre, le risque devient moins important. Ces deux matériaux sont de catégorie 2, ce qui signifie qu'ils ont une perméabilité élevée à la vapeur et une faible capacité d'absorption d'eau liquide. Concernant l'application d'un isolant thermique à l'extérieur de la paroi, les deux isolants étudiés (de catégorie 2 et 3) maintiennent un indice de moisissures acceptable voire nul pour les quatre orientations de façade étudiées et pour les cinq années simulées. Ces scénarios sont donc pertinents, pour assurer la durabilité des parois à pans de bois.

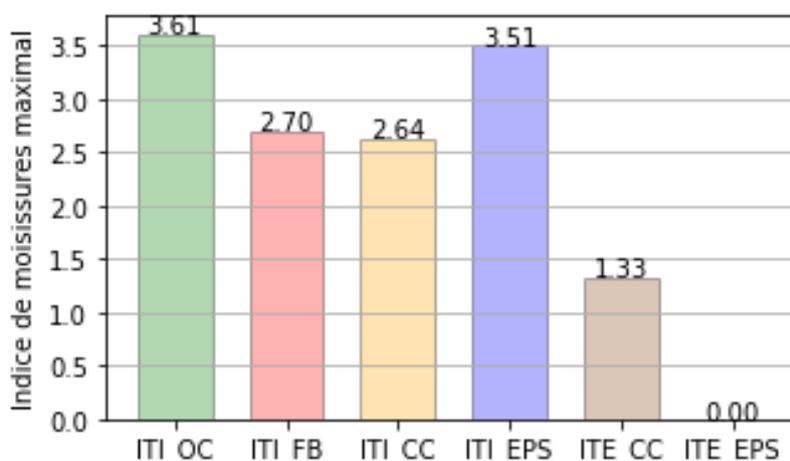


Figure 5.22 – Indice de moisissures maximal pour chaque scénario de rénovation

Le risque de croissance de moisissures a également été évalué au niveau de la surface intérieure de la paroi. Cette étude a mené aux mêmes conclusions que pour la brique massive. Un risque non acceptable est observé pour la paroi en brique non isolée (avec un indice de moisissures maximal égal à 3,1), tandis que l'indice de moisissures ne dépasse jamais 2, pour les surfaces intérieures des parois rénovées. Le risque de croissance de moisissures au niveau de la surface intérieure devient donc acceptable après rénovation.

4.2.5. Energie grise

La seconde paroi étudiée possède une structure différente constituée de pans de bois remplis de brique, mais la rénovation de cette paroi est étudiée au travers des mêmes scénarios d'isolation que la paroi massive. Les mêmes matériaux et épaisseurs sont donc ajoutés, ce qui signifie que l'analyse de l'énergie grise est identique à celle effectuée dans la section 4.1.5. Les conclusions obtenues sont donc également valables pour cette seconde configuration.

4.2.6. Bilan

Pour conclure, l'isolation des parois à pans de bois a toujours un impact positif sur le confort intérieur (diminution jusqu'à 23% du nombre d'heures d'inconfort) et sur les consommations énergétiques (réduites jusqu'à 60,6%) (Figure 5.23). En revanche, la rénovation a un impact négatif du point de vue de l'analyse de cycle de vie. En effet, l'isolation implique d'ajouter de

nouveaux matériaux qui doivent être produits et dont il faudra gérer la fin de vie. En fonction des matériaux installés, l'énergie grise induite est plus ou moins importante. La rénovation à partir de ouate de cellulose ou de fibre de bois conduit aux énergies grises les plus faibles.

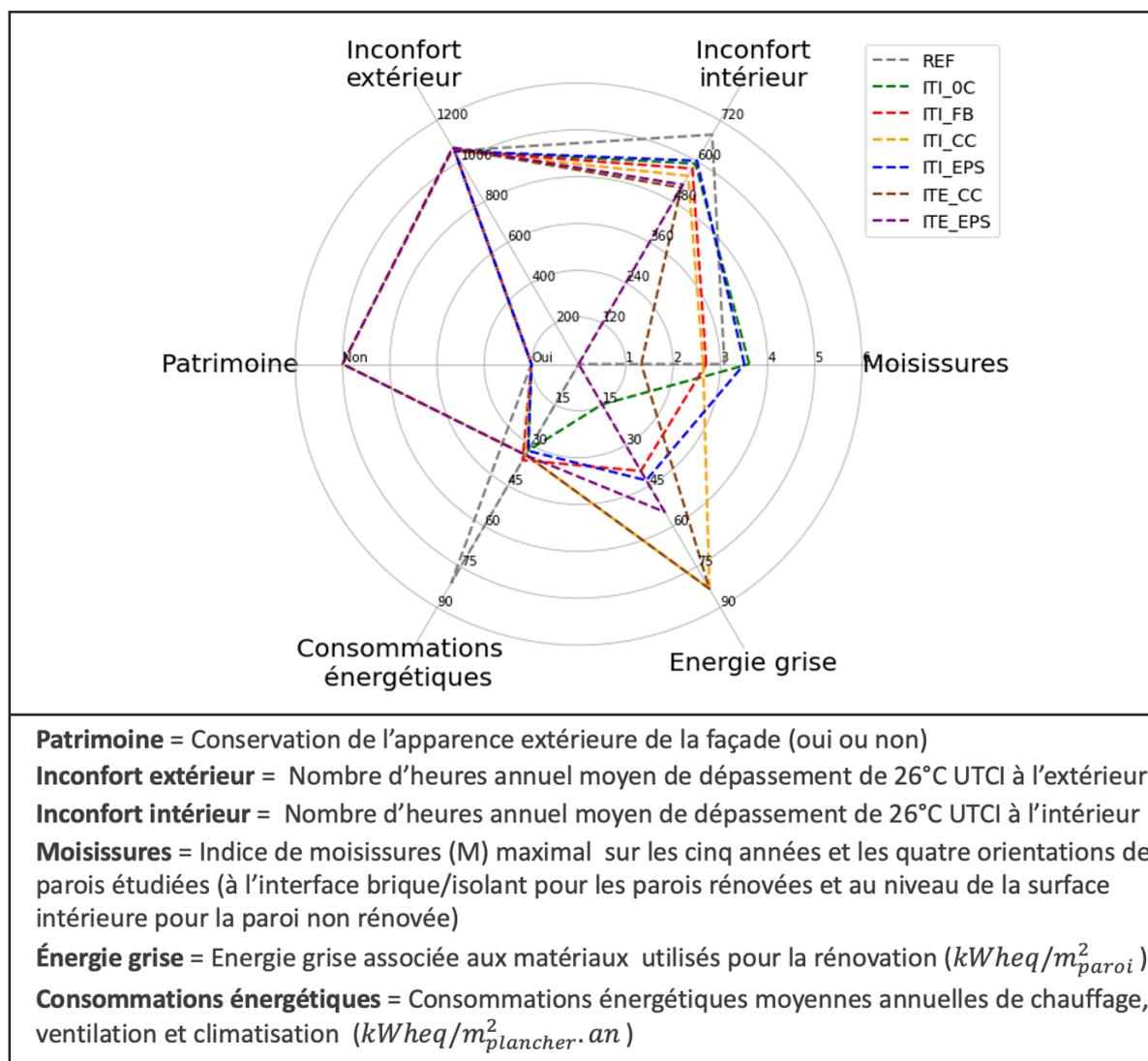


Figure 5.23 – Récapitulatif des résultats pour tous les scénarios étudiés et pour chaque critère

Dans cette étude, la rénovation des parois n'a pas d'impact sur le confort extérieur des piétons. De plus, les scénarios de rénovation étudiés mènent à des consommations énergétiques annuelles moyennes similaires. Néanmoins, les six scénarios se différencient par le risque de croissance de moisissures. Ce critère est primordial lors de la comparaison des scénarios, car il impacte fortement la durabilité de la paroi rénovée. L'isolation par l'intérieur à partir de polystyrène expansé et de ouate de cellulose entraîne un risque conséquent de moisissures. En revanche, dans le cas de l'isolation par l'intérieur à partir de fibre de bois ou de chaux-chanvre, le risque de croissance de moisissures entraîné n'est pas inacceptable, mais il est à surveiller (voir Tableau 5.7). Notons que dans le cas des parois à pans de bois, l'isolation thermique par l'extérieur entraîne un risque de croissance de moisissures acceptable voire nul. En revanche, isoler par l'extérieur ne permet plus de voir les pans de bois, ce qui est dommage du point architectural.

Finalement, lorsqu'il est impossible d'isoler par l'extérieur, l'isolation par l'intérieur à partir de fibres de bois apparaît comme un bon compromis. En effet, bien qu'il ait une énergie grise plus élevée que le scénario basé sur la ouate de cellulose et qu'il ne garantisse pas le meilleur confort d'été, l'application d'un isolant à base de fibres de bois à l'intérieur a l'avantage de ne pas modifier l'apparence des façades et de n'entraîner aucun risque significatif de croissances de moisissures.

5. Limites de l'étude

5.1. Limites de l'outil TEB

Les simulations ont été effectuées à partir de l'outil TEB. Le niveau de précision des résultats obtenus est donc soumis aux limites du modèle de climat urbain TEB. Les limites du modèle pour représenter les centres-villes anciens ont déjà été détaillées dans la partie 6 du Chapitre 4. Pour rappel, les principales limites sont le fait que TEB considère une seule zone thermique et une unique condition aux limites pour chaque façade, et qu'il néglige les ponts thermiques.

La définition des bâtiments s'appuie sur la calibration effectuée à partir de mesures in-situ, dans le Chapitre 4. Les données utilisées pour la calibration sont des mesures effectuées dans une pièce au premier étage et orientée ouest. Cette étude suppose donc que les conditions intérieures sont égales dans toutes les pièces du bâtiment à celles de la pièce localisée au premier étage, orientée ouest. Cette hypothèse ne permet pas de traduire les variabilités de températures dans les pièces en fonction des étages et des orientations.

La capacité du module TEB-BEM à estimer les consommations énergétiques de chauffage et de refroidissement a été évaluée à plusieurs reprises par comparaison avec des résultats simulés par un modèle détaillé dans EnergyPlus. Les résultats obtenus sur différents bâtiments localisés à Toulouse et à Paris, montrent que TEB est capable d'estimer la demande en chauffage et climatisation avec une précision d'environ 15 % (Bueno et al., 2012; Pigeon et al., 2014)

Les profils de puissances de chauffage moyens journaliers, obtenus sur une période hivernale et après rénovation, sont équivalents à ceux simulés par TEB pour des bâtiments toulousains construits après 2012 (Tornay et al., 2017). De plus, les consommations énergétiques de CVC annuelles moyennes sont comprises entre 46 et 81 $kWh_{eq}/m^2_{plancher}\cdot an$ avant rénovation des parois et entre 29 et 36 $kWh_{eq}/m^2_{plancher}\cdot an$ après rénovation des parois. La rénovation des deux typologies de bâtiments conduit à des bâtiments ayant de bonnes performances énergétiques, au vu des exigences de la RT2012 par exemple. Néanmoins, notons que ces consommations ne comprennent pas les besoins énergétiques liés à la production d'eau chaude sanitaire.

Cependant, la simulation des performances énergétiques des bâtiments à partir d'une seule zone thermique tend généralement à sous-estimer les besoins énergétiques en chauffage et climatisation. En effet, plusieurs études comparent des modèles détaillés et des modèles monozones de bâtiments. Leur conclusion est que la considération d'une seule zone thermique mène à des sous-estimations des consommations énergétiques allant de 5 à 30 % (Garreau et al., 2021; Heo et al., 2018; Martin et al., 2017; Perez et al., 2015). Par exemple, Pigeon et al. (2014) estiment que les consommations énergétiques de chauffage d'un bâtiment historique collectif à

Paris s'élève à $79,76 \text{ kWheq/m}_{\text{plancher}}^2 \cdot \text{an}$ avec un modèle détaillé simulé dans EnergyPlus, tandis que TEB les estime à $71,30 \text{ kWheq/m}_{\text{plancher}}^2 \cdot \text{an}$, soit une sous-estimation de 11 %.

Garreau (2021) compare différentes méthodes de zonage thermique, dans le but d'obtenir un compromis entre la précision des résultats, le niveau de détail de la modélisation et le temps de calcul, adapté au modèle énergétique à l'échelle urbaine. Finalement, elle conclut que les modèles comprenant une seule zone thermique ne permettent pas d'obtenir un niveau de précision de satisfaisant. Elle propose l'utilisation de modèle à trois zones, mais l'idéal reste les modèles multizones (comprenant une zone thermique par étage).

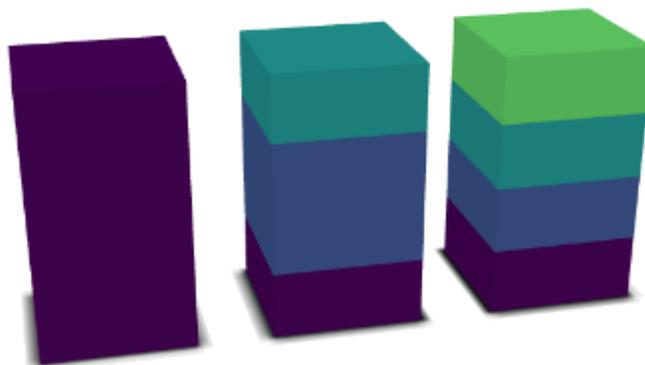


Figure 5.24 – Application des méthodes de zonage thermique sur un bâtiment : monozone, trois zones et multi-zone par étages (de gauche à droite) (Garreau, 2021)

Par ailleurs, les hypothèses effectuées par TEB peuvent limiter le choix des critères étudiés. Par exemple, les transferts d'eau sous forme liquide et vapeur à travers les parois ont été intégrés, mais TEB ne modélise toujours pas la formation de glace dans les pores, ce qui ne permet pas d'inclure précisément un critère sur les dommages associés au risque de gel/dégel.

5.2. Limites des scénarios définis

Cette étude se concentrant sur la rénovation des parois anciennes, le cas de référence sélectionné suppose que les autres éléments du bâtiment ancien sont déjà rénovés. De ce fait, l'étude est réalisée sur un bâtiment déjà relativement performant énergétiquement. De plus, les résultats sont fortement influencés par les hypothèses effectuées sur les scénarios d'occupation et les équipements de CVC installés. Par exemple, nous avons fait le choix d'étudier un système de ventilation régulé en fonction de l'humidité relative, qui impacte fortement les conditions hygrothermiques intérieures. De plus, nous supposons que les habitants utilisent des méthodes de rafraîchissement passives. Il serait intéressant d'effectuer une étude similaire en considérant l'usage de la climatisation combiné aux différents types d'isolant et de comparer l'impact sur les consommations énergétiques mais également sur le microclimat urbain. De même, un seul compartiment a été utilisé pour modéliser les bâtiments dans TEB. De ce fait, un seul type d'usage des bâtiments a été considéré. Il pourrait être intéressant de refaire des simulations en prenant mieux en compte la variabilité des comportements humains, ce qui permettrait notamment d'obtenir une estimation des consommations énergétiques plus représentative du quartier.

La rénovation de deux typologies de parois a été discutée. Néanmoins, cette étude pourrait être complétée en intégrant davantage de types de parois anciennes. De plus, les parois localisées au

rez-de-chaussée des bâtiments à pans de bois, sont plus épaisses que les parois localisées dans les étages (jusqu'à 1 m d'épaisseur de briques). Cette variation n'a pas pu être modélisée dans TEB, puisqu'il permet de considérer une seule composition de paroi par quartier.

Pour chaque typologie de paroi étudiée, les scénarios de rénovation ont été définis de manière à obtenir une résistance équivalente pour toutes les parois rénovées. De ce fait, lors de la comparaison des scénarios, peu de différences sont constatées sur le confort et les consommations énergétiques. Une autre approche serait d'étudier plusieurs épaisseurs de l'isolant voire de chercher une épaisseur optimale. L'impact de la résistance thermique pourrait alors être discuté.

Par ailleurs, en fonction des scénarios, le revêtement installé à l'intérieur n'est pas le même. Certains comprennent une plaque de plâtre et d'autres un enduit à la chaux. De plus, la mise en place d'une peinture sur la paroi peut ajouter une résistance de diffusion à la vapeur d'eau, ce phénomène n'est pas pris en compte dans cette étude. Cette thèse se concentre sur l'effet de l'isolant, mais il serait pertinent de discuter l'impact des revêtements et peintures, notamment sur la capacité de tampon hydrique.

De même, la section 2.5 présente différentes solutions pour limiter l'ICU, comme des enduits de façade ou encore des filtres à installer sur les fenêtres, impactant la répartition du flux radiatif dans le canyon urbain. Il serait intéressant à l'avenir de simuler ces solutions pour étudier leur impact potentiel sur le microclimat urbain du centre-ville médiéval de Cahors.

5.3. Limites des critères sélectionnés

La méthodologie appliquée permet d'étudier la rénovation au travers de six critères (conservation du patrimoine, énergie grise, consommation énergétique, risque de moisissures, confort intérieur et extérieur.) Ainsi, cette approche se base sur un nombre de critères à la fois limité et suffisant, qui sont définis simplement, dans le but d'obtenir une étude complète dont les résultats sont facilement interprétables.

Néanmoins, il pourrait être pertinent d'ajouter le facteur économique. La partie concernant la phase d'exploitation est indirectement prise en compte lors de l'évaluation des consommations énergétiques, mais le coût des travaux de rénovation (achat des matériaux, acheminement et mise en place) n'est pas considéré dans cette étude.

De même, il a été décidé de retenir un seul indicateur par critère, mais il aurait évidemment été possible d'en étudier davantage, par exemple le risque de moisissures au niveau de l'encastrement des poutres pour la durabilité des parois ou les émissions de CO₂ au cours du cycle de vie des matériaux utilisés lors de la rénovation. De manière plus générale, l'étude sur le cycle de vie se limite à l'énergie grise, mais une Analyse de Cycle de Vie (ACV) complète aurait permis une approche plus globale. Elle aurait cependant été complexe à mettre en œuvre, notamment en raison de la durée de vie typique des bâtiments (habituellement considérée égale à 50 ans, qui n'est pas adaptée pour des bâtiments historiques).

L'inconfort est quantifié par une durée de dépassement annuelle moyenne. Il serait pertinent de quantifier le nombre d'heures/de jours consécutifs durant lesquels le seuil d'inconfort est dépassé. Concernant l'étude du confort intérieur, il est possible d'améliorer l'indicateur choisi, en

sélectionnant un indicateur spécialement développé pour le confort intérieur permettant de prendre en compte le processus de thermorégulation du corps.

Par ailleurs, cette étude ne propose pas de pondérer chaque critère dans le but d'obtenir une note finale, mais plutôt de discuter qualitativement de chaque point. Sans prioriser certains critères, il est alors difficile de conclure sur le scénario de rénovation le mieux adapté.

5.4. Limites de la période climatique étudiée

La rénovation des bâtiments anciens représente un investissement financier significatif. L'objectif est donc de proposer des solutions pérennes. L'étude est réalisée sur une période de cinq ans, du 1^{er} janvier 2018 au 31 décembre 2022, donc en climat actuel. Elle ne tient donc pas compte de l'impact du changement climatique sur les conditions météorologiques. Or celui-ci aura probablement des effets significatifs sur le microclimat urbain (Masson et al., 2020b), le confort d'été intérieur (Mavrogianni et al., 2012) et la durabilité des parois (Vandemeulebroucke et al., 2021). Ainsi, les solutions dimensionnées en climat actuel ne seront pas forcément adaptées en climat futur. Pour obtenir des bâtiments plus durables et plus résilients, tout en limitant l'usage de la climatisation, il est primordial de mener des études similaires à partir des projections climatiques.

6. Conclusion

Les modifications apportées à TEB, dans le chapitre précédent, ont permis d'obtenir un outil de climat urbain complet et adapté à l'évaluation multicritère de la rénovation d'un centre-ville historique. En effet, il simule à la fois les conditions intérieures et extérieures, tout en évaluant les consommations énergétiques et le développement de moisissures. En parallèle, l'impact de la rénovation sur la conservation du patrimoine et l'énergie grise induite a pu être estimé.

Ainsi, plusieurs scénarios de rénovation des parois anciennes des bâtiments du centre-ville de Cahors, ont pu être simulés par TEB et comparés au vu de ces critères. Les solutions d'isolation installées ont été dimensionnées de sorte à obtenir des parois rénovées de résistances thermiques équivalentes. Dans ce contexte, de faibles écarts entre les scénarios sont observés pour les consommations énergétiques et le microclimat urbain. En revanche, les scénarios se différencient par la conservation du patrimoine, l'énergie grise, le confort intérieur et la durabilité des parois. Ces critères peuvent donc être utilisés pour trancher sur la pertinence des solutions envisagées.

Ce chapitre souligne l'importance d'étudier séparément les différentes typologies de parois, pour proposer des solutions de rénovation adaptées. En effet, en fonction de la typologie, la technique d'isolation recommandée n'est pas la même. Ces différences s'observent principalement, par rapport aux risques de moisissures et au confort intérieur. Par exemple, l'isolation par l'intérieur à partir de la ouate de cellulose semble particulièrement recommandée pour une paroi en briques massives, tandis que cette même technique d'isolation entraîne un risque d'apparition de moisissures pour des parois plus fines, à pans de bois. Dans ce cas, il sera préférable d'appliquer côté intérieur de la paroi un isolant à base de fibres de bois.

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont très spécifiques au centre-ville médiéval de Cahors. Il serait intéressant d'appliquer la méthodologie proposée (simulation à partir du modèle de climat urbain TEB amélioré et analyse des résultats au vu des critères proposés) à d'autres cas d'étude, comprenant des types de parois, de bâtiments, de formes urbaines ou encore de climats différents. Ces études permettraient de discuter de l'impact du choix de la technique d'isolation des parois sur les critères proposés, dans d'autres contextes. De plus, chaque centre-ville historique possède ses spécificités (Cantin et al., 2010), qu'il convient de prendre en compte pour choisir la solution de rénovation la mieux adaptée.

Conclusion générale

La rénovation énergétique des parois des bâtiments anciens représente un enjeu de taille dans les quartiers historiques des villes moyennes. Cette problématique a été étudiée au travers d'un cas d'étude : le centre-ville médiéval de Cahors. L'approche choisie est la simulation à l'échelle urbaine et ce travail contribue à l'amélioration d'un modèle de climat urbain, vers une meilleure prise en compte des spécificités des centres-villes historiques.

Le **Chapitre 1** recense les multiples enjeux à considérer lors de l'étude de la rénovation des centres-villes anciens, incluant notamment le contexte actuel de changement climatique, le phénomène d'ICU, la contrainte de conservation du patrimoine ou encore le comportement hygrothermique spécifique des parois anciennes. Ce premier chapitre présente ensuite les différents modèles de climat urbain, y compris le modèle TEB qui est finalement retenu pour évaluer la rénovation des centres-villes historiques à l'échelle urbaine. Il a l'avantage de considérer les interactions entre le microclimat et les bâtiments sur de larges échelles spatio-temporelles, mais il néglige les transferts d'humidité à travers les parois. Pour lever ce verrou, ce travail de thèse vise à intégrer ce phénomène dans le modèle TEB. Cependant, les méthodes numériques actuellement utilisées pour résoudre les transferts hygrothermiques à l'échelle de la paroi, ne sont pas adaptées à la modélisation à l'échelle urbaine.

Le **Chapitre 2** se concentre sur le développement d'une nouvelle méthode de résolution numérique des transferts hygrothermiques à travers les parois. La méthode proposée est basée sur des compromis, permettant de concilier un niveau de précision satisfaisant et une méthode facilement intégrable dans un modèle de climat urbain. Elle a les caractéristiques suivantes :

- Un **schéma de discrétisation IMEX** (Implicite-Explicite), permettant l'utilisation d'une méthode de résolution numérique non itérative ;
- Une **approche de résolution découplée** (résolution séparée de l'équation de conservation de l'énergie et de l'équation de conservation de la masse), permettant de conserver la structure du code du modèle TEB ;
- L'utilisation de **seulement deux pas de temps** différents (pas de temps fixé à cinq minutes et abaissé à dix secondes dans les moments critiques pour la convergence), évitant l'implémentation d'un pas de temps totalement variable.

Cette méthode originale est validée par comparaison inter-modèle, en utilisant l'outil de référence Delphin. La validation est réalisée au travers de quinze compositions de parois différentes (comprenant entre une et cinq couches de matériaux) et dans trois climats (tempéré, chaud et sec, ainsi que chaud et humide). Une analyse de sensibilité est effectuée dans le but de déterminer quel maillage est suffisant pour obtenir des résultats satisfaisants dans toutes les configurations étudiées. Finalement, une version sans affinement à l'interface entre deux couches de matériaux est suffisante pour simuler les échanges entre la paroi et son environnement. En revanche, lorsque la croissance de moisissures à l'interface brique/isolant est étudiée, il est nécessaire d'appliquer un affinement du maillage à l'interface entre deux couches de matériaux.

Le **Chapitre 3** présente la validation expérimentale de la méthode proposée. Elle s'appuie sur l'instrumentation mise en place dans le centre-ville historique de Cahors, qui comprend une station météorologique, et de nombreux capteurs de température et d'humidité relative localisés dans des bâtiments anciens et leurs parois. Les conditions simulées par la méthode développée ont pu être comparées aux mesures effectuées dans trois parois anciennes de compositions différentes. Les résultats de la comparaison sont satisfaisants et ont donc permis de valider la pertinence de la méthode, mais également la fiabilité des hypothèses effectuées pour définir les matériaux et les conditions aux limites.

Le **Chapitre 4** applique la méthode développée et validée pour intégrer les transferts d'humidité à travers les parois dans le modèle TEB. Ainsi, les équations de transferts à travers les parois et leur méthode de résolution numérique ont dû être modifiées dans TEB. D'autres changements ont été nécessaires comme l'ajout de nouvelles conditions aux limites (convection massique et pluie battante) et l'intégration des propriétés hydriques des matériaux. Un modèle de croissance/décroissance de moisissures (de type VTT) a également été implémenté dans TEB. Ainsi, le modèle de climat urbain TEB tient désormais compte des transferts hygrothermiques.

Ensuite, le modèle TEB a été configuré pour simuler le centre-ville ancien de Cahors. Les résultats obtenus, à partir de la version modifiée de TEB, sont comparés aux mesures effectuées dans les bâtiments de Cahors. La comparaison met en avant une bonne corrélation entre la simulation et les mesures avec des EAM (Erreurs Absolues Moyennes) toujours inférieures à 1,2 °C pour la température et un coefficient de Pearson toujours supérieur à 0,82. Ces résultats montrent que la nouvelle version de TEB est adaptée et correctement configurée pour simuler les conditions hygrothermiques dans les parois et à l'intérieur du bâtiment.

La comparaison des résultats simulés par TEB, avant et après intégration des transferts d'humidité à travers les parois, permet d'évaluer l'impact de ce phénomène à différents niveaux. La version modifiée de TEB considère la capacité de tampon hydrique des matériaux, ce qui améliore significativement la simulation de l'humidité relative intérieure (l'EAM passe de 6,7 à 4,4 % pour l'humidité relative). Les transferts d'humidité impactent également les flux échangés entre les parois, le canyon urbain et l'atmosphère. En revanche, dans le contexte étudié, les écarts entre les températures simulées par les deux versions de TEB sont généralement inférieurs à 1 °C. Ainsi, aucun effet significatif n'est constaté sur les températures simulées dans les bâtiments, dans les parois ou dans le canyon urbain.

Le **Chapitre 5** utilise la version améliorée de TEB pour évaluer la rénovation des parois anciennes des bâtiments du quartier historique de Cahors, vis-à-vis de six critères. Ils ont été définis pour couvrir les multiples enjeux de la rénovation des centres anciens : la conservation du patrimoine, le cycle de vie, les consommations énergétiques, la durabilité des parois, le confort intérieur et le confort extérieur.

Plusieurs solutions d'isolation des parois sont comparées. Elles se différencient par le positionnement (intérieur ou extérieur) et le type d'isolant (ouate de cellulose, fibre de bois, chaux-chanvre, polystyrène expansé). Les solutions d'isolation installées ont été dimensionnées de sorte à obtenir des parois rénovées de résistances thermiques équivalentes. Peu d'écart entre les scénarios sont observés lors de la simulation des consommations énergétiques et du

microclimat urbain. Les critères déterminants, lors du choix de la solution de rénovation, sont : la conservation du patrimoine, l'énergie grise, le confort intérieur et la durabilité des parois.

Deux typologies de parois principales coexistent dans le quartier médiéval de Cahors. Leur rénovation est étudiée séparément, car elles ont des comportements hygrothermiques différents. En effet, en fonction du type de parois, les techniques d'isolation recommandées ne sont pas les mêmes. De plus, il reste difficile de conclure sur une solution de rénovation idéale pour chaque typologie de parois, car cette recommandation dépend fortement des critères prioritaires par le décideur.

Les nouveaux développements dans TEB ont donc permis l'obtention d'un modèle de climat urbain capable de représenter les spécificités des centres-villes historiques et de considérer les multiples enjeux inhérents à leur réhabilitation énergétique. Les résultats obtenus, les impacts des transferts hydriques à travers les parois et les recommandations effectuées pour l'isolation sont propres au cas d'étude de cette thèse : le centre-ville médiéval de Cahors. En revanche, l'outil et la méthodologie proposés pourront être appliqués à d'autres études.

Perspectives de recherche

Méthode de résolution des transferts hygrothermiques à travers les parois à l'échelle urbaine

Une nouvelle méthode de résolution des transferts couplés a été développée dans le but d'être facilement intégrable dans un modèle de climat urbain. Un des principaux enjeux des modèles de climat urbain étant d'effectuer rapidement des calculs pour de larges échelles spatiales, il serait pertinent de comparer le coût computationnel de la méthode proposée, par rapport aux méthodes communément utilisées pour résoudre les transferts hygrothermiques à travers les parois.

La méthode développée s'appuie notamment sur cinq tests, vérifiant la stabilité numérique dans le but d'ajuster la durée du pas de temps de simulation. Ces tests reposent sur différents seuils, qui ont été fixés de sorte à obtenir des résultats satisfaisants pour l'ensemble des cas étudiés et à limiter le nombre de fois, où le pas de temps est diminué à dix secondes. Un travail complémentaire pourrait être mené dans le but de mieux optimiser la valeur des seuils fixés. De même, les dix-neuf cas d'étude définis pour la validation par comparaison inter-modèle, pourraient être étendus, par exemple en évaluant l'ensemble des parois dans les trois climats étudiés ou encore en effectuant le même travail dans un climat froid.

Une validation expérimentale a également été effectuée en comparant les données simulées aux mesures effectuées dans des bâtiments anciens. Les résultats simulés sont impactés à la fois par la précision du modèle, mais également par les incertitudes sur les données d'entrée (conditions aux limites et propriétés des matériaux). Dans le but de quantifier ces incertitudes, il serait intéressant d'appliquer une méthodologie complète d'analyse de sensibilité du modèle à ces différents paramètres.

Amélioration de TEB pour la simulation des centres-villes anciens

La méthode développée a été utilisée pour intégrer les transferts d'humidité à travers les parois dans TEB. Cette version modifiée de TEB a également été évaluée par comparaison avec des mesures in-situ, dans le contexte spécifique d'un centre-ville historique du sud de la France. Les résultats obtenus étaient satisfaisants. Dans de prochains travaux, il serait pertinent d'étendre cette étude à d'autres compositions de bâtiments, formes urbaines et types de climat. De plus, il pourrait être intéressant d'effectuer une nouvelle validation numérique de la méthode proposée après intégration dans TEB, en considérant les conditions intérieures variables. Une option serait d'effectuer une comparaison inter-modèle à l'échelle du bâtiment, permettant de vérifier à la fois les conditions hygrothermiques dans les pièces et dans les parois.

Le calcul de la quantité de pluie battante incidente à la paroi a également été implémenté dans TEB, au travers d'une méthode semi-empirique. Néanmoins, cette formule est fortement dépendante d'un coefficient d'atténuation de la pluie qui est complexe à définir. Il devient alors indispensable d'améliorer les relations semi-empiriques existantes et de les adapter à la prévision de la pluie battante à partir de la vitesse locale du vent à l'intérieur du canyon urbain.

Dans l'objectif d'améliorer la prise en compte des parois anciennes, davantage de processus pourraient être intégrés dans TEB comme la formation de gel, pour évaluer les risques d'endommagement liés au cycle de gel/dégel, ou encore les transferts d'air à travers les pores des matériaux, pour considérer les transferts de vapeur d'eau par advection à travers les parois.

Pour une simulation hygrothermique complète des bâtiments dans TEB, il serait également pertinent d'ajouter les transferts d'humidité à travers le toit et au niveau du sol, ainsi que les remontées capillaires, dans les parois en contact avec le sol. Pour encore augmenter la précision de la simulation, il faudrait inclure l'effet de tampon hydrique du mobilier, des planchers et des parois internes des bâtiments.

De manière plus générale, le module BEM permet actuellement de simuler efficacement les performances énergétiques des bâtiments. Néanmoins, la prise en compte de plusieurs zones thermiques, la différenciation des étages lors du calcul des conditions aux limites et la considération des ponts thermiques permettrait d'augmenter la précision du modèle TEB pour évaluer les enjeux associés aux centres-villes anciens.

Évaluation des scénarios de rénovation

Une méthodologie pour l'évaluation multicritère de plusieurs scénarios d'isolation des parois a été proposée. Pour compléter cette étude, il serait pertinent d'intégrer un critère économique, dans le but de prendre en compte le coût des travaux de rénovation. Ce critère permettrait de considérer le prix des différents isolants et le fait que la mise en place d'un isolant par l'extérieur coûte plus cher que d'isoler par l'intérieur.

Ce travail de thèse a aussi montré que les recommandations pour l'isolation varient en fonction de l'épaisseur de la paroi en briques. Seulement deux typologies de parois sont étudiées, l'étude pourrait être complétée en intégrant davantage de compositions de parois, ce qui permettrait de mieux englober la diversité des parois existantes dans le centre-ville médiéval de Cahors. De plus, un enduit ciment peut être présent de manière hétérogène au niveau des surfaces extérieures, mais également au niveau des surface intérieure. Ce paramètre n'a pas été considéré au cours de cette étude. De prochains travaux pourraient donc quantifier l'influence de cette couche d'enduit sur la rénovation des parois.

Six scénarios de rénovation sont étudiés, incluant les deux positionnements d'isolant possibles et quatre types d'isolant. Les épaisseurs sont fixées de sorte à obtenir des parois de résistance thermique équivalente. D'autres épaisseurs d'isolants pourraient être étudiées, dans le but d'optimiser les travaux d'isolation.

L'impact des solutions varie également en fonction des scénarios d'occupation et des équipements de CVC installés. Cette thèse suppose que les habitants appliquent des stratégies de rafraîchissement passives durant les périodes estivales. Il serait intéressant d'effectuer une étude similaire en intégrant l'usage de la climatisation, notamment dans le but de prendre en compte son impact sur le confort extérieur, lors du choix des stratégies de rénovation.

La simulation est effectuée sur une durée de cinq ans, allant du 1^{er} janvier 2018 au 31 décembre 2022. La période choisie est représentative du climat présent, mais il semble indispensable de répéter cette étude, en utilisant des données météorologiques représentatives du climat futur. Ce

travail supplémentaire permettrait de s'assurer que les solutions de rénovation recommandées sont adaptées, pour maintenir un niveau de confort intérieur et extérieur satisfaisant, ainsi que pour assurer la durabilité des parois, face au changement climatique.

Élargissement de l'étude à d'autres villes et climats

Cette méthodologie pour l'évaluation multicritère de scénarios de rénovation pourra évidemment être appliquée à d'autres quartiers et villes. Cet outil est particulièrement adapté pour l'étude de la durabilité des parois, sur de larges échelles spatiales, en contexte de changement climatique.

Cette nouvelle version de TEB sera également utile pour étudier l'impact multi-échelle des transferts hygrothermiques à travers les parois, dans davantage de climats et morphologies urbaines. Il pourra notamment être utilisé pour estimer le potentiel de refroidissement par évaporation au niveau des parois, en conditions réelles et dans différentes configurations. L'impact d'autres matériaux traditionnels (terre crue par exemple) pourra être évalué.

Par ailleurs, certaines villes sont soumises au phénomène d'îlot d'humidité urbain, ce qui est le cas de Hong Kong, une ville subtropicale, très dense et composée de hauts bâtiments. L'intégration des transferts d'humidité à travers les parois permet alors de considérer l'eau stockée dans le mur, lors de l'étude des mécanismes de ce phénomène.

Nomenclature

Indices et exposants

Symbole	Identification
a	air
abs	absorbé
c	capillaire
can	canyon urbain
CLO	Courte Longueur d'Onde
cond	conduction
conv	convection
crit	critique
diff	diffusion
dry	sec
elem	élément
env	environnement
ext	extérieur
g	gaz
GLO	Grande Longueur d'Onde
h	sensible
inc	incidente
int	intérieur
l	liquide
le	latent
lim	limite
m	massique
mat	matériau
max	maximal
ref	référence
road	route
roof	toit
sat	saturation
sint	surface intérieure
sext	surface extérieure
surf	surface
th	thermique
v	vapeur
w	eau
wall	paroi

Lettres grecques

Symbole	Grandeur	Unité
A	Albedo	-
Δ	Perméabilité	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
E	Émissivité	-
Θ	Orientation d'une façade	°
Θ_L	Teneur en eau liquide	$m^3 \cdot m^{-3}$
Λ	Conductivité thermique	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
M	Facteur de résistance à la vapeur d'eau	-
P	Masse volumique	$kg \cdot m^{-3}$
Σ	Constante de Stefan Boltzmann	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
φ	Humidité relative	-

Lettres latines

Symbole	Grandeur	Unité
A_w	Coefficient d'absorption de l'eau	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2}$
c	Capacité calorifique massique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C	Capacité calorifique volumique	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
D	Coefficient de diffusion	$m^2 \cdot s^{-1}$
D	Direction du vent	°
F	Facteur de vue	-
G	Gravité	$m \cdot s^{-2}$
H	Enthalpie massique	$J \cdot kg^{-1}$
$h_{conv,m}$	Coefficient d'échange convectif massique	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
$h_{conv,th}$	Coefficient d'échange convectif thermique	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
j	Densité de flux massique	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
K_l	Conductivité de l'eau liquide du matériau	S
K_v	Perméabilité à la vapeur du matériau	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
L_v	Chaleur latente de vaporisation	$J \cdot kg^{-1}$
M	Masse molaire	$kg \cdot mol^{-1}$
M	Indice de moisissures	-
P	Pression	Pa
Q ou q	Densité de flux thermique	$W \cdot m^{-2}$
R	Coefficient de Pearson	-
R	Constante des gaz parfaits	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
R_v	Constante des gaz parfaits de la vapeur d'eau	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
T	Temps	S
T	Température	K
U	Densité d'énergie	$J \cdot m^{-3}$
V	Vitesse du vent	$m \cdot s^{-1}$
W	Teneur en eau	$kg \cdot m^{-3}$

Sigles et acronymes

ACV	Analyse de Cycle de Vie
BEM	Building Energy Model
BES	Building Energy Simulation
CC	Chaux-Chanvre
CES	City Energy Simulation
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLO	Courte Longueur d'Onde
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
EAM	Erreur Absolue Moyenne
EDP	Equation aux Dérivées Partielles
EPS	Polystyrène expansé
FB	Fibre de bois
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GLO	Grande Longueur d'Onde
HAM	Heat, Air, and Moisture
HR	Humidité Relative
ICU	Ilot de Chaleur Urbain
IMEX	Implicite-Explicite
ITE	Isolation Thermique par l'Extérieur
ITI	Isolation Thermique par l'Intérieur
MDF	Méthode des Différences Finies
OC	Ouate de Cellulose
PSMV	Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur
RAF	Rain Admittance Factor
RDC	Rez-De-Chaussée
RT	Règlementation Thermique
TEB	Town Energy Balance
UBES	Urban Energy Simulation
UMI	Urban Moisture Island
UTCI	Universal Thermal Climate Index

Références

- Abadie, M., Mendes, N., 2006. Comparative Analysis of Response-factor and Finite-volume based Methods for predicting Heat and Moisture Transfer through Porous Building Materials. *J. Build. Phys.* 30, 7–37. <https://doi.org/10.1177/1744259106064599>
- Abuku, M., Blocken, B., Nore, K., Thue, J.V., Carmeliet, J., Roels, S., 2009a. On the validity of numerical wind-driven rain simulation on a rectangular low-rise building under various oblique winds. *Build. Environ.* 44, 621–632. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.003>
- Abuku, M., Blocken, B., Roels, S., 2009b. Moisture response of building facades to wind-driven rain: Field measurements compared with numerical simulations. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 97, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.06.006>
- Ackerman, B., 1987. Climatology of Chicago Area Urban–Rural Differences in Humidity. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 26, 427–430.
- ADEME, 2022. Isoler sa maison.
- Agliata, R., Marino, A., Mollo, L., Pariso, P., 2020. Historic Building Energy Audit and Retrofit Simulation with Hemp-Lime Plaster—A Case Study. *Sustainability* 12, 4620. <https://doi.org/10.3390/su12114620>
- Akkurt, G.G., Aste, N., Borderon, J., Buda, A., Calzolari, M., Chung, D., Costanzo, V., Del Pero, C., Evola, G., Huerto-Cardenas, H.E., Leonforte, F., Lo Faro, A., Lucchi, E., Marletta, L., Nocera, F., Pracchi, V., Turhan, C., 2020. Dynamic thermal and hygrometric simulation of historical buildings: Critical factors and possible solutions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 118, 109509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109509>
- Allegrini, J., Dorer, V., Carmeliet, J., 2015a. Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 144, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.024>
- Allegrini, J., Dorer, V., Carmeliet, J., 2012a. Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy Build.* 55, 823–832.
- Allegrini, J., Dorer, V., Carmeliet, J., 2012b. Analysis of convective heat transfer at building façades in street canyons and its influence on the predictions of space cooling demand in buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 13th International Conference on Wind Engineering 104–106, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.003>
- Allegrini, J., Orehounig, K., Mavromatidis, G., Ruesch, F., Dorer, V., Evins, R., 2015b. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52, 1391–1404.
- Alliance HQE-GBC, 2017. INIES | Les données environnementales et sanitaires de référence pour le

bâtiment.

Amziane, S., Arnaud, L., Challamel, N., 2013. Bio-aggregate-based Building Materials: Applications to Hemp Concretes. <https://doi.org/10.1002/9781118576809>

Andreotti, M., Calzolari, M., Davoli, P., Dias Pereira, L., 2022. Hygrothermal performance of an internally insulated masonry wall: Experimentations without a vapour barrier in a historic Italian Palazzo. *Energy Build.* 260, 111896. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111896>

APUR, 2014. Amélioration des performances énergétiques du bâti ancien de la Région Bruxelles-Capitale.

APUR, 2011. Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1801 et 1850.

Araújo, M.T. de, Souza, H.A. de, Gomes, A.P., 2021. Computer simulation of moisture transfer in walls: impacts on the thermal performance of buildings. *Archit. Eng. Des. Manag.* 0, 1–20. <https://doi.org/10.1080/17452007.2021.1916426>

AREC, A. régionale énergie-climat-, 2012. Guide Bio-tech : L'énergie grise des matériaux et des ouvrages.

Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants., 2007.

Arrêté du 22 mars 2017 modifiant l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants, 2017.

Artola, P.-A., 2009. Etude théorique et numérique de l'effet Soret (These de doctorat). Paris 11.

Ascione, F., Cheche, N., Masi, R.F.D., Minichiello, F., Vanoli, G.P., 2015. Design the refurbishment of historic buildings with the cost-optimal methodology: The case study of a XV century Italian building. *Energy Build.* 99, 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.027>

ASHRAE, 2014. Guideline 14-2014: Measurement of energy, demand, and water savings, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. ed. Atlanta, Georgia.

Asphaug, S.K., Andenæs, E., Geving, S., Time, B., Kvande, T., 2022. Moisture-resilient performance of concrete basement walls – Numerical simulations of the effect of outward drying. *Build. Environ.* 222, 109393. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109393>

Aste, N., Angelotti, A., Buzzetti, M., 2009. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy Build.* 41, 1181–1187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>

ATHEBA, 2010. Amélioration thermique du bâti ancien, Rapport.

Atthajariyakul, S., Leephakpreeda, T., 2004. Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage, in: *Energy and buildings*. Presented at the Building research and the sustainability of the built environment in the tropics, pp. 720–733.

- Azam, M.-H., 2021. Simulation du bâtiment au quartier : exploration du potentiel de la PGD paramétrique comme méthode de réduction de modèles pour des calculs précis et rapides (These de doctorat). Nantes.
- Baba, F.M., Ge, H., Wang, L. (Leon), Zmeureanu, R., 2022. Do high energy-efficient buildings increase overheating risk in cold climates? Causes and mitigation measures required under recent and future climates. *Build. Environ.* 219, 109230. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109230>
- Baglivo, C., Congedo, P.M., Malatesta, N.A., 2023. Building envelope resilience to climate change under Italian energy policies. *J. Clean. Prod.* 411, 137345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137345>
- Bailly, A., Jiang, Y., Guyot, G., Desfougères, F., 2013. PRELIMINARY ANALYSIS OF A FRENCH BUILDINGS AIRTIGHTNESS DATABASE 12.
- Bear, J., Bachmat, Y., 1990. Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media, Theory and Applications of Transport in Porous Media. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1926-6>
- Berger, J., 2014. Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : application des méthodes de réduction de modèle (These de doctorat). Grenoble.
- Berger, J., Gasparin, S., Mendes, N., 2017a. Accurate numerical simulation of moisture front in porous material. *Build. Environ.* 118, 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.016>
- Berger, J., Mendes, N., Guernouti, S., Woloszyn, M., Chinesta, F., 2017b. Review of Reduced Order Models for Heat and Moisture Transfer in Building Physics with Emphasis in PGD Approaches. *Arch. Comput. Methods Eng.* 24, 655–667. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9184-1>
- Best, A.C., 1950. The size distribution of raindrops. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 76, 16–36. <https://doi.org/10.1002/qj.49707632704>
- Blahovec, J., Yanniotis, S., 2008. GAB Generalized Equation for Sorption Phenomena. *Food Bioprocess Technol.* 1, 82–90. <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0012-3>
- Blocken, B., Carmeliet, J., 2010. Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory. *Build. Environ.* 45, 691–703. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.007>
- Blocken, B., Carmeliet, J., 2006. On the accuracy of wind-driven rain measurements on buildings. *Build. Environ.* 41, 1798–1810. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.022>
- Blocken, B., Carmeliet, J., 2004. A review of wind-driven rain research in building science. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 92, 1079–1130. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.06.003>
- Blocken, B., Carmeliet, J., Stathopoulos, T., 2007a. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 95, 941–962. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.01.013>

- Blocken, B., Defraeye, T., Derome, D., Carmeliet, J., 2009. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. *Build. Environ.* 44, 2396–2412. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.04.004>
- Blocken, B., Moonen, P., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2008a. Numerical Study on the Existence of the Venturi Effect in Passages between Perpendicular Buildings. *J. Eng. Mech.* 134, 1021–1028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:12\(1021\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:12(1021))
- Blocken, B., Roels, S., Carmeliet, J., 2007b. A combined CFD–HAM approach for wind-driven rain on building facades. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 95, 585–607. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.12.001>
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2008b. Wind Environmental Conditions in Passages between Two Long Narrow Perpendicular Buildings. *J. Aerosp. Eng.* 21, 280–287. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2008\)21:4\(280\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:4(280))
- Bonhomme, M., Faraut, S., Martins, T., Bonneaud, F., Michel, C., Adolphe, L., Ginestet, S., Oltra-Carrio, R., 2015. *Projet IFU, Ilots de Fraicheur Urbains* (report). ADEME.
- Bottino-Leone, D., Larcher, M., Herrera-Avellanosa, D., Haas, F., Troi, A., 2019. Evaluation of natural-based internal insulation systems in historic buildings through a holistic approach. *Energy* 181, 521–531. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.139>
- Bottino-Leone, D., Larcher, M., Troi, A., Grunewald, J., 2021. Hygrothermal characterization of a fictitious homogenized porous material to describe multiphase heat and moisture transport in massive historic walls. *Constr. Build. Mater.* 266, 121497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121497>
- Bouyer, J., 2009. *Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l’impact de l’aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments* (These de doctorat). Nantes.
- Bouyer, J., Inard, C., Musy, M., 2011. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy Build.* 43, 1549–1559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.010>
- Bridgman, H.A., Warner, R.F., Dodson, J.R., 1995. *Urban Biophysical Environments*. Oxford University Press.
- Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Epstein, Y., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Richards, M., Rintamäki, H., Shitzer, A., Havenith, G., 2009. CALCULATING UTCI EQUIVALENT TEMPERATURE.
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G., 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int. J. Biometeorol.* 56, 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- Bröde, P., Jendritzky, G., Fiala, D., Havenith, G., 2010. The Universal Thermal Climate Index UTCI in operational use. Presented at the Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK.
- Bruse, M., Fleer, H., 1998. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environ. Model. Softw.* 13, 373–384.

- BS EN 15026:2007, 2007. Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments. Evaluation du transfert d'humidité par simulation numérique.
- Buda, A., Pracchi, V., 2018. Potentialities and criticalities of retrofit guidelines in their application on different case studies.
- Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L.K., Zibouche, K., Marchadier, C., 2012. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geosci. Model Dev.* 5, 433–448. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-433-2012>
- Bui, R., Goffart, J., McGregor, F., Woloszyn, M., Fabbri, A., Grillet, A.-C., 2020. Uncertainty and sensitivity analysis applied to a rammed earth wall: evaluation of the discrepancies between experimental and numerical data. *E3S Web Conf.* 172, 17004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017217004>
- Busser, T., Berger, J., Piot, A., Pailha, M., Woloszyn, M., 2019. Comparison of model numerical predictions of heat and moisture transfer in porous media with experimental observations at material and wall scales: An analysis of recent trends. *Dry. Technol.* 37, 1363–1395. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1502195>
- Calice, C., Clemente, C., Salvati, A., Palme, M., Inostroza, L., 2017. Urban Heat Island Effect on the Energy Consumption of Institutional Buildings in Rome. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 245, 082015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082015>
- Calle, K., Van Den Bossche, N., 2021. Sensitivity analysis of the hygrothermal behaviour of homogeneous masonry constructions: Interior insulation, rainwater infiltration and hydrophobic treatment. *J. Build. Phys.* 44, 510–538. <https://doi.org/10.1177/17442591211009937>
- Calle, K., Van Den Bossche, N., 2017. Towards understanding rain infiltration in historic brickwork. *Energy Procedia* 132, 676–681. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.005>
- Camuffo, D., 2019. *Microclimate for Cultural Heritage: Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments.* Elsevier.
- Cantin, R., Burgholzer, J., Guarracino, G., Moujalled, B., Tamelikecht, S., Royet, B.G., 2010. Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France. *Build. Environ., 1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings* 45, 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.07.010>
- Carlucci, S., Pagliano, L., 2012. A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy Build.* 53, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.015>
- Carmeliet, J., Blocken, B., Defraeye, T., Derome, D., 2011. Moisture phenomena in whole building performance prediction, in: *Building Performance Simulation for Design and Operation.* Routledge.
- Carmeliet, J., de Wit, M.H., Janssen, H., 2005. Hysteresis and moisture buffering of wood, in: *Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries : Reykjavik.* Presented at the 7th Nordic Symposium on Building Physics (NSB 2005), June 13-15, 2005, Reykjavik, Iceland, pp. 55–62.

- Carmeliet, J., Kubilay, A., Strelbel, D., Derome, D., 2021. Urban climate simulation: coupling of mesoscale meteorological model with building-resolved neighborhood CFD simulation, in: *Building Simulation*. Presented at the Building Simulation 2021, IBPSA, pp. 1020–1025. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.31125>
- Cassar, M., 2009. Sustainable heritage: challenges and strategies for the twenty-first century. *J. Preserv. Technol.*
- Chandler, T.J., 1967. absolute and relative humidities in towns. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 48, 394–399. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-48.6.394>
- Chapman, S., Thatcher, M., Salazar, A., Watson, J.E.M., McAlpine, C.A., 2019. The impact of climate change and urban growth on urban climate and heat stress in a subtropical city. *Int. J. Climatol.* 39, 3013–3030. <https://doi.org/10.1002/joc.5998>
- Charrier, A., 2013. Cahors, les chantiers.
- Chen, L., Frauenfeld, O.W., 2016. Impacts of urbanization on future climate in China. *Clim. Dyn.* 47, 345–357. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2840-6>
- Chilton, T.H., Colburn, A.P., 1934. Mass transfer (absorption) coefficients: prediction from data on heat transfer and fluid friction. American Chemical Society, Washington, D.C.
- Cho, H.M., Yun, B.Y., Kim, Y.U., Yuk, H., Kim, S., 2022. Integrated retrofit solutions for improving the energy performance of historic buildings through energy technology suitability analyses: Retrofit plan of wooden truss and masonry composite structure in Korea in the 1920s. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 168, 112800. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112800>
- Choi, E.C.C., 1994. Determination of wind-driven-rain intensity on building faces. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 51, 55–69. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90077-9)
- Choi, E.C.C., 1993. Simulation of wind-driven-rain around a building. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Proceedings of the 1st International on Computational Wind Engineering* 46–47, 721–729. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90342-L](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90342-L)
- Choidis, P., Coelho, G.B.A., Kraniotis, D., 2023. Assessment of frost damage risk in a historic masonry wall due to climate change, in: *Advances in Geosciences*. Presented at the European Geosciences Union General Assembly 2022, EGU Division Energy, Resources & Environment (ERE) - EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, Copernicus GmbH, pp. 157–175. <https://doi.org/10.5194/adgeo-58-157-2023>
- Clarke, J., 2001. *Energy Simulation in Building Design*, Second Edition.
- Claude, S., 2018. Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain (PhD Thesis). INSA de Toulouse.
- Claude, S., Ginestet, S., Bonhomme, M., Escadeillas, G., Taylor, J., Marincioni, V., Korolija, I., Altamirano, H., 2019. Evaluating retrofit options in a historical city center: Relevance of bio-based insulation and the need to consider complex urban form in decision-making. *Energy Build.* 182, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.026>

- Claude, S., Ginestet, S., Bonhomme, M., Moulène, N., Escadeillas, G., 2017. The Living Lab methodology for complex environments: Insights from the thermal refurbishment of a historical district in the city of Cahors, France. *Energy Res. Soc. Sci., Energy Consumption in Buildings*: 32, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.018>
- Colombert, M., 2008. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville (These de doctorat). Paris Est.
- Compagnon, D.R., 2001. a simulation tool for daylighting systems 60.
- Coşkun, T., Gülhan, Ö., Şahin, C.D., Durmuş Arsan, Z., Gökçen Akkurt, G., 2017. The effect of spatial interventions on historic buildings' indoor climate (Case Study: Tire Necip Paşa Library, Izmir-Turkey). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.362>
- Costa-Carrapiço, I., Croxford, B., Raslan, R., Neila González, J., 2022a. Hygrothermal calibration and validation of vernacular dwellings: A genetic algorithm-based optimisation methodology. *J. Build. Eng.* 55, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104717>
- Costa-Carrapiço, I., González, J.N., Raslan, R., Sánchez-Guevara, C., 2022b. Understanding the challenges of determining thermal comfort in vernacular dwellings: A meta-analysis. *J. Cult. Herit.* 58, 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.09.019>
- Costa-Carrapiço, I., Raslan, R., González, J.N., 2020. A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy Build.* 210, 109690. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109690>
- Costola, D., Blocken, B.J.E., Hensen, J.L.M., 2009. External coupling between BES and HAM programs for whole building simulation, in: 11th International Building Performance Simulation Conference, 27-30 July 2009, Glasgow, Scotland. Presented at the 11th International IBPSA Building Simulation Conference (BS 2009), July 27-30, 2009, Glasgow, UK, International Building Performance Simulation Association (IBPSA), pp. 316–323.
- Cóstola, D., Mirsadeghi, M., Blocken, B., Hensen, J., 2008. Towards external coupling of BES and HAM envelope programs for whole building HAM simulation.
- Crank, J., Nicolson, P., 1947. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. *Math. Proc. Camb. Philos. Soc.* 43, 50–67. <https://doi.org/10.1017/S0305004100023197>
- Dañan, J.-F., 2010. Equilibre et transferts en milieux poreux I- Etats d'équilibre.
- Daniel, S., Ghiaus, C., 2023. Multi-Criteria Decision Analysis for Energy Retrofit of Residential Buildings: Methodology and Feedback from Real Application. *Energies* 16, 902. <https://doi.org/10.3390/en16020902>
- Darcy, H., 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont.
- De Munck, C., 2013. Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville (These de doctorat). Toulouse, INPT.

- De Munck, C., Lemonsu, A., Bouzouidja, R., Masson, V., Claverie, R., 2013. The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB. *Geosci. Model Dev.* 6, 1941–1960. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1941-2013>
- de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poeuf, P., Marchadier, C., 2013. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *Int. J. Climatol.* 33, 210–227. <https://doi.org/10.1002/joc.3415>
- de Munck, C., Pigeon, G., Meunier, F.-E., Tréméac, B., Bousquet, P., Merchat, M., Poeuf, P., Marchadier, C., 2010. *Projet CLIM2 - CLIMatisation et CLIMat urbain.*
- De Ridder, K., Lauwaet, D., Maiheu, B., 2015. UrbClim – A fast urban boundary layer climate model. *Urban Clim.* 12, 21–48. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001>
- De Vries, D.A., 1958. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media. *Trans. Am. Geophys. Union* 39, 909. <https://doi.org/10.1029/TR039i005p00909>
- Defraeye, T., 2011. *Convective Heat and Mass Transfer at Exterior Building Surfaces (Convectief warmte- en massatransport op gebouwoppervlakken).* KU Leuven.
- Deiml, M., Suderland, M., Reiss, P., Czupalla, M., 2015. Development and evaluation of thermal model reduction algorithms for spacecraft. *Acta Astronaut., Dynamics and Control of Space Systems* 110, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.01.018>
- Delgado, J., Ramos, N., Barreira, E., Freitas, V., 2010. A critical review of hygrothermal models used in porous building materials. *J. Porous Media - J POROUS MEDIA* 13, 221–234. <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v13.i3.30>
- Delgado, J.M.P.Q., Barreira, E., Ramos, N.M.M., Freitas, V.P. de, 2012. *Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics, SpringerBriefs in Computational Mechanics.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35003-0>
- Densley Tingley, D., Hathway, A., Davison, B., 2015. An environmental impact comparison of external wall insulation types. *Build. Environ.* 85, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.021>
- Derome, D., Kubilay, A., Defraeye, T., Blocken, B., Carmeliet, J., 2017. Ten questions concerning modeling of wind-driven rain in the built environment. *Build. Environ.* 114, 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.026>
- DGHUC, MPF, CETE Est, ENTPE, 2007. *Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie.*
- Dingle, A.N., Lee, Y., 1972. Terminal Fallspeeds of Raindrops. *J. Appl. Meteorol.* 1962-1982 11, 877–879.
- Dipasquale, L., Correia, M., Mecca, S., Achenza, M., Guillaud, H., Mileto, C., Vegas, F., Alcindor, M., Belingardi, C., Cadinu, M., Cannas, L., Carlos, G., Castro, A., Costa-Carrapiço, I., Cristini, V., Di Benedetto, S., Frey, P., Soriano, L., García, S., Zanini, L., 2014. *VerSus: Heritage for Tomorrow Vernacular Knowledge for Sustainable Architecture.*
- Dong, W., Chen, Y., Bao, Y., Fang, A., 2020. A validation of dynamic hygrothermal model with

coupled heat and moisture transfer in porous building materials and envelopes. *J. Build. Eng.* 32, 101484. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101484>

Doya, M., 2010. Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense (phdthesis). Université de La Rochelle.

Du, R., Song, J., Huang, X., Wang, Q., Zhang, C., Brousse, O., Chan, P.W., 2022. High-resolution regional modeling of urban moisture island: mechanisms and implications on thermal comfort. *Build. Environ.* 207, 108542. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108542>

Dubois, C., 2014. Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique : une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois (These de doctorat).

Dubois, S., 2014. Modelling the hygrothermal behaviour of crop-based construction materials. Université de Liège, Liège, Belgique.

Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2013. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.

Dupont, S., 2001. Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine: réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO (phdthesis). Université de Nantes.

Dupont, S., Mestayer, P.G., 2006. Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 45, 1744–1765.

Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.* 30, 211–223. <https://doi.org/10.1029/93WR02676>

Economidou, M., Atanasiu, B., Despret, C., Maio, J., Nolte, I., Rapf, O., 2011. Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings. *Build. Perform. Inst. Eur. BPIE* 35–36.

El Diasty, R., Fazio, P., Budaiwi, I., 1992. Modelling of indoor air humidity: the dynamic behaviour within an enclosure. *Energy Build.* 19, 61–73. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90036-G](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90036-G)

Enescu, D., 2017. A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79, 1353–1379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175>

EPICEA, 2012. Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne (Rapport final).

Errell, E., Pearlmutter, D., Williamson, T., 2012. *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*. Routledge.

Fahed, J., 2018. Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen (These de doctorat). Toulouse, INSA.

Fang, L., Clausen, G., Fanger, P.O., 1998. Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. *Indoor Air* 8, 80–90. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x>

Fanger, P.O., 1970. *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish

Technical Press, Copenhagen.

Fechner, H., Ruisinger, U., Nicolai, A., Grunewald, J., 2020. DELPHIN.

Ferrari, A., Kubilay, A., Derome, D., Carmeliet, J., 2020. The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation. *Urban Clim.* 31, 100534. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100534>

Ferroukhi, M.Y., 2015. Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité (These de doctorat). La Rochelle.

Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M., 2001. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.* 45, 143–159. <https://doi.org/10.1007/s004840100099>

Fick, A., 1855. Ueber Diffusion. *Ann. Phys.* 170, 59–86. <https://doi.org/10.1002/andp.18551700105>

Fletcher, T.D., Andrieu, H., Hamel, P., 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Adv. Water Resour.*, 35th Year Anniversary Issue 51, 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>

Florentin, Y., Pearlmutter, D., Givoni, B., Gal, E., 2017. A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials. *Energy Build.* 156, 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.097>

Foucquier, A., Robert, S., Suard, F., Stéphan, L., Jay, A., 2013. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 23, 272–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.004>

Fouillet, A., Rey, G., Jouglu, E., Hémon, D., 2006. Estimation de la surmortalité observée et attendue au cours de la vague de chaleur du mois de juillet 2006 (report). Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM).

Frayssinet, L., Merlier, L., Kuznik, F., Hubert, J.-L., Milliez, M., Roux, J.-J., 2018. Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81, 2318–2327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>

Freitas, 1996. Moisture migration in building walls—Analysis of the interface phenomena. *Build. Environ.* 31, 99–108. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00027-5](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00027-5)

Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J.-D., Kossmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., Wienert, U., 2011. Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50, 167–184. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2377.1>

Garci, M., 2016. Simulation multi-physiques de circuits intégrés pour la fiabilité (These de doctorat). Strasbourg.

Garreau, E., 2021. Développement d'une méthodologie d'analyse de la parcimonie pour la simulation énergétique urbaine (These). Université Paris sciences et lettres.

- Garreau, E., Berthou, T., Duplessis, B., Partenay, V., Marchio, D., 2021. Solar shading and multi-zone thermal simulation: Parsimonious modelling at urban scale. *Energy Build.* 249, 111176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111176>
- Garuma, G.F., 2018. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. *Urban Clim.* 24, 830–851. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.006>
- Gasparin, S., 2019. Numerical methods for predicting heat and moisture transfer through porous building materials (PhD Thesis). Université Grenoble Alpes ; Pontificia universidade católica do Paraná.
- Gasparin, S., Berger, J., Dutykh, D., Mendes, N., 2019. An innovative method to determine optimum insulation thickness based on non-uniform adaptive moving grid. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 41, 173. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1670-6>
- Gasparin, S., Berger, J., Mendes, N., 2017. Stable explicit schemes for simulation of nonlinear moisture transfer in porous materials. *J. Build. Perform. Simul.* 11, 129–144. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1298669>
- Ge, H., Yang, X., Fazio, P., Rao, J., 2014. Influence of moisture load profiles on moisture buffering potential and moisture residuals of three groups of hygroscopic materials. *Build. Environ.* 81, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.021>
- Genuchten, M.T. van, 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Geros, V., Santamouris, M., Karatasou, S., Tsangrassoulis, A., Papanikolaou, N., 2005. On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. *Energy Build.* 37, 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.024>
- Gill, S., 2024. Literature review: Impacts of Climate Change on Urban Environments. University of Manchester, Centre For Urban and Regional Ecology.
- Goffart, J., Rabouille, M., Mendes, N., 2017. Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate. *J. Build. Perform. Simul.* 10, 37–57. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1112430>
- Golany, G.S., 1996. Urban design morphology and thermal performance. *Atmos. Environ., Conference on the Urban Thermal Environment Studies in Tohwa* 30, 455–465. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00266-9](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00266-9)
- Grimmond, C.S.B., Blackett, M., Best, M., Barlow, J., Baik, J., Belcher, S., Bohnenstengel, S., Calmet, I., Chen, F., Dandou, A., others, 2010. The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 49, 1268–1292.
- Grimmond, C.S.B., Blackett, M., Best, M.J., Baik, J.-J., Belcher, S.E., Beringer, J., Bohnenstengel, S.I., Calmet, I., Chen, F., Coutts, A., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M.L., Hamdi, R., Hendry, M., Kanda, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E.S., Lee, S.-H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Ooka, R., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.-H., Salamanca, F.,

- Steenefeld, G.J., Tombrou, M., Voogt, J.A., Young, D.T., Zhang, N., 2011. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *Int. J. Climatol.* 31, 244–272. <https://doi.org/10.1002/joc.2227>
- Groleau, D., 2000. SOLENE UN OUTIL DE SIMULATION DES ECLAIREMENTS SOLAIRES ET LUMINEUX DANS LES PROJETS ARCHITECTURAUX ET URBAINS 8.
- Gros, A., 2013. Modelisation de la demande energetique des batiments a l' echelle d' un quartier (PhD Thesis). University of La Rochelle.
- Gross, G., 2012. Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments. *Meteorol. Z.* 399–412. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0363>
- Grunewald, J., 1997. Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen.
- Guerreiro, S.B., Dawson, R.J., Kilsby, C., Lewis, E., Ford, A., 2018. Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environ. Res. Lett.* 13, 034009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>
- Guidetti, E., Ferrara, M., 2023. Embodied energy in existing buildings as a tool for sustainable intervention on urban heritage. *Sustain. Cities Soc.* 88, 104284. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104284>
- Gutland, M., Bucking, S., Santana Quintero, M., 2022. Hygrothermal modelling of historic rubble masonry walls: Accounting for geometric and compositional variability. *J. Build. Eng.* 48, 103929. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103929>
- Hadavi, M., Pasharshahi, H., 2021. Impacts of urban buildings on microclimate and cooling systems efficiency: Coupled CFD and BES simulations. *Sustain. Cities Soc.* 67, 102740. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102740>
- Hagentoft, C.-E., Kalagasidis, A.S., Adl-Zarrabi, B., Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Grunewald, J., Funk, M., Becker, R., Shamir, D., Adan, O., Brocken, H., Kumaran, K., Djebbar, R., 2004. Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases. *J. Therm. Envel. Build. Sci.* 27, 327–352. <https://doi.org/10.1177/1097196304042436>
- Hallegatte, S., Viguie, V., Masson, V., Lemonsu, A., Pigeon, G., Beaulant, A.-L., Bueno, B., Marchadier, C., Salagnac, J.-L., 2013. VURCA Project - Cities vulnerability to future heat waves & adaptation strategies (Rapport final).
- Hamdi, R., Kusaka, H., Doan, Q.-V., Cai, P., He, H., Luo, G., Kuang, W., Caluwaerts, S., Duchêne, F., Van Schaebroek, B., Termonia, P., 2020. The State-of-the-Art of Urban Climate Change Modeling and Observations. *Earth Syst. Environ.* 4, 631–646. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00193-3>
- Hamdi, R., Masson, V., 2008. Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme: Offline 1D Evaluation in a Street Canyon. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47, 2627–2644. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1865.1>

- Hansen, T.K., Bjarlov, S.P., Peuhkuri, R., 2019. The effects of wind-driven rain on the hygrothermal conditions behind wooden beam ends and at the interfaces between internal insulation and existing solid masonry. *Energy Build.* 196, 255–268. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.020>
- Hansen, T.K., Bjarløv, S.P., Peuhkuri, R.H., Harrestrup, M., 2018. Long term in situ measurements of hygrothermal conditions at critical points in four cases of internally insulated historic solid masonry walls. *Energy Build.* 172, 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.001>
- Hao, L., Herrera-Avellanosa, D., Del Pero, C., Troi, A., 2020. What Are the Implications of Climate Change for Retrofitted Historic Buildings? A Literature Review. *Sustainability* 12, 7557. <https://doi.org/10.3390/su12187557>
- Harish, V.S.K.V., Kumar, A., 2016. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56, 1272–1292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>
- Harrestrup, M., Svendsen, S., 2016. Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades. *Build. Environ.* 99, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.019>
- Harrestrup, M., Svendsen, S., 2015. Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture. *Build. Environ.* 85, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.005>
- Havinga, L., Schellen, H., 2019. The impact of convective vapour transport on the hygrothermal risk of the internal insulation of post-war lightweight prefab housing. *Energy Build.* 204, 109418. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109418>
- Hendel, M., 2015. Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation : A Study of its Cooling Effects and Water Consumption in Paris (These de doctorat). Sorbonne Paris Cité.
- Hendel, M., Gutierrez, P., Colombert, M., Diab, Y., Royon, L., 2016. Measuring the effects of urban heat island mitigation techniques in the field: Application to the case of pavement-watering in Paris. *Urban Clim.* 16, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.02.003>
- Hens, H., 2002. Heat, air and moisture transfer in highly insulated building envelopes (HAMTIE). FaberMaunsell Limited.
- Hens, H.L.S.C., 2015. Combined heat, air, moisture modelling: A look back, how, of help? *Build. Environ., Fifty Year Anniversary for Building and Environment* 91, 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.009>
- Hens, H.S.L.C., 2012. *Building physics: heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises*, 2nd ed. ed. Ernst & Sohn, a Wiley Company, Berlin.
- Heo, Y., Ren, G., Sunikka-Blank, M., 2018. Investigating an Adequate Level of Modelling for Energy Analysis of Domestic Buildings.
- Hogan, R.J., 2019a. Flexible Treatment of Radiative Transfer in Complex Urban Canopies for Use in Weather and Climate Models. *Bound.-Layer Meteorol.* 173, 53–78. <https://doi.org/10.1007/s10546->

019-00457-0

Hogan, R.J., 2019b. An Exponential Model of Urban Geometry for Use in Radiative Transfer Applications. *Bound.-Layer Meteorol.* 170, 357–372. <https://doi.org/10.1007/s10546-018-0409-8>

Holmer, B., Eliasson, I., 1999. Urban–rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. *Int. J. Climatol.* 19, 989–1009. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199907\)19:9<989::AID-JOC410>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<989::AID-JOC410>3.0.CO;2-1)

Hong, T., Chen, Y., Lee, S.H., Piette, M.A., 2016. CityBES: A web-based platform to support city-scale building energy efficiency. *Urban Comput.* 14.

Hong, T., Xu, Y., Sun, K., Zhang, W., Luo, X., 2019. Visualizing Urban Microclimate and Quantifying its Impact on Building Energy Use in San Francisco, in: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Urban Building Energy Sensing, Controls, Big Data Analysis, and Visualization. Presented at the BuildSys '19: The 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation*, ACM, New York NY USA, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1145/3363459.3363536>

Horn, V.V., Dudás, A., Terjék, A., 2020. The Role of Façades in Solar Energy Utilization. *Buildings* 10, 209. <https://doi.org/10.3390/buildings10110209>

Howard, L., 1833. *THE CLIMATE OF LONDON.*

Huerto-Cardenas, H.E., Leonforte, F., Aste, N., Del Pero, C., Evola, G., Costanzo, V., Lucchi, E., 2020. Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations. *Build. Environ.* 180, 107081. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107081>

Huerto-Cardenas, H.E., Leonforte, F., Del Pero, C., Aste, N., Buzzetti, M., Adhikari, R.S., Miglioli, A., 2021. Impact of moisture buffering effect in the calibration of historical buildings energy models: a case study. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.* [9], [1]–[16].

Hukka, A., Viitanen, H.A., 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Sci. Technol.* 33, 475–485. <https://doi.org/10.1007/s002260050131>

Huszar, P., Halenka, T., Belda, M., Zak, M., Sindelarova, K., Miksovsky, J., 2014. Regional climate model assessment of the urban land-surface forcing over central Europe. *Atmospheric Chem. Phys.* 14, 12393–12413. <https://doi.org/10.5194/acp-14-12393-2014>

Huttner, S., 2012. Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met.

Huynen, M.M., Martens, P., Schram, D., Weijenberg, M.P., Kunst, A.E., 2001. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environ. Health Perspect.* 109, 463–470. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109463>

Ichinose, M., Inoue, T., Nagahama, T., 2017. Effect of retro-reflecting transparent window on anthropogenic urban heat balance. *Energy Build.* 157, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.051>

Insee, 2022. Logements ordinaires en 2019.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Ishii, T., Tsujimoto, M., Yoon, G., Okumiya, M., 2009. Cooling System with Water Mist Sprayers for Mitigation of Heat-island 2.

ISO 10211:2007, 2007. Ponts thermiques dans les bâtiments — Flux thermiques et températures superficielles — Calculs détaillés.

Jackson, M., 2005. Embodied Energy and Historic Preservation: A Needed Reassessment. *APT Bull. J. Preserv. Technol.* 36, 47–52.

Janssen et al, J., 2007. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *Int. J. Heat Mass Transf.* 50, 1128–1140.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.048>

Janssen, H., 2014. Simulation efficiency and accuracy of different moisture transfer potentials. *J. Build. Perform. Simul.* 7. <https://doi.org/10.1080/19401493.2013.852246>

Janssen, H., 2011. Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction? *Int. J. Heat Mass Transf.* 54, 1548–1562. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.034>

Janssen, H., Blocken, B., Carmeliet, J., 2007a. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *Int. J. Heat Mass Transf.* 50, 1128–1140.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.048>

Janssen, H., Blocken, B., Roels, S., Carmeliet, J., 2007b. Wind-driven rain as a boundary condition for HAM simulations: Analysis of simplified modelling approaches. *Build. Environ.* 42, 1555–1567.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.001>

Janssens, A., Woloszyn, M., Rode, C., Sasic-Kalagasidis, A., De Paepe, M., 2008. From EMPD to CFD – overview of different approaches for Heat Air and Moisture modeling in IEA Annex 41: IEA ECBCS Annex 41. *Proc. IEA ECBCS Annex 41 Closing Semin.* 9–20.

Jendritzky, G., Weihs, P., Batchvarova, E., Havenith, G., de Dear, R., 2008. The Universal Thermal Climate Index UTCI Goal and state of COST Action 730 and ISB Commission 6. Presented at the Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge, London.

Johansson, P., Geving, S., Hagentoft, C.-E., Jelle, B.P., Rognvik, E., Kalagasidis, A.S., Time, B., 2014. Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations. *Build. Environ.* 79, 31–45.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.014>

Johari, F., Peronato, G., Sadeghian, P., Zhao, X., Widén, J., 2020. Urban building energy modeling: State of the art and future prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 128, 109902.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109902>

- Kalamees, T., 2004. IDA ICE: the simulation tool for making the whole building energy- and HAM analysis.
- Kämpf, J., 2009. On the modelling and optimisation of urban energy fluxes. Lausanne, EPFL.
- Katal, A., Mortezaadeh, M., Wang, L. (Leon), 2019. Modeling building resilience against extreme weather by integrated CityFFD and CityBEM simulations. *Appl. Energy* 250, 1402–1417. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.192>
- KBOB, ecobau, IPB, 2016. Données des écobilans dans la construction.
- Kinnane, O., O’Hegarty, R., Reilly, A., 2019. What is a sustainable or low impact concrete? *Acad. J. Civ. Eng.* 37, 621–626. <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.90>
- Kolaitis, D.I., Malliotakis, E., Kontogeorgos, D.A., Mandilaras, I., Katsourinis, D.I., Founti, M.A., 2013. Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings. *Energy Build.* 64, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.004>
- Kompatscher, K., Kramer, R.P., Ankersmit, B., Schellen, H.L., 2019. Intermittent conditioning of library archives: Microclimate analysis and energy impact. *Build. Environ.* 147, 50–66. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.013>
- Kratzer, A., 1956. The climate of cities (das Stadtklima), 2nd edition. ed. Air Force Cambridge Research Laboratories.
- Krüger, E.L., Pearlmutter, D., 2008. The effect of urban evaporation on building energy demand in an arid environment. *Energy Build.* 40, 2090–2098. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.002>
- Krus, M., 1996. Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials theoretical principles and new test methods. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.
- Kubilay, A., Allegrini, J., Strebel, D., Zhao, Y., Derome, D., Carmeliet, J., 2020. Advancement in Urban Climate Modelling at Local Scale: Urban Heat Island Mitigation and Building Cooling Demand. *Atmosphere* 11, 1313. <https://doi.org/10.3390/atmos11121313>
- Kubilay, A., Derome, D., Carmeliet, J., 2018. Coupling of physical phenomena in urban microclimate: A model integrating air flow, wind-driven rain, radiation and transport in building materials. *Urban Clim.* 24, 398–418. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.012>
- Kubilay, A., Strebel, D., Derome, D., Carmeliet, J., 2021. Mitigation measures for urban heat island and their impact on pedestrian thermal comfort. *J. Phys. Conf. Ser.* 2069, 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012058>
- Künzel, H.M., 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB Verlag, Stuttgart.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., Kimura, F., 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteorol.* 101, 329–358.

- Laaidi Karine, Zeghnoun Abdelkrim, Dousset Bénédicte, Bretin Philippe, Vandentorren Stéphanie, Giraudet Emmanuel, Beaudeau Pascal, 2012. The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environ. Health Perspect.* 120, 254–259. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103532>
- Landsberg, H.E., 1981. *The Urban Climate*. Academic Press.
- Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), 1994. DOE2.1E-053 Source Code.
- Lawrence, M., Shea, A., Walker, P., De Wilde, P., 2013. Hygrothermal performance of bio-based insulation materials. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Constr. Mater.* 166, 257–263. <https://doi.org/10.1680/coma.12.00031>
- Lelarasme, E., Ruehli, A.E., Sangiovanni-Vincentelli, A.L., 1982. The Waveform Relaxation Method for Time-Domain Analysis of Large Scale Integrated Circuits. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* 1, 131–145. <https://doi.org/10.1109/TCAD.1982.1270004>
- Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, J.-L., Masson, V., 2013. Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Clim. Change* 116, 679–692. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0521-6>
- Lemonsu, A., Masson, V., 2002. Simulation of a Summer Urban Breeze Over Paris. *Bound.-Layer Meteorol.* 104, 463–490. <https://doi.org/10.1023/A:1016509614936>
- Lemonsu, A., Masson, V., Berthier, E., 2007. Improvement of the hydrological component of an urban soil–vegetation–atmosphere–transfer model. *Hydrol. Process.* 21, 2100–2111. <https://doi.org/10.1002/hyp.6373>
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., Pearlmutter, D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.* 5, 1377–1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>
- Li, H., Harvey, J., Ge, Z., 2014. Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of permeable pavement materials. *Constr. Build. Mater.* 65, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.004>
- Li, Q., Rao, J., Fazio, P., 2009. Development of HAM tool for building envelope analysis. *Build. Environ.* 44, 1065–1073. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.017>
- Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., Zhang, X., 2017. Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy* 141, 2445–2457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071>
- Libralato, M., De Angelis, A., Saro, O., Qin, M., Rode, C., 2021. Effects of considering moisture hysteresis on wood decay risk simulations of building envelopes. *J. Build. Eng.* 42, 102444. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102444>
- Lindberg, F., Holmer, B., Thorsson, S., 2008. SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *Int. J. Biometeorol.* 52, 697–713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>

- Liu, Y., Li, T., Peng, H., 2018. A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island. *Sci. Total Environ.* 634, 1119–1125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.041>
- Lokoshchenko, M.A., 2017. Urban Heat Island and Urban Dry Island in Moscow and Their Centennial Changes. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 56, 2729–2745. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0383.1>
- Loveday, D.L., Taki, A.H., 1996. Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade. *Int. J. Heat Mass Transf.* 39, 1729–1742. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00268-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00268-5)
- Lu, J., Marincioni, V., Orr, S.A., Altamirano-Medina, H., 2021. Climate Resilience of Internally-Insulated Historic Masonry Assemblies: Comparison of Moisture Risk under Current and Future Climate Scenarios. *Minerals* 11, 271. <https://doi.org/10.3390/min11030271>
- Luikov, A.V., 1975. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). *Int. J. Heat Mass Transf.* 18, 1–14. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90002-2)
- Maalouf, C., Le, A.D.T., Umurigirwa, S.B., Lachi, M., Douzane, O., 2014. Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France. *Energy Build.* 77, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040>
- Malagoli de Almeida, M., 2022. Etude de la rénovation hygrothermique de parois anciennes utilisant des matériaux biosourcés (PHD Thesis). INSA de Toulouse.
- Malys, L., 2012. Evaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments (These de doctorat). Ecole Centrale de Nantes.
- Malys, L., Musy, M., Inard, C., 2015. Microclimate and building energy consumption: Study of different coupling methods. *Adv. Build. Energy Res.* 9, 151–174.
- Maronga, B., Gross, G., Raasch, S., Banzhaf, S., Forkel, R., Heldens, W., Kanani-Sühring, F., Matzarakis, A., Mauder, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Schubert, S., Seckmeyer, G., Sieker, H., Winderlich, K., 2019. Development of a new urban climate model based on the model PALM – Project overview, planned work, and first achievements. *Meteorol. Z.* 28, 105–119. <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0909>
- Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M.O., Sühring, M., Raasch, S., 2015. The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geosci. Model Dev.* 8, 2515–2551. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2515-2015>
- Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M.W., 2002. An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models. *Bound.-Layer Meteorol.* 104, 261–304. <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>
- Martin, M., Berdahl, P., 1984. Characteristics of infrared sky radiation in the United States. *Sol. Energy* 33, 321–336. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90162-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90162-2)
- Martin, M., Wong, N.H., Hii, D.J.C., Ignatius, M., 2017. Comparison between simplified and detailed EnergyPlus models coupled with an urban canopy model. *Energy Build.* 157, 116–125.

- Martínez-Molina, A., Tort-Ausina, I., Cho, S., Vivancos, J.-L., 2016. Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 61, 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.018>
- Masson, V., 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theor. Appl. Climatol.* 84, 35–45. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0142-3>
- Masson, V., 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Bound.-Layer Meteorol.* 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Liousse, C., Pont, V., Lagouarde, J.-P., Voogt, J., Salmond, J., Oke, T.R., Hidalgo, J., Legain, D., Garrouste, O., Lac, C., Connan, O., Briottet, X., Lachéradé, S., Tulet, P., 2008. The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOU) experiment. *Meteorol. Atmospheric Phys.* 102, 135. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0289-4>
- Masson, V., Heldens, W., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., Burmeister, C., de Munck, C., Esch, T., Hidalgo, J., Kanani-Sühring, F., Kwok, Y.-T., Lemonsu, A., Lévy, J.-P., Maronga, B., Pavlik, D., Petit, G., See, L., Schoetter, R., Tornay, N., Votsis, A., Zeidler, J., 2020a. City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. *Urban Clim.* 31, 100536. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100536>
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., Voldoire, A., 2013a. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.* 6, 929–960. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., Voogt, J., 2020b. Urban Climates and Climate Change. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 45, 411–444. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>
- Masson, V., Marchadier, C., Bretagne, G., Moine, M.-P., Houet, T., Bonhomme, M., Morel, T., Viguie, V., Avner, P., Aguejda, R., Briottet, X., Doukari, O., 2013b. *Projet ACCLIMAT - Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine (Research Report)*.
- Masson, V., Pigeon, G., Lemonsu, A., Marchadier, C., Hidalgo, J., Bueno, B., De Munck, C., Daniel, M., Viguie, V., Genovese, E., Salagnac, J.-L., ZIBOUCHE, K., Long, N., Levellier, T., Bonhomme, M., AIT HADDOU, H., Adolphe, L., Nologues, L., 2014. *Projet MUSCADE, Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement Climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique (Research Report)*. ANR.
- Masson, V., Seity, Y., 2009. Including Atmospheric Layers in Vegetation and Urban Offline Surface Schemes. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 48, 1377–1397. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1866.1>
- Matzarakis, A., Matuschek, O., 2011. Sky view factor as a parameter in applied climatology - Rapid estimation by the SkyHelios model. *Meteorol. Z.* 20, 39–45. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0499>

- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *Int. J. Biometeorol.* 54, 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Mavrogianni, A., Wilkinson, P., Davies, M., Biddulph, P., Oikonomou, E., 2012. Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. *Build. Environ., Implications of a Changing Climate for Buildings* 55, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.003>
- McAdams, W.H., 1954. Heat Transmission.
- Mendes, N., Winkelmann, F.C., Lamberts, R., Philippi, P.C., 2003. Moisture effects on conduction loads. *Energy Build.* 35, 631–644. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00171-8)
- Mensinga, P., Straube, J., Schumacher, C., 2010. Assessing the freeze-thaw resistance of clay brick for interior insulation retrofit projects. *Therm. Perform. Exter. Envel. Whole Build. - 11th Int. Conf.*
- Milelli, M., Bassani, F., Garbero, V., Poggi, D., von Hardenberg, J., Ridolfi, L., 2023. Characterization of the Urban Heat and Dry Island effects in the Turin metropolitan area. *Urban Clim.* 47, 101397. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101397>
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2018. Le Plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH).
- Mira, M.A., Espanet, C., De Larochelambert, T., Giurgea, S., Nika, P., 2013. Multi-physics analysis of a magnetocaloric cooling system, in: *International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*. Budapest, Hungary.
- Mirsadeghi, M., Costola, D., Blocken, B., Hensen, J.L., 2013. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. *Appl. Therm. Eng.* 56, 134–151.
- Mitchell, V.G., Mein, R.G., McMahon, T.A., 2001. Modelling the urban water cycle. *Environ. Model. Softw.* 16, 615–629. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00029-9)
- Mokhtari, L., Delinchant, B., Chevalier, T., Coulomb, J.-L., 2009. Comparing Weak and Strong PEEC-MoM Coupling, in: *COMPUMAG 2009*. Florianopolis, Brazil, p. pp 83-84.
- Monin, A.-S., Obukhov, A.-M., 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr Akad Nauk SSSR Geophys* 24, 163–187.
- Morelli, M., Rønby, L., Mikkelsen, S.E., Minzari, M.G., Kildemoes, T., Tommerup, H.M., 2012. Energy retrofitting of a typical old Danish multi-family building to a “nearly-zero” energy building based on experiences from a test apartment. *Energy Build.* 54, 395–406. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.046>
- Moriwaki, R., Watanabe, K., Morimoto, K., 2013. Urban dry island phenomenon and its impact on cloud base level. *J. JSCE* 1, 521–529. https://doi.org/10.2208/journalofjsce.1.1_521
- Mortezazadeh, M., 2019. CityFFD – City Fast Fluid Dynamics Model for Urban Microclimate

Simulations. Concordia University.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12, 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>

Mualem, Y., 1974. A conceptual model of hysteresis. *Water Resour. Res.* 10, 514–520. <https://doi.org/10.1029/WR010i003p00514>

Munarim, U., Ghisi, E., 2016. Environmental feasibility of heritage buildings rehabilitation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58, 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.334>

Musy, M., Maillard, P., Azam, M.-H., Bailly, J.-B., Barel, E., Bozonnet, E., CALMET, I., Gros, A., Inard, C., Morille, B., Mouquet, D., Smadi, I., Tavares, R., Zaba, S., 2017. EVA (Eau, Végétation, Albédo) EVALUATION QUANTITATIVE DE L'IMPACT SUR LE MICROCLIMAT, LES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DES BATIMENTS ET LE CONFORT INTERIEUR ET EXTERIEUR DE TROIS PRINCIPES DE RAFRAICHISSEMENT URBAIN. APPLICATION AU QUARTIER DE LA PART-DIEU A LYON (Research Report). ADEME ; IRSTV FR CNRS 2488.

Nakhi, A.E., 1995. ADAPTIVE CONSTRUCTION MODELLING WITHIN WHOLE BUILDING DYNAMIC SIMULATION. University of Strathclyde, Glasgow, UK.

NF EN ISO 7730, 2006. Ergonomie des ambiances thermiques Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.

NF EN ISO 15148, 2003. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - - Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle.

NF EN ISO 15927-3, 2009. Performance hygrothermique des bâtiments - Calcul et présentation des données climatiques - Partie 3 : calcul d'un indice de pluie battante pour surfaces verticales à partir de données horaires de vent et de pluie.

Nicolai, A., 2007. Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials. *Mech. Aerosp. Eng. Theses Diss.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2016.2088>

Nicolai, A., Zhang, J., Grunewald, J., 2007. COUPLING STRATEGIES FOR COMBINED SIMULATION USING MULTIZONE AND BUILDING ENVELOPE MODELS, in: Undefined. Presented at the IBPSA, Beijing.

Noilhan, J., 1981. A model for the net total radiation flux at the surfaces of a building. *Build. Environ.* 16, 259–266. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(81\)90004-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(81)90004-4)

Noilhan, J., Mahfouf, J.-F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob. Planet. Change* 13, 145–159.

Oberkampf, W.L., Roy, C.J., 2010. *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511760396>

Ojanen, T., Peuhkuri, R.H., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Vinha, J., Salminen, K., 2011. Classification

of material sensitivity – New approach for mould growth modeling. Proc. 9th Nord. Symp. Build. Phys. Tamp.

Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., Salminen, K., 2010. Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials.

Oke, T.R., 2006. INITIAL GUIDANCE TO OBTAIN REPRESENTATIVE METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AT URBAN SITES INSTRUMENTS AND OBSERVING METHODS REPORT No. 8 51.

Oke, T.R., 2004. SITING AND EXPOSURE OF METEOROLOGICAL INSTRUMENTS AT URBAN SITES 14.

Oke, T.R., 2002. Boundary Layer Climates. Routledge.

Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. Energy Build. 11, 103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)

Oke, T.R., 1987. Boundary Layer Climates, 2nd édition. ed. Routledge, London New York.

Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. Q. J. R. Meteorol. Soc. 108, 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>

Oke, T.R., 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. Atmosphere 14, 268–277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>

Oleson, K.W., Bonan, G.B., Feddema, J., Jackson, T., 2011. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. Int. J. Climatol. 31, 1848–1865. <https://doi.org/10.1002/joc.2201>

Oleson, K.W., Bonan, G.B., Feddema, J., Vertenstein, M., 2008. An Urban Parameterization for a Global Climate Model. Part II: Sensitivity to Input Parameters and the Simulated Urban Heat Island in Offline Simulations. J. Appl. Meteorol. Climatol. 47, 1061–1076. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1598.1>

Ongpeng, J.M.C., Rabe, B.I.B., Razon, L.F., Aviso, K.B., Tan, R.R., 2022. A multi-criterion decision analysis framework for sustainable energy retrofit in buildings. Energy 239, 122315. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122315>

Orosa, J.A., Oliveira, A.C., 2012. A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment. Renew. Energy 37, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.009>

Orr, S.A., Viles, H., 2018. Characterisation of building exposure to wind-driven rain in the UK and evaluation of current standards. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 180, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.07.013>

Osanyintola, O.F., Simonson, C.J., 2006. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. Energy Build. 38, 1270–1282. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.026>

Padfield, T., 1999. The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity. Department of Structural Engineering and Materials, The Technical University of Denmark.

Palyvos, J.A., 2008. A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Appl. Therm. Eng.* 28, 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.005>

Panico, S., Larcher, M., Marincioni, V., Troi, A., Baglivo, C., Congedo, P.M., 2023. Identifying key parameters through a sensitivity analysis for realistic hygrothermal simulations at wall level supported by monitored data. *Build. Environ.* 229, 109969. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109969>

Papadopoulos, A.M., 2005. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy Build.* 37, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>

Parison, S., Hendel, M., Grados, A., Royon, L., 2020. Analysis of the Heat Budget of Standard, Cool and Watered Pavements Under Lab Heat-Wave Conditions. *Energy Build.* 110455. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110455>

Patankar, S., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. CRC Press, Boca Raton.

Perez, N., Riederer, P., Inard, C., Partenay, V., 2015. Thermal building modelling adapted to district energy simulation. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3714.2163/1>

Pfafferott, J., Reißmann, S., Sühling, M., Kanani-Sühling, F., Maronga, B., 2021. Building indoor model in PALM-4U: indoor climate, energy demand, and the interaction between buildings and the urban microclimate. *Geosci. Model Dev.* 14, 3511–3519. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3511-2021>

Philip, J.R., De Vries, D.A., 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Union* 38, 222. <https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222>

Pickles, D., 2016. *Energy Efficiency and Historic Buildings: Insulating Solid Walls*. Historic England in association with Liverpool University Press, England.

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., Masson, V., 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *Int. J. Climatol.* 27, 1969–1981. <https://doi.org/10.1002/joc.1530>

Pigeon, G., Zibouche, K., Bueno, B., Le Bras, J., Masson, V., 2014. Improving the capabilities of the Town Energy Balance model with up-to-date building energy simulation algorithms: an application to a set of representative buildings in Paris. *Energy Build.* 76, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.038>

Piot, A., 2009. *Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique* (These de doctorat). Lyon, INSA.

Plate, E. J., 1995. Urban Climates and Urban Climate Modelling: An Introduction, in: Cermak, J.E., Davenport, A.G., Plate, Erich J., Viegas, D.X. (Eds.), *Wind Climate in Cities*, NATO ASI Series. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 23–39. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_2

Ponsar, L., Couturier, B., Jary, P., Pouvesle, C., 2017. Confort thermique en milieu urbain Quelques outils disponibles pour l'aide à la décision ?

- Popa, I., 2002. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU TRANSFERT THERMIQUE - Méthode des volumes finis.
- Posani, M., 2021. THERMAL INSULATION SOLUTIONS FOR HISTORIC BUILDINGS: FEASIBILITY, EFFICACY, COMPATIBILITY (PhD Thesis).
- Posani, M., Veiga, M., Freitas, V., 2019. Towards Resilience and Sustainability for Historic Buildings: A Review of Envelope Retrofit Possibilities and a Discussion on Hygric Compatibility of Thermal Insulations. *Int. J. Archit. Herit.* <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1650133>
- Priesack, E., Durner, W., 2006. Closed-Form Expression for the Multi-Modal Unsaturated Conductivity Function. *Vadose Zone J.* 5, 121–124. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0066>
- Raad, A., 2017. Co-simulation et optimisation multi-critères en conception de bâtiment, par approche d'interopérabilité de services (Theses). Université Grenoble Alpes.
- Raad, A., Reinbold, V., Delinchant, B., Wurtz, F., 2015. ENERGY BUILDING CO-SIMULATION BASED ON THE WRM ALGORITHM FOR EFFICIENT SIMULATION OVER FMU COMPONENTS OF WEB SERVICE, in: *Building Simulation 2015*. Hyderabad, India.
- Raasch, S., Sch, M., 2001. PALM-A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorol Z* 10, 363–372. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2001/0010-0363>
- Rasmussen, T., 2011. Retrofitting Listed Buildings: Measures, Savings and Requirements. *Open Constr. Build. Technol. J.* 5. <https://doi.org/10.2174/1874836801105010174>
- Raupach, M.R., Antonia, R.A., Rajagopalan, S., 1991. Rough-Wall Turbulent Boundary Layers. *Appl. Mech. Rev.* 44, 1–25. <https://doi.org/10.1115/1.3119492>
- Raupach, M.R., Thom, A.S., Edwards, I., 1980. A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces. *Bound.-Layer Meteorol.* 18, 373–397. <https://doi.org/10.1007/BF00119495>
- Redon, E., 2017. Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique (These de doctorat). Toulouse 3.
- Redon, E., Lemonsu, A., Masson, V., 2020. An urban trees parameterization for modeling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0). *Geosci. Model Dev.* 13, 385–399. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-385-2020>
- Redon, E.C., Lemonsu, A., Masson, V., Morille, B., Musy, M., 2017. Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geosci. Model Dev.* 10, 385–411. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-385-2017>
- Ren, Z., Razek, A., 1994. A strong coupled model for analysing dynamic behaviours of non-linear electromechanical systems. *IEEE Trans. Magn.* 30, 3252–3255. <https://doi.org/10.1109/20.312631>
- Riederer, P., Partenay, V., Perez, N., Nocito, C., Trigance, R., Guiot, T., 2015. Development of a simulation platform for the evaluation of district energy system performances, in: *Fourteenth International IBPSA Conference*. pp. 2499–2506.

- Roberti, F., Oberegger, U.F., Gasparella, A., 2015. Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperatures: Methodology and case study. *Energy Build.* 108, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.010>
- Roberti, F., Oberegger, U.F., Lucchi, E., Troi, A., 2017. Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process. *Energy Build.* 138, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.028>
- Robinson, D., Haldi, F., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., Wilke, U., 2009. CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning, in: *Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference*. pp. 1083–1090.
- Robinson, D., Stone, A., 2005. Holistic radiation modelling with a fast simplified radiosity algorithm, in: *Proc. Ninth Int. IBPSA Conf., Building Simulation*. Citeseer.
- Robitu, M., 2005. Étude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs (These de doctorat). École polytechnique de l'Université de Nantes.
- Rode, C., Grau, K., 2003. Whole Building Hygrothermal Simulation Model. *ASHRAE Trans.* 109.
- Rode Pedersen, C., 1990. Combined heat and moisture transfer in building constructions. Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby (Denmark). Lab. for Varmeisolering.
- Rodler, A., Guernouti, S., Musy, M., Bouyer, J., 2018. Thermal behaviour of a building in its environment: Modelling, experimentation, and comparison. *Energy Build.* 168, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.008>
- Rodriguez, F., Andrieu, H., Morena, F., 2008. A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. *J. Hydrol.* 351, 268–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.007>
- Rosso, F., Golasi, I., Castaldo, V.L., Piselli, C., Pisello, A.L., Salata, F., Ferrero, M., Cotana, F., de Lieto Vollaro, A., 2018. On the impact of innovative materials on outdoor thermal comfort of pedestrians in historical urban canyons. *Renew. Energy* 118, 825–839. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.074>
- Rosso, F., Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Cotana, F., Ferrero, M., 2017a. Smart cool mortar for passive cooling of historical and existing buildings: experimental analysis and dynamic simulation. *Energy Procedia* 134, 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.560>
- Rosso, F., Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Fabiani, C., Cotana, F., Ferrero, M., Jin, W., 2017b. New cool concrete for building envelopes and urban paving: Optics-energy and thermal assessment in dynamic conditions. *Energy Build.* 151, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.051>
- Rosso, F., Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Ferrero, M., Cotana, F., 2017c. On Innovative Cool-Colored Materials for Building Envelopes: Balancing the Architectural Appearance and the Thermal-Energy Performance in Historical Districts. *Sustainability* 9, 2319. <https://doi.org/10.3390/su9122319>
- Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, C.W., Everett, D.H., Haynes, J.M., Pernicone, N., Ramsay, J.D.F.,

- Sing, K.S.W., Unger, K.K., 1994. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 66, 1739–1758. <https://doi.org/10.1351/pac199466081739>
- Rowley, F.B., Algren, A.B., Blackshaw, J.L., 1930. Surface conductances as affected by air velocity, temperature and character of surface. *ASHRAE Trans* 36, 429–446.
- Rowley, F.B., Eckley, W.A., 1932. Surface coefficients as affected by wind direction. *ASHRAE Trans* 38, 33–46.
- Şahin, C.D., Arsan, Z.D., Tunçoku, S.S., Broström, T., Akkurt, G.G., 2015. A transdisciplinary approach on the energy efficient retrofitting of a historic building in the Aegean Region of Turkey. *Energy Build.* 96, 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.018>
- Saïd, M.N.A., Brown, W.C., Shirliffe, C.J., Maurenbrecher, A.H.P., 1999. Monitoring of the building envelope of a heritage house: a case study. *Energy Build.* 30, 211–219. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00031-0)
- Salgado, R., Le Moigne, P., 2010. Coupling of the FLake model to the Surfex externalized surface model. *Boreal Environ. Res.* 15, 231–244.
- Salim, M.H., Schlünzen, K.H., Grawe, D., Boettcher, M., Gierisch, A.M.U., Fock, B.H., 2018. The microscale obstacle-resolving meteorological model MITRAS v2.0: model theory. *Geosci. Model Dev.* 11, 3427–3445. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3427-2018>
- Saneinejad, S., 2013. The influence of evaporative cooling on the micro-climate and thermal comfort in a street canyon (Doctoral Thesis). ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-009910063>
- Saneinejad, S., Moonen, P., Carmeliet, J., 2014. Coupled CFD, radiation and porous media model for evaluating the micro-climate in an urban environment. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 128, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.02.005>
- Saneinejad, S., Moonen, P., Defraeye, T., Derome, D., Carmeliet, J., 2012. Coupled CFD, radiation and porous media transport model for evaluating evaporative cooling in an urban environment. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 104–106, 455–463. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.006>
- Santamouris, M., Adnot, J., 2004. *Cooling the cities : rafraîchir les villes*. Presse des Mines.
- Sasic Kalagasidis, A., Bednar, T., Hagentoft, C.-E., 2004. The evaluation of the interface moisture conductivity between control volumes. Comparison between linear, harmonic and integral averaging, in: *9th International Conference on Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*. Clearwater Beach, Florida, 2004.
- Scheffler, G.A., 2008. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage. Dresden University of Technology.
- Schellen, H.L., A. W.M. Schijndel, V., Brigggen, P.M., 2008. The use of COMSOL for Building Constructions Engineering regarding Heat and Moisture transport. Presented at the 2008 European COMSOL Conference, Hannover, Germany, pp. 1–8.
- Schlünzen, K.H., Hinneburg, D., Knoth, O., Lambrecht, M., Leitzl, B., López, S., Lüpkes, C., Pankus,

- H., Renner, E., Schatzmann, M., Schoenemeyer, T., Trepte, S., Wolke, R., 2003. Flow and Transport in the Obstacle Layer: First Results of the Micro-Scale Model MITRAS. *J. Atmospheric Chem.* 44, 113–130. <https://doi.org/10.1023/A:1022420130032>
- Schoetter, R., Masson, V., Bourgeois, A., Pellegrino, M., Lévy, J.-P., 2017. Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v. 8.2). *Geosci. Model Dev.* 10, 2801–2831. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2801-2017>
- Seng, B., 2018. Etude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique de blocs préfabriqués en béton de chanvre (These de doctorat). Toulouse 3.
- Shi, Y., Zhang, Y., 2022. Urban morphological indicators of urban heat and moisture islands under various sky conditions in a humid subtropical region. *Build. Environ.* 214, 108906. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108906>
- Shokri Kuehni, S.M.S., Bou-Zeid, E., Webb, C., Shokri, N., 2016. Roof cooling by direct evaporation from a porous layer. *Energy Build.* 127, 521–528. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.019>
- SIA, 2020. L'énergie grise - Établissement du bilan écologique pour la construction de bâtiments.
- Sidler, 2003. L'Inertie thermique en climat méditerranéen. Montpellier, p. 15.
- Simon, H., Bruse, M., Kissel, L., 2017. Evaluation of ENVI-met's multiple-node model and estimation of indoor climate. Presented at the PLEA 2017 - Passive and Low Energy Architecture, Edinburgh.
- Smit, B., Wandel, J., 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Glob. Environ. Change, Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change* 16, 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>
- Sola, A., Corchero, C., Salom, J., Sanmarti, M., 2020. Multi-domain urban-scale energy modelling tools: A review. *Sustain. Cities Soc.* 54, 101872. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101872>
- Sola, A., Corchero, C., Salom, J., Sanmarti, M., 2018. Simulation tools to build urban-scale energy models: A review. *Energies* 11, 3269.
- Sontag, L., Nicolai, A., Grunewald, J., 2014. Influence of Ice Formation on Thermal Conductivity and Liquid Water Conductivity in Hygrothermal Transport Models.
- Sontag, L., Nicolai, A., Vogelsang, S., 2013. Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin (Technical report).
- Soudani, L., Fabbri, A., Morel, J.-C., Woloszyn, M., Chabriac, P.-A., Wong, H., Grillet, A.-C., 2016. Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials. *Energy Build.* 116, 498–511. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.025>
- Spitz, C., Woloszyn, M., Buhé, C., Labat, M., 2013. SIMULATING COMBINED HEAT AND MOISTURE TRANSFER WITH ENERGYPLUS: AN UNCERTAINTY STUDY AND COMPARISON WITH EXPERIMENTAL DATA. Presented at the 13th Conference of International

Building Performance Simulation Association, Chambéry, France.

Stavropoulos-Laffaille, X., Chancibault, K., Brun, J.-M., Lemonsu, A., Masson, V., Boone, A., Andrieu, H., 2018. Improvements to the hydrological processes of the Town Energy Balance model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment. *Geosci. Model Dev.* 11, 4175–4194. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4175-2018>

Stephan, E., 2014. Méthode d'aide à la décision multicritère des stratégies de réhabilitation des bâtiments anciens en pierre calcaire : application au patrimoine en tuffeau (Theses). École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE].

Stephan, E., Caucheteux, A., Cantin, R., Tasca-Guernouti, S., Michel, P., 2013. Sensitivity Analysis of an Energyplus Simulation Model of the Ambient Humidity in an Old Building. *Int Building Performance Simulation Assoc-Ibpsa*, Toronto.

Steuri, B., Bender, S., Cortekar, J., 2020. Successful user-science interaction to co-develop the new urban climate model PALM-4U. *Urban Clim.* 32, 100630. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100630>

Stone, B., Mallen, E., Rajput, M., Broadbent, A., Krayenhoff, E.S., Augenbroe, G., Georgescu, M., 2021. Climate change and infrastructure risk: Indoor heat exposure during a concurrent heat wave and blackout event in Phoenix, Arizona. *Urban Clim.* 36, 100787. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100787>

Straube, J., 2010. Simplified prediction of driving rain on buildings: ASHRAE 160P and WUFI 4.0. *Build. Sci. Press* 148, 1–16.

Straube, J., Burnett, E., 2000. Simplified prediction of driving rain deposition.

Straube, J., Schumacher, C., 2007. Interior Insulation Retrofits of Load-Bearing Masonry Walls in Cold Climates. *J. Green Build.* 2, 42–50. <https://doi.org/10.3992/jgb.2.2.42>

Swan, L.G., Ugursal, V.I., 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1819–1835.

Taniguchi, M., Burnett, W.C., Ness, G.D., 2008. Integrated research on subsurface environments in Asian urban areas. *Sci. Total Environ.* 404, 377–392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.033>

Taoukil, D., El bouardi, A., Sick, F., Mimet, A., Ezbakhe, H., Ajzoul, T., 2013. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Constr. Build. Mater.* 48, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.067>

Tariku, F., Kumaran, K., Fazio, P., 2010. Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer. *Int. J. Heat Mass Transf.* 53, 3111–3120. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.016>

Tennekes, H., Lumley, J.L., 1972. *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

Thorel, M., 2014. Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale (These de doctorat). Grenoble.

- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., van Heijst, G.J.F., 2017. A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80, 1613–1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- Tornay, N., Schoetter, R., Bonhomme, M., Faraut, S., Masson, V., 2017. GENIUS: A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations. *Urban Clim.* 20, 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.03.002>
- Torres-Rivas, A., Palumbo, M., Haddad, A., Cabeza, L.F., Jimenez, L., Boer, D., 2018. Multi-objective optimisation of bio-based thermal insulation materials in building envelopes considering condensation risk. *Appl. Energy* 224, 602–614. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.079>
- Trcka, M., Hensen, J., Wijsman, A.J., 2006a. Integrated building and system simulation using run-time coupled distributed models.
- Trcka, M., Hensen, J., Wijsman, A.J., 2006b. Distributed building performance simulation: a novel approach to overcome legacy code limitations. *HVACR Res.* 12, 621–640. <https://doi.org/10.1080/10789669.2006.10391198>
- Trčka, M., Hensen, J.L.M., Wetter, M., 2009. Co-simulation of innovative integrated HVAC systems in buildings. *J. Build. Perform. Simul.* 2, 209–230. <https://doi.org/10.1080/19401490903051959>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., Theodosiou, T., 2018. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustain. Cities Soc.* 43, 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>
- van Aarle, M., Schellen, H., van Schijndel, J., 2015. Hygro Thermal Simulation to Predict the Risk of Frost Damage in Masonry; Effects of Climate Change. *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 2536–2541. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.268>
- Vandemeulebroucke, I., Calle, K., Caluwaerts, S., De Kock, T., Van Den Bossche, N., 2019. Does historic construction suffer or benefit from the urban heat island effect in Ghent and global warming across Europe? *Can. J. Civ. Eng.* 46, 1032–1042. <https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0594>
- Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., Van Den Bossche, N., 2021. Factorial Study on the Impact of Climate Change on Freeze-Thaw Damage, Mould Growth and Wood Decay in Solid Masonry Walls in Brussels. *Buildings* 11, 134. <https://doi.org/10.3390/buildings11030134>
- Vandemeulebroucke, I., Kotova, L., Caluwaerts, S., Van Den Bossche, N., 2023. Degradation of brick masonry walls in Europe and the Mediterranean: Advantages of a response-based analysis to study climate change. *Build. Environ.* 230, 109963. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109963>
- Vanderschelden, B., Calle, K., Van Den Bossche, N., 2022. On the potential of clustering approaches for hygrothermal material properties based on three degradation risks in solid masonry constructions. *J. Build. Phys.* 46, 1–41. <https://doi.org/10.1177/17442591221085734>
- Verbeke, S., Audenaert, A., 2018. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 2300–2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>
- Vereecken, E., Roels, S., 2014. A comparison of the hygric performance of interior insulation systems: A hot box–cold box experiment. *Energy Build.* 80, 37–44.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.033>

Vereecken, E., Roels, S., 2012. Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Build. Environ.* 51, 296–310. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.003>

Vereecken, E., Van Gelder, L., Janssen, H., Roels, S., 2015a. Interior insulation for wall retrofitting – A probabilistic analysis of energy savings and hygrothermal risks. *Energy Build.* 89, 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.031>

Vereecken, E., Vanoirbeek, K., Roels, S., 2015b. Towards a more thoughtful use of mould prediction models: A critical view on experimental mould growth research. *J. Build. Phys.* 39, 102–123. <https://doi.org/10.1177/1744259115588718>

Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., Zirkelbach, D., 2015. Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models. Presented at the Energy Procedia. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.165>

Viitanen, H., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Vinha, J., Lähdesmäki, K., Salminen, K., 2011. Mould growth modelling to evaluate durability of materials: 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, XII DBMC. XII DBMC Int. Conf. Durab. Build. Mater. Compon. 409–416.

Vogelsang, S., Fechner, H., Nicolai, A., 2013. Delphin 6 Material File Specification.

Voogt, J.A., Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ., Urban Remote Sensing* 86, 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)

Walker, R., Pavía, S., 2015. Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings. *Build. Environ.* 94, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.033>

Walton, G.N., 1983. Thermal analysis research program reference manual.

Walton, G.N., 1980. A new algorithm for radiant interchange in room loads calculations. ASHRAE.

Wang, J., Meng, Q., Tan, K., Zhang, L., Zhang, Y., 2018. Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment. *Build. Environ.* 140, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.033>

Wang, Z., Song, J., Chan, P.W., Li, Y., 2021. The urban moisture island phenomenon and its mechanisms in a high-rise high-density city. *Int. J. Climatol.* 41, E150–E170. <https://doi.org/10.1002/joc.6672>

Wardeh, Y., Kinab, E., Escadeillas, G., Rahme, P., Ginestet, S., 2022. Review of the optimization techniques for cool pavements solutions to mitigate Urban Heat Islands. *Build. Environ.* 223, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109482>

Webb, A.L., 2017. Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 77, 748–759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>

Williams Portal, N., 2011. Evaluation of heat and moisture induced stress and strain of historic building materials and artefacts.

- Winkler, M., Steuri, B., Stalder, S., Antretter, F., 2020. Evaluating the Practicability of the new Urban Climate Model PALM-4U using a Living-Lab Approach. *E3S Web Conf.* 172, 11010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017211010>
- Wise, F., Moncaster, A., Jones, D., Dewberry, E., 2019. Considering embodied energy and carbon in heritage buildings – a review. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 329, 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012002>
- Woloszyn, M., Kalamees, T., Abadie, M., Steeman, M., Sasic Kalagasidis, A., 2009. The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings. *Build. Environ.* 44, 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.017>
- Woloszyn, M., Rode, C., 2008. Tools for Performance Simulation of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings. *Build. Simul.* 1, 5–24. <https://doi.org/10.1007/s12273-008-8106-z>
- Xiao, Q., McPherson, E.G., Simpson, J.R., Ustin, S.L., 2007. Hydrologic processes at the urban residential scale. *Hydrol. Process.* 21, 2174–2188. <https://doi.org/10.1002/hyp.6482>
- Yamada, H., Yoon, G., Okumiya, M., Okuyama, H., 2008. Study of cooling system with water mist sprayers: Fundamental examination of particle size distribution and cooling effects. *Build. Simul.* 1, 214–222. <https://doi.org/10.1007/s12273-008-8115-y>
- Yan, T., Sun, Z., Xu, X., Wan, H., Huang, G., 2019. Development of a simplified dynamic moisture transfer model of building wall layer of hygroscopic material. *Energy* 183, 1278–1294. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.033>
- Yang, J., Fu, H., Qin, M., 2015. Evaluation of Different Thermal Models in EnergyPlus for Calculating Moisture Effects on Building Energy Consumption in Different Climate Conditions. *Procedia Eng., The 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) joint with the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), 12-15 July 2015, Tianjin, China* 121, 1635–1641. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.194>
- Yang, J., Tham, K.W., Lee, S.E., Santamouris, M., Sekhar, C., Cheong, D.K.W., 2017. Anthropogenic heat reduction through retrofitting strategies of campus buildings. *Energy Build.* 152, 813–822. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.051>
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., Meng, Q., 2012. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy Build.* 54, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.042>
- Zhai, Z., Chen, Q., Haves, P., Klems, J.H., 2002. On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs. *Build. Environ.* 37, 857–864. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00054-9)
- Zhang, K., Cao, C., Chu, H., Zhao, L., Zhao, J., Lee, X., 2023. Increased heat risk in wet climate induced by urban humid heat. *Nature* 617, 738–742. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05911-1>
- Zhang, M., Qin, M., Rode, C., Chen, Z., 2017. Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption. *Appl. Therm. Eng.* 124, 337–345.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.173>

Zhang, Z., Thiéry, M., Baroghel-Bouny, V., 2014. A review and statistical study of existing hysteresis models for cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* 57, 44–60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.008>

Zhao, J., 2012. Development of a Novel Statistical Method and Procedure for Material Characterization and a Probabilistic Approach to Assessing the Hygrothermal Performance of Building Enclosure Assemblies.

Zhou, X., Carmeliet, J., Sulzer, M., Derome, D., 2020. Energy-efficient mitigation measures for improving indoor thermal comfort during heat waves. *Appl. Energy* 278, 115620. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115620>

Zhou, X., Kubilay, A., Derome, D., Carmeliet, J., 2023. Comparison of wind-driven rain load on building facades in the urban environment and open field: A case study on two buildings in Zurich, Switzerland. *Build. Environ.* 233, 110038. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110038>

Liste des figures

Figure 1.1 – Présentation du bilan d'énergie en zone rurale (à gauche) et en zone urbaine (à droite), le jour (en haut) et la nuit (en bas) (Météo France).....	10
Figure 1.2 – Schéma regroupant les facteurs naturels et humains provoquant le phénomène de l'îlot de Chaleur Urbain (C. Dubois, 2014).....	10
Figure 1.3 – Composition du bilan d'humidité urbain avec les termes puits (a) et les termes sources (b) obtenu à partir de l'application d'un modèle de climat urbain à la ville de Hong Kong (Wang et al., 2021).....	11
Figure 1.4 – Graphique du nombre de décès journalier et des températures minimales (en bleu) et maximales (en rouge) en France en aout 2003 (INSERM).....	13
Figure 1.5 – Récapitulatif des potentiels impacts des transferts d'humidité à travers les parois	16
Figure 1.6 – Schéma de la Couche Limite Urbaine (Adaptation de Oke (1987) par Bouyer (2009))	18
Figure 1.7 – Schéma représentant les différents flux d'énergie et de rayonnement au niveau des zones urbaines et rurales (Oke, 1987).....	20
Figure 1.8 – Schéma du bilan radiatif au niveau de la canopée urbaine (Colombert 2008).....	20
Figure 1.9 – Schéma des composantes du rayonnement solaire global (Duffie et Beckman, 2013)	21
Figure 1.10 – Schéma de la contribution des termes au bilan hydrique en zone urbaine (Oke, 1987).....	22
Figure 1.11 – Échelles des différentes catégories de simulation du bâti : Building Energy Simulation (BES), Urban Building Energy Simulation (UBES), City Energy Simulation (CES) (Frayssinet et al. 2018).....	25
Figure 1.12 – Représentation d'outils permettant d'étudier le climat urbain, en fonction de leurs échelles spatiotemporelles.....	27
Figure 1.13 – Représentation des sous-modèle de ENVI-met (Huttner, 2012).....	28
Figure 1.14 – Schéma récapitulatif du contenu de PALM 4U (https://palm.muk.uni-hannover.de)	30
Figure 1.15 – Schéma des trois principaux types de modèles méso : (a) approche par dalle, (b) modèle de canopée urbaine simple couche et (c) modèle de canopée urbaine multicouche (Garuma, 2018).....	32

Figure 1.16 – Schéma du modèle urbain conçu pour étudier le phénomène d’îlot d’humidité urbain (Wang et al., 2021)	33
Figure 1.17 – Schéma d’un milieu poreux composé de différentes phases (Busser 2018)	35
Figure 1.18 – Isotherme de sorption d’un matériau hygroscopique représentant une hystérésis entre l’adsorption et la désorption (Piot, 2009)	41
Figure 1.19 – Mécanismes de transfert d’humidité en fonction de la teneur en eau des pores (Adaptation de Krus (1996) par Piot (2009)).....	41
Figure 1.20 – Interactions entre la paroi et les environnements intérieur et extérieur (Ferroukhi, 2015).....	44
Figure 1.21 – Schéma de principe de la résolution par calcul numérique adapté de Popa (2002)	49
Figure 1.22 – Illustration de la teneur en eau et de l’humidité relative à l’interface entre deux matériaux (Tariku et al., 2010).....	52
Figure 1.23 – Schéma du couplage externe statique unidirectionnel (Garci, 2016)	55
Figure 1.24 – Schéma de la méthode de relaxation des formes d’onde (WRM) appliquée entre deux programmes (appelés $\Sigma 1$ et $\Sigma 2$) dont les entrées et sorties sont notées respectivement e_1, e_2, s_1 et s_2 (Raad, 2017).....	55
Figure 1.25 – Schéma des deux types de co-simulation entre deux programmes (Azam, 2021).56	
Figure 2.1 – Approche de résolution découplée résolvant l’équation de la masse puis l’équation de la chaleur	66
Figure 2.2 – Grille de discrétisation spatiotemporelle pour une variable inconnue X, en appliquant le schéma IMEX.....	67
Figure 2.3 – Schéma du fonctionnement de la méthode numérique proposée	68
Figure 2.4 – Algorithme décrivant le Test 2 pour la pression capillaire au niveau de la surface extérieure	69
Figure 2.5 – Schéma de la configuration typique simulée.....	72
Figure 2.6 – Zone urbaine simulée dans EnergyPlus pour définir les conditions aux limites, avec une vue de la façade est du bâtiment simulé, en centre-ville de Cahors	73
Figure 2.7 – Les versions de maillage appliquées à la paroi en brique isolée à partir de chaux-chanvre.....	81
Figure 2.8 – Principales variables utilisées pour calculer les conditions aux limites extérieures : température et humidité relative extérieure (a), coefficient de convection thermique (b),	

rayonnement solaire incident à la façade (c) et flux de pluie incident à la paroi (d), du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors.....	82
Figure 2.9 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de la pression de vapeur (à droite) au niveau de la surface extérieure du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors.....	82
Figure 2.10 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de la pression de vapeur (à droite) au niveau de la surface intérieure du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors	83
Figure 2.11 – Profil de la température (à gauche) et de la teneur en eau (à droite) dans la paroi le 8 juillet 2016 à 9h30 à Cahors.....	83
Figure 2.12 – Évolution temporelle du flux thermique (à gauche) et du flux massique (à droite) au niveau de la surface extérieure du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors.....	84
Figure 2.13 – Évolution temporelle du flux thermique (à gauche) et du flux massique (à droite) au niveau de la surface extérieure du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors.....	84
Figure 2.14 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de l’humidité relative (à droite) à l’interface du 4 au 8 juillet 2016 à Cahors	85
Figure 2.15 – Principales variables utilisées pour calculer les conditions aux limites extérieures : température et humidité relative extérieure (a), coefficient de convection thermique (b), rayonnement solaire incident à la façade (c) et flux de pluie incident à la paroi (d), du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors	85
Figure 2.16 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de la pression de vapeur (à droite) au niveau de la surface extérieure du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors.....	86
Figure 2.17 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de la pression de vapeur (à droite) au niveau de la surface intérieure du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors.....	86
Figure 2.18 – Profil de la température (à gauche) et de la teneur en eau (à droite) dans la paroi le 23 novembre 2016 à minuit à Cahors.....	87
Figure 2.19 – Profil de la température (à gauche) et de la teneur en eau (à droite) dans la paroi le 25 novembre 2016 à midi à Cahors.....	87
Figure 2.20 – Évolution temporelle du flux thermique (à gauche) et du flux massique (à droite) au niveau de la surface extérieure du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors.....	87
Figure 2.21 – Évolution temporelle du flux thermique (à gauche) et du flux massique (à droite) au niveau de la surface intérieure du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors.....	88
Figure 2.22 – Évolution temporelle de la température (à gauche) et de l’humidité relative (à droite) à l’interface du 22 au 26 novembre 2016 à Cahors.....	88
Figure 3.1 – Quartier médiéval de Cahors (Charrier, 2013)	91
Figure 3.2 – Localisation du centre médiéval de Cahors et des lieux instrumentés.....	93

Figure 3.3 – Localisation des trois parois instrumentées	93
Figure 3.4 – Descriptif des dispositifs expérimentaux installés au R+1 (adapté de Malagoli de Almeida, (2022)).....	94
Figure 3.5 – Descriptif des dispositifs expérimentaux installés au R+2 (adapté de Malagoli de Almeida, (2022)).....	94
Figure 3.6 – Composition et instrumentation de la paroi 1.....	95
Figure 3.7 – Composition et instrumentation de la paroi 2.....	95
Figure 3.8 – Composition et instrumentation de la paroi 3.....	95
Figure 3.9 – Instrumentation de la paroi 2.....	96
Figure 3.10 – Dispositifs expérimentaux pour la récupération des données au R+1 (à gauche) et au R+2 (à droite) (Malagoli de Almeida, 2022)	97
Figure 3.11 – Station météorologique située sur un toit du centre médiéval	98
Figure 3.12 – Méthodologie pour la comparaison des données simulées et mesurées	99
Figure 3.13 – Versions de maillage appliquées à la paroi 1 (a), à la paroi 2 (b) et à la paroi 3 (c)	100
Figure 3.14 – Échantillons utilisés pour la caractérisation de la brique du 16 ^{ème} siècle (en haut à gauche) et pour le mélange chaux-chanvre (en bas à droite) (Claude, 2018)	101
Figure 3.15 – Conditions initiales et conditions aux limites définies pour la simulation des parois instrumentées	103
Figure 3.16 – Évolution temporelle des principales variables intervenant dans le calcul des conditions aux limites extérieures : température (a), humidité relative (b), flux de pluie incident aux parois (c), rayonnement solaire incident (d) et rayonnement infrarouge incident aux trois parois (e)	104
Figure 3.17 – Évolution temporelle de la température (a) et de l’humidité relative (b) à l’intérieur des pièces adjacentes aux trois parois étudiées, du 15 mars 2021 au 17 janvier 2022	105
Figure 3.18 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d’humidité relative (b) à l’interface de la paroi 1	107
Figure 3.19 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d’humidité relative (b) à mi-isolant de la paroi 1	108
Figure 3.20 – Évolution temporelle de la température simulée et mesurée au niveau de la surface intérieure de la paroi 1.....	108

Figure 3.21 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d’humidité relative (b) à l’interface de la paroi 2	109
Figure 3.22 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d’humidité relative (b) à mi-isolant de la paroi 2	110
Figure 3.23 – Évolution temporelle de la température simulée et mesurée au niveau de la surface intérieure de la paroi 2	110
Figure 3.24 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d’humidité relative (b) dans la lame d’air de la paroi 3	111
Figure 3.25 – Évolution temporelle des résultats simulés et des mesures de température (a) et d’humidité relative (b) à mi-isolant de la paroi 3	112
Figure 3.26 – Évolution temporelle de la température simulée et mesurée au niveau de la surface intérieure de la paroi 3	112
Figure 3.27 – EAM (a) et coefficient de Pearson (b) entre les températures simulées et mesurées pour les trois points étudiés, les trois parois et les quatre versions de maillage	113
Figure 3.28 – EAM (a) et coefficient de Pearson (b) entre les humidités relatives simulées et mesurées pour les deux points étudiés, les trois parois et les quatre versions de maillage	114
Figure 4.1 – Description des échanges entre un modèle atmosphérique et SURFEX, qui est composé de plusieurs modèles physiques, représentant chacun une fraction f^* de la tuile étudiée (Météo France).....	121
Figure 4.2 – Schéma d’une rue canyon typique et des principaux processus paramétrés dans TEB (Météo France).....	122
Figure 4.3 – Représentation schématique de la version originale de TEB et de TEB-SBL (Masson et al. 2013)	124
Figure 4.4 – Représentation schématique d’une rue canyon dans TEB, intégrant les principaux processus considérés par BEM (Météo France)	125
Figure 4.5 – Schéma représentant le concept du calcul de l’UTCI (Bröde et al., 2010).....	127
Figure 4.6 – Représentation schématisée des trois environnements dans lesquels l’UTCI est calculé dans TEB. (a) et (b) décrivent l’influence du rayonnement solaire pour un individu à l’extérieur au soleil et à l’ombre respectivement, (c) montre l’impact du rayonnement infrarouge pour les deux situations à l’extérieur et (d) correspond à la situation intérieure (Pigeon 2011)	127
Figure 4.7 – Simulation des parois dans TEB avant (a) et après (b) intégration des transferts d’humidité.....	129
Figure 4.8 – Schéma de la répartition de pluie battante à l’intérieur du canyon urbain.....	134

Figure 4.9 – Description des deux orientations de rue simulées (vue du haut).....	138
Figure 4.10 – Représentation temporelle des différentes phases et des données de forçage utilisées	142
Figure 4.11 – Température (a), humidité relative (b), rayonnement solaire (c) et quantité de précipitations (d) utilisés pour le forçage au-dessus du canyon urbain	143
Figure 4.12 – Évolution temporelle de la température (a) et de l’humidité relative (b) simulées et mesurées à l’interface entre la brique et l’isolant du 17 juin 2021 au 1 ^{er} janvier 2022	145
Figure 4.13 – Évolution temporelle de la température (a) et de l’humidité relative (b) simulées et mesurées au milieu de l’isolant du 17 juin 2021 au 1 ^{er} janvier 2022	146
Figure 4.14 – Évolution temporelle de la température simulée et mesurée au niveau de la surface intérieure du 17 juin 2021 au 1 ^{er} janvier 2022	147
Figure 4.15 – Évolution temporelle de la température (a) et de l’humidité relative (b) simulées et mesurées dans la pièce étudiée du 17 juin 2021 au 1 ^{er} janvier 2022.....	149
Figure 4.16 – Comportement de la paroi C pendant les phases de mouillage et de séchage : pluie absorbée (a), teneur en eau à la surface extérieure (b), humidité relative à la surface extérieure (c), température à la surface extérieure (d), flux sensible (e) et flux radiatif à grande longueur d’onde allant de la surface vers le canyon (f)	151
Figure 4.17 – Quantité de précipitations (a), flux sensible (b) flux radiatif à grande longueur d’onde ascendant (c) et flux latent (d) échangés entre la surface urbaine et l’atmosphère du 22 au 26 juin 2021	152
Figure 4.18 – Détail des composantes du flux latent échangé entre les surfaces urbaines et l’atmosphère, simulé à partir de la version améliorée de TEB du 23 au 26 juin 2021.....	153
Figure 5.1 – Évolution de la consommation des bâtiments résidentiels de 1900 à aujourd’hui (ATHEBA, 2010).....	157
Figure 5.2 – Schéma de la répartition des pertes thermiques à travers l’enveloppe d’un bâtiment non rénové, datant d’avant 1974 (ADEME, 2022).....	159
Figure 5.3 – Exemple de façade ancienne dont les briques sont mises à nue en certains points (44 Rue Saint-Urcisse à Cahors)	160
Figure 5.4 – Fonctionnement hygrométrique d’une paroi traditionnelle non isolée (à gauche) et de la même paroi isolée avec une solution moderne (à droite) (ATHEBA, 2010)	161
Figure 5.5 – Profil de température dans la paroi en fonction de la position de l’isolant (Fahed, 2018).....	163
Figure 5.6 – Les principales causes de l’ICU (à gauche) et les principales stratégies d’atténuation (à droite) (Nature Québec).....	166

Figure 5.7 – Système de ventilation régulé en fonction de l’humidité relative (Woloszyn et al., 2009). Dans cette étude : $Q_1 = 0,075 \text{ vol/h}$, $Q_2 = 0,3 \text{ vol/h}$, $RH_1 = 25 \%$ et $RH_2 = 60 \%$	172
Figure 5.8 – Compositions des parois associées à chaque scénario de rénovation étudié.....	175
Figure 5.9 – Évolution journalière moyenne de la puissance de chauffage du 1 ^{er} décembre 2021 au 28 février 2022	181
Figure 5.10 – Variation des consommations énergétiques de chauffage (à gauche) et de ventilation (à droite) de chaque scénario par rapport à la référence (la paroi en brique massive non isolée)	181
Figure 5.11 – Nombre moyen d’heures d’inconfort intérieur par an pour chaque scénario.....	182
Figure 5.12 – Évolution temporelle de la température (a), de l’humidité relative (b) et de l’UTCI intérieur (c) du 10 juin 2022 au 20 juin 2022	183
Figure 5.13 – Nombre moyen d’heures d’inconfort extérieur par an pour chaque scénario	184
Figure 5.14 – Évolution de l’indice de moisissure à l’interface brique/isolant pour la façade orientée ouest rénovée à partir des différents scénarios au cours des cinq années étudiées	185
Figure 5.15 – Récapitulatif des résultats pour tous les scénarios étudiés et pour chaque critère	188
Figure 5.16 – Évolution journalière moyenne de la puissance de chauffage du 1 ^{er} décembre 2021 au 28 février 2022	189
Figure 5.17 – Variation des consommations énergétiques de chauffage (à gauche) et de ventilation (à droite) de chaque scénario par rapport à la référence (la paroi à pans de bois non isolée)..	189
Figure 5.18 – Nombre moyen d’heures d’inconfort intérieur par an pour chaque scénario.....	190
Figure 5.19 – Évolution temporelle de la température (a), de l’humidité relative (b) et de l’UTCI intérieur (c) du 10 juin 2022 au 20 juin 2022	191
Figure 5.20 – Nombre moyen d’heures d’inconfort extérieur par an pour chaque scénario	192
Figure 5.21 – Évolution de l’indice de moisissures à l’interface brique/isolant pour la façade orientée ouest rénovée à partir des différents scénarios au cours des cinq années étudiées	192
Figure 5.22 – Indice de moisissures maximal pour chaque scénario de rénovation	193
Figure 5.23 – Récapitulatif des résultats pour tous les scénarios étudiés et pour chaque critère	194
Figure 5.24 – Application des méthodes de zonage thermique sur un bâtiment : monozone, trois zones et multi-zone par étages (de gauche à droite) (Garreau, 2021).....	196

Liste des tableaux

Tableau 1.1 – Mécanismes de transport de chaleur et d’humidité et leur potentiel moteur basé sur les travaux de Krus (1996) et Künzle (1995).....	36
Tableau 1.2 – Comparaison des méthodes de discrétisation basé sur Popa (2002).....	51
Tableau 2.1 – Caractéristiques des méthodes de discrétisation et de résolution pour Delphin, TEB et la méthode proposée.....	64
Tableau 2.2 – Caractéristiques du maillage pour les quatre versions testées et pour le modèle de référence Delphin	65
Tableau 2.3 – Valeurs seuil utilisées pour les cinq tests.....	70
Tableau 2.4 – Détails de la composition des parois étudiées	75
Tableau 2.5 – Propriétés hygrothermiques des matériaux composant les parois étudiées	76
Tableau 2.6 – Valeurs seuils pour l’écart entre la méthode proposée et Delphin	78
Tableau 2.7 – Durée de dépassement pour chaque simulation avec la version 1 du maillage	78
Tableau 2.8 – Durée de dépassement pour chaque simulation avec la version 2 du maillage	79
Tableau 2.9 – Durée de dépassement pour chaque simulation avec la version 3 du maillage	80
Tableau 2.10 – Durée de dépassement pour chaque simulation avec la version 4 du maillage ...	81
Tableau 3.1 – Indicateurs morphologiques du quartier médiéval de Cahors (Claude, 2018)	91
Tableau 3.2 – Propriétés des capteurs utilisés pour l’instrumentation des bâtiments (Malagoli de Almeida, 2022).....	96
Tableau 3.3 – Description des capteurs de la station météorologique Vantage Pro	98
Tableau 3.4 – Périodes d’initialisation et de comparaison des différentes parois.....	99
Tableau 3.5 – Propriétés hygrothermiques des matériaux.....	100
Tableau 3.6 – Valeurs seuil pour les deux niveaux de validation	106
Tableau 4.1 – Principaux paramètres d’entrée décrivant la géométrie et les matériaux urbains dans TEB.....	123
Tableau 4.2 – Indice de moisissures (M) (Vereecken et Roels, 2012).....	135

Tableau 4.3 – Classe de sensibilité à la moisissure (Ojanen et al., 2011, 2010)	136
Tableau 4.4 – Valeurs des paramètres en fonction de la classe de sensibilité (Ojanen et al., 2011, 2010)	137
Tableau 4.5 – Classes de décroissance (Ojanen et al., 2011, 2010)	137
Tableau 4.6 – Propriétés du canyon urbain moyen simulé par TEB	139
Tableau 4.7 – Caractéristiques thermiques et radiatives des matériaux constituant le bâtiment	140
Tableau 4.8 – Indicateurs sur l'écart entre les données mesurées et simulées en trois points de la paroi du 17 juin 2021 au 1 ^{er} janvier 2022 (na = non applicable)	147
Tableau 4.9 – Indicateurs sur l'écart entre les données mesurées et simulées dans la pièce étudiée du 17 juin 2021 au 1 ^{er} janvier 2022	150
Tableau 5.1 – Classification des matériaux en fonction de leur perméabilité à la vapeur d'eau (Posani et al., 2019)	164
Tableau 5.2 – Classification des matériaux en fonction de leur capacité à absorber l'eau liquide (Posani et al., 2019)	164
Tableau 5.3 – Classification des matériaux en trois catégories (Posani et al., 2019).....	165
Tableau 5.4 – Catégories et positionnement des isolants étudiés.....	173
Tableau 5.5 – Propriétés hygrothermiques des matériaux.....	174
Tableau 5.6 – Niveau de stress thermique en fonction de la valeur de l'UTCI (Ponsar et al., 2017)	177
Tableau 5.7 – Seuils retenus pour l'indice de moisissures (M) en fonction de la localisation étudiée (Claude, 2018).....	178
Tableau 5.8 – Critères retenus pour l'évaluation des scénarios	180
Tableau 5.9 – Quantité de précipitations annuelles incidentes aux parois en fonction de l'orientation et moyennées sur les cinq années simulées.....	185
Tableau 5.10 – Energie grise associée à chaque scénario de rénovation.....	186

Annexe A : Estimation des échanges infrarouges entre les bâtiments du centre-ville ancien à partir d'EnergyPlus

Méthode de calcul proposée

Dans les simulations thermiques du bâtiment, les échanges infrarouges avec l'environnement sont souvent simplifiés. Par exemple, le mode par défaut d'EnergyPlus, calcule le flux radiatif à GLO en faisant l'hypothèse que le bâtiment échange seulement avec le sol, l'air et le ciel. Ainsi, il ne considère pas les échanges radiatifs entre les bâtiments. En effet, il est complexe de représenter les échanges infrarouges avec les bâtiments environnants, car cela nécessite de connaître non seulement les températures de surface de toutes leurs façades mais également de déterminer les facteurs de vue entre les surfaces du bâtiment étudiés et celles des bâtiments environnants.

Pour prendre en compte ce phénomène, une stratégie de co-simulation de plusieurs bâtiments a été mise en place. Elle utilise l'outil EnergyPlus et le langage python.

Cette méthode consiste à simuler plusieurs bâtiments séparément, puis à utiliser les températures de surface obtenues pour calculer les échanges infrarouges. Les simulations de l'ensemble des bâtiments sont répétées jusqu'à obtenir la convergence des températures de surface du bâtiment d'intérêt. Pour le calcul des échanges infrarouges, les façades des bâtiments simulés, sont divisées en plusieurs surfaces : une surface pour chaque étage.

Ce travail se base sur les hypothèses suivantes :

- Les surfaces ayant la même orientation et le même niveau ont la même température de surface (même couleur sur la Figure A.1) ;
- Les parois des bâtiments environnants ont la même composition de paroi et les mêmes scénarios d'occupation et de chauffage que le bâtiment d'intérêt.

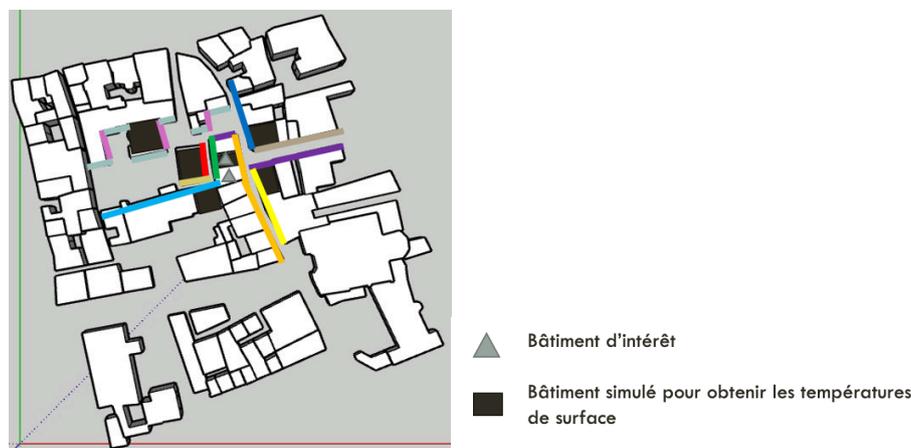


Figure A.1 - Schéma du quartier simulé mettant en avant les bâtiments d'intérêt et les bâtiments simulés ainsi que les parois ayant les mêmes températures de surface (de la même couleur)

Les étapes pour le calcul du rayonnement à GLO entre les bâtiments sont les suivantes :

1. Préparer les fichiers avec les coordonnées des surfaces d'intérêts à partir des données SIG (Système d'Information Géographique) ;
2. Calculer les facteurs de vue entre tous les bâtiments de la zone d'intérêt (niveau par niveau) avec l'outil View3D ;
3. Renvoyer les informations nécessaires aux fichiers d'entrée des simulations EnergyPlus ;
4. Simuler individuellement les six bâtiments (les températures de surface obtenues serviront pour l'initialisation de la co-simulation) ;
5. Co-simuler les six bâtiments en renvoyant à chaque fin de simulations les nouvelles températures de surface, qui sont utilisées pour le calcul des échanges infrarouges à l'itération suivante ;
6. Vérifier la convergence sur les températures de surface.

Le rayonnement GLO incident à la paroi d'intérêt est ainsi obtenu et peut être utilisé pour définir les conditions aux limites du modèle de transferts hygrothermiques à travers les parois, dans les Chapitres 2 et 3.

Exemples de résultats obtenus

Les températures de surface simulées en utilisant la méthode par défaut d'EnergyPlus sont comparées avec celles obtenues à partir de la stratégie de co-simulation. Cette comparaison est effectuée pour le premier étage du bâtiment d'intérêt orienté est, ce qui correspond à la configuration utilisée pour définir les conditions aux limites dans les Chapitres 2 et 3. La Figure A.2 présente les résultats simulés sur une période estivale allant du 1^{er} au 10 août 2016. Durant cette période, l'écart maximal observé entre les deux méthodes est de 2,5 °C. Finalement, l'impact des échanges radiatifs à GLO entre les bâtiments est non négligeable pour évaluer les températures de surface des façades.

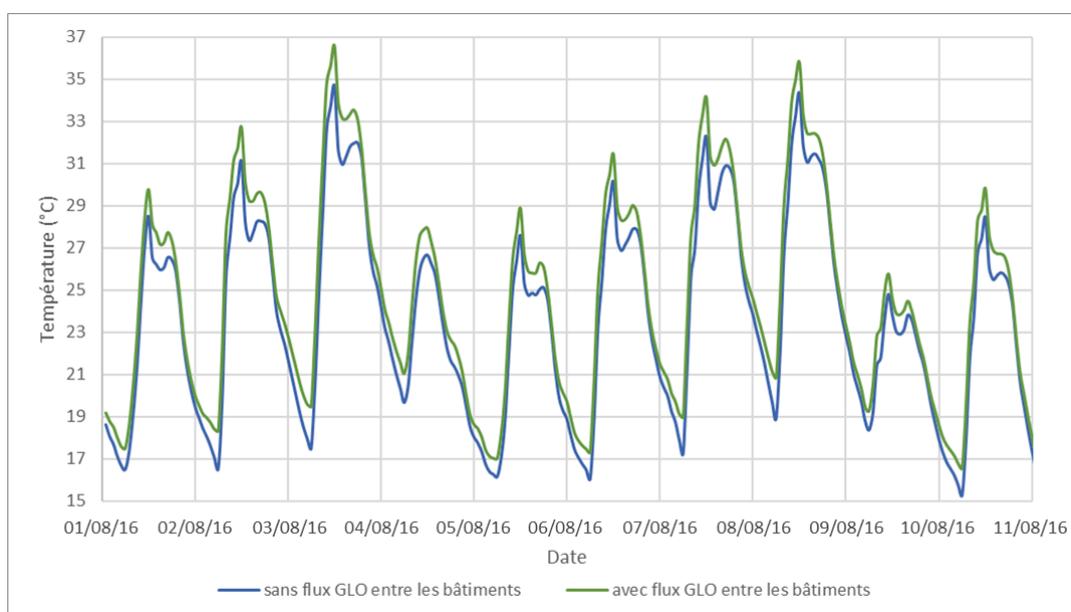


Figure A.2 - Comparaison de la température de surface avec et sans prendre en compte le rayonnement à GLO entre les bâtiments pour la période du 1^{er} au 10 août 2016

Annexe B : Définition de l'évolution des propriétés hydriques des matériaux dans le modèle TEB

Les propriétés hygrothermiques du chaux-chanvre et de la brique ancienne ont été définies à partir de la caractérisation effectuée par Claude (2018) et la base de données Delphin (voir la section 4.2 du Chapitre 3). Les caractéristiques hydriques des matériaux évoluent en fonction du niveau d'humidité. Ces courbes peuvent être intégrées de manière simplifiée, à partir de deux méthodes : en fournissant soit une liste courte de points soit les coefficients d'un modèle (voir la section 3.4 du Chapitre 4). Cette annexe présente les fonctions utilisées pour décrire le comportement hydrique de la brique du 16^{ème} siècle et du chaux-chanvre, dans le modèle TEB. Elles ont été calibrées à partir des données de Claude (2018) et de Delphin.

Pour la brique, la courbe de rétention d'humidité est décrite par le modèle de Durner, en version unimodal. Le Tableau B.1 donne les coefficients utilisés.

Tableau B.1 – Coefficients du modèle de Durner pour la brique

α	m	n	w_{sat} ($kg \cdot m^{-3}$)
2,4553e-5	0,4697	1,8857	386,236

L'évolution de la conductivité d'eau liquide en fonction de la teneur en eau est décrite par la version unimodal du modèle de Mualem. Le Tableau B.2 fournit les paramètres utilisés pour définir ce modèle.

Tableau B.2 – Coefficients du modèle de Mualem pour la brique

τ	α	m	n	$K_{l,sat}$ (s)
1	1,2265e-5	0,6915	3,2418	3,3128e-9

Finalement, le coefficient de diffusivité de vapeur dans la brique est fixé à la valeur suivante :

$$K_v = 1,619e-11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}.$$

Pour l'isolant à base de chaux-chanvre, la courbe de rétention d'humidité est décrite par une liste de points reliant la pression capillaire à la teneur eau (Tableau B.3).

Tableau B.3 – Description de la courbe de rétention d'humidité pour l'isolant à base de chaux-chanvre

p_c (log(Pa))	θ ($m^3 \cdot m^{-3}$)
0	0,789
6,13	0,03245
8,79	0,001672
12	0

De manière similaire, le Tableau B.4 présente les valeurs utilisées pour décrire l'évolution de la conductivité liquide en fonction de la teneur en eau.

Tableau B.4 – Description de l'évolution de la conductivité de l'eau liquide pour l'isolant à base de chaux-chanvre

$\theta \text{ (m}^3 \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$	$K_l \text{ (log(s))}$
0	-25
0,02813	-14,207
0,789	-10,959

Le coefficient de diffusion de vapeur d'eau K_v est supposé constant à la valeur suivante :

$$K_v = 3,564\text{e-}11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}.$$

Ces approximations permettent de fournir des résultats satisfaisants (voir les résultats de l'évaluation dans le Chapitre 4).

Annexe C : Évaluation du modèle TEB par comparaison expérimentale avec le bâtiment à typologie pans de bois

Dans la partie 5 du Chapitre 4, le modèle TEB avait été évalué par comparaison avec les mesures effectuées dans le bâtiment constitué de parois « massives ». Cette annexe applique la même méthodologie pour l'évaluation de TEB pour la simulation du bâtiment 2 dont les façades comprennent des pans de bois. Dans ce second cas, les parois dans TEB sont configurées pour correspondre à la paroi étudiée, localisée au 1^{er} étage du 50 rue Saint-Urcisse et composée de 14 cm de briques isolées par l'intérieur à partir de 15 cm de chaux-chanvre (voir section 3.2 du Chapitre 3). Les mesures effectuées dans la paroi 2 (à l'interface brique/isolant, à mi-isolant et au niveau de la surface intérieure) et dans la pièce adjacente sont donc comparées avec les résultats simulés par TEB.

Le tableau C.1 présente le récapitulatif des indicateurs d'erreur calculés (EAM et coefficient de Pearson) et des niveaux de validation associés à la méthodologie de Huerto-Cardenas et al. (2021), qui a été présentée dans la section 4.4 du Chapitre 3. La simulation des températures à l'interface et au milieu de l'isolant est validée de niveau 2 (avec un faible niveau de précision) pour la version de TEB incluant les transferts d'humidité à travers les parois, tandis qu'elle n'est pas validée en utilisant la version de TEB non modifiée. Concernant l'humidité relative en ces deux points de la paroi, la validation est de niveau 2, en simulant à partir de la version modifiée de TEB. Au niveau de la surface intérieure, les deux versions de TEB conduisent à des résultats similaires et une validation de niveau 2.

Enfin, la température intérieure est validée avec un niveau 2, pour les deux versions du modèle TEB. En revanche, la version améliorée de TEB conduit à des humidités relatives simulées plus satisfaisantes que la version non modifiée de TEB. En effet, le niveau de validation est de 2 avant modification et passe à 1 après modification.

Pour conclure, la version de TEB comprenant les transferts d'humidité à travers les parois permet de valider les conditions hygrothermiques simulées en tous les points étudiés, alors que la version non modifiée ne permet pas de représenter correctement l'évolution de la température dans la paroi.

Les EAM obtenues pour le premier bâtiment (parois « massives », voir la partie 5 du Chapitre 4) étaient plus faibles que celle calculées pour ce second bâtiment (parois « légères »). L'écart entre la simulation et les mesures est donc plus important dans le cas du bâtiment ayant une typologie à pans de bois.

Dans la réalité, les conditions mesurées dans la pièce instrumentée sont impactées par la composition de leur paroi extérieure (paroi instrumentée et simulée), mais également par celle des autres parois du bâtiment, puisque des transferts ont lieu entre les différentes pièces du bâtiment. Or, la composition des parois du bâtiment 2 est plus hétérogène, que dans le cas du bâtiment 1. En effet, dans le bâtiment à typologie pans de bois, les parois au RDC sont constituées d'une épaisseur de brique de l'ordre de 1 m, tandis que les parois des étages supérieurs sont

composées de 14 cm de briques. De plus, seule la façade au premier étage, orientée ouest, est isolée par l'intérieur à partir de 15 cm de chaux-chanvre. Les autres façades sont isolées par l'intérieur mais à partir de 5 cm de polystyrène. Or dans TEB, une seule paroi est définie pour représenter toutes les parois du bâtiment. Cette simplification lors de la définition des parois explique donc une partie des écarts entre la simulation et les mesures.

Tableau C.1 - Indicateurs sur l'écart entre les données mesurées et simulées en trois points de la paroi et à l'intérieur du bâtiment du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022 (na = non applicable)

			Température	Humidité relative
INTERFACE	EAM	TEB avant modification	2,5 °C	na
		TEB après modification	2,0 °C	2,8 %
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,98	na
		TEB après modification	0,98	0,88
	Niveau de validation	TEB avant modification	Pas validé	na
		TEB après modification	2	1
ISOLANT	EAM	TEB avant modification	2,5 °C	na
		TEB après modification	2,0 °C	3,3 %
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,98	na
		TEB après modification	0,97	0,89
	Niveau de validation	TEB avant modification	Pas validé	na
		TEB après modification	2	1
SURFACE	EAM	TEB avant modification	1,2 °C	na
		TEB après modification	1,1 °C	na
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,97	na
		TEB après modification	0,97	na
	Niveau de validation	TEB avant modification	2	na
		TEB après modification	2	na
INTERIEUR	EAM	TEB avant modification	1,4 °C	8,2 %
		TEB après modification	1,3 °C	4,8 %
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,96	0,85
		TEB après modification	0,96	0,94
	Niveau de validation	TEB avant modification	2	2
		TEB après modification	2	1

Annexe D : Configuration des bâtiments dans TEB

Scénarios d'occupation

Le Chapitre 5 étudie des bâtiments du centre-ville médiéval de Cahors. Les scénarios d'occupation sont définis à partir des travaux de Schoetter et al. (2017). Un seul type d'usage des bâtiments est considéré : tous les bâtiments sont supposés résidentiels. La fraction de bâtiments occupés varie en fonction du jour de la semaine et des heures de la journée (Figure D.1). Aucune période d'absence longue durée (vacances) n'est considérée.

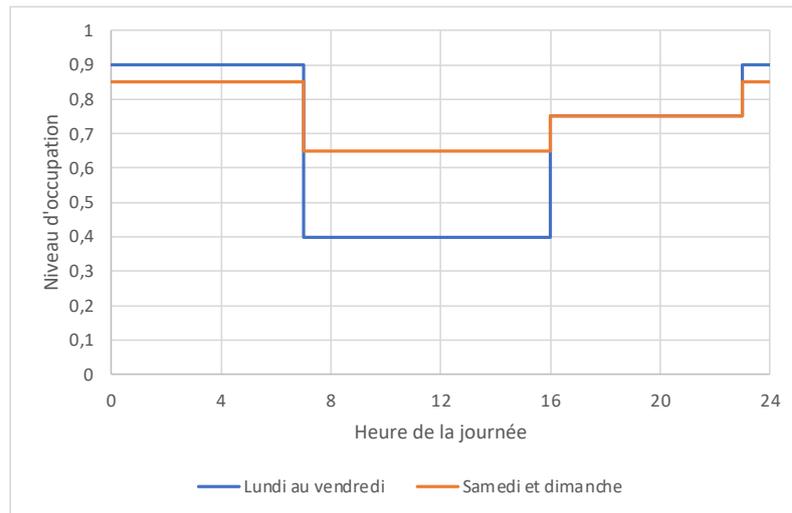


Figure D.1 – Fraction d'occupation des bâtiments (f_{occ})

Gains thermiques internes

Les gains de chaleur internes sont modulés en fonction de l'occupation et de l'heure de la journée. Ils sont calculés à chaque pas de temps en fonction de l'équation suivante (Schoetter et al., 2017) :

$$QIN_{actuel} = f_{nuit}(QIN_{nom}M_{nuit}) + (1 - f_{nuit})(f_{occ}QIN_{nom} + (1 - f_{occ})QIN_{nom}M_{vac}) \quad (D-1)$$

Avec QIN_{actuel} les gains de chaleur internes au pas de temps actuel ($W \cdot m^{-2}$), QIN_{nom} la valeur nominale des gains de chaleur internes ($W \cdot m^{-2}$), f_{nuit} la fraction qui varie en fonction de l'heure de la journée ($f_{nuit} = 1$ la nuit et $f_{nuit} = 0$ la journée), f_{occ} la fraction d'occupation des bâtiments, M_{nuit} le facteur de modulation de la valeur nominale durant la nuit et M_{vac} le facteur de modulation de la valeur nominale durant les courtes périodes de vacances.

Les différents facteurs impliqués dans le calcul des gains internes sont définis dans la Figure D.1 et le Tableau D.1.

Tableau D.1 – Valeur nominale des gains de chaleur internes et des facteurs de modulation pour des bâtiments résidentiels ayant une intensité d’usage des équipements moyenne (Schoetter et al., 2017)

Usage des bâtiments	QIN_{nom} ($W/m_{plancher}^2$)	M_{vac}	M_{nuit}
Bâtiments résidentiels moyens	4	1	0,5

Les fractions de gains internes latents et de gains internes raditif sont toutes les deux fixées à 20 %, en accord avec les valeurs choisies par Bueno et al. (2012), pour l’étude des bâtiments du centre-ville de Toulouse.

Système de chauffage

Cette étude s’appuie sur le système de chauffage défini par Bueno et al. (2012). Le chauffage est supposé être effectué par soufflage d’air chaud, car cela correspond au seul système de chauffage intégré dans TEB. Le débit massique nominal du système de chauffage est de $0,0067 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}_{bât}^2)$. La température de consigne, pour le chauffage, est toujours égale à $19 \text{ }^\circ\text{C}$. La capacité maximale du système de chauffage est fixée à $90 \text{ W}/\text{m}_{bât}^2$.

Plusieurs types de combustibles sont utilisés dans le centre-ville médiéval de Cahors. La part de chacun a été déterminée à partir des données statistiques de l’Insee (2022), sur ce quartier spécifique. Le Tableau D.2 présente les proportions utilisées pour chaque type de combustible.

Tableau D.2 – Part de chaque type de combustible utilisé dans les systèmes de chauffage des bâtiments du centre-ville médiéval de Cahors

Type de combustible	Proportion utilisée pour le chauffage
Gaz	60 %
Électricité	38 %
Fuel	2 %

Ouverture des fenêtres

L’ouverture des fenêtres peut être utilisée comme une stratégie passive pour abaisser la température intérieure des bâtiments. Dans l’objectif de modéliser cette stratégie dans TEB, Schoetter et al. (2017) proposent de calculer la fraction de fenêtres ouvertes en ville en fonction du niveau d’occupation des bâtiments ainsi que des températures intérieures et extérieures des bâtiments. Les paramètres d’entrée nécessaires pour ce calcul sont les suivants :

- Fraction des foyers **ouvrant les fenêtres pendant les conditions chaudes** = 100 % ;
- Fraction des foyers **ouvrant les fenêtres pendant la nuit** (s’il fait chaud) = 100 % ;
- Fraction des foyers **ouvrant les fenêtres pendant les périodes vacantes** = 0 % ;
- **Température de design** (permettant de déterminer s’il fait chaud ou pas) = $23 \text{ }^\circ\text{C}$;
- **Fraction de fenêtres ouvertes** = 50 %.

Fermeture des volets

La fermeture des volets, durant les journées chaudes, permet de réduire les gains radiatifs à travers les fenêtres, et donc de limiter la hausse de la température intérieures. Schoetter et al.

(2017) calculent également la fraction de volets fermés en fonction du niveau d'occupation du bâtiment et des conditions météorologiques. Dans cette étude, les paramètres d'entrée ont été définis de la manière suivante :

- Fraction des foyers **fermant les volets pendant la nuit** = 100 % ;
- Fraction des foyers **fermant les volets pendant les absences** = 100 % ;
- Fraction des foyers **fermant les volets pendant les conditions chaudes** (si le rayonnement solaire est élevé) = 100 % ;
- Valeur **limite pour le rayonnement solaire** reçu par les parois = 150 W/m^2 ;
- **Transmittance** (lorsque les volets sont fermés) = $0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.

Annexe E : Résultats détaillés des différents scénarios simulés

Le Chapitre 5 propose l'étude de la rénovation de deux typologies de parois anciennes. Plusieurs scénarios de rénovation sont simulés à partir de TEB. Puis, ils sont évalués par rapport à six critères. Cette annexe présente les résultats bruts et détaillés, obtenus pour la rénovation des parois en briques massives (Tableau E.1) et pour les parois à pans de bois (Tableau E.2).

Tableau E.1 – Résultats détaillés obtenus pour le cas de référence et les six scénarios de rénovation des parois en briques massives

Versions étudiées		REF	ITI_OC	ITI_FB	ITI_CC	ITI_EPS	ITE_CC	ITE_EPS	
Patrimoine	Conservation de l'apparence extérieure des parois	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	
Consommations énergétiques	Consommations énergétiques annuelles moyennes [kWh/(m²pl.an)]	Chauffage	46,08	27,56	29,61	28,55	27,59	28,44	28,47
		Ventilation	0,22	0,22	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22
		Totales	46,30	27,78	29,82	28,77	27,81	28,65	28,69
Confort intérieur	Nombre d'heures de dépassement de 26°C sur l'échelle de l'UTCI à l'intérieur	Jour	475,7	515,8	502,6	477,9	590,6	438,2	440,2
		Nuit	80,9	70,6	70,8	68,3	70,8	54,1	54,4
		Total	556,6	586,4	573,3	546,2	590,6	492,3	494,6
Microclimat urbain	Nombre d'heures de dépassement de 26°C sur l'échelle de l'UTCI à l'extérieur	Jour	1030,0	1029,8	1029,9	1029,7	1029,9	1046,0	1051,6
		Nuit	19,0	19,2	19,2	19,0	19,2	16,1	15,2
		Total	1049,1	1049,03	1049,1	1048,8	1049,1	1062,1	1066,8
Durabilité des parois	Indice de croissances de moisissures maximal (M) à l'interface brique/isolant	Nord	-	0	0	0	0	0	0
		Est	-	0	0	0	0	0	0
		Sud	-	0	0	0	0	0,45	0
		Ouest	-	0	0	0	0	4,71	0
		Maximal	-	0	0	0	0	4,71	0
Analyse de cycle de vie	Energie grise des rénovations effectuées [kWh/m²paroi]	0	14,94	39,54	83,11	43,00	83,11	54,71	

Tableau E.2 – Résultats détaillés obtenus pour le cas de référence et les six scénarios de rénovation des parois à pans de bois

Versions étudiées		REF	ITI_OC	ITI_FB	ITI_CC	ITI_EPS	ITE_CC	ITE_EPS	
Patrimoine	Conservation de l'apparence extérieure des parois	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	
Consommations énergétiques	Consommations énergétiques annuelles moyennes [kWh/(m²pl.an)]	Chauffage	80,61	31,75	35,31	33,38	31,87	33,35	33,25
		Ventilation	0,22	0,22	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22
		Totales	80,83	31,97	35,52	33,60	32,09	33,57	33,67
Confort intérieur	Nombre d'heures de dépassement de 26°C sur l'échelle de l'UTCI à l'intérieur	Jour	563,4	509,1	491,9	474,4	517,4	449,5	457,0
		Nuit	115,2	83,8	86,6	82,3	84,1	72,1	73,7
		Total	678,7	592,9	578,6	556,7	601,5	521,6	530,7
Microclimat urbain	Nombre d'heures de dépassement de 26°C sur l'échelle de l'UTCI à l'extérieur	Jour	1031,3	1029,9	1029,8	1029,7	1029,9	1046,2	1051,9
		Nuit	20,1	20,5	20,4	20,1	20,5	16,4	15,5
		Total	1051,4	1050,4	1050,2	1049,8	1050,4	1062,6	1067,5
Durabilité des parois	Indice de croissances de moisissures maximal (M) à l'interface brique/isolant	Nord	-	0	2,01	0,66	0	0	0
		Est	-	0	2,49	1,31	0	0	0
		Sud	-	2,64	2,70	2,13	2,59	0	0
		Ouest	-	3,61	2,39	2,64	3,51	1,33	0
		Maximal	-	3,61	2,7	2,64	3,51	1,33	0
Analyse de cycle de vie	Energie grise des rénovations effectuées [kWh/m²paroi]	0	14,94	39,54	83,11	43,00	83,11	54,71	

Titre : Modélisation des transferts hygrothermiques à travers les parois dans un modèle de climat urbain : application aux centres-villes historiques à réhabiliter

Mots clés : transferts couplés chaleur-masse, modèle de climat urbain, rénovation du bâti ancien, isolation des parois, centre-ville historique

Résumé : Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et limiter l'îlot de chaleur urbain est une priorité, en particulier dans les centres-villes historiques, composés de bâtiments peu isolés. Un des leviers d'action envisagés est l'isolation des parois. Cependant, la rénovation des parois anciennes rencontre de nombreux obstacles (technologiques, architecturaux, urbains). Ces parois ont notamment un comportement hygrothermique spécifique, qu'il convient de prendre en compte pour éviter l'apparition de pathologies et estimer correctement les déperditions énergétiques. Il est donc primordial d'intégrer les transferts hygrothermiques à travers les parois pour simuler efficacement le bâti ancien. Néanmoins, la plupart des modèles à l'échelle urbaine négligent les transferts hydriques à travers les parois. Cette thèse propose une nouvelle méthode de résolution numérique pour les transferts hygrothermiques, qui est adaptée aux différentes contraintes de la modélisation à l'échelle urbaine (résolutions spatio-temporelles, méthode numérique etc.). La validation est réalisée en deux temps : une partie numérique et une partie expérimentale. La validation numérique est effectuée par une comparaison inter-modèle, en s'appuyant sur quinze compositions de parois et trois climats. La validation expérimentale utilise les données enregistrées dans plusieurs bâtiments rénovés à partir de matériaux biosourcés et instrumentés dans le centre médiéval de la ville de Cahors. Ensuite, les transferts couplés de masse et de chaleur dans les parois sont intégrés dans le modèle de climat urbain TEB (Town Energy Balance), en utilisant la méthode développée et validée. La pertinence de cette nouvelle version de TEB pour représenter le centre-ville médiéval de Cahors est évaluée par comparaison avec des mesures in-situ. Une amélioration significative est constatée pour la simulation de l'humidité relative intérieure. L'impact des transferts d'humidité est discuté à plusieurs échelles. Finalement, la réhabilitation des parois anciennes des bâtiments du centre-ville de Cahors est étudiée à partir de plusieurs types d'isolant thermique positionnés à l'intérieur ou à l'extérieur. Ces scénarios de réhabilitation sont simulés en utilisant la version modifiée de TEB incluant les transferts d'humidité à travers les parois. Leur pertinence est comparée, vis-à-vis des enjeux énergétiques, du confort intérieur et extérieur, de la conservation du patrimoine et de la durabilité des parois. Des recommandations sont formulées en fonction du type de parois.

Title: Modelling of hygrothermal transfers through walls in an urban climate model: application to historical city centres to be retrofitted

Key words: coupled heat-mass transfer, urban climate model, historical building retrofit, wall insulation, historical city centre

Abstract: Improving the energy efficiency of buildings and mitigating the urban heat island is a priority, particularly in historical city centres, which are composed of poorly insulated buildings. One of the levers of action envisaged is wall insulation. However, the retrofit of old walls faces numerous obstacles (technological, architectural, urban). In particular, these walls have a specific hygrothermal behavior, which needs to be taken into account to avoid the appearance of pathologies and to correctly estimate energy losses. It is therefore essential to integrate hygrothermal transfers through the walls to effectively simulate old buildings. However, most urban-scale models neglect moisture transfer through walls. This thesis proposes a new numerical method for solving hygrothermal transfers, which is adapted to the various constraints of urban-scale modeling (spatio-temporal resolutions, numerical method, etc.). Validation is carried out in two steps: a numerical part and an experimental part. Numerical validation is based on an inter-model comparison, using fifteen wall compositions and three climates. Experimental validation uses data recorded in several buildings retrofitted with bio-based materials and instrumented in the medieval city centre of Cahors. Then, coupled heat and mass transfer through walls are integrated into the TEB (Town Energy Balance) urban climate model, using the developed and validated method. The suitability of this new version of TEB to represent the medieval town center of Cahors is assessed by comparison with in-situ measurement. A significant improvement is observed when simulating indoor relative humidity. The impact of moisture transfer is discussed at several scales. Finally, the retrofit of the old walls of buildings in the city center of Cahors is studied using several types of thermal insulation positioned inside or outside. These retrofitting scenarios are simulated with the modified version of TEB, including moisture transfer through the walls. Their relevance is compared with regard to energy issues, indoor and outdoor comfort, heritage conservation and wall durability. Recommendations are given according to the type of wall.