



HAL
open science

Analyse des phénomènes de transferts hygrothermiques de parois humides ventilées : application à la rénovation du patrimoine ancien

Wafa Ghrissi

► **To cite this version:**

Wafa Ghrissi. Analyse des phénomènes de transferts hygrothermiques de parois humides ventilées : application à la rénovation du patrimoine ancien. Génie civil. Université de Picardie Jules Verne; Université de Tunis El Manar, 2021. Français. NNT : 2021AMIE0096 . tel-03944405

HAL Id: tel-03944405

<https://theses.hal.science/tel-03944405>

Submitted on 18 Jan 2023

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.

Thèse de Doctorat
Mention Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité Génie Civil

présentée à l'Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585) de
l'Université de Picardie Jules Verne

et

à l'Ecole doctorale Mathématiques, Informatique, Sciences et Technologies
des Matériaux

de l'Université de Tunis El Manar

par

Wafa GHRISSI

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

*Analyse des phénomènes de transferts hygrothermiques de
parois humides ventilées :
Application à la rénovation du patrimoine ancien*

Soutenue le 17 décembre 2021, après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

M.E. SEDIKI, Professeur, UTM
M.A. JEMNI, Professeur, Université de Monastir
M.F. GRONDIN, Professeur, Ecole Centrale de Nantes
Mme V. LEPILLER, Maître de Conférences, UBFC
M.E. SEDIKI, Professeur, UTM
M. A. GUIZANI, Professeur, UTM
M. T. LANGLET, Professeur, UPJV
M. G. PROMIS, Maître de Conférences HDR, UPJV

Président de jury
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examineur
Directeur de thèse
Directeur de thèse
Co-encadrant

A ma famille et mes amis
A la mémoire de mon père

Remerciements

Ma recherche a été réalisée dans le cadre d'une co-tutelle de thèse entre l'Université de Picardie Jules Verne à Amiens (France), au sein de l'équipe "Matériaux, Habitat et Transferts (MHT)" du Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), et la Faculté des Sciences Physiques, Mathématiques et Naturelles de Tunis, de l'Université de Tunis El Manar, au sein du Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie (CRTE_n), sous la direction du Professeur Thierry LANGLET et du Professeur Amen Allah GUIZANI. A ce titre, je tiens à leur exprimer mes plus vifs remerciements pour leur accueil au sein de leur unité de recherche, leur confiance et leurs encouragements.

Je remercie également, et tout particulièrement, mon encadrant Monsieur Geoffrey PROMIS, pour l'excellence de son encadrement scientifique, son soutien au quotidien ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de mon travail de thèse. Ses conseils judicieux, ses qualités scientifiques et humaines m'ont permis de mûrir tant sur le plan professionnel que personnel. Il a toujours été disponible et à l'écoute, tout en mettant à ma disposition les moyens nécessaires pour la réussite de ma thèse. Pour tout cela Merci.

Je tiens à remercier les membres de mon jury, le Professeur Frédéric GRONDIN et le Professeur Abdel Majid JEMNI pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être rapporteurs ; la docteure Valérie LEPILLER et le Professeur Ezzeddine SEDIKI pour avoir accepté d'examiner mon investissement en thèse.

Je souhaite remercier tout le personnel technique et administratif du Laboratoire des Technologies Innovantes et du Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie avec un intérêt particulier à M. Ridha CHOUIKH pour sa collaboration et sa disponibilité. Son aide et ses remarques m'ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de la partie numérique de mon travail.

J'exprime ma plus grande gratitude à mes collègues, à mes amis ainsi qu'à toute ma famille, mon fiancé et surtout ma mère, qui m'a toujours soutenue, aidée et encouragée lors de la réalisation de ce projet de vie.

Enfin, une pensée pour mon père, l'être qui m'est le plus cher, celui qui m'a toujours soutenue, encouragée, comprise... Sans son aide, je n'aurai jamais eu l'opportunité de poursuivre cette recherche. Tu as tant voulu que je réalise ma thèse, toi qui n'es plus là... Merci, de là où tu es, j'espère que tu es fier de moi.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Nomenclature | xi |
| Introduction | 1 |
| Partie I Étude Analytique de la Littérature | 9 |
| Introduction de la première partie | 11 |
| Ch 1 Le bâti ancien humide : contexte, problématiques et enjeux | 13 |
| 1.1 Les spécificités du bâti ancien | 14 |
| 1.1.1 Les interactions entre le mode constructif et son environnement . . . | 14 |
| 1.1.2 Le comportement hygrothermique du bâti ancien | 16 |
| 1.1.3 La sensibilité des parois à l'humidité | 18 |
| 1.2 Les pathologies liées à l'excès d'humidité | 20 |
| 1.2.1 La dégradation de la structure porteuse | 21 |
| 1.2.2 La dégradation de l'enveloppe thermique | 24 |
| 1.2.3 La détérioration de la qualité de l'air intérieur | 26 |
| 1.3 Les différents traitements palliatifs et curatifs | 29 |
| 1.3.1 Limiter l'apparition des phénomènes de condensation | 30 |
| 1.3.2 Lutter contre les phénomènes d'infiltration directe ou accidentelle . | 31 |
| 1.3.3 Prévenir les transferts ascendants d'humidité | 31 |
| 1.3.4 Les impacts sur le confort des occupants | 36 |
| 1.4 Conclusion | 37 |
| Ch 2 Les transferts de chaleur et de masse au cœur de l'enveloppe du bâtiment | 39 |
| 2.1 Les mécanismes des transferts hygrothermiques dans un milieu poreux . . . | 40 |
| 2.1.1 Définition d'un milieu poreux : hypothèses fondamentales | 40 |
| 2.1.2 La dynamique de transfert et de stockage de l'humidité | 42 |
| 2.1.3 Le transfert et le stockage de chaleur | 44 |
| 2.1.4 L'effet du couplage entre les transferts hygriques et thermiques . . . | 46 |
| 2.2 La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité | 46 |
| 2.2.1 Le choix des moteurs de transfert | 48 |

| | | |
|--|--|---------------|
| 2.2.2 | Les modèles de transferts hygrothermiques existants | 51 |
| 2.3 | Conclusion | 53 |
| Conclusion de la première partie | | 55 |
| Partie II Approche Numérique d'un Procédé Innovant de Ventilation d'une Paroi Ancienne Humide | | 57 |
| Introduction de la deuxième partie | | 59 |
| Ch 3 Modélisation du comportement d'une paroi humide ventilée | | 61 |
| 3.1 | Les transferts hygrothermiques à l'échelle de la paroi | 62 |
| 3.1.1 | Les transferts de chaleur entre la paroi et le milieu extérieur | 64 |
| 3.1.2 | Les transferts de vapeur d'eau entre la paroi et le milieu extérieur | 66 |
| 3.1.3 | Application à une paroi multi-couche | 67 |
| 3.1.4 | Les avancées scientifiques sur l'assèchement des parois | 69 |
| 3.2 | Le système Aéraulec®, une technologie de rupture | 72 |
| 3.2.1 | Modélisation du système de ventilation d'un milieu saturé en conditions adiabatiques | 76 |
| 3.2.2 | Formulation mathématique | 76 |
| 3.2.3 | Protocole de résolution numérique | 81 |
| 3.3 | Extension du modèle vers un milieu non saturé en conditions diabatiques | 84 |
| 3.3.1 | Formulation mathématique | 84 |
| 3.3.2 | Conditions initiales et aux limites | 86 |
| 3.3.3 | Méthodologie de résolution numérique | 91 |
| 3.4 | Conclusion | 94 |
| Ch 4 Caractérisation multi-physique de briques anciennes en terre cuite | | 97 |
| 4.1 | La brique, matériau de longue tradition | 97 |
| 4.1.1 | L'apparition des briques comme élément porteur | 97 |
| 4.1.2 | La production de briques de terre cuite | 98 |
| 4.1.3 | Présentation des briques de terre cuite étudiées | 100 |
| 4.2 | État de l'art | 101 |
| 4.2.1 | Analyse de la littérature | 101 |
| 4.2.2 | La brique en terre cuite, un milieu poreux | 103 |
| 4.3 | Identification des propriétés multi-physiques des briques en terre cuite | 105 |
| 4.3.1 | Caractérisation physique des briques | 105 |
| 4.3.2 | Caractérisation micro-structurale des briques | 109 |
| 4.3.3 | Analyse des performances mécaniques des briques | 113 |
| 4.3.4 | Identification des propriétés hygriques des briques | 118 |

| | | |
|--|---|------------|
| 4.3.5 | Étude des performances thermiques | 137 |
| 4.4 | Conclusion | 140 |
| Conclusion de la deuxième partie | | 141 |
| Partie III Validation et Interprétation des Résultats | | 143 |
| Introduction de la troisième partie | | 145 |
| Ch 5 | Interprétation de la modélisation adiabatique d'un milieu saturé | 147 |
| 5.1 | Validation analytique et expérimentale du modèle numérique | 148 |
| 5.1.1 | Validation analytique | 148 |
| 5.1.2 | Conception d'un banc d'essai expérimental | 150 |
| 5.1.3 | Présentation des résultats expérimentaux | 154 |
| 5.1.4 | Validation expérimentale | 158 |
| 5.2 | Analyse de l'influence des conditions hygrothermiques de l'air insufflé . . . | 161 |
| 5.2.1 | En conditions hivernales | 162 |
| 5.2.2 | En conditions estivales | 165 |
| 5.2.3 | En conditions intermédiaires | 168 |
| 5.3 | Analyse de l'effet de la variation de la vitesse de l'air | 170 |
| 5.3.1 | En période hivernale | 172 |
| 5.3.2 | En période estivale | 173 |
| 5.3.3 | En périodes intermédiaires | 174 |
| 5.4 | Conclusion | 174 |
| Ch 6 | Interprétation du modèle diabatique en milieu non saturé | 177 |
| 6.1 | Étude de sensibilité aux propriétés multi-physiques de l'ossature porteuse . | 180 |
| 6.1.1 | Impact de la porosité de la paroi humide | 180 |
| 6.1.2 | Impact des propriétés thermiques de l'enveloppe | 183 |
| 6.1.3 | Impact des propriétés hygriques de l'ossature | 186 |
| 6.1.4 | Impact de la géométrie du modèle | 189 |
| 6.2 | Influence des paramètres hygrothermiques et aérauliques de l'air insufflé . . | 191 |
| 6.2.1 | Variation des conditions hygrothermiques | 191 |
| 6.2.2 | Vers l'optimisation des conditions de soufflages | 199 |
| 6.2.3 | Sensibilité à la vitesse de l'air insufflé | 202 |
| 6.3 | Effet de la variation des conditions hygrothermiques extérieures | 205 |
| 6.3.1 | En conditions climatiques printanières | 205 |
| 6.3.2 | En conditions climatiques estivales | 208 |
| 6.3.3 | En conditions climatiques hivernales | 210 |
| 6.4 | Conclusion | 212 |

| | |
|--|------------|
| Conclusion de la troisième partie | 215 |
| Conclusion et perspectives de recherche | 217 |
| Bibliographie | 223 |
| Table des figures | 239 |
| Liste des tableaux | 243 |

Nomenclature

Lettres grecques

| | |
|--------------|---|
| α | diffusivité thermique, m^2/s |
| δ | coefficient de thermo-migration, k^{-1} |
| δ_p | perméabilité à la vapeur d'eau, $kg/(m.s.Pa)$ |
| ϵ | taux de changement de phase, - |
| λ | conductivité thermique, $W/(m.K)$ |
| μ | viscosité dynamique, $kg/(m^2.s)$ |
| μ^* | facteur de diffusion vapeur d'eau, - |
| ν | viscosité cinématique, m^2/s |
| ω | teneur en eau à saturation, kg/m^3 |
| ϕ | humidité relative, % |
| ϕ^{abs} | humidité absolue, g/m^3 |
| ρ | masse volumique, kg/m^3 |
| θ | teneur en eau volumique, % |

Lettres romaines

| | |
|------------|--|
| A_c | absorption d'eau par capillarité, $kg/m^2.s^{0.5}$ |
| b_m | effusivité hygrique, $kg/(m^2.Pa.s^{1/2})$ |
| Bi_m | nombre de Biot massique, - |
| Bi_t | nombre de Biot thermique, - |
| C | concentration de vapeur d'eau, g/kg |
| C_m | capacité de stockage d'humidité, kg/m^3 |
| C_p | capacité thermique, $J/K.kg$ |
| D | coefficient de diffusion de la vapeur d'eau, m^2/s |
| D_θ | coefficient de transport massique, m/s |
| D_T | coefficient de transfert de chaleur, $W/(m^2.K)$ |
| Da | nombre de Darcy, - |
| e | épaisseur, m |
| g | flux hygrique, J/kg |
| h_m | coefficient d'échange massique, m/s |
| h_t | coefficient d'échange thermique, $W/m^2.k$ |
| k | perméabilité liquide, m^2 |
| Ko | nombre de Kosovich, - |
| L | longueur, m |
| l | largeur, m |
| L_v | chaleur latente d'évaporation, J |

| | |
|-------------|---|
| Lu | nombre de Luikov, - |
| M | masse molaire, g/mol |
| m | masse, kg |
| MBV | capacité tampon hygrique, $g/(m^2.\%HR)$ |
| n | porosité, % |
| Nu | nombre de Nusselt, - |
| P | pression, Pa |
| P_v | pression de vapeur d'eau, Pa |
| $P_{v,sat}$ | pression de vapeur d'eau saturante, Pa |
| Pn | nombre de Posnov, - |
| Pr | nombre de Prandtl, - |
| q | flux thermique, J/s |
| Re | nombre de Reynolds, - |
| S | surface, m^2 |
| S_d | résistance à la diffusion de vapeur, m |
| Sc | nombre de Schmidt, - |
| Sh | nombre de Sherwood, - |
| T | température, K |
| t | temps, h |
| u | composante horizontale de la vitesse, m/s |
| V | volume, m^3 |
| v | composante verticale de la vitesse, m/s |
| w | teneur en eau, g/m^3 |
| X, Y | coordonnées cartésiennes, - |

Exposants

| | |
|-------|----------------------|
| * | valeur adimensionnée |
| a | air |
| eau | eau |

Indices

| | |
|-------|--------------|
| 0 | apparent |
| a | air |
| d | sec |
| eff | effective |
| f | fluide (air) |
| i | initiale |

NOMENCLATURE

inlet entrée

interface interface

L liquide

m mur

s solide

v vapeur d'eau

w liquide

Introduction générale

Contexte Général

L'un des principaux enjeux du développement durable est de réduire les émissions des gaz à effet de serre, selon une étude scientifique réalisée par le Groupement d'Experts International pour l'Étude du Climat (GEIEC) [Collins et al., 2013], qui prévoit, d'ici 2100, une augmentation de 1.5°C à 6°C de la température moyenne de l'atmosphère. De ce fait, plusieurs pays - dont la France - approuvent la nécessité d'une transition énergétique impliquant une révolution de nos us et habitudes de production et de consommation d'énergie [Legifrance, 2020].

En France, le Grenelle de l'environnement a abouti à un projet de loi adoptée en mai 2015, appelé Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV ou loi de transition énergétique). Près de 215 articles définissent la politique énergétique dans le cadre de cette loi dont le principal axe est "la rénovation énergétique des bâtiments et la performance énergétique des bâtiments neufs". En effet, la consommation énergétique des bâtiments en France représente 43,6% de la consommation énergétique finale et 23% des émissions de CO₂ [ADEME, 2020b].

Le secteur du bâtiment apparaît donc comme un domaine d'intervention privilégié pour lequel les lois Grenelle ont fixées la révision des réglementations thermique tous les 5 ans [ADEME, 2010]. Cette réglementation s'applique aux bâtiments neufs et à ceux qui ont été construits après 1948. En 2020, cette réglementation (RE2020) a évolué vers un standard basé sur des bâtiments à énergies positives.

Le parc de bâtiments existants compte deux tiers de logements construits selon un mode constructif industrialisé avant 1975, dont un tiers a été construit avant 1948, date correspondante à la deuxième guerre mondiale [ADEME, 2020a]. Ce dernier représente le patrimoine ancien et est basé sur un mode constructif traditionnel. Le taux de renouvellement de ce parc est inférieur à 2% par an [Pouget, 2011]. Il constitue donc un potentiel non-négligeable pour atteindre nos objectifs nationaux, à savoir diviser par quatre nos émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) d'ici 2050. Cette politique implique alors de lourds travaux de rénovation et de réhabilitation, à grande échelle [ADEME, 2007].

Cependant, le bâti ancien fait l'objet de plusieurs mesures particulières : d'une part, il est considéré comme un héritage culturel à la vue de sa richesse architecturale, et, d'autre part, les matériaux utilisés lors de sa construction sont des ressources locales, non standardisées et présentant une forte sensibilité à l'humidité [Agence Qualité Construction, 2014a].

Plusieurs stratégies de rénovation de ce parc patrimonial sont proposées afin d'amélio-

rer ses performances énergétiques. Certaines sont dites passives car elles visent l'amélioration de l'enveloppe du bâti quand d'autres, actives, favorisent des systèmes énergétiques plus efficaces. Néanmoins, la majorité de ces travaux de rénovation énergétique consiste à rendre les parois du bâti étanches à l'air, que ce soit par la mise en place d'un enduit de façade, la réfection des joints des murs à l'aide d'un mortier cimentaire (et donc imperméable), ou encore par la mise en œuvre d'une isolation par l'intérieur [Claude, 2018]. Toutes ses solutions peuvent perturber l'équilibre hygrothermique des parois et des locaux.

En effet, l'une des caractéristiques intrinsèque de ces bâtiments à structure lourde est qu'ils possèdent une forte inertie thermique et que le renouvellement d'air se fait d'une manière naturelle : l'air pénètre par les défauts d'étanchéité ou par les ouvertures (fenêtres, aération...). Les solutions actuelles pour rénover énergétiquement une habitation ancienne consistent alors à limiter les infiltrations afin de garder l'énergie au cœur de nos habitations. Subséquemment, le renouvellement d'air (et l'humidité contenue dans l'air) ne pourra plus s'échapper naturellement, ce qui peut provoquer un inconfort hygrothermique pour les occupants [Peuportier, 2013]. A terme, le développement et la prolifération de bactéries et de moisissures peut également causer la dégradation du bâti et avoir des conséquences sur la santé des habitants. La pose d'une isolation thermique par l'intérieur peut, de plus, modifier la capacité de séchage du mur et accentuer les ponts thermiques, ce qui mène à l'apparition de risques structurels ainsi qu'à la dégradation de l'isolant thermique [Agence Qualité Construction, 2014b].

Selon l'Agence Qualité de la Construction, chaque année, on recense environ 20 000 désordres expertisés et signalés sur des bâtiments dont 56% sont liées à des défauts d'étanchéité à l'eau [Berger, 2014]. Le bâti ancien possède une singularité qui le distingue du bâti contemporain : il est régi par un fonctionnement physique holistique différent où un équilibre hygrothermique subtil peut rendre impropre l'utilisation de certaines techniques de rénovation, notamment celles qui se basent sur des simulations thermiques dans lesquelles les transferts d'humidité ne sont pas pris en considération. Le bâti ancien est particulièrement sensible aux transferts d'eau, sous forme tant liquide que de vapeur [Agence Qualité Construction, 2014a, Agence Qualité Construction, 2014b].

Contexte Scientifique

Les objectifs de réduction de la consommation d'énergie primaire dans le secteur de la construction a stimulé de nombreux acteurs dans divers domaines (recherche, R&D, réglementation, conception...) pour améliorer l'efficacité énergétique de l'enveloppe des bâtiments [Woloszyn & Rode, 2008]. Parallèlement, des avancées significatives sur la compréhension des phénomènes de transferts dans les matériaux (chaleur, vapeur, eau liquide) doivent conduire à optimiser la configuration et le dimensionnement des parois, tout en valorisant notamment les ressources dites renouvelables. Néanmoins, les applications qui

en découlent touchent encore essentiellement les constructions neuves. Pour le bâti ancien, tous les paramètres ne sont pas maîtrisables, en particulier l’humidité dans les murs ou les remontées capillaires. Il est donc nécessaire de bien comprendre les phénomènes de migration de cette humidité et d’offrir des conditions qui ne favorisent pas le développement des moisissures et micro-organismes. Par ailleurs, les échanges de chaleur, y compris par changement de phase (évaporation/condensation), ne doivent pas pénaliser le bilan énergétique de la construction [Mendes & Philippi, 2005].

Dans ce contexte où l’humidité est une des causes majeures de problèmes d’insalubrité et de désordre dans le bâti ancien [ADEME, 2020a], plusieurs projets scientifiques ont interrogé cette problématique afin de mieux comprendre les phénomènes physiques associés aux transferts hygrothermiques. A l’échelle du matériau et à celle de la paroi, ces phénomènes sont généralement traduits par des systèmes d’équations fortement couplées, résolues à l’aide de différentes méthodes numériques [Bauklimatik Dresden, 2011]. Dans ce sens, de nombreuses équipes de recherches ont investi particulièrement le champ disciplinaires des transferts thermo-hydro-aéroulque dans le bâtiment. Leur démarche consiste à l’élaboration des modèles numériques, en partie validés par l’expérience. De nos jours, même si la compréhension et la modélisation de ces phénomènes physiques ont progressé, notamment grâce à l’évolution des outils informatiques qui ont permis la résolution de problèmes complexes, ceux-ci restent encore difficilement mis en applications concrètes dans la rénovation énergétique du patrimoine en raison de l’impact holistique d’une telle approche et des répercussions de ces phénomènes de transferts sur le comportement global d’une habitation [IEA, 2020].

Des nombreux projets ont été financés pour appréhender le comportement hygrothermique des bâtiments. Certains font état d’applications technologiques afin d’aider les concepteurs à respecter les standards et normes réglementaires, quand d’autres s’intéressent au développement de nos connaissances fondamentales, (les Annexes 21 et 41 de l’Agence Internationale de l’Énergie [IEA, 2020])

A l’échelle internationale

Peu de travaux de recherche portent actuellement sur ces sujets de gestion de l’humidité dans une paroi, en raison de la complexité des problèmes physiques mis en jeu (transferts couplés de chaleur et d’humidité, aéroulque, ...). Néanmoins, nos voisins européens, également touchés par ces problématiques d’insalubrité, poursuivent actuellement leurs investigations expérimentales sur deux solutions différentes : l’Université de Stockholm étudie la mise en place d’une double peau ventilée et chauffée [af Klintberg & Björk, 2012] et le Laboratoire des Physiques de Bâtiments de l’Université d’Ingénieur de Porto propose de ventiler uniquement la base du mur humide [Guimarães & de Freitas, 2009] :

- La méthode Gap Air consiste dans la modification profonde de l’enveloppe de l’habitat. Cette méthode d’assèchement des parois permet de ventiler l’intérieur des

parois et du plancher d'une construction. Le procédé permet l'écoulement d'air convectif à l'intérieur de la construction. Le but de la méthode est d'enlever l'humidité de la construction et donc de protéger la structure des dommages tels que la moisissure. L'air pénètre par des trous dans les parois, traverse les murs et les planchers, puis est évacué par des bouches de sortie. Dans le cadre de la rénovation d'une maison humide, la méthode Gap Air permet d'évacuer l'humidité sans période de séchage préalable, qui peut souvent atteindre 6 à 8 semaines ; les occupants peuvent donc rapidement réintégrer leur logement. La méthode peut également renforcer et sécuriser la maison face à de tels dommages [af Klintberg et al., 2008]. Des essais à l'échelle réelle ont été réalisés et analysés afin d'identifier les mécanismes d'assèchement de l'enveloppe par ce procédé. Les essais ont été menés sur une structure en L, censée représenter un plancher assemblé à une paroi. Le banc d'essai fait intervenir un plancher et un mur traversés par une lame d'air équipée d'un câble chauffant en partie basse. Toutes les surfaces intérieures et les joints dans la partie horizontale de la plate-forme de test ont été scellés avec une résine plastique à deux composants pour empêcher tout passage d'humidité. L'assèchement de la lame d'air ventilée est assuré par la présence du câble chauffant délivrant une puissance de 15 W/m. Ce câble de chauffage est constitué de deux conducteurs électriques incorporés dans une résine semi-conductrice dont la résistivité augmente avec la température [af Klintberg & Björk, 2008, af Klintberg & Björk, 2010]. Ce procédé présente l'inconvénient majeur de prévoir une restructuration forte de l'habitat. En effet, le passage de l'air ventilé et chauffé est réalisé dans la structure même de l'habitat et nécessite donc une intervention lourde et onéreuse.

- Le Laboratoire de Physique de Construction (LFC), de l'Université de Porto a développé une recherche expérimentale importante sur les problèmes d'humidité et plus précisément les remontées capillaires [Delgado et al., 2014]. Une technique de traitement de ces problèmes appelée " Hygro-Regulated Wall Base Ventilation System for the Treatment of Rising Damp" a été caractérisée et validée expérimentalement. La technique consiste à faire circuler de l'air autour de la base d'un mur afin d'augmenter l'évaporation de l'eau absorbée par la paroi poreuse. Un système mécanique hygro-réglé est contrôlé par des sondes placées à l'admission et à la sortie. Conformément aux critères préprogrammés, les sondes commuteront d'un système marche/arrêt. La ventilation de la base du mur augmente l'évaporation, et réduit le niveau d'humidité [Torres & de Freitas, 2007, Torres & de Freitas, 2010]. Ce système, contrôlé par un moteur hygro-réglé à vitesse variable, entre en fonctionnement sous deux conditions : la pression de vapeur d'eau à l'entrée doit être inférieure à celle de la sortie, et l'humidité relative de l'entrée aérienne doit être suffisamment importante pour garantir l'absence de cristallisation de sels à l'intérieur du système. Le Wall Base Ventilation System est efficace en cas de remontées

d'humidité par capillarité (effet "mèche"). L'eau contenue dans le sol est évacuée au contact des zones ventilées situées de part et d'autre du pied du mur. Ce dispositif est, en revanche, inadapté aux murs humides enterrés où la progression de l'eau est horizontale. Dans ce cas, une intervention sur une seule face du mur est possible et doit assainir l'intégralité de mur.

Différents textes officiels ont également été publiés pour tenter de lutter contre les remontées capillaires. On peut citer l'annexe 14, publiée en 1992, qui porte une attention particulière aux problèmes de condensation dans les parois [Enertech, 1992]. Ce texte a apporté des connaissances en terme de caractérisation des matériaux de constructions tout en proposant des solutions technologiques pour réduire l'apparition des pathologies liées à la condensation d'humidité au sein des parois. Par suite, l'annexe 24, en 1996, avait pour but de modéliser les phénomènes physiques fondamentaux liés aux transferts de chaleur, d'humidité et d'air à travers une paroi multi-couche. On peut alors déduire de ces deux textes (les annexes 14 et 24) [IEA, 2020] que la prise en compte d'une modélisation globale des transferts couplés de chaleur et de masse à l'échelle du bâtiment et de la paroi est une étape *sine qua non* à la rénovation énergétique efficiente. En 2007, l'annexe 41 [Woloszyn & Rode, 2008] regroupe quatre problématiques majeures qui portent sur l'amélioration des connaissances scientifiques et l'analyse des effets de la réponse couplée thermo-hygro-aéraulique des bâtiments sur le confort des occupants, les consommations énergétiques et la durabilité de l'enveloppe. Cette annexe s'intéresse à l'exploitation détaillée des phénomènes de transferts tant d'un point de vue numérique que expérimental, sous différentes conditions intérieure et extérieure à la surface d'une paroi, en sus de l'étude de l'impact des systèmes de ventilation. Ce texte s'achève sur l'analyse des potentielles dégradations liées à la présence de l'humidité au sein des parois et dans le bâtiment. Ensuite, en 2013, l'annexe 55 a été développée dans l'objectif de fournir des informations ainsi que des outils conceptuels pour améliorer la réhabilitation énergétique des bâtiments en se basant sur des méthodes probabilistes lors de la prédiction du comportement hygrothermique et de la consommation d'énergie des bâtiments.

A l'échelle nationale

Au niveau national, le projet "HUMIRISK" [Nord, 2010] cible le renforcement de l'isolation dans l'existant et l'évaluation des risques liés à l'humidité. Ce projet porte sur l'influence de la rénovation thermique sur la réponse hygrothermique des bâtiments et la prévention des risques liés à l'humidité. Il a été constaté que les dégâts majeurs dans le bâtiment existant sont dus à des mauvaises qualités de mise en œuvre. Les projets "HYGRO-BAT" [Woloszyn, 2014] définit une méthodologie de conception hygrothermique des constructions en bois. La démarche adoptée se base sur la caractérisation des matériaux pour réaliser des mesures et des simulations sur des assemblages de parois. Ce projet sera approfondi à l'échelle du bâtiment en climat réel. L'objectif du projet "HU-

MIBATex" [Agence Nationale de la Recherche, 2011] est d'établir un outil en se basant sur les modèles numériques existants afin de prédire les désordres liés à l'humidité, tout en proposant des solutions technologiques. Il s'articule autour de modèles numériques d'une part et, d'autre part, sur des mesures expérimentales réalisées grâce à une cellule expérimentale. Une campagne de mesure sur des bâtiments, avant et après travaux de rénovation, vient également renforcer les conclusions du projet.

Actuellement, les communautés scientifiques cherchent alors à mieux appréhender le comportement des bâtiments existants. Plusieurs projets, précédemment cités, ont contribué à faire progresser nos connaissances scientifiques et technologiques du bâti existant, au travers du diagnostic des pathologies liées à l'humidité dans l'habitat et par l'identification d'un lien entre les dégradations et les modèles numériques qui traduisent ces phénomènes physiques complexes de transfert hygrothermique à l'échelle de l'enveloppe du bâtiment. Des guides de "bonnes pratiques" ou de solutions technologiques sont alors rédigés, à destination de professionnels de la rénovation énergétique ou des particuliers, afin de rénover le bâti existant tout en évitant le développement des pathologies causées par l'humidité [Berger, 2014]. Néanmoins, aucune solution proposée ne semble concrète, pérenne, efficace et peu onéreuse pour remédier à ces problématiques d'humidité dans le bâti ancien.

De manière générale, les différentes conclusions s'accordent sur le fait de veiller à ne pas piéger l'humidité et lui permettre, si possible, de s'évacuer de part et d'autre de la paroi. Tel est le point central sur lequel s'appuie le projet GAHB (Gestion Active de l'Humidité dans le Batiment) qui a pour objectif de permettre la rénovation du bâti ancien grâce à une gestion active de l'humidité dans les murs à l'aide d'un système aéraulique géré de façon intelligente et durable. Ce dispositif étudié, générant une ventilation de la lame d'air entre le mur porteur et l'isolant, est simple à mettre en œuvre, peu énergivore et garantit la durabilité du doublage thermique et de la structure (pas d'assèchement systématique), ainsi que la salubrité de l'ambiance. Les travaux réalisés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de ce projet.

Problématique et Démarche Générale

Dans ce contexte, notre problématique interroge la construction d'un modèle numérique global permettant de modéliser suffisamment finement les phénomènes physiques complexes mis en jeu, dans l'objectif de quantifier les échanges hygrothermiques à l'échelle d'une paroi humide ventilée composée d'une ossature porteuse en briques de terre cuite, doublée d'un isolant thermique, et en présence d'une ventilation mécanique contrôlée à l'interface structure / doublage. A terme, le modèle pourra alors être employé

pour automatiser et optimiser le procédé industriel d'assainissement des parois et des ambiances à l'origine de notre projet de recherche. Ce modèle devra également être confronté à des résultats expérimentaux, en laboratoire et sur site réel, afin d'en éprouver sa performance. L'enjeu majeur de notre démarche numérique consiste alors en la réduction de la complexité du modèle afin d'amorcer une approche holistique, à l'échelle de la paroi multi-couche puis de l'habitat.

Notre démarche se compose ainsi de trois étapes successives. Dans une première partie, un état de l'art est dressé, axé sur les spécificités du bâti ancien, en mettant en exergue les pathologies courantes causées par un excès d'humidité et les approches mathématiques associées aux transferts de chaleur et de masse au sein des parois de l'enveloppe des bâtiments. Le premier chapitre présente le contexte, les problématiques et les enjeux de la rénovation du bâti ancien humide, en mettant en exergue les pathologies liées à l'excès d'humidité ainsi que les solutions curatives et palliatives actuellement mises en œuvre. Le deuxième chapitre s'intéresse ensuite plus particulièrement aux mécanismes de transferts hygrothermiques au sein de parois poreuses et notamment à la description mathématique de ces phénomènes physiques.

La deuxième partie s'intéresse à la formulation numérique du procédé de ventilation étudié dans le cadre de notre projet GAHB. Un troisième chapitre est alors organisé autour de l'identification expérimentale des propriétés multi-physiques de briques anciennes en terre cuite. Dans ce chapitre, une vaste campagne expérimentale de caractérisation des propriétés microstructurales (porosité, microscopie, cristallographie, ...), thermo-physiques (conductivité thermique effective, chaleur massique spécifique ...), hygro-physiques (absorption capillaire, isothermes de sorption, immersion, perméabilité à la vapeur d'eau, MBV, ...), mécaniques (comportement en flexion et la compression à l'état sec et à l'état saturé) est réalisée et analysée, à l'échelle du matériau. À l'aune de cette large campagne d'identification, les propriétés multi-physiques des constituants représentent ainsi une base de données complètes, utilisables lors des simulations numériques que nous avons élaborées sous Fortran. Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation numérique des transferts de chaleur et de masse dans une lame d'air ventilée dont l'une de ses parois verticales est constituée d'un mur en brique de terre cuite (BTC) et l'autre représente un isolant hygroscopique. Lors de ces approches, l'écoulement d'air en convection forcée est décrit par les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et de concentration de vapeur d'eau. La paroi en BTC, assimilée à un milieu poreux, est dans un premier temps considérée saturée et dans un deuxième temps considérée non saturée. Les transferts de chaleur et de masse sont régis par le modèle de Darcy dans la première formulation et par le modèle de Luikov, dans le second. Le couplage entre les transferts de chaleur et de masse dans la paroi et l'air circulant dans la lame d'air est assuré par la continuité des densités des flux thermique et massique à l'interface entre le matériau et l'air. Le couplage entre les vitesses et les pressions est résolu par la méthode

de Lattice-Boltzman (LBM). Les deux modèles sont validées expérimentalement.

La dernière partie a pour objectif l'analyse et l'interprétation des résultats des simulations numériques des transferts de chaleur et de masse de parois humides ventilées, en ciblant plus spécifiquement le comportement de la paroi, de la lame d'air et le comportement global. Le chapitre 5 s'intéresse au premier modèle, darcien, où la paroi est saturée d'eau et nous analysons l'influence de la température de l'air insufflé et de son humidité relative, et l'influence des conditions de soufflage (vitesse d'air à l'entrée de la lame ventilée) sur les transferts de chaleur et masse au sein du système. Les limites de cette approche numérique nous conduisent alors vers le chapitre 6 qui investit une extension du modèle numérique, basé sur le modèle de Luikov, où la paroi est partiellement saturée (coexistence des trois phases liquide, solide et gazeuse) et les conditions limites adiabatiques levées. Les transferts étudiés en évolution bi-dimensionnelle de la température, de la concentration de vapeur et de la vitesse d'air dans la lame ventilée et dans le milieu poreux. L'influence des nombres de Nusselt et de Sherwood est également discutée.

Finalement, les principales conclusions sont présentées afin de synthétiser ce travail de recherche et d'ouvrir des perspectives scientifiques et technologiques futures, y compris sur l'optimisation du procédé de ventilation et le transfert de cette technologie vers le secteur industriel et le domaine de la rénovation et de la réhabilitation de la construction.

PREMIÈRE PARTIE

Étude Analytique de la Littérature

Introduction de la première partie

Les bâtiments construits avant la deuxième guerre mondiale en 1948 souffrent actuellement d'une très faible performance énergétique ; leur restauration et rénovation présentent alors un marché d'avenir, tant environnemental que scientifique. Ce patrimoine bâti participe à la perception identitaire et culturelle de notre société et, au-delà de l'intérêt du public, il constitue un enjeu économique et touristique conséquent.

Contrairement au bâti moderne qui ne présente que de faibles contraintes vis-à-vis des techniques modernes d'isolation thermique, le bâti ancien nécessite la prise en considération de son équilibre hygrothermique avec son environnement sous peine de désordres conséquents. Il s'agit souvent d'un habitat dégradé, voire insalubre, avec une médiocre qualité énergétique et qui exige une étude préalable approfondie de son comportement afin de choisir les techniques idoines pour le rénover. En effet, une mauvaise intervention sur ce bâti risque fortement de le déstabiliser et, par conséquent, pourrait engendrer des problèmes structurels graves ainsi qu'un fort taux d'inconfort pour ces occupants.

Les problèmes de réhabilitation et d'amélioration des caractéristiques thermiques de ce type de bâtiments s'articulent autour de 3 contraintes fondamentales :

- Des contraintes techniques liées à l'architecture et la richesse culturelle ou historique de notre société et de son tissu urbain. Cette contrainte dépend de la morphologie du quartier, où les travaux de rénovation de façade, voire la réalisation de travaux intérieurs, sont soumis à une autorisation auprès de l'architecture des bâtiments de France.*
- Des contraintes à l'échelle du matériau ou du bâtiment. Les matériaux utilisés sont pour la plupart du temps des matériaux naturels (pierre, pisé, brique en terre cuite...). Les parois sont, en général, de forte épaisseur et possèdent une forte inertie thermique. Des problèmes d'incompatibilité avec le matériau d'origine sont alors fréquemment rencontrés.*
- Des contraintes financières avec une capacité d'investissement limitée, notamment dans une démarche qui ne tient pas compte du coût global des travaux (c'est-à-dire avec une vision court-termiste qui ne prend en considération que la seule facture des travaux entrepris).*

Une connaissance approfondie du bâti et de ses composants est alors une condition sine qua non à toute intervention. Une méthode de rénovation intelligente et compatible doit être identifiée - et éprouvée - pour améliorer ces performances énergétiques de l'enveloppe du bâtiment, tout en évitant de dénaturer son architecture ou de perturber son équilibre hygrothermique.

Ainsi, l'objectif de cette première partie consiste en l'étude analytique de la littérature relative au comportement du bâti ancien soumis à des phénomènes de remontées capillaires. Nous détaillons les spécificités du bâti ancien en mettant en exergue les raisons pour lesquelles ces constructions sont sujettes à de nombreux désordres dus à la présence d'eau au sein de l'enveloppe. Quelles sont les sources d'eau dans l'enveloppe, comment y remédier, comment la protéger ? Différentes approches mathématiques des phénomènes de transferts de chaleur et de masse sont également présentées.

Le bâti ancien humide : contexte, problématiques et enjeux

La contrainte de réduction des émissions de CO₂ de l'industrie du bâtiment à l'horizon de 2050 est fixée par les orientations des politiques énergétiques nationales [IEA, 2020]. Ces politiques nous imposent de mener une campagne de réhabilitation des bâtiments existants, y compris le bâti ancien, afin de les adapter aux conditions de confort contemporain et de mieux répondre aux normes relatives aux consommations énergétiques (électricité, chauffage, éclairage ...). Le parc de logements français peut être décomposé en trois catégories énergétiques, dont chacune représente des niveaux performances différents : les bâtiments construits avant 1948, ceux antérieurs au premier choc pétrolier (entre 1948 et 1975) et ceux réalisés après 1975 [ADEME, 2014].

Par définition, le bâti ancien représente les constructions qui ont été mises en œuvre avant la première Réglementation Thermique de 1975. Certaines références font mention de bâtiments anciens pour toutes constructions antérieures à 1948, avant la Seconde Guerre Mondiale [Coignet & Coignet, 2012]. Il nous semble néanmoins judicieux de distinguer ces constructions en deux catégories en raison de l'important besoin de reconstruction post Seconde Guerre Mondiale : dès lors, de nouvelles stratégies, basées sur des modes constructifs industrialisés, mettant en œuvre des matériaux manufacturés, ont été largement utilisées. Nous nous intéressons ici plus spécifiquement aux modes de constructions traditionnels, datant d'avant 1948, plus assujettis aux désordres structuraux liés à la gestion de l'humidité dans l'enveloppe (nous les désignerons dans ce manuscrit sous la dénomination de "bâti ancien"). De nos jours, ces constructions connaissent un regain d'intérêt eu égard à sa forte représentativité au sein du parc immobilier existant, et pour lequel un important gisement d'économie d'énergie est identifiable - et identifié [Cloux, 2012]. Le bâti ancien présente des spécificités propres, qui le rend distinctif des bâtiments contemporains, d'où l'importance de la maîtrise de son fonctionnement et de la connaissance des risques potentiellement gouvernés par toute modification de son équilibre hygrothermique [Kaddour & Dahli, 2016].

1.1 Les spécificités du bâti ancien

En France, le bâti ancien est très diversifié et diffère d'une région à l'autre. Cette variété vient du fait que chaque région a des conditions géologiques locales qui sont différentes [Claude, 2018]. Les bâtiments sont construits par des matériaux naturels et/ou bio-sourcés qui se trouvent souvent dans un périmètre proche de leur site d'utilisation. Les savoir-faire des bâtisseurs ainsi que l'utilisation de ces matériaux ont permis d'avoir des bâtiments relativement performants avec un niveau de confort élevé, notamment durant la saison estivale [Calame, 1988]. Ces constructions montrent un niveau de performance énergétique proche de celui de bâtiment répondant aux normes de la réglementation thermique RT2000, avec une consommation d'énergie proche de 200 KWh/m²/an (voir figure 1.1 [CETE de l'Est, 2007]). Le bâti ancien est plus performant, du point de vue des consommations d'énergies, que les constructions datant de la période 1948 - 2000. Néanmoins, ces constructions ne répondent pas aux exigences énergétiques définies dans les réglementations thermiques, puis environnementale, post-2000 [Molle & Patry, 2015].

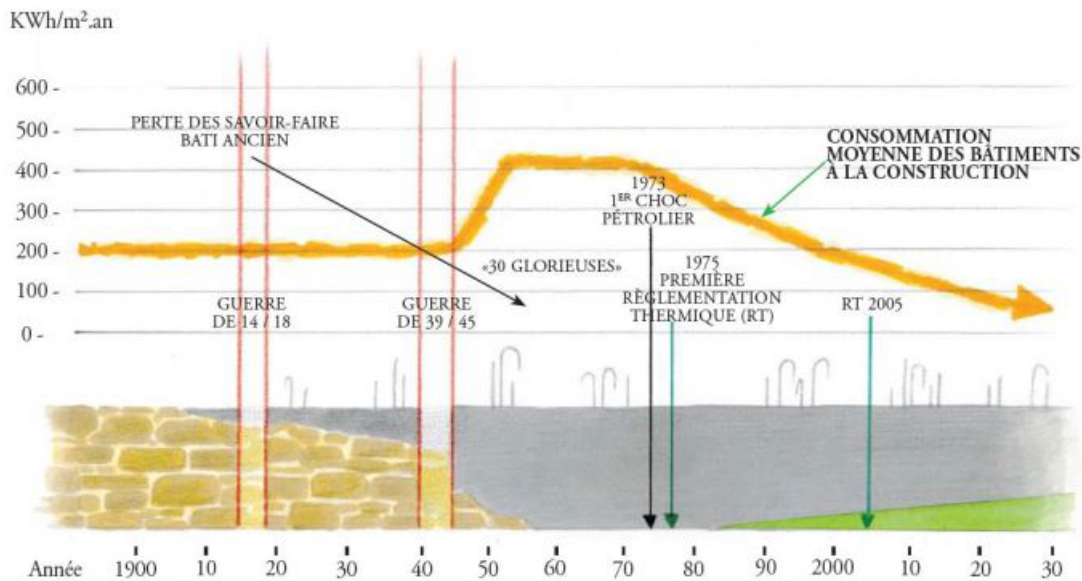


FIGURE 1.1: Consommation énergétique moyenne des bâtiments en fonction de leur date de construction [CETE de l'Est, 2007]

1.1.1 Les interactions entre le mode constructif et son environnement

Quantitativement, le bâti ancien représente 10 millions de logements, soit sensiblement le tiers du parc immobilier actuel. Il a été pensé solide et durable, capable de traverser des siècles, sous différentes sollicitations climatiques et mécaniques. Il est composé d'une majorité de maisons individuelles (60%), le reste étant constitué d'immeubles collectifs (40%) [Gress et al., 2009].

Rural ou urbain, il se décline du plus élémentaire au plus complexe, avec une remarquable continuité constructive, les mêmes matériaux, les mêmes modes constructifs ayant été employés [de Lapparent, 2007]. Le bâti ancien est issu de son environnement immédiat : il bénéficie d'une conception que l'on peut qualifier souvent de "bioclimatique" [ATHEBA, 2010]. Il vit avec et par son environnement, et se caractérise par son implantation en fonction du site, du relief, de la géologie, en fonction des éléments naturels, son orientation par rapport au soleil, aux vents et à la pluie, comme représenté en figure 1.2 [ATHEBA, 2010].

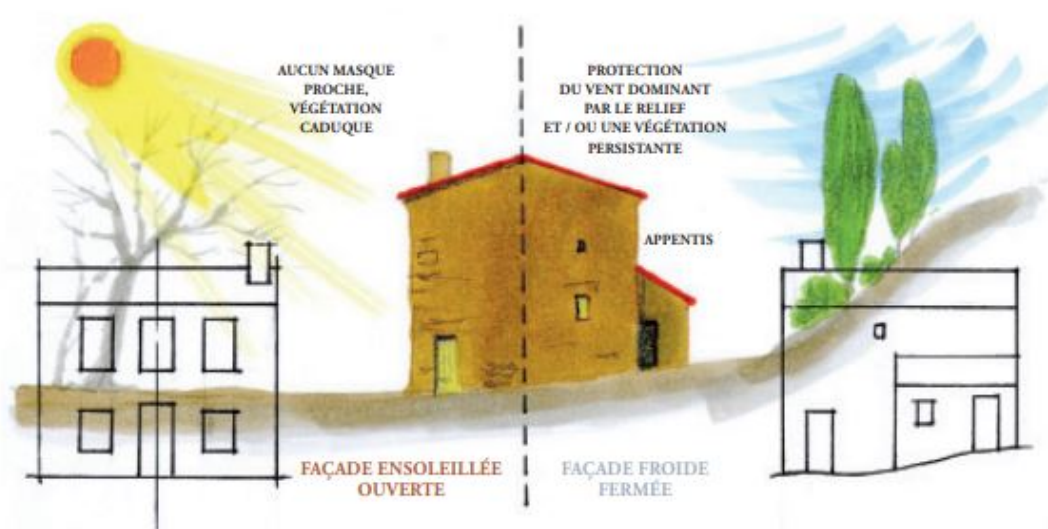


FIGURE 1.2: Approche ancestrale de la conception bioclimatique [ATHEBA, 2010]

Le bâti ancien est, par nécessité, basé sur l'économie des moyens. Il est alors souvent modeste, voire très modeste. Il est fruit d'un développement local autosuffisant. Tout d'abord, l'implantation des bâtiments entre-eux participe de cette économie générale : les constructions sont basées sur une économie de gestion de l'espace qui se manifeste clairement par le mode de groupement d'habitat, qui joue un rôle très important dans le confort thermique des occupants (mitoyenneté, écran solaire, protection aux vents, aux crues ...) [DREAL, 2014]. Ensuite, ces bâtiments sont construits avec les matériaux disponibles à proximité du chantier et peu transformés : issus du sous-sol (pierre, briques terre crue ou cuite, tuiles, ardoise ...), et/ou des végétaux (bois de structure pour la charpente, bois de menuiserie, paille ...). Les effets de densité contribuent à ce caractère bioclimatique. Les matériaux de construction anciens présentent généralement un bilan carbone très favorable, exprimé ci-dessous en en kg de carbone par kg de matériau [CEREMA, 2014] :

- bois : -0.49kg/kg
- pierre : 0.002kg/kg
- brique : 0.025kg/kg
- verre : 0.41kg/kg

La construction traditionnelle est réalisée sur le principe de l'empilement (tas de charge, voûte ...) et de l'assemblage (pans de bois, charpente) et doit sa stabilité à l'effet du poids propre d'un matériau et de l'ouvrage. Les assemblages sont majoritairement mécaniques (pas ou peu d'utilisation de colle par adhésion). La maçonnerie traditionnelle est souple, capable de s'adapter à des déformations importantes [CETE, 2010].

Le bâti ancien est souvent dit durable car ce type de constructions a traversé les siècles. Leur durabilité doit être appréciée à cette échelle de temps. Il est dit aussi biodégradable car les ruines des bâtiments anciens sont souvent désintégrées dans leur site et peuvent être réutilisées. Il répond donc en particulier aux valeurs recherchées actuellement au titre des économies de prélèvements et du recyclage [Giebeler et al., 2012].

Le mortier traditionnel utilisé pour maçonner les éléments constitutifs est issu du sous-sol local, directement accessible dans la grande majorité des cas. Il est composé de «terre» locale, roche en décomposition légèrement argileuse ou sable de carrière ou de rivière mélangé à la chaux (obtenue dans des fours à chaux par cuisson à environ 900°C) [Benabdallah et al., 2018].

1.1.2 Le comportement hygrothermique du bâti ancien

De nos jours, différentes approches, qui ont été initialement développés pour dimensionner les bâtiments neufs, ont prouvé leur inefficacité dans l'étude et l'analyse du comportement global des bâtiments anciens. En effet les bâtiments antérieurs à 1948 révèlent des spécificités significatives, souvent méconnues, dont il faut impérativement tenir compte pour modéliser leur comportement hygrothermique [Lautre, 2018]. Après de nombreuses observations approfondies, l'équilibre hygrothermique de ces bâtiments a pu être mis en exergue, à l'aune de caractéristiques majeures telles que leur forte inertie thermique, leur ventilation naturelle, leur capacité à "respirer", ou encore leur capacité à engendrer un confort d'été [Stephan et al., 2014].

En comparant le bâti moderne au bâti ancien, comme le montre la figure 1.3, on constate que l'ensemble des parois horizontales et verticales, y compris les murs extérieurs, les murs de refend intérieurs et les planchers intermédiaires, sont des structures lourdes eu égard à leur poids et leur inertie [ATHEBA, 2010]. Ils jouent un rôle très important dans le stockage et la régulation de chaleur en hiver et offrent un excellent confort d'été. Physiquement, la porosité à l'air et à la vapeur d'eau sont deux caractéristiques fondamentales de la maçonnerie ancienne. Les murs sont construits selon un mode traditionnel, "perméant" - car ils laissent passer la vapeur d'eau et l'air à travers les pores internes et à travers les défauts d'étanchéités. De plus, du point de vue thermique, ces parois traditionnelles, modernes, échangent la chaleur par rayonnement. Les parois anciennes possèdent une forte inertie thermique gouvernée par les matériaux qui les composent, et offrent un compromis entre inertie et isolation thermique [Chabriac, 2014].

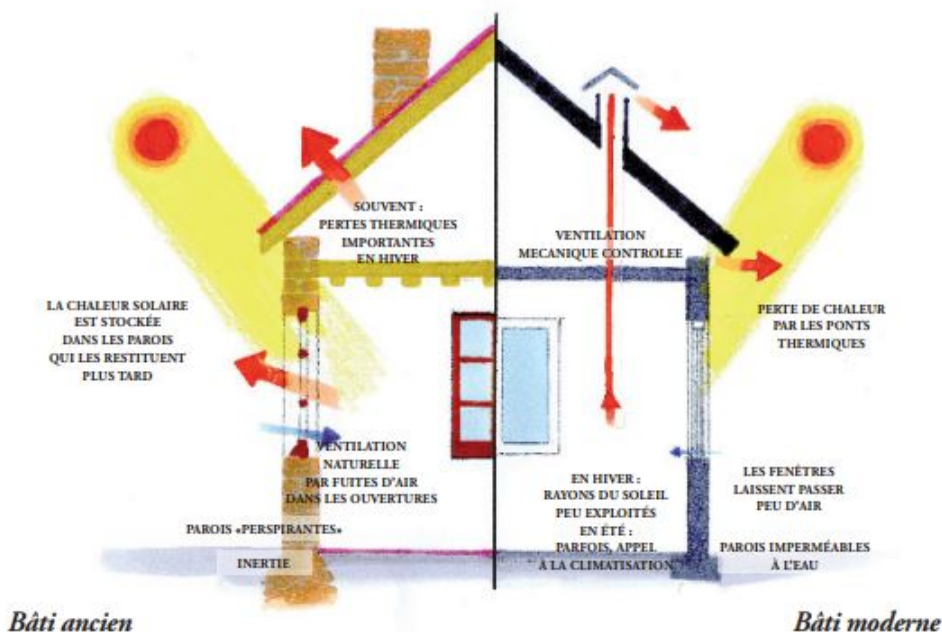


FIGURE 1.3: Principes de comportement thermique de constructions moderne et ancienne [ATHEBA, 2010]

Les matériaux jouent un rôle important en permettant rapidement d'atteindre un état d'équilibre avec l'environnement (déphasage thermique) et stabilisent la température intérieure face aux aléas thermiques de l'extérieur (amortissement thermique). L'ajout d'enduit, notamment à la chaux, et de boiseries participent également au comportement thermique de qualité de la paroi en raison de leur faible effusivité thermique. En effet, ils atteignent rapidement la température de l'air tout en permettant au mur de garder ses qualités de paroi respirante et, en même temps, offrent une réduction du rayonnement froid. Une parfaite combinaison entre une maçonnerie en pierre et l'utilisation des planchers en bois garantie une suppression des ponts thermiques. Le choix de certains espaces tampon comme les caves et surtout les combles (constitués par le vide de la charpente), contribue considérablement à atténuer les variations de température et d'humidité [Claude, 2018].

Le système constructif ancien offre un confort intérieur. Les fenêtres, en hauteur, permettent une pénétration profonde de la lumière. Les volets et les contrevents contribuent intensément, à leur tour, au dosage de confort thermique en été comme en hiver : la mise en œuvre des menuiseries, relativement mal assemblées, assure une ventilation permanente et nécessaire pour le maintien et la durabilité des structures en bois et pour le renouvellement de l'air ambiant. En effet, pendant la saison estivale la température interne reste inférieure à la température extérieure en raison de la forte inertie thermique des parois qui assurent un déphasage thermique, qui peut atteindre 8h comme le souligne la figure

1.4. Ce déphasage permet une restitution de la fraîcheur nocturne au cours de la journée à l'intérieur du bâti. L'humidité contribue pareillement à la création d'une fraîcheur par l'évaporation de l'eau contenu dans les murs eu égard au phénomène de changement de phase de l'eau, et plus particulièrement à l'effet de la chaleur latente d'évaporation. En hiver, la chaleur apportée par rayonnement solaire au cours de la journée est emmagasinée dans les parois lourdes. Cette énergie est ensuite restituée le soir. Ainsi, une stratégie de chauffage adaptée au cycle de présence des occupants, notamment en soirée, permettra d'assurer une température minimale de confort durant la nuit [ARCAD, 2015].

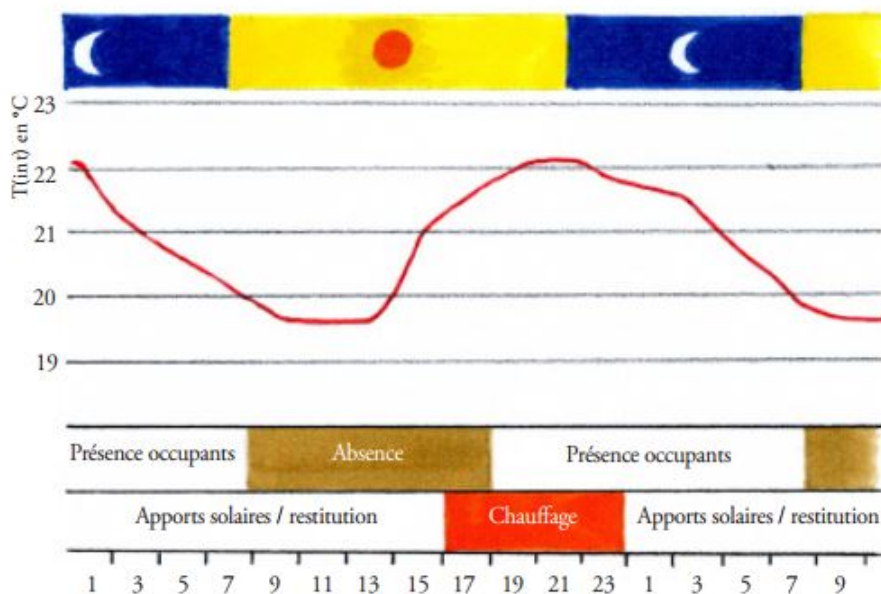


FIGURE 1.4: Évolution de la température intérieure au cours d'une journée, dans une construction ancienne [ATHEBA, 2010]

Cependant, les déperditions thermiques en saison hivernale ont principalement lieu en toiture et au niveau des défauts d'étanchéité à l'air. Chacune contribue en moyenne à 30% des déperditions, un des points faibles du bâti ancien. Néanmoins, la principale source de réduction de la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment reste la présence - et l'excès - d'eau dans la structure. En effet, la présence d'eau perturbe l'équilibre hygrothermique du bâti et peut entraîner, subséquemment, l'apparition et le développement de moisissures et champignons. Ces derniers peuvent alors affecter la qualité sanitaire du logement, voire sa salubrité, par le truchement de différentes pathologies pour les occupants et pour la structure bâtie [DPE, 2012].

1.1.3 La sensibilité des parois à l'humidité

La présence excessive de l'humidité dans tous les bâtiments entraîne une dégradation structurelle des parois et une détérioration du confort thermique et de la qualité de l'air

des ambiances habitables, en particulier dans les bâtiments anciens qui présentent une sensibilité accrue à ces phénomènes [Berger, 2014]. L'excès d'humidité perturbe l'équilibre hygrothermique de l'enveloppe du bâti avec son environnement et peut réduire considérablement les performances énergétiques. Ainsi, il apparaît nécessaire d'identifier les principales sources d'humidité dans les bâtiments, ainsi que les pathologies afférentes. Une évaluation du taux d'humidité dans les parois et l'ambiance peut permettre d'anticiper au mieux de futurs dégâts afin d'apporter une solution, souvent curative. La prise en considération de l'humidité avant même le début des travaux, notamment dans les modèles de simulation et de prédiction, permet de mettre en œuvre une rénovation durable et pérenne, et de préserver l'intégrité de l'isolant afin d'optimiser les besoins en chauffage et, éventuellement, en climatisation [Ferroukhi, 2015].

L'origine de l'humidité peut être naturelle, accidentelle ou liée à un défaut d'entretien tel que, par exemple, lors d'infiltration d'eau en toiture, ou un défaut d'étanchéité, de fuites dans un réseau . . . [Collombet, 1985]

Le phénomène de condensation : La formation d'humidité par condensation est liée à une production importante de vapeur d'eau à l'intérieur des habitations. Dans une maison, la buée sur les vitres intérieures des fenêtres ou l'apparition de gouttelettes d'eau sur les parois murales froides sont deux des signes manifestes du phénomène de condensation. Il s'agit d'un phénomène très courant qui a pour origine l'activité humaine au sein du logement. La production excessive de vapeur d'eau provient des plantes, des cuissons, du lavage, du séchage, du repassage, de la transpiration voire même de la respiration des occupants du logement. La condensation se produit lorsque la différence de température entre l'air ambiant et les parois est trop importante c'est-à-dire lorsque la température des parois est inférieure à la température de rosée de l'air ambiant (figure 1.5). Ce phénomène est amplifié par une mauvaise ventilation et un manque de renouvellement de l'air intérieur. Les solutions généralement mises en place consistent alors à ventiler, naturellement ou mécaniquement, le logement.

Les infiltrations d'eau : L'apparition d'humidité dans un bâtiment due à l'infiltration d'eau est un phénomène assez fréquent dans les bâtiments anciens dont les toitures sont souvent mal entretenues (tuiles cassées non remplacées, défaut de l'étanchéité en cuivre ou en zinc). De plus, l'état des façades, généralement fissurées, sont des circonstances qui favorisent l'infiltration des eaux de pluie, telles que présentées en figure 1.5. Celles-ci peuvent alors se frayer un passage au travers de l'enveloppe du bâtiment et ruissellent à l'intérieur des parois, entraînant l'apparition des nombreux désordres tant structurels que sur la santé des occupants. L'entretien et la réparation doivent alors être mi en œuvre pour pallier à ses problématiques.

Les remontées capillaires : L'humidité ascensionnelle est un phénomène qui se produit dans les matériaux de construction poreux. Elle s'accumule dans les pores de très faibles dimensions (effet mèche) qui sont dans la majorité des cas reliés entre eux et forment des longs canaux appelés "capillaires". Ce phénomène est renforcé par le mécanisme d'électro-osmose (l'eau tellurique chargée en sels minéraux présente une charge électrique créant ainsi une différence de potentiel électrique avec le mur et engendrant la migration de l'humidité du sol vers la toiture). C'est la source d'humidité la plus fréquente dans les bâtiments et, en particulier, dans les bâtiments anciens [Torres & de Freitas, 2007]. En effet, les murs traditionnels sont en contact direct avec le sol (pas de rupture étanche), construits avec des matériaux fortement hygroscopiques voire capillaires (tels que les pierres ou les briques en terre cuite), et favorisent donc la migration de l'eau dans un sens anti-gravitaire (figure 1.5). Ce phénomène peut atteindre plusieurs mètres en hauteur, notamment en cas d'étanchéité des deux faces verticales de la paroi. Ces phénomènes de migration d'eau sont également très fréquents dans les parois semi-enterrées.

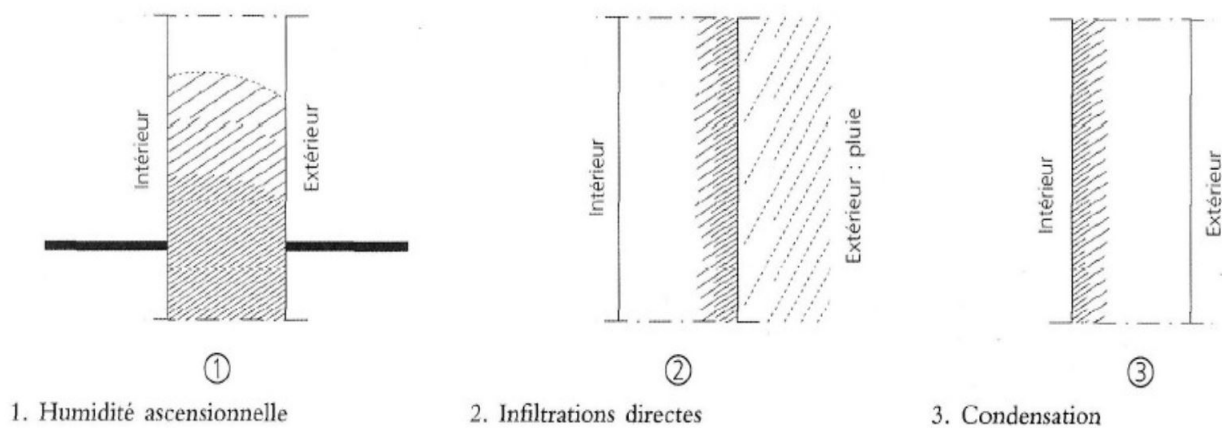


FIGURE 1.5: Origines de l'humidité au sein de l'enveloppe des bâtiments [Coignet & Coignet, 2012]

1.2 Les pathologies liées à l'excès d'humidité

L'eau est présente d'une manière naturelle, sous forme de gaz (vapeur) ou liquide, à l'intérieur d'un bâtiment. L'eau en phase liquide est amenée par l'infiltration des eaux de pluie ou par phénomène de succion (remontées capillaires). La sollicitation de la paroi des bâtiments par la vapeur d'eau est inéluctable car cette dernière est présente dans l'atmosphère extérieure et dans les ambiances intérieures via la respiration et l'activité des occupants qui contribuent à sa production. L'ensemble des bâtiments contemporains reposent sur un équilibre hygrothermique stable, qui n'engendre pas de désordres. Toute modification impactant cet équilibre peut être à l'origine de désordres. Dans ce sens, les travaux de réhabilitation thermique peuvent perturber ces équilibres et provoquer l'ap-

parition des différentes pathologies [Viitanen et al., 2010]. Dans ce cas, ils sont qualifiés de travaux pathogènes. Dans le cadre de rénovations énergétiques, la problématique de l'humidité dans les bâtiments existants nécessite donc une attention particulière pour ne pas compromettre leur durabilité. Parfois, sans même l'intervention des travaux de réhabilitation, certains bâtiments présentent des pathologies dues à l'action de l'humidité, notamment les bâtiments anciens qui sont les plus touchés par les remontées capillaires au regard de leurs spécificités. On peut être souvent envahi par le charme de la structure vue de l'extérieur mais l'intérieur peut être invivable en raison de multiples désordres liés aux caractéristiques du matériaux de construction, aux performances hygrothermiques des parois et à l'équilibre hygrothermique entre l'extérieur et l'intérieur [Berger et al., 2012]. Ces différentes pathologies peuvent alors être observées au niveau de l'enveloppe du bâtiment ou de l'ambiance habitable.

1.2.1 La dégradation de la structure porteuse

En sus de sa fonction structurelle, une paroi d'un bâtiment doit assurer à la fois le confort thermique, visuel et acoustique du bâtiment [Ünver et al., 2004]. La conception rigoureuse de la composition d'une paroi repose sur la compréhension des mécanismes de transferts et de stockage de l'humidité dans les matériaux de construction inhérents et sur la maîtrise des techniques de gestion d'humidité au sein de la paroi. Les transferts de chaleur, d'air et de masse peuvent alors être maîtrisés et contrôlés par un choix judicieux et efficace de la conception de la paroi et des matériaux avec des propriétés adéquates.

Des désordres apparaissent principalement en présence de teneurs excessives dans les différentes couches de la paroi, que cette eau soit sous forme liquide ou de vapeur. D'une façon générale, la présence de l'humidité dans les matériaux de construction modifie leurs propriétés thermo-physiques et mécaniques et a des conséquences néfastes sur le comportement et l'état d'équilibre de la structure. Des pathologies d'ordre structurelle assez grave peuvent apparaître, comme une fissuration excessive telle que présentée en figure 1.6.



FIGURE 1.6: Exemple de fissuration d'un mur en briques terre cuite sous l'effet d'une quantité d'humidité interne excessive

Dans la littérature, on recense de nombreuses études expérimentales et numériques sur l'impact de la teneur en eau sur les performances mécaniques, physiques et hygrothermiques des matériaux de construction tels que le bois, la pierre, la terre crue et le béton [Rousseau, 2003]. En effet, le comportement mécanique des matériaux constituant une paroi est fortement affecté par un taux élevé d'humidité, dégradant ainsi dangereusement la performance structurelle des parois : [Vu, 2007] prouve dans ses travaux que la résistance mécanique décroît d'une façon non linéaire avec l'augmentation de la teneur en eau dans le matériau de construction. Exposé à une humidité relative importante, un matériau a tendance à emmagasiner l'humidité par adsorption jusqu'à saturation. Les auteurs ont évalué la variation de la contrainte à la rupture en fonction du degré de saturation, et leurs résultats, présentés en figure 1.7, montrent que la résistance diminue de 31% entre l'état sec et celui saturé. Dans un contexte similaire, [Meille, 2001] a identifié la perte de résistance mécanique du plâtre entre un état sec et celui saturé, de l'ordre de 50%.

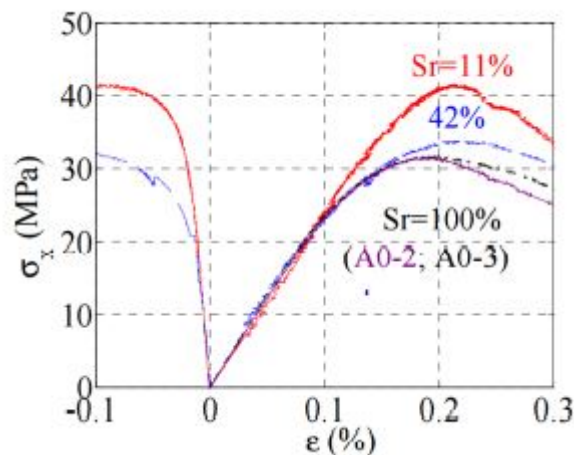


FIGURE 1.7: Évolution de la loi de comportement mécanique du béton en fonction du degré de saturation [Vu, 2007]

[Beck et al., 2003], à travers son étude expérimentale sur des matériaux à base de calcaire, a défini des courbes d'influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression desdits matériaux étudiés. Le comportement a été observé pour la pierre de tuffeau, avec une baisse de la résistance à la compression de 55% entre les deux états sec et saturé. Dans la poursuite de ces observations, [Berger, 2014] a défini des indicateurs de pathologies liées aux modifications des caractéristiques mécaniques des matériaux. Les auteurs définissent alors la notion de teneur en eau critique, quantité d'eau à laquelle la résistance mécanique critique est atteinte. Cette résistance mécanique critique est le seuil au delà duquel une pathologie structurelle apparaît. La figure 1.8 montre l'évolution de la résistance mécanique d'un matériau en fonction de la teneur en eau, en résonance avec l'atteinte du seuil critique. Selon les auteurs, ces paramètres peuvent être aisément intégrés à un code numérique, via un indicateur de pathologie, afin de modéliser le comportement de la structure de la paroi et d'anticiper d'éventuels désordres.

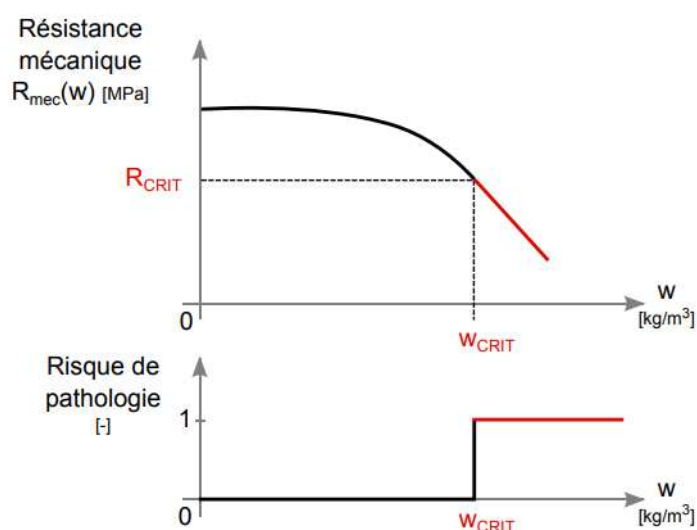


FIGURE 1.8: Définition de l'indicateur de pathologie liée aux effets de l'humidité sur les propriétés mécaniques des matériaux [Berger, 2014]

Enfin, la présence de l'eau dans les pores d'un matériau à caractère hygroscopique, tel que la pierre, les briques ou le bois, exerce une pression capillaire sur la matrice solide. Cette pression les fragilise et des phénomènes de gonflement, de retrait ou de dilatation peuvent apparaître. Cette variation dimensionnelle peut également avoir des conséquences sur la pérennité et la durabilité des performances mécaniques de la structure. Ainsi, [Cognard, 2002] a déterminé le coefficient de variation dimensionnelle de plusieurs matériaux, dont la brique. Le tableau 1.1 résume les coefficients de variation dimensionnelle en fonction de la teneur en eau de quelques matériaux de construction. Ces variations peuvent être irréversibles ce qui mène à une apparition de dégradation structurelle (voir figure 1.9).

TABLEAU 1.1: Effet de l'humidité sur les propriétés physiques de différents matériaux [Cognard, 2002]

| Matériaux | Coefficient de variation dimensionnelle | |
|--------------------------------|---|---------------|
| | Réversible | Irréversible |
| Béton de granulats courants | 0.02 à 0.06 | -0.03 à -0.07 |
| Béton de granulats légers | 0.03 à 0.06 | -0.03 à -0.08 |
| Parpaing de granulats courants | 0.02 à 0.04 | -0.02 à -0.06 |
| Parpaing de granulats légers | 0.03 à 0.06 | -0.02 à -0.06 |
| Briques | 0.02 | 0.07 |
| Calcaire | 0.01 | Non |
| Grès | 0.07 | Non |



FIGURE 1.9: Exemple d'un pignon en pierres gonflé et fissuré en raison de la présence excessive d'eau

1.2.2 La dégradation de l'enveloppe thermique

Pareillement, les propriétés thermiques ne sont pas épargnées par l'action de l'humidité. En effet, la conductivité thermique de l'eau est 25 fois supérieure à celle de l'air sec. La présence d'eau dans les pores d'un matériau modifie ainsi la conductivité thermique apparente, ce qui a pour conséquence l'augmentation des transferts thermiques et, impacte donc la consommation d'énergie de la construction. Selon [Derome, 1999], une augmentation volumique de 1% de la teneur en eau d'un matériau implique une augmentation de 3% à 5% du flux thermique allant de l'intérieur vers l'extérieur. En réalité la variation des propriétés thermiques d'un matériau ne cause pas une pathologie directe sur le matériau mais engendre une dégradation des performances énergétiques des parois composées par ces matériaux. Il s'agit donc ici d'une pathologie indirecte.

Plusieurs études expérimentales ont été menées pour évaluer la variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau. Pour des isolants, [Jerman & Černý, 2012] ont montré que la conductivité thermique de la laine minérale augmente de 90% entre l'état sec et celui saturé, quand [Meukam, 2004a] tend à démontrer qu'elle peut atteindre 140%. La figure 1.10 présente la variation de la conductivité thermique des matériaux de construction en fonction de la teneur en eau : Briques (à gauche)[Meukam, 2004a] et laines minérales (à droite) [Jerman & Černý, 2012]. Ces résultats montrent que l'humidification des matériaux se traduit par un remplacement progressif de l'air contenu dans les pores par l'eau, favorisant le transfert thermique par conduction, au regard de la forte conductivité thermique de l'eau, par rapport à l'air.

Pour sa part, [Berger, 2014] a défini un coefficient de transfert critique de la paroi, égal à $1.05 \times$ le coefficient de transfert déclaré. L'auteur propose de comparer ce coefficient de transfert critique avec le coefficient de transfert effectif pour identifier une dégradation des performances thermiques de l'enveloppe.

L'humidité est considérée comme un vecteur de pathologies supplémentaires lorsqu'un

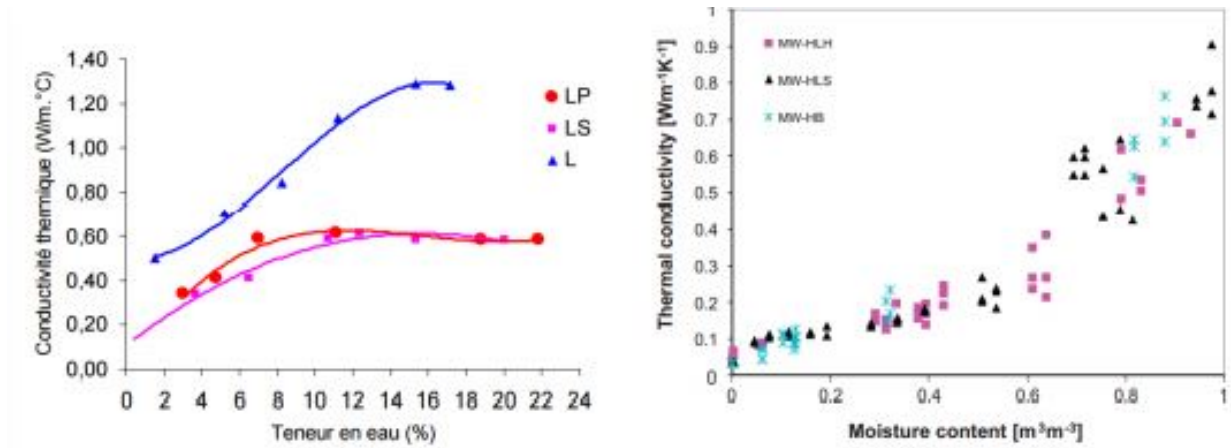


FIGURE 1.10: Effet de l'humidité sur la conductivité thermique de différents matériaux de construction [Meukam, 2004a] et [Jerman & Černý, 2012]

bâtiment est soumis à des ambiances hivernales favorisant des cycles de gel et de dégel à l'intérieur des matériaux à forte porosité capillaire (pores de diamètre équivalent important). Ces cycles peuvent engendrer, à l'échelle de la paroi, l'apparition de fissures thermiques. Phénoménologiquement, l'eau présente dans les pores se transforme en glace qui exerce une pression sur la matrice solide et augmente ainsi le volume du matériau jusqu'à 9% [Valenza II & Scherer, 2007], comme présenté en figure 1.11. Sous l'effet de cette pression, la porosité va donc augmenter et favoriser les transferts de chaleur au sein du matériau au regard de la forte conductivité thermique de l'eau.

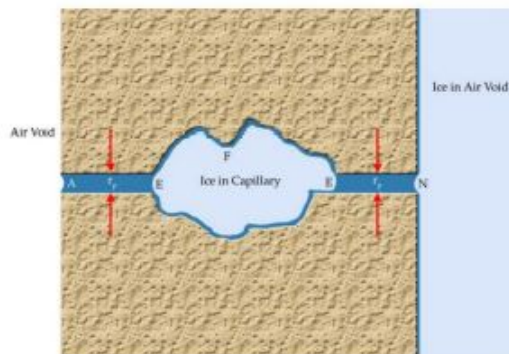


FIGURE 1.11: Phénomène de gel d'eau dans un pore

Les matériaux cimentaires et les briques en terre cuite sont fortement sensibles à ce phénomène. Plusieurs modèles numériques de prédiction des dégradations causées par ces cycles de gel/dégel ont été développés : l'étude de [Zuber & Marchand, 2000] a déterminé la déformation macroscopique à partir de la simple connaissance de la distribution de la taille des pores. Les auteurs ont analysé l'influence des paramètres physiques (la porosité, la perméabilité et le module d'élasticité) et interrogé l'aptitude du modèle numérique à décrire la réaction du matériau à ces cycles.

Parmi d'autres pathologies liées à l'action de l'humidité, le phénomène de la cristal-

lisations des sels peut également être cité en raison de la présence dans l'eau des pores de sels dissous (des chlorure de sodium, des sulfates de magnésium et de calcium ...) [Nord, 1992]. Ces sels peuvent avoir deux origines : soit l'eau provenant des sols par osmose est riche en sels minéraux qui remonte dans les parois, soit par une réaction de l'eau avec les composants du matériau. Ce dernier cas est très fréquent lorsque le matériau de construction utilisé est la brique en terre cuite car l'eau interstitielle va réagir avec les minéraux présents au sein des briques, notamment lors de cuisson hétérogène et/ou incomplète. Ces sels minéraux vont ensuite être entraînés vers les faces verticales de la paroi, sous l'effet du gradient de pression de vapeur d'eau, et engendrer un phénomène d'efflorescence surfacique (voir figure 1.12).



FIGURE 1.12: Efflorescence d'un mur en briques terre cuite

L'efflorescence et la subflorescence dépendent de plusieurs paramètres tels que la porosité, la taille et la distribution des pores et la sursaturation en sel [Andres et al., 2009]. Le processus de cristallisation des sels a lieu quand l'eau interstitielle s'évapore au sein même du matériau, notamment s'il présente une forte capillarité comme la brique de terre cuite. Les sels dissous migrent alors vers le front de séchage ou ils subissent une phase de saturation suivie de recristallisation. En cas d'isolation thermique par l'intérieur, ce phénomène sera renforcé, pouvant impacter la conduction de chaleur au travers de la paroi et la durabilité de l'isolant [Subashi De Silva & Hansamali, 2019]. A l'échelle d'une paroi, la cristallisation cause la formation des sels sous forme de tâches blanches en surface du matériau (figure 1.13). En général, cette pathologie ne cause pas une détérioration structurelle car elle n'affecte pas la matrice solide. En revanche, lorsqu'il s'agit d'une cristallisation interne, elle risque de causer des dégâts esthétiques comme l'écaillage ou la fissuration [Nicolai, 2008, Poupeleer, 2007].

1.2.3 La détérioration de la qualité de l'air intérieur

Les conditions hygrothermiques de l'air intérieur représentent les principaux facteurs qui ont une influence directe sur le confort et le bien-être des habitants. Une température et une humidité relative de l'air intérieur défavorables constituent un terrain favorable pour le développement des pathogènes nuisibles [Baughman & Arens, 1996].

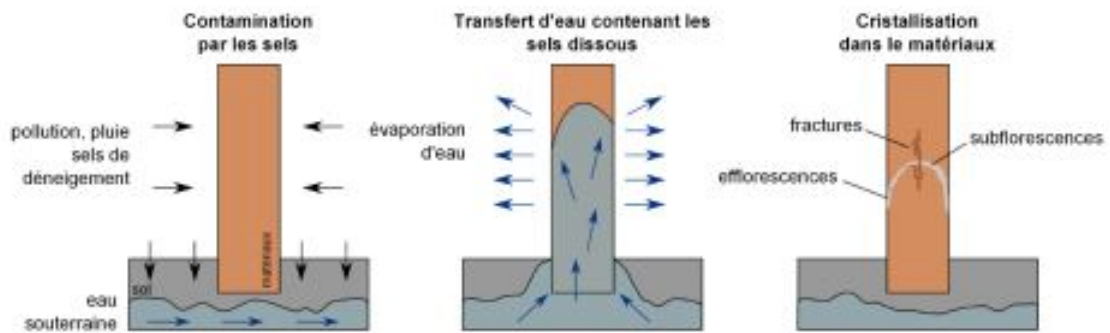


FIGURE 1.13: Processus de cristallisations des sels [Vorhauer, 2018]

Une bonne qualité d'air intérieur est un facteur primordial pour garantir le bien-être des occupants. Cette problématique s'est posée depuis l'apparition de la réglementation thermique de 1975, c'est à dire depuis que les bâtiments sont devenus plus étanches, moins perméables, ce qui a accru le risque de pollution intérieure [Maskell et al., 2015].

Selon une campagne nationale d'études portant sur 567 résidences principales, menée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) en 2005 [Rousseau, 2003], la moyenne d'occupation des logements en France est de l'ordre de 16h par jour, et la chambre à coucher est la pièce la plus fréquentée (39% du temps), suivie par le séjour (17% du temps) et la cuisine (11% du temps). Nous passons alors environ 85% de notre temps dans des environnements clos (domicile, locaux de travail ...) dans lesquels nous pouvons être exposés à de nombreux polluants. La nature de ces polluants (chimiques, biologiques, physiques) dépend notamment des caractéristiques du bâti, des activités et du comportement des occupants. Les polluants sont regroupés dans trois grandes catégories :

- Les bio-contaminants sont des moisissures ou des allergènes domestiques provenant entre autres d'acariens (voir figure ??),
- Les polluants chimiques sont les composés organiques volatiles (COV), des oxydes d'azote (NOx), du monoxyde de carbone (CO), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des phtalates ...
- Les polluants physiques sont des particules et des fibres (amiante, fibres minérales artificielles), la radio-activité, la poussière ...





FIGURE 1.14: Développement de bio-contaminants à l'intérieur du bâtiment

La présence de ces polluants est issue de différentes sources d'émission : les constituants du bâtiment, le mobilier, les appareils de combustion (chaudières, poêles, chauffe-eau . . .), le transfert de la pollution extérieure, mais dépend également des modes de vie des habitants (tabagisme, présence d'animaux domestiques, produits d'entretien ménagers). En effet, la qualité de l'air que nous respirons peut avoir des effets sur la santé et le bien-être, depuis la simple gêne (olfactive, somnolence, irritation des yeux et de la peau) jusqu'à l'apparition ou l'aggravation de pathologies aiguës ou chroniques (allergies respiratoires, asthme, cancer, intoxication mortelle ou invalidante . . .). Depuis quelques années, une attention croissante est donc portée à ce sujet, en s'intéressant plus particulièrement aux bio-contaminants susceptibles de se développer dans des conditions climatiques favorables.

La majorité des études sur ce sujet montre que les contaminants biologiques ont tendance à se produire dans des humidités relatives assez élevées (supérieur à 60%) [Funk & Wakili, 2008, Roulet, 2004, Toftum et al., 1998, Baughman & Arens, 1996], [Wolkoff & Kjærgaard, 2007]. Néanmoins, dans un contexte similaire, les résultats de [Green, 1985] ont montré que les bio-contaminants peuvent également se développer pour de faibles humidités relatives. [Berger], à son tour, a conclu que la plage d'humidité relative optimale pour une bonne qualité d'air intérieur, sans développement des agents biotiques, doit être comprise entre 40% et 60%. La figure 1.15 montre les plages courantes de formation de polluants dégradant la qualité de l'air ambiant [Roulet, 2004]. Les zones vertes ne sont pas favorables à la formation de ces polluants. De plus, l'influence de la température

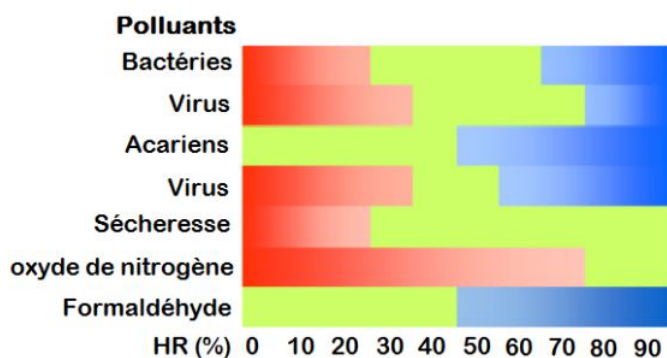


FIGURE 1.15: Plages d'humidité relative optimale pour une bonne qualité d'air [Roulet, 2004]

est également un facteur clé pour leur apparition, comme le soulignent les zones bleues et rouges. Ces polluants se développent davantage lorsque la température est douce et l'humidité élevée, ou lorsque la température est plus élevée, avec un air relativement sec.

L'excès d'humidité alors est la première problématique du bâtiment, notamment en vue de leur réhabilitation ou rénovation. L'humidité présente une source de désordre structurelle et d'inconfort pour les occupants, voire d'insalubrité. Les dégâts dues à la présence de l'humidité s'accroissent avec l'âge du bâtiment, ce qui explique pourquoi les bâtiments anciens sont les plus touchés. Mais ceci n'exclut pas que les bâtiments mal chauffés ou construits dans des régions à très forte pluviométrie souffrent aussi des problèmes causés par l'humidité. Les dégradations de ces constructions peuvent être d'ordre structurel et hygrothermique, mais aussi esthétique et d'hygiène. Aujourd'hui de nombreuses interrogations se posent sur les solutions à adopter pour traiter le problème d'humidité sous formes palliatives ou curatives dans le cadre de la rénovation énergétique durable des bâtiments.

1.3 Les différents traitements palliatifs et curatifs

Dans la littérature, de nombreuses enquêtes et diagnostics peuvent être recensés et présentant des approches très pragmatiques des pathologies liées à l'humidité [Pien, 1985, Louvigne & Peccard, 1985]. Ces travaux ont été réalisés sur différentes pathologies rencontrées au sein d'un bâtiment afin d'estimer l'apparition de ces dégradations. Des essais réalisés *in-situ*, sans tenir compte des transferts fortement couplés de chaleur et d'humidité dans les parois, ont ainsi été menés. Ces études sont souvent destinées aux professionnels de la construction et proposent des solutions à des coûts assez élevés et dont la durabilité n'est pas toujours garantie.

De plus, à l'échelle nationale, plusieurs projets ont été récemment réalisés dans le but d'investir les problématiques inhérentes aux bâtiments anciens, patrimoine plus particulièrement touché par l'humidité. Ces projets ont pour objectif de présenter, et éventuellement de renforcer nos connaissances sur le bâti ancien et incitent à tenir compte de l'humidité dans les parois lors de chantier de rénovation. Malheureusement, aucune solution concrète, pérenne et efficace n'est stipulée pour remédier à ces problèmes. Différentes techniques sont néanmoins disponibles sur le marché de la rénovation. En raison de la complexité et de la variabilité des facteurs, les résultats obtenus peuvent être imprévisibles et/ou non pérennes. Le choix de la technique doit s'appuyer sur un diagnostic exhaustif de l'origine du problème, en étudiant l'efficacité escomptée de la solution apportée, le tout en corrélation avec le coût d'intervention. Les techniques de traitement de l'humidité ascensionnelle, habituellement utilisées, reposent sur trois principes d'intervention :

- Empêcher l'eau de pénétrer dans les murs
- Enlevez l'excès d'eau des murs
- Empêcher la (re)montée d'eau sur les murs

1.3.1 Limiter l'apparition des phénomènes de condensation

Actuellement, les solutions utilisées pour pallier aux pathologies dues à l'humidité par condensation consistent à réduire la production de vapeur à l'intérieur par l'installation d'un système de ventilation mécanique ou naturelle qui assure une habitation saine, sans polluant. On distingue deux types de VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) double flux avec récupération de chaleur ou simple flux avec des pertes d'énergie. Ces systèmes agissent en créant un mouvement d'air qui amène naturellement de l'air frais dans les pièces sèches (séjour, chambres ...) directement par la conduite, et une extraction mécanique de l'air pollué et humide hors des pièces d'eau, via une centrale. La figure 1.16 montre le principe de fonctionnement de la VMC, double flux à gauche et simple flux à droite [Guide-humidité, 2019].

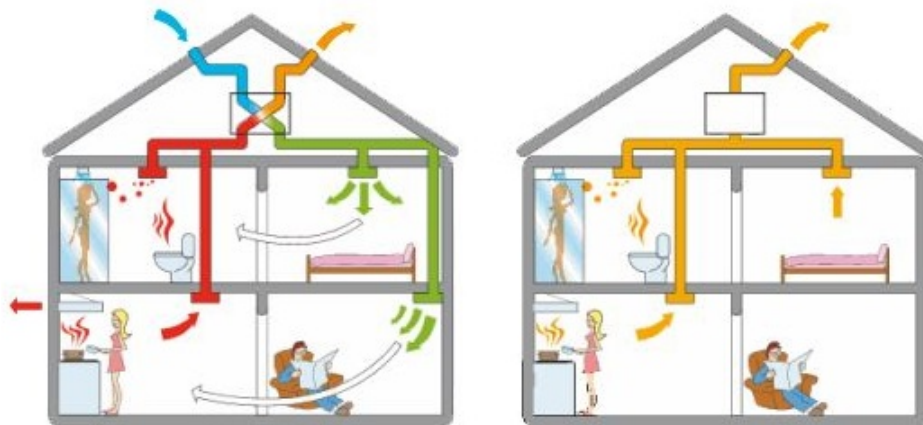


FIGURE 1.16: VMC double flux *vs* VMC simple flux

Cette solution est plus efficace que l'utilisation de dé-humidificateurs solution plus coûteuse dont l'efficacité n'est pas prouvée à long terme. En addition, on trouve dans plusieurs logements qui souffrent de développement de moisissures et de salpêtre l'utilisation de revêtements de murs ou d'enduit qui masquent les défauts des parois (caches misères). Cette solution, loin de traiter les problèmes - au contraire -, présente des pathologies qui s'accroissent et réapparaissent en surface au bout d'un certain temps.

Une autre alternative consiste à supprimer les zones froides en remplaçant le simple vitrage par un double vitrage qui a pour effet de relever la température de la face vitrée en contact avec la pièce et de changer les conditions de condensation [Nord-humidité, 2021].

Enfin, une dernière technique consiste à mieux isoler les logements mal chauffés. Or, l'inconvénient majeur de cette pratique est que la mise en œuvre de l'isolant sur une paroi humide ne garantit en aucun cas d'empêcher le transfert d'humidité de la paroi vers l'isolant thermique.

1.3.2 Lutter contre les phénomènes d'infiltration directe ou accidentelle

Les solutions présentes sur le marché incitent à l'utilisation d'une barrière physique dans le but que l'eau de pluie ne pénètre pas profondément dans les matériaux. La façade peut être traitée à l'aide de produits hydrofuges si nécessaire. Il faut alors procéder au nettoyage de la façade, ainsi qu'à la réfection des joints et à la réparation des fissures, et enfin mettre en place une couche de produit hydrofuge qui forme une pellicule sur laquelle glisse l'eau sans imprégner le matériau (figure 1.17). D'autre part, les appuis des fenêtres sont protégés avec des feuilles de zinc ou tout autre matériau étanche. Les fuites d'eau dans les conduites sont traitées par des sels absorbants, le cas échéant [Lermier, 2021].



FIGURE 1.17: Principe d'hydrofuge d'une façade

1.3.3 Prévenir les transferts ascendants d'humidité

L'humidité ascendante ou remontées capillaires par effet succion est l'une des sources les plus fréquentes et les plus difficiles à traiter. Il s'agit d'un phénomène naturel qui a lieu quand une paroi est en contact direct avec un sol non drainé. En effet, l'eau monte à travers les matériaux de construction perméables en progressant jusqu'à atteindre un équilibre entre la quantité d'eau entrante par absorption et la quantité d'eau sortante par évaporation. Un tel phénomène dépend de multiples facteurs tels que la quantité d'eau en contact avec le matériau, l'évaporation en surface et à l'intérieur du matériau, les conditions de sollicitation hygrothermiques, les caractéristiques des différentes couches constituant la parois (porosité, dimension, caractéristiques mécaniques, thermiques, hygrothermiques ...) [Promis et al., 2018].

En réalité la plupart des solutions utilisées pour pallier aux problèmes d'humidité ascendante résident dans la mise en œuvre d'une barrière physique limitant la progression de l'eau dans le mur (bande d'arase, injection de produit...) (figure 1.18) et constitue une coupure franche du soubassement. Cette barrière peut être réalisée par l'injection de mortier bouche-pores ou hydrofuge dans des trous percés à la base du mur. Cette technique est envisageable pour des murs relativement homogènes, ne présentant pas de

cavités importantes, mais est peu efficace pour des murs maçonnés avec des éléments creux ou fortement capillaires comme les briques [AQC, 2021].



FIGURE 1.18: Mise en œuvre d'une barrière physique jouant le rôle de coupure capillaire

L'installation d'un drain (figure 1.19) consiste à créer un chemin préférentiel pour l'écoulement des eaux qui imprègnent les terrains en contact avec les parties enterrées des bâtiments (fondations, caves). Les drains évacuent une partie de l'eau et limitent leur contact avec les ouvrages enterrés. Cette solution est à envisager dans un terrain peu perméable : l'eau suivra la pente de la fouille et rejoindra le drain. Les drains sont reliés à un réseau conçu pour évacuer les eaux collectées vers un point bas assurant ainsi leur écoulement [Rénovation et travaux, 2021].

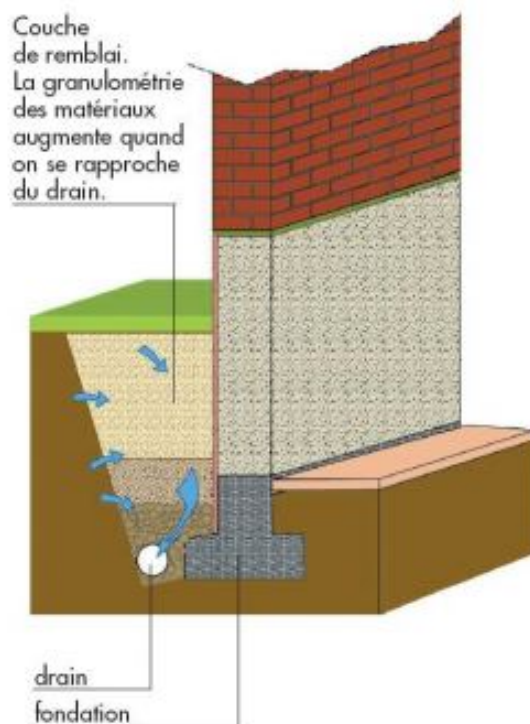


FIGURE 1.19: Mise en place d'un drain périphérique pour dévier le chemin d'écoulement des eaux telluriques

Ces dernières années, d'autres alternatives sont apparues sur le marché comme l'injection de résine pour réduire localement la porosité du mur. Cette technique vise à créer une barrière contre les remontées d'eau, sur le même principe que l'injection de mortier. L'injection de résine offre une solution simple à mettre en place pour endiguer partiellement, voire éliminer complètement le phénomène (voir figure 1.20). La résine est un produit imperméabilisant destiné à réduire les pénétrations d'eau sous forme liquide au coeur de la maçonnerie. Les fabricants fournissent peu d'information sur la composition des résines. Selon les formulations, certaines permettent de boucher les pores du mur (groupe de silicates). D'autres ont une action plus complète que de boucher les pores (groupe des silicones). Les premiers retours d'expériences montrent que l'effet ne semble pas durable et que l'opération doit être remise en œuvre après plusieurs années, au mieux. De plus, les limites de cette techniques sont sensiblement identiques à celle de l'injection de mortier [France-humidité, 2021].

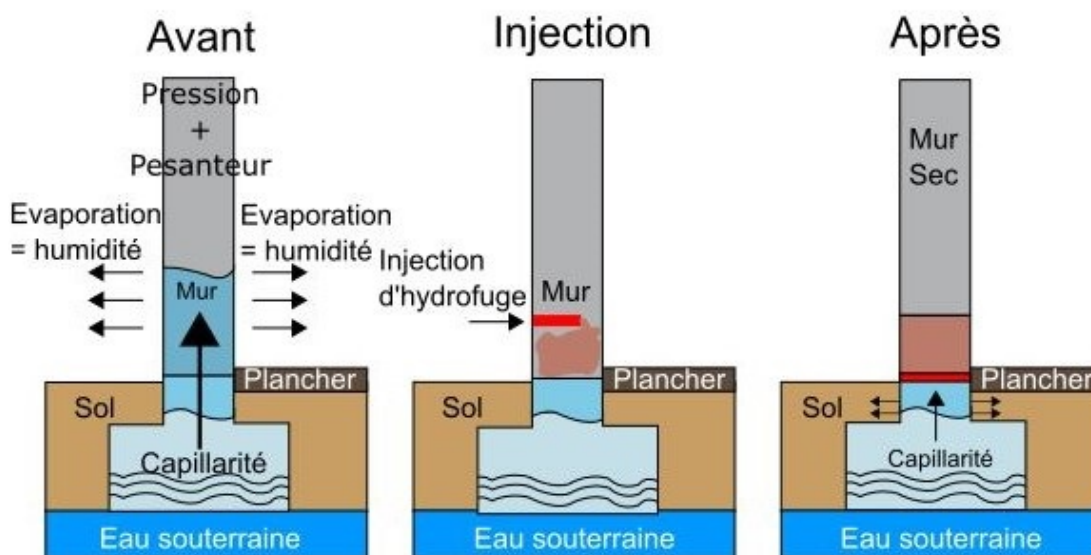


FIGURE 1.20: Principe d'injection de résine en soubassement de mur afin de créer une barrière étanche

Il existe aussi l'application d'une polarisation électrique, par électro-osmose ou électrophorèse, dont l'objectif est de repousser l'eau en jouant sur les charges électriques de l'eau dues à la présence de sels minéraux (figure 1.21). Physiquement, l'humidité ascensionnelle s'accompagne d'une différence de potentiel électrique entre le mur et le sol. En plaçant une électrode positive dans le mur et des électrodes négatives dans le sol, le champ électrique est inversé et l'humidité re-dirigée vers le sol. Cette opposition est créée soit en utilisant des métaux choisis pour engendrer une pile électrique entre le mur et le sol, soit en ajoutant une batterie électrique. Cette technique semble montrer un résultat relativement aléatoire, fortement dépendant des conditions d'application et d'utilisation [Actualité des bâtiments, 2017].

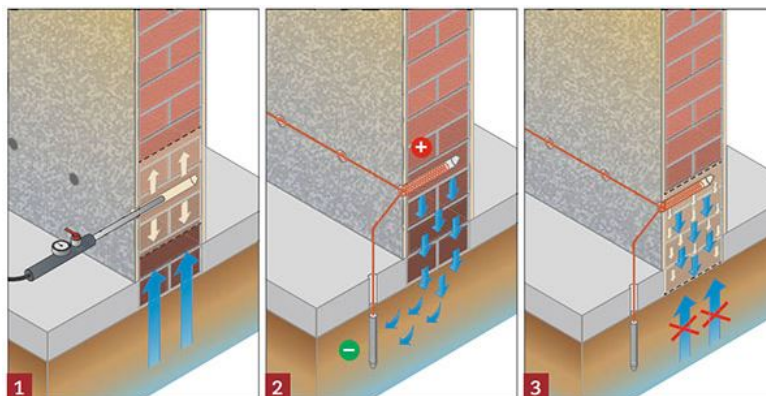


FIGURE 1.21: Principe de l'électro-osmose permettant de repousser l'eau ascensionnelle

Enfin, l'implantation de siphons atmosphériques permet d'améliorer l'aération du mur et favorise l'évaporation de l'eau. Pour que cette méthode fonctionne correctement, l'air doit être contraint de circuler dans ces dispositifs afin d'évacuer la vapeur d'eau qui arrive à la surface interne des tubes (figure 1.22). Cette technique repose sur une technologie ancestrale qui consistait à générer un mouvement d'air naturel au sein même des parois afin de ventiler au maximum les caves et pièces enterrées. L'utilisation de siphons atmosphériques permet de réguler le séchage en fonction des conditions intérieures et extérieures.

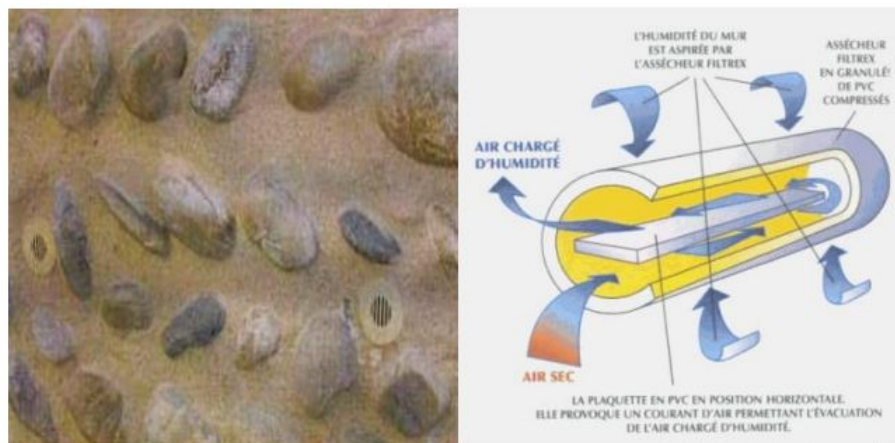


FIGURE 1.22: Principe physique du siphon atmosphérique

Les techniques de traitement de remontées capillaires couramment utilisées sont résumées dans l'organigramme de la figure 1.23. Le tableau 1.2 présente une synthèse comparative des techniques de traitement de l'humidité ascendante, avec leurs efficacités respectives, le principe d'intervention et certaines observations considérées pertinentes. Il est possible de remarquer qu'une bonne partie des techniques nécessite d'importants travaux ; elles deviennent donc très onéreuses. Les procédés plus performants sont également difficilement applicables ou bien avec des conditions très spécifiques et une main d'œuvre spécialisée. Dans certains cas, une intervention dans l'aspect physique et esthétique sur

le bâti est programmée, influençant significativement la préservation architecturale du patrimoine.

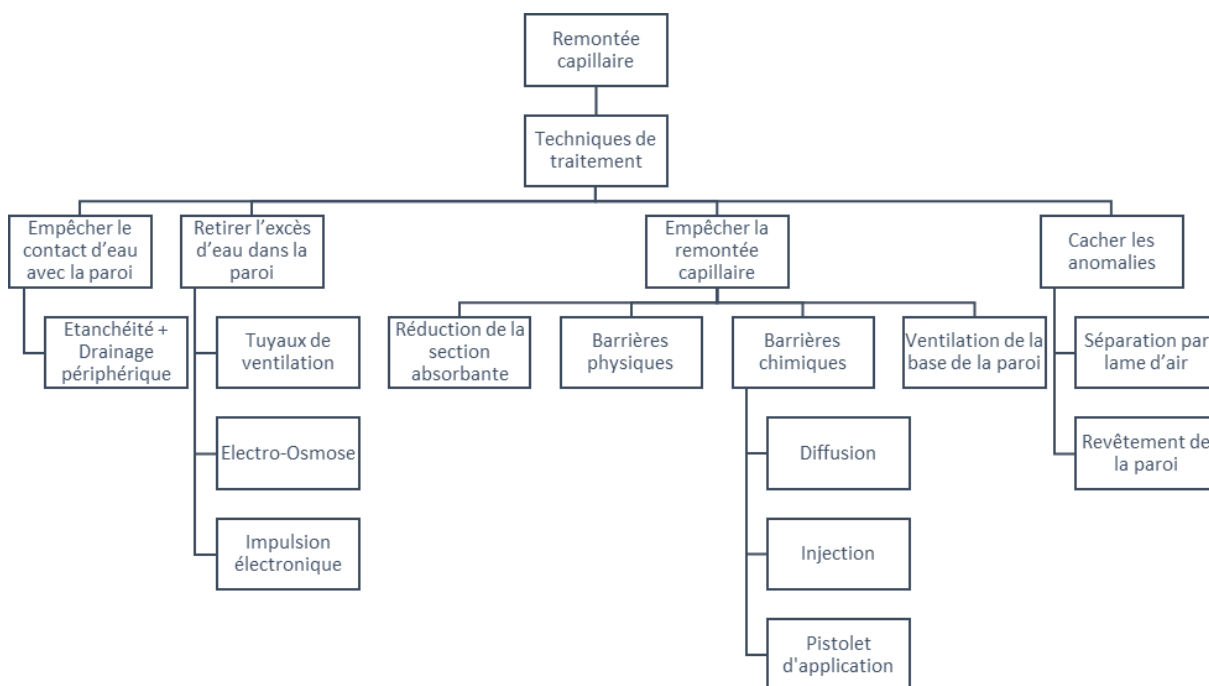


FIGURE 1.23: Organigramme des techniques de traitement de l'humidité ascendante

TABLEAU 1.2: Synthèse des solutions curatives et palliatives aux remontées capillaires

| Technique | Principe | Efficacité | Observations |
|------------------------------------|---------------------------------|------------|--|
| Drainage périphérique | Empêcher l'accès d'eau | Moyenne | Coûteux / prévention |
| Électro-osmose | Empêcher l'accès d'eau | Moyenne | Peu utilisée si la résistance de la terre est élevée |
| Impulsion électronique | Empêcher l'accès d'eau | Moyenne | Peu utilisée et peu efficace lorsqu'il y a beaucoup d'humidité |
| Réseau de ventilation | Retirer l'excès d'eau | Basse | Esthétique / Sels qui peuvent endommager le réseau |
| Barrières physiques | Empêcher la remontée capillaire | Élevée | Difficilement applicable en parois épaisses, dégradées, avec des joints irréguliers |
| Barrières chimiques | Empêcher la remontée capillaire | Élevée | Difficilement applicable en parois épaisses avec hétérogénéités Difficultés de bouche-pores dans la migration du fluide |
| Réduction de la section absorbante | Empêcher l'accès d'eau | Basse | Problèmes architecturaux / Instabilité de la structure |
| Ventilation de la base | Retirer l'excès d'eau | Élevée | Seulement exécutable si l'enveloppe le permet |
| Application de revêtement | Cacher les anomalies | Moyenne | Maintien de l'apparition de la fluorescence |

Malgré le large choix des solutions proposées sur le marché, ces alternatives restent

souvent lourdes et coûteuses et ne donnent pas systématiquement de garanties suffisantes sur le long terme. Plusieurs de ces pratiques semblent aussi rester inefficaces et leur application peut parfois aggraver et accélérer les phénomènes de dégradations. Cependant, les changements de mode de vie, la forte présence des habitants à l'intérieur du logement et les évolutions des exigences de confort et de performances auxquelles nous sommes désormais habitués contribuent à vouloir utiliser le bâti dans des conditions pour lesquelles il n'a pas été conçu. Ces aspects rendent incontournables la recherche d'une solution de rénovation adaptée aux spécificités des bâtiments, d'autant que certaines techniques sont très difficilement conciliables avec le respect du bâti ancien. En effet, la mise en œuvre d'un doublage thermique sur une paroi, l'isolation d'une toiture, l'installation d'un double vitrage ou d'un réseau de chauffage au sol, peut impliquer une modification de l'équilibre hygrothermique du bâti, notamment au travers de l'imbrication systémique de ces différents phénomènes avec la réponse hygrothermique du logement.

Certains procédés contemporains d'amélioration des performances thermiques de ces murs anciens peuvent conduire à des aberrations telles que l'inefficacité du pare-vapeur mis en place avec une isolation thermique par l'intérieur. En effet, l'air chauffé dans une habitation en hiver est en surpression par rapport à l'extérieur et cherche donc à en sortir. Cet air se refroidit en traversant la paroi, au-fur-et-à-mesure qu'il se rapproche de l'extérieur sous l'effet du gradient de température. En considérant que l'air est en équilibre hygrique avec son milieu solide, la baisse de la température va alors entraîner la baisse de la pression de vapeur d'eau. Lorsque la pression de vapeur d'eau atteint la pression de saturation, l'humidité contenue dans l'air va condenser (principe du point de rosée). Dans le cas d'une isolation par l'extérieur, la condensation peut se produire dans l'isolant.

Avec les isolants fibreux amorphes telles que les laines minérales, l'eau s'accumule entre les fibres, ruine les capacités isolantes de ceux-ci et les détériore plus ou moins rapidement. Si, de surcroît et pour empêcher l'air intérieur chargé d'humidité de pénétrer dans la paroi, un pare-vapeur est mis en œuvre (film étanche à l'air et à la vapeur d'eau), la condensation va s'accumuler en surface et s'infiltrer dans les différents raccords de la structure (entre les lés, au contact des planchers, des refends, des baies vitrées ...), notamment si le renouvellement d'air est insuffisant, ou la VMC inadaptée. De plus, on constate par exemple, qu'avec un renouvellement d'air conseillé d'un volume par heure, on peut atteindre en une journée une perte d'énergie du logement considérable, conduisant à une performance énergétique médiocre de l'habitat.

1.3.4 Les impacts sur le confort des occupants

La notion de confort hygrothermique est définie comme étant l'ensemble des conditions indispensables pour garantir le bien-être des occupants, selon un certain degré de satisfaction. Elle est souvent liée à une température dépendante des conditions externes,

généralement comprise entre 18°C et 22°C durant toute la saison (sous nos latitudes) et une humidité relative comprise entre 40% et 60%. De plus, le confort dépend de la température des parois, où une différence de l'ordre de 3°C entre la température de l'air et celle des parois est souhaitable, ainsi que des mouvements d'air au sein de la pièce. Définir la notion de confort est assez complexe, sans même tenir compte des paramètres propres aux occupants (taux d'habillement, activité, paramètres physiologiques et métaboliques, etc) [Medjelakh & Abdou, 2008].

[Fang et al., 2000] a montré que la température et l'humidité ont un impact sur le ressenti du confort intérieur. Les auteurs ont démontré que le confort thermique est inversement proportionnel à l'enthalpie de l'air. Plusieurs études scientifiques ont investi la notion de confort hygrothermique. Les modèles, différents selon les aspects auxquels ils s'intéressent, ne sont pas tous au même stade de développement et d'utilisation. Néanmoins, quelque soit la complexité de représentation de l'environnement et de l'être humain, un problème subsiste : le confort (ou l'inconfort), paramètre relativement subjectif et difficilement quantifiable, est estimé au travers de corrélations empiriques ou statistiques qui conduisent à l'obtention de tendances qui sont exploitées par approches analytique (ou statistique selon certaines études) ou adaptative :

- l'approche statique porte sur les aspects physiques et les échanges thermiques entre l'occupant et son environnement. Elle se base sur deux indicateurs nommés PMV (*Predicted Mean Vote*) et PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*). [Kameni et al., 2013] estime, en se basant sur les expériences de [Fang et al., 2000], que le confort thermique est assuré si le PMV est compris entre -1 et 1.
- l'approche adaptative se base sur l'adaptation de l'occupant à son environnement. Elle s'appuie sur le fait que l'être humain est actif dans son environnement et qu'il crée ses propres conditions de confort. Cette approche ne se focalise que sur la température, l'humidité relative étant ici considérée comme un paramètre intrinsèque.

[Moujalled et al., 2008] considère que les deux approches sont complémentaires, et permettraient de mieux évaluer le confort thermique des occupants lorsqu'elles sont couplées au sein d'une même modélisation numérique. Ainsi, l'auteur compare ces deux approches à des données issues de perceptions thermiques locales et/ou globales, notions objectives et mesurables, afin de tenter de valider ces modèles.

1.4 Conclusion

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est devenue aujourd'hui une nécessité imposée par l'urgence écologique. Les bâtiments anciens représentent une part importante du parc immobilier français et par voie de conséquence, un potentiel d'économie d'énergie.

Ces bâtiments évoluent en équilibre hygrothermique constant avec leur environnement, ce qui offre un confort intérieur significatif pour les occupants. Ils sont aussi considérés comme un patrimoine historique à sauvegarder, qui ne peut être rénové thermiquement que par l'intérieur afin de préserver la valeur architecturale de la façade extérieure. Or la pose d'une isolation thermique par l'intérieur peut bouleverser l'équilibre hygrothermique de la paroi. Une telle modification peut entraîner un risque de condensation interstitielle mais également l'apparition de moisissures et la prolifération de champignons et autres bactéries. L'inconvénient majeur de ces bâtiments réside dans leur forte sensibilité à l'eau, sous toutes des formes (vapeur et liquide), dont l'origine peut être naturelle, accidentelle ou liée à un défaut d'entretien.

Les traitements pour lutter contre l'humidité, disponibles actuellement sur le marché, proposent des solutions à des coûts assez élevés et dont la durabilité n'est pas toujours garantie.

Pour ces raisons, une bonne connaissance du bâti ancien est indispensable, tout comme la prise en compte de l'humidité pour concevoir les principes de rénovation adaptés.

Les sources d'inconfort dans le bâti ancien sont la température de l'air, la température des parois, les mouvements de l'air et l'humidité (sans tenir compte des critères liés directement aux occupants). Les solutions de rénovation doivent alors combiner le système de chauffage et de ventilation et tenir compte de la présence d'humidité. La rénovation doit alors veiller à maintenir la capacité de la paroi à "respirer", tout autant pour conserver la durabilité du bâti que pour assurer le confort hygrothermique des occupants.

Les transferts de chaleur et de masse au cœur de l’enveloppe du bâtiment

Les bâtiments existants reposent sur un équilibre hygrothermique avec l’environnement extérieur ce qui assure leur durabilité. Toute exécution de travaux de rénovation qui perturbe cet équilibre peut être à l’origine de plusieurs désordres d’ordre structurel voire d’insalubrité.

Dans le cadre d’une rénovation énergétique, la présence excessive de l’humidité dans les bâtiments présente un frein face à tous travaux de rénovation. Cette rénovation nécessite donc une attention particulière où il convient de fournir aux acteurs de la construction des modèles numériques de simulation du comportement hygrothermique global des bâtiments, permettant d’évaluer les éventuels risques de pathologies liées à la présence excessive de l’humidité.

L’élaboration de ces modèles passent par la résolution de problèmes non-linéaires, de grandes échelles spatiale et temporelle assez complexes à résoudre. Depuis de nombreuses années, les technologues du bâtiment utilisent la méthode de Glaser (calculs simples du profil de pression de vapeur en régime permanent) pour concevoir l’agencement des couches dans la paroi [Glaser, 1958]. Elle donne une réponse binaire sur le risque de condensation.

Mais cette méthode considère des transferts d’humidité par diffusion totalement découplés des transferts de chaleur ; les matériaux sont, en général, considérés inertes à la vapeur. Cette approche semble donc mal adaptée aux matériaux bio-sourcés qui peuvent être fortement hygroscopiques.

Dans le domaine de la recherche, plusieurs travaux consistent à comprendre et à détailler les mécanismes de transferts de chaleur et de masse dans les matériaux de construction utilisés dans le secteur du bâtiment à différents échelles (microscopique et macroscopique) afin d’aboutir à la conception d’un modèle des transferts hygrothermiques des enveloppes et en utilisant des outils de simulation numériques (COMSOL multi-physics, Transys, WUFI, Fortran . . .) pour permettre une rénovation énergétique efficiente et durable des bâtiments.

2.1 Les mécanismes des transferts hygrothermiques dans un milieu poreux

2.1.1 Définition d'un milieu poreux : hypothèses fondamentales

Dans le champ disciplinaire de la physique des bâtiments, la plupart des matériaux de construction qui composent l'enveloppe des bâtiments sont considérées comme un milieu poreux et hygroscopique. Ces matériaux permettent ainsi les transferts de masse et de chaleur en opposant leur capacité à stocker et à libérer la chaleur et l'humidité environnantes. Un milieu poreux est composé d'une matrice rigide (solide, fibreuse, ...) comportant des interstices, dénommés "pores" (qu'ils soient ouverts, fermés, accessibles ou non), susceptibles d'accueillir des fluides sous forme liquide ou gazeux. Ces pores peuvent être connectés – c'est-à-dire qu'ils communiquent entre eux : leur inter-connectivité et leur accessibilité participent au transport de matière à travers le matériau, gouvernant le comportement hygrothermique du matériau lorsqu'il est soumis à des sollicitations en température et en humidité. On trouve également au sein des milieux poreux des pores isolés, non connectés, qui ne semblent pas avoir d'influence significative sur les phénomènes de transfert de masse [Daïan, 2013, Rahim, 2015, Collet et al., 2012].

Un milieu poreux est dit saturé lorsque l'intégralité de ses pores internes sont remplis par un fluide ou un ensemble de fluides miscibles ; il peut être à l'état non saturé lorsque ces pores sont partiellement saturés [Carrayrou, 2001]. On distingue alors dans ce dernier cas la coexistence simultanée de trois phases : liquide, solide et gazeuse, comme présenté en figure 2.1.

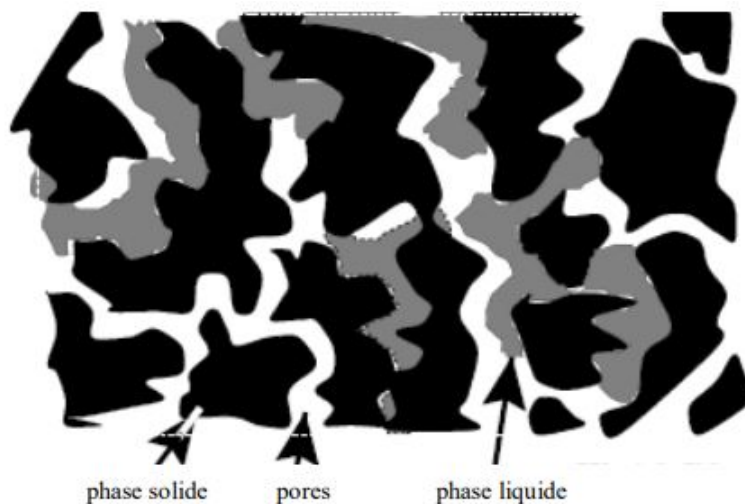


FIGURE 2.1: Représentation d'un milieu poreux

La structure d'un milieu poreux est caractérisée par différents paramètres qui définissent son état [Rahim, 2015]. Ces paramètres sont définis dans le tableau 2.1 :

TABLEAU 2.1: Grandeurs physiques définissant l'état d'un milieu poreux

| Paramètre | Unité | Expression |
|-------------------------|-------------------|--------------------------------|
| Masse volumique | kg/m ³ | $\rho_s = \frac{m_s}{V_0}$ |
| Surface spécifique | m ² | $s = \frac{S}{V_0}$ |
| Teneur en eau | % | $u = \frac{m_L}{m_t}$ |
| Teneur en eau massique | kg/m ³ | $\omega = \frac{V_s}{V_t}$ |
| Teneur en eau volumique | % | $\theta = \frac{V_0 m_v}{V_0}$ |
| Teneur en vapeur d'eau | kg/m ³ | $u_v = \frac{P_v}{P_{v,sat}}$ |
| Humidité relative | % | |

La dynamique des transferts hygrothermiques est conditionnée par la nature poreuse de la structure du matériau. Depuis quelques décennies, les phénomènes de transfert dans les milieux poreux attirent l'attention des unités de recherche du monde entier et font l'objet de nombreux travaux. Ces études sont entreprises pour résoudre plusieurs problématiques dans différents domaines et un grand nombre de travaux, tant numériques que théoriques, est consacré à l'étude de ces phénomènes complexes. A titre d'exemple, nous pourrions citer les travaux qui ont porté sur le développement du modèle numérique HAM (*heat, air and moisture*), appliqué au phénomène de transport dans les composants du bâtiment, initié dans les années 1990 sous l'impulsion de 37 programmes de recherche différents regroupant 12 pays (dont 26 programmes qui ont ciblé des modèles en régime dynamique) [Angermann, 2010].

L'essor continu des outils informatiques a permis l'existence de nombreux supports de simulation (Comsol Multiphysics, Wufi, Fortran, Matlab, Transys ...) qui sont des potentiels de calculs dédiés à la résolution des modèles mathématiques. La différence entre ces modèles numériques réside dans le choix du potentiel de calcul et les conditions aux limites, mais tous sont développés pour tenter de reproduire le comportement hygrothermique des nombreux matériaux poreux utilisés dans le domaine du génie civil. Cependant, ils reposent tous sur le même physique de conservation de masse [Ait Oumeziane, 2013] défini par la relation suivante :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\nabla(\vec{j}) + \vec{s} \quad (2.1)$$

avec le membre de gauche représentant le terme instationnaire qui est égal au terme de transport complété par un terme source. Selon Kunzel [Künzel et al., 2005, Künzel, 1995], les transferts hygrothermiques sont basés principalement sur la dynamique des fluides et certains phénomènes physiques (advection, diffusion et la conduction).

2.1.2 La dynamique de transfert et de stockage de l’humidité

Dans un milieu poreux l’humidité peut exister sous forme liquide ou vapeur. Le transport de masse se fait principalement par deux modes : le phénomène diffusif et/ou le phénomène advectif. En effet le transfert advectif (également dénommé convectif par abus de langage) est le déplacement de matière généré par la circulation d’air au sein du milieu poreux. Il est conditionné par la vitesse de l’air et dépend du gradient de pression totale. La convection, au sens physique propre du terme, est donc la somme des deux flux diffusif et advectif [Dullien, 2012]. L’eau sous forme liquide n’est pas affectée par le mode de transport advectif :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(j_{t,diff} + j_{t,adv}) + S \quad (2.2)$$

Le transport d’eau liquide est lié au gradient de pression capillaire. A l’échelle microscopique, il obéit à la loi de Poiseuille [Poiseuille, 1840]. Au niveau des pores d’un matériau, le transport de vapeur d’eau se fait principalement par diffusion qui est le mode prédominant. En effet, sous des conditions isothermes, le transfert de masse par diffusion est conditionné par la structure du réseau poral ; il dépend du diamètre des pores. Dans les pores de diamètre supérieur 10^{-6} m, on assiste à un phénomène de diffusion moléculaire –ou diffusion de Fick –, gouverné par la collision entre les particules elles-mêmes sans interaction avec le corps solide [Gertis & und Erhorn, 1991]. Lorsque la taille des pores est inférieure à 10^{-8} m, le transport de masse se fait par effusion – ou diffusion de Knudsen. Il existe alors une interaction avec la matrice solide. L’effusion est déterminée par le nombre de collisions des particules de vapeur d’eau avec les parois des pores [Delmon, 1969]. Les deux phénomènes de diffusion peuvent avoir lieu en même temps, proche de la surface. Une collision entre les particules et la paroi des pores est caractérisée par la diffusion mixte. La figure 2.2 illustre ces trois phénomènes de diffusion de la vapeur d’eau au sein d’un pore, en fonction du diamètre de celui-ci [Do Duong, 1998].

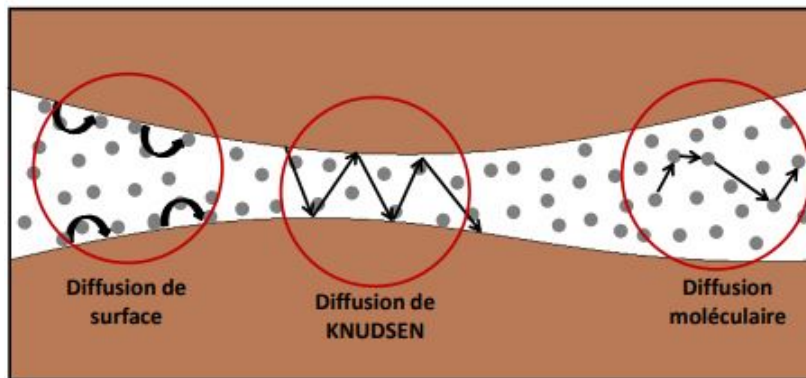


FIGURE 2.2: Les modes de diffusion de la vapeur d’eau dans un pore [Ferroukhi, 2015]

En revanche, lorsqu’un gradient de température est appliqué, comme dans les travaux de [Artola, 2009], un autre mode de transport de matière apparaît : la thermodiffusion

(effet solet). Ce phénomène se traduit par une différence de température qui provoque une différence de densité. La vapeur d'eau migre alors dans l'air à partir des zones froides vers les zones chaudes. [Krus et al., 2007] et [Janssen et al., 2007] montrent dans leurs travaux que le phénomène de thermodiffusion contribue à environ 0.05% au transport total de la vapeur d'eau. Cette faible contribution a pour origine les faibles gradients de température imposés. Ce phénomène non significatif dans notre champs d'études est généralement négligés dans la plupart des modèles numériques. La figure 2.3 présente un organigramme des phénomènes de transport pris en considération lors de la modélisation des transferts de masse au sein des matériaux de construction, sous les gradients de température, de vitesse d'air et d'humidité.

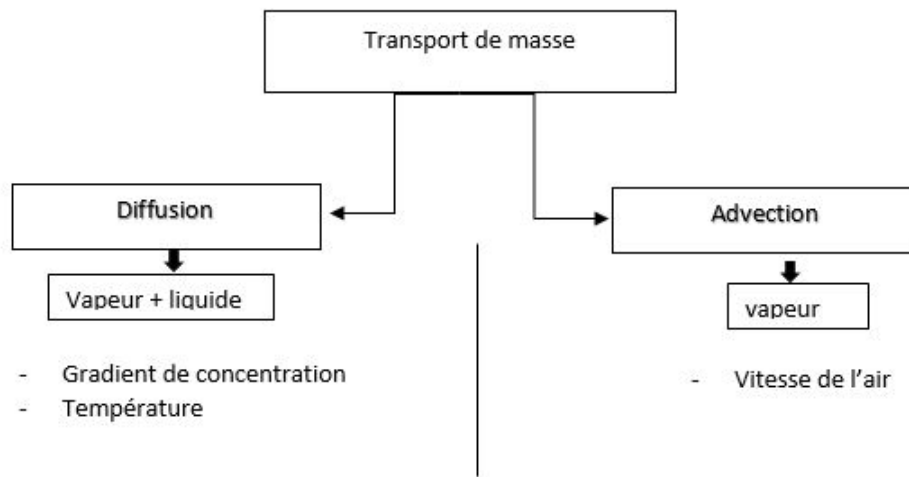


FIGURE 2.3: Les moteurs de transport de la matière au sein des matériaux de construction

Les matériaux poreux ont la capacité de stocker l'humidité contenue dans l'air ambiant. Ainsi, lorsque le matériau est exposé à un air humide, sa masse apparente augmente. Physiquement, cette augmentation de masse se traduit par la fixation de particules d'eau sur la surface interne des pores. Ce phénomène physique est appelé adsorption. Il existe deux types d'adsorption : l'adsorption chimique ou chimisorption, due à une interaction entre le fluide et la matrice solide par le truchement de liaisons covalentes (forces de grande intensité), a pour conséquence la formation d'un composé sur la surface du solide. Ce type d'adsorption change la nature du matériau en modifiant la structure moléculaire même de l'absorbant [Oura et al., 2003]. L'adsorption physique ou physisorption consiste dans la formation de liaisons électro-statiques de faible intensité de type Van Der Waals. La structure moléculaire de l'adsorbant n'est pas modifiée [Luth, 1993] et le processus est réversible.

Le processus d'adsorption physique peut être décomposé en plusieurs phases. A l'état sec, lorsque les pores sont vides, suite à une exposition à l'air ambiant des particules d'eau se retrouvent piégées à l'intérieur des pores formant une couche dite mono-moléculaire.

Puis, au-fur-et-à-mesure de l’accroissement de l’humidité, les molécules d’eau se superposent en plusieurs couches, jusqu’à la formation de ponts liquides. A ce moment, un phénomène de condensation capillaire apparaît. Lorsque l’humidité atteint 100% à l’intérieur du pore (saturation), la teneur en eau dépasse la teneur en eau critique à partir de laquelle l’eau se diffuse vers les autres pores les moins concentrés par la diffusion (voir figure 2.4) [Caro, 2004].

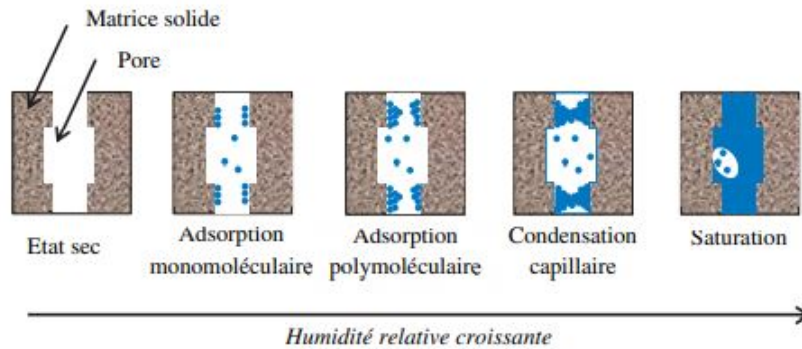


FIGURE 2.4: La cinétique de stockage de l’humidité à l’intérieur des pores d’un matériau

Lorsque les pores sont saturés, l’écoulement d’eau est régi par le gradient de pression. A l’échelle macroscopique, l’eau liquide se déplace par capillarité (figure 2.5). Elle obéit à la loi de Darcy [Darcy, 1856] qui est une extension de la loi de Poiseuille à l’échelle microscopique. Pour un fluide compressible, la loi de Darcy généralisée est exprimée par l’expression suivante :

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla(p - \rho \vec{g}) \quad (2.3)$$

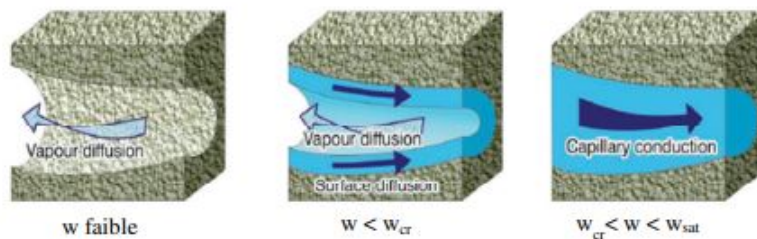


FIGURE 2.5: Processus de diffusion de l’eau liquide dans un milieu poreux

A l’inverse, lorsque le matériau poreux est exposé à un air ambiant moins humide, il restitue l’humidité stockée. Sa masse apparente diminue, symbolisant le phénomène de désorption [Neto, 1992].

2.1.3 Le transfert et le stockage de chaleur

Dans un milieu poreux, le transfert de chaleur est gouverné par plusieurs phénomènes physiques différents :

- la conduction dans les phases solide, liquide et gazeuse
- la convection due à la circulation de l'air
- le rayonnement entre les parois des pores
- le changement de phase (condensation - évaporation) à l'intérieur des pores
- la chaleur sensible (variation de la température)

L'organigramme présenté en figure 2.6 montre les quatre phénomènes de transport de chaleur ; conduction, rayonnement, enthalpie et advection, représentés par un gradient de température, des ondes électromagnétiques, la diffusion de matière et le mouvement du fluide, respectivement.

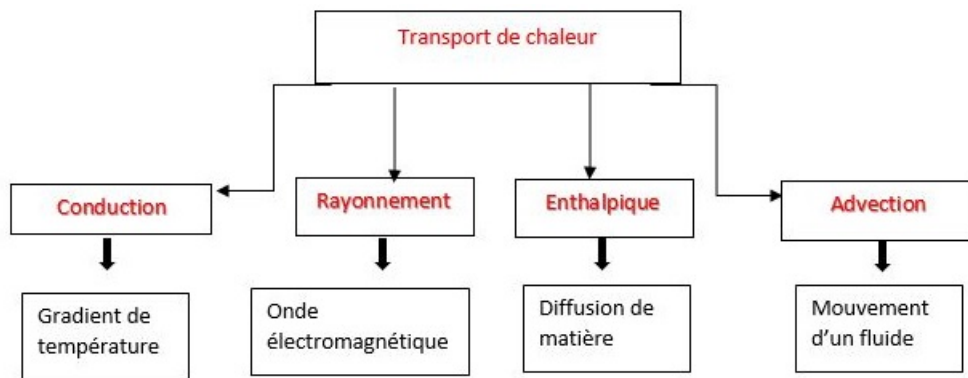


FIGURE 2.6: Transport de chaleur dans un milieu poreux

La conduction est le mode de transfert thermique dominant, gouverné par un gradient de température. Il s'agit d'un phénomène analogue au phénomène de diffusion massique. En effet lors d'une différence de température entre deux zones, la conduction se traduit par une transmission de proche en proche d'une agitation thermique. Elle obéit à la loi de Fourier, lorsque le milieu poreux est saturé par un fluide (liquide ou gazeux) en écoulement dans le réseau poral et que la matrice solide est fixe [Fourier, 1822].

$$\varphi = -\lambda \nabla(T) \quad (2.4)$$

Ce mode de transfert, par convection thermique, résulte de la conduction thermique due au transport d'énergie par les particules de fluide en mouvement [Hagentoft et al., 2004]. On distingue deux type de convection : la convection naturelle et la convection forcée. Lorsque les deux phénomènes coexistent, on identifie la convection mixte. La modélisation des phénomènes de convection en milieu poreux est très complexe en raison de la nature hétérogène du milieu poreux, de l'hydro-dynamisme et des interactions thermiques entre les phases, à l'échelle microscopique. Le bilan de conservation de chaleur, à l'échelle macroscopique, se résume au travers du bilan suivant :

$$q_t = q_{cond} + q_{conv} + q_{sens} + q_{lat} \quad (2.5)$$

où q_{cond} , q_{conv} , q_{sens} et q_{lat} représentent respectivement les flux de chaleur par conduction, convection, sensible et latente.

Les transferts thermiques dans un milieu poreux se basent sur la conservation de l'enthalpie. Le stockage de chaleur sous des conditions isobares est décrit par l'expression suivante :

$$H = \rho C_p T \quad (2.6)$$

où C_p définit la capacité d'un matériau à emmagasiner l'énergie.

2.1.4 L'effet du couplage entre les transferts hygriques et thermiques

Les transferts de masse et d'énergie sont deux phénomènes fortement couplés et interdépendants. Une modélisation du comportement hygrothermique d'un matériau ne peut être abouti sans tenir compte du couplage des transports thermique et massique. En réalité, l'état hydrique (saturé ou non saturé) et thermique (chaud et froid) d'un matériau joue un rôle crucial dans la cinétique de transport de matière et de l'énergie.

En effet, la température et l'humidité sont les moteurs des transferts hygrothermiques. Leurs variations influencent les propriétés thermiques et hygriques du matériau. Plusieurs travaux de recherches s'intéressent à l'évaluation des impacts de l'état hygrothermique sur les propriétés du matériau. Par exemple, un taux élevé d'humidité impacte la chaleur spécifique et la conductivité [Ferroukhi, 2015, Taoukil et al., 2013, Jerman & Černý, 2012]. D'une manière analogue, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'isotherme de sorption (adsorption et désorption) varient sous l'effet de la température [Promis et al., 2019, Hedenblad, 1996].

Un autre effet du couplage hygrothermique consiste dans le phénomène de "Soret-Dufour", lié à la thermodynamique : le flux de chaleur, provoqué par la diffusion de masse, est liée à l'effet Dufour et le flux de masse, induit par le transfert de chaleur, est l'effet Soret [Belarbi et al., 2006, Trabelsi et al., 2013, Trabelsi et al., 2012]. D'autre part, [Künzel, 1995] a également démontré que le phénomène de changement de phases à l'intérieur du matériau a un effet important sur les transferts de chaleur. L'auteur a prouvé un doublement de flux thermique lorsqu'un matériau est exposé à une forte humidité relative.

2.2 La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité

L'état de l'art réalisé précédemment sur les mécanismes de transferts hygrothermiques et la présentation des phénomènes physiques au sein d'un milieu poreux a pour objectif

d'aboutir à une modélisation numérique des transferts couplés de masse et d'énergie. Cette modélisation est utile pour prédire le comportement hygrothermique d'une paroi ainsi que ces performances énergétiques et le niveau de confort qui sera assuré. Toutes les modélisations numériques se basent sur des approches permettant la généralisation des mécanismes de transfert de l'échelle microscopique vers l'échelle macroscopique. En effet, la modélisation des phénomènes physiques de transfert à l'échelle microscopique est très complexe au regard de l'hétérogénéité du milieu poreux. Ceci se traduit par un recours à l'utilisation d'un volume élémentaire représentatif (VER) afin de s'affranchir des difficultés du modèle et de garantir le passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. La figure 2.7 met en évidence la notion de VER. Ces modèles macroscopiques permettent de décrire les interactions entre les transferts de masse (liquide et vapeur) et de chaleur dans un milieu poreux, en régime variable ou stationnaire, tout en tenant compte des conditions environnementales dans lesquelles le matériau est placé et de ses propriétés thermo-physiques et hygriques. Les modèles les plus utilisés sont ceux développés par [Whitaker, 1977], [Philip & De Vries, 1957] et [Luikov, 2012].

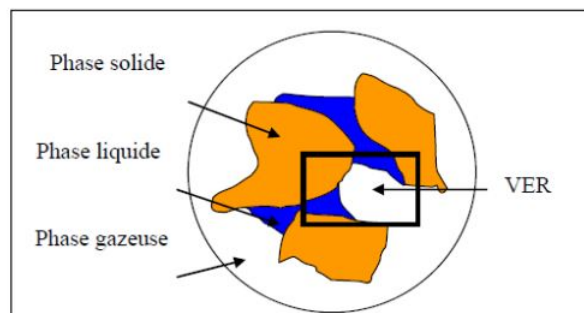


FIGURE 2.7: Volume élémentaire représentative

Le modèle de Whitaker se base principalement sur l'homogénéisation par prise de moyenne. Les phénomènes physiques sont modélisés à l'échelle microscopique, puis extrapolés à l'échelle macroscopique en s'appuyant sur une approximation de continuité fictive du milieu (voir figure 2.8). Les fluides sont considérés parfaits [Whitaker, 1977, Whitaker, 1986].

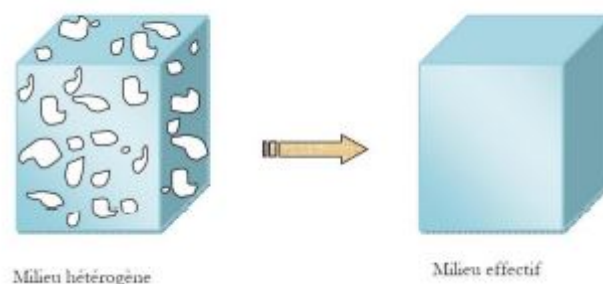


FIGURE 2.8: Homogénéisation par prise de moyenne d'un milieu poreux

Le modèle de Whitaker se base sur les équations suivantes :

— Équation de conservation de l’énergie

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + [\rho_L C_L V_L + \rho_v C_v V_v] \nabla T + L_v \dot{m} = \nabla(\lambda_{eff} \text{div}(T)) \quad (2.7)$$

— Équation de continuité de la phase liquide

$$\frac{d\varepsilon_L}{dt} + \nabla(V_L) + \frac{\dot{m}}{\rho_L} = 0 \quad (2.8)$$

— Équation de diffusion de la vapeur d’eau

$$\frac{d\varepsilon_g \rho_g}{dt} + \nabla(\rho_g V_g) = \dot{m} + \nabla(\rho_g D_{eff} \nabla(\frac{\rho_v}{\rho_g})) \quad (2.9)$$

— Équation des mouvements de phases liquide et gazeuse

$$V_L = -\frac{Kk}{\mu_L} (\nabla P_L - \rho_L g) \quad (2.10)$$

$$V_g = -\frac{KK_g}{\mu_g} (\nabla P_g) \quad (2.11)$$

en considérant que la contrainte sur le volume est

$$\varepsilon_g + \varepsilon_L + \varepsilon_s = 1 \quad (2.12)$$

et la pression de gaz

$$P_g = P_v + P_a \rho_g \quad (2.13)$$

La complexité de ce modèle réside, en premier lieu, dans la non linéarité des équations et, en second lieu, dans la difficulté de détermination des coefficients de transferts du matériau. Néanmoins, on trouve plusieurs travaux menés dans ce sens : [Bennai et al., 2020, Samson et al., 2005, Quintard & Whitaker, 1988, Samson et al., 1999] qui définissent les transferts hygrothermiques par un champs spécial de trois vecteurs (la température, la teneur en eau et la pression totale). Leurs résultats ont mis en exergue l’intérêt du modèle de Whitaker dans l’étude de la contribution du gradient de pression totale dans les transferts liquides.

2.2.1 Le choix des moteurs de transfert

Les modèles de transferts hygrothermiques macroscopiques se distinguent généralement par les choix des différents moteurs de transfert utilisés. Pour le transfert de chaleur, la température est désignée comme moteur de transfert classique. En revanche, pour

le transfert massique il n'y a pas d'unanimité [Bouddour et al., 1998]. Il existe différents moteurs de transfert de matière. Tous donnent des résultats assez similaires au regard des hypothèses fondamentales retenus par les auteurs et les lois de continuité aux liaisons qui sont assumées [Funk & Wakili, 2008].

Le modèle de Philip De Vries [Philip & De Vries, 1957] caractérise les transferts hygrothermiques dans les milieux poreux non saturés [De Vries, 1952a]. Le choix de moteurs retenus sont la température et la teneur en eau. Le transfert d'humidité par diffusion sous gradients de pression de vapeur et de température est déduit de l'analyse du comportement thermique et hygrique des matériaux, dont l'écoulement de la phase liquide par capillarité. Les transferts thermiques se font purement par conduction et par phénomène de changement de phase. L'advection thermique sous gradient de pression de vapeur ou totale n'est pas pris en compte dans son approche. Ce modèle se base sur les hypothèses fondamentales suivantes :

- la phase solide est macroscopiquement considérée homogène et anisotrope.
- le mouvement de l'eau liquide est décrit par la loi de Darcy et le mouvement de vapeur, dissocié du mouvement de liquide, est décrit par la loi de Fick.
- la phase gazeuse est considéré comme parfaite.

Le flux liquide résultant de la superposition des 3 densités de flux engendrés par les gradients de teneur en eau, de température et de gravité s'écrit :

$$g_L = -\rho_L[D_{TL}\nabla T + D_{\theta L}\nabla\theta + Kg] \quad (2.14)$$

Le flux de vapeur engendré par les gradients de teneur en eau et température :

$$g_v = -\rho_L[D_{Tv}\nabla T + D_{\theta v}\nabla\theta] \quad (2.15)$$

Le flux massique globale s'écrit :

$$g_m = -\rho_L[D_T\nabla T + D_\theta\nabla\theta + kg] \quad (2.16)$$

avec le coefficient de transfert de chaleur $D_T = D_{TV} + D_{TL}$ et le coefficient de transport massique $D_\theta = D_{\theta V} + D_{\theta L}$.

Le système d'équations gouvernant les transferts de masse et de chaleur dans le milieu poreux sont alors :

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(D_T\nabla T) + \nabla(D_\theta\nabla\theta) + \nabla K_L g \quad (2.17)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla((\lambda + \rho_L L_v D_{Tv})\nabla T) + \nabla(\rho_L L_v D_{\theta v}\nabla\theta) \quad (2.18)$$

$$(2.19)$$

L’avantage du modèle de Philip De Vries est qu’il ne fait intervenir que deux coefficients de transport en phase liquide et vapeur (D_θ et D_T) [Shepherd & Wiltshire, 1995, Mchirgui, 2012]. En revanche, ces deux coefficients dépendent d’un facteur expérimental qui prend en compte les propriétés géométriques du milieu poreux comme la tortuosité, dont la mesure semble assez complexe, voire inaccessible. Signalons que l’approche de Philip et de Vries a servi de support à de nombreux travaux dont on peut citer : [De Vries, 1952b, Hadas, 1977, Van Der Kooi, 1971, Horton & Wierenga, 1984].

D’une manière similaire, Luikov [Luikov, 2012] met en évidence le phénomène de thermo-diffusion et établit qu’un thermo-gradient provoque le déplacement de l’humidité vers l’intérieur du matériau [Daïan, 2013]. En se basant sur le modèle de Philip De Vries, et pour expliciter le terme de vaporisation-condensation, Luikov introduit un terme exprimant le taux de changement de phase. Le système d’équation devient alors :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D_\Theta \nabla \theta + \delta_s \nabla T) \quad (2.20)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(D_T \nabla T) - \rho_s L_v \varepsilon \frac{d\theta}{dt} \quad (2.21)$$

avec ε qui traduit le terme de vaporisation ou de condensation et δ le terme de thermo-diffusion ($\delta = \frac{D_{Tv} + D_{vL}}{D_v + D_L}$).

Dans cette formulation mathématique, l’identification de ε est difficilement accessible. Le choix de sa valeur est purement arbitraire, généralement comprise entre 0 et 1. La valeur du taux de changement de phase est également différent d’un matériau à l’autre [Saidi, 2018].

[Belarbi et al., 2008] et [Qin et al., 2008] ont développé un modèle numérique de transferts hygrothermiques non isothermes. Afin de résoudre les problèmes de discontinuité du transport hydrique à l’interface entre les différentes couches d’une paroi, les auteurs ont opté pour un choix particulier de moteur pour leur modèle. Les moteurs retenus sont la température et la teneur en vapeur d’eau, ce qui conduit au système d’équations suivant :

$$\rho C_m \frac{\partial U}{\partial t} = \nabla(\delta \nabla U) + \nabla(\varepsilon \delta \nabla T) \quad (2.22)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \rho C_m (\sigma L_v + \gamma) \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2.23)$$

où C_m est la capacité de stockage d’humidité du matériau. Elle s’identifie à partir de l’isotherme de sorption dudit matériau, comme suit :

$$C_m = \frac{\partial U}{\partial \varphi} \frac{1}{\rho u_{v,sat}(T)} \quad (2.24)$$

2.2.2 Les modèles de transferts hygrothermiques existants

[Künzel, 1995] a développé un modèle qui est implémenté dans le logiciel commercial Wufi. Il s'agit d'un des outils numériques les plus utilisés dans la modélisation des transferts hygrothermiques en une-dimension et deux-dimensions. Kunzel a choisi la température et l'humidité relative comme moteurs du modèle. Le bilan des équations décrivant les transferts de masse et d'énergie sont les suivantes :

$$\frac{\partial H}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L_v \nabla(\delta_p \nabla(\varphi P_{v,sat})) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_\varphi \nabla \varphi) + \delta_v \nabla(\delta_p \nabla(\varphi P_{v,sat})) \quad (2.26)$$

Enfin, il existe d'autres logiciels, tel que Delphin qui est basé sur le modèle de Nicolai [Nicolai et al., 2007], où les moteurs de calcul sont la température, la pression de gaz et la pression de vapeur d'eau. Spark est un outil de calcul utilisé par [Tran Le, 2010]. Transys [Medjelekh, 2015] et Comsol Multi-physics [Mendes, 2014] et [Samri, 2008] sont les logiciels les plus exploités pour modéliser les transferts hygrothermiques. De plus, de nombreux travaux expérimentaux ont été mis en place pour tenter de valider ces approches numériques [Promis et al., 2019]. Ces études expérimentales sont réalisées à différentes échelles :

- A l'échelle du matériau, les études aboutissent à l'établissement des lois physiques qui gouvernent les transferts hygrothermiques. Dans la majorité des cas, ces travaux servent à identifier les paramètres d'entrée du modèle numérique étudié.
 - [Cagnon et al., 2012], dans ces travaux expérimentaux, analyse le comportement hygrothermique des briques produites au Sud de la France. Les propriétés d'entrée retenues dans ces travaux sont les isothermes de sorption, la perméabilité à la vapeur d'eau, la capacité thermique et la conductivité.
 - [Talukdar et al., 2007] a créé un dispositif expérimental qui lui a permis de mesurer, de façon continue et pour différentes valeurs d'humidité relative, la température et la teneur en eau de ses échantillons de bois. La comparaison de ces résultats, expérimentaux et ceux prédits numériquement, prouve l'efficacité de son modèle.
- A l'échelle d'une paroi du bâtiment,
 - [Samri, 2008] a mesuré, à l'aide d'une cellule d'échange, les grandeurs caractéristiques du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre en situation réelle. Les distributions de température et de teneur en eau, déterminées expérimentalement, sont validées numériquement à l'aide du modèle de Kunzel.
 - [Hall & Allinson, 2009] s'appuie sur des travaux expérimentaux pour valider les approches numériques de [Meukam, 2004a]. L'étude numérique de Meukam

porte sur la modélisation des transferts couplés de masse et de chaleur sur HM-Trans. Elle a permis la détermination des profils des champs d’iso-concentration et des isothermes au sein d’une paroi. L’analyse de ces résultats conduit à une prédiction de la durabilité d’une paroi en pisé stabilisé soumise aux différentes conditions climatiques. [Hall & Allinson, 2009] a reproduit le dispositif expérimental en utilisant une chambre de simulation des conditions climatiques. Il a mis en évidence le risque limité de condensation interstitielle de la vapeur d’eau dans la paroi.

- [Piot, 2009] étudie le comportement hygrothermique d’une paroi à ossature en bois, en se basant sur un modèle numérique existant sur HAM-tools. Il a testé plusieurs configurations (paroi simple, avec et sans pare-vapeur) sous différentes conditions climatiques (climat interne, sans ou avec chauffage ventilation, . . .). La validation de son approche est validée en plusieurs étapes (paroi seule dans un premier temps, puis couplée avec une zone thermique et enfin ajout d’un bardage). Ses analyses ont mis en exergue l’effet des sollicitations sur le comportement hygrothermique de la paroi.
 - [Ferroukhi, 2015] a élaboré un modèle numérique (de type HAM) implémenté dans un code de simulation thermo-dynamique des bâtiments (BES) afin de prédire le comportement hygrothermique d’une paroi. Ses travaux ont mis en évidence l’impact des transferts hygrothermiques sur la prédiction de la consommation d’énergie et l’influence de l’efficacité des stratégies de ventilation (soufflage ou extraction) sur le risque d’apparition des désordres liées à la présence d’humidité. Ses travaux numériques sont associés à une partie expérimentale qui a servi à valider la plate-forme de co-simulation HAM-BES.
- A l’échelle d’un bâtiment, les différentes études permettent l’intégration des problématiques de traitement et/ou de renouvellement d’air, d’occupation des habitats avec différents scénarii, Dans ce sens, le comportement hygrothermique d’un local dont les parois sont soumises à des conditions ambiantes réelles a été simulé par [Tran Le, 2010]. Il a effectué une simulation, via SPARK, au sein d’une paroi en béton chanvre simple dans un premier temps, une paroi multi-couche dans un second temps et enfin, du local. Ses études sont effectuées sous des conditions statiques et dynamiques dont l’objectif est de déterminer les performances du béton de chanvre sous des conditions hivernales et en période caniculaire. [Tran Le, 2010] a démontré que la combinaison de la ventilation hygro-réglable avec la capacité de sorption des murs permet de réduire les besoins énergétiques du local jusqu’à 12%, par comparaison avec une ventilation classique.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini dans un premier temps la notion de milieu poreux ainsi que les différents états d'équilibre de l'humidité. La description de phénomènes connus et observables, tels que les tensions inter-faciales entre différentes phases ou encore le piégeage de l'humidité sous forme liquide dans les pores, ont permis l'établissement des lois physiques reprises de façon récurrente dans les études traitant des propriétés d'un matériau hygroscopique.

Dans un second temps, l'analyse des différents phénomènes physiques entraînant des transferts hygrothermiques dans un matériau poreux a mis en évidence le fait que les équations de conservation de la masse et de l'énergie peuvent être établies en fonction de différentes variables telles que la température, la teneur en eau, l'humidité relative, la pression de vapeur... Malgré la diversité de ces moteurs de transferts, tous conduisent à des résultats similaires au regard des hypothèses fondamentales et des lois de continuité aux liaisons. Toutefois, il est important de souligner que le recours à un nombre croissant de variables nécessite la connaissance de propriétés des matériaux, propriétés difficilement identifiables par l'expérimentation, et qui, de surcroît, peuvent être entachées d'une incertitude très importante. Une démarche de modélisation doit donc intégrer cette réflexion, d'autant plus qu'une paroi de bâtiment est soumise à des sollicitations complexes.

Les équations décrivant les transferts couplés hygro-thermo-aérauliques reportées dans ce chapitre, représentent les différents modèles numériques à différentes échelles (du matériau, de la paroi et du bâtiment) recensés dans la littérature. Afin de prédire le comportement du matériau ou de la paroi, ces équations sont, par la suite, implémentées dans différents logiciels de simulation numérique tels que COMSOL Multiphysics, SPARK, MATLAB...

Conclusion de la première partie

L'étude réalisée dans cette première partie a permis de dresser un état de l'art sur les bâtiments anciens antérieurs à 1948 et, plus spécifiquement, sur leurs spécificités propres qui peuvent se résumer en un bon équilibre hygrothermique avec le milieu extérieur grâce à l'inertie thermique de ces parois. L'enveloppe de ces constructions, souvent qualifiée de perméante, permet au bâti ancien de vivre dans et avec son environnement. Les exigences de confort auxquelles nous sommes désormais habituées contribuent à vouloir utiliser le bâti dans des conditions pour lesquelles il n'a pas été conçu, ce qui rend impérative la rénovation de ces bâtiments.

La première partie a été consacrée à synthétiser les connaissances actuelles sur le mode de fonctionnement des bâtiments anciens et leurs nombreux avantages. Ce type de bâtiment présente un point particulier qui est leur forte sensibilité à l'humidité.

Le premier chapitre s'est alors focalisé sur les risques causés par la présence de l'humidité en termes de détérioration structurelle de l'enveloppe et de dégradation de la qualité d'air intérieur. Une section a interrogé les solutions présentes sur le marché actuel de la rénovation pour résoudre ces problématiques. Néanmoins, aucune alternative ne semble pleinement efficace, pérenne, durable et accessible au plus grand nombre.

Ce premier état d'art a mis en évidence l'intérêt d'une prise en compte des transferts d'humidité lors d'une modélisation numérique. Le second chapitre est alors axé sur une description détaillée du milieu poreux et des phénomènes physiques intervenant dans les transferts hygrothermiques. Par la suite, une synthèse bibliographique des différents modèles de transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments a été exposée dans l'objectif de présenter l'avancement des travaux scientifiques en terme de modélisation numérique ainsi que les différentes approches utilisées lors d'une modélisation des transferts couplés d'air, d'humidité et de chaleur (modèles HAM et dérivés).

Au travers de cette synthèse, il a été mis en évidence la nécessité d'une étude numérique couplée à une caractérisation expérimentale des propriétés des matériaux couramment utilisés afin d'identifier clairement les paramètres d'entrée à interpoler dans les codes et, dans un second temps, de valider et d'exploiter les modèles numériques.

DEUXIÈME PARTIE

**Approche Numérique d'un Procédé
Innovant de Ventilation d'une Paroi
Ancienne Humide**

Introduction de la deuxième partie

Les signes d'humidité dans le logement touchent plus de 20% des ménages en France métropolitaine, et particulièrement les régions du Nord. Cette nuisance reste le problème majeur de la qualité de l'habitat. Outre les désordres structurels, l'humidité est source d'inconfort, voire d'insalubrité, et constitue généralement un frein aux travaux de rénovation. Des avancées significatives sur la compréhension des phénomènes de transferts dans les matériaux doivent conduire à optimiser la configuration et le dimensionnement de l'enveloppe du bâtiment afin de répondre au mieux aux objectifs de réduction de la consommation d'énergie primaire dans le secteur de la construction. Eu égard au parc immobilier existant, un effort important est porté sur la rénovation et la réhabilitation de notre patrimoine ancien, qui représente un marché en plein essor. Tous les paramètres ne sont pas maîtrisables lors de la rénovation du bâti ancien qui peut montrer des signes d'humidité dans les murs ou de remontées capillaires. Les solutions de traitement actuels ne montrent pas toujours des résultats probants car ils ne prennent pas en considération la complexité de la réponse hygrothermique de l'enveloppe, au delà d'un coût de mise en place qui peut être pénalisant.

Pour répondre à ces besoins, une nouvelle technologie, de rupture, est proposée grâce au procédé dynamique Aéraulec® qui consiste en la ventilation d'une lame d'air créée entre la structure porteuse et l'isolant thermique. L'isolation thermique est alors conciliée avec la présence d'humidité partiellement évacuée grâce au renouvellement de l'air confiné entre le mur support et l'isolant. Un balayage aéraulique, dosé en fonction de l'hygrométrie de la lame d'air, permet de maintenir les doublages isolants et parements parfaitement sains et d'assurer des conditions hygrothermiques qui ne favorisent pas l'apparition et le développement de moisissures et micro-organismes. Ce système assure le maintien de l'équilibre hygroscopique du mur dans son environnement, et sa pérennité.

Néanmoins, chaque installation de ventilation fait intervenir une complexité physique et structurelle justifiant une étude approfondie de paramètres tels que la géométrie de la structure, les propriétés des matériaux en présence, le taux d'humidité et la réponse hygrothermique de la paroi humide. Le chapitre 3 s'intéresse alors à la modélisation du comportement hygrothermique d'une paroi humide ventilée, avec la prise en considération des interactions aérauliques. La paroi considérée est composée d'une structure en briques anciennes de terre cuite, doublée d'un isolant thermique. Un espace tampon est mis en œuvre entre la structure porteuse et l'isolation thermique afin de créer une lame d'air mécaniquement ventilée. La ventilation de cette lame d'air devrait alors assurer la pérennisation de l'isolant thermique au travers de la gestion active du niveau d'humidité

atteint dans la paroi soumise à des remontées capillaires. Un premier modèle est formulé, en conditions adiabatiques, avec un milieu poreux saturé. Dans un second temps, ce modèle est étendu à un milieu partiellement saturé, en conditions diabatiques afin de pouvoir généraliser les résultats numériques. Pour chacun de ces modèles, les hypothèses fondamentales sont précisées, la résolution numérique est détaillée, et une validation, analytique et expérimentale est présentée.

Les transferts hygrothermiques au sein de l'enveloppe dépendent fortement des propriétés intrinsèques des matériaux qui la constitue. De ce fait, afin d'exploiter le modèle de simulation numérique permettant de prédire le comportement hygrothermique d'une paroi en briques de terre cuite, nous avons mené une vaste campagne de caractérisation multiphysique de briques en terre cuite. Cette campagne expérimentale s'articule autour de différents essais de caractérisation afin d'identifier les propriétés et caractéristiques physique, micro-structurale, hygrothermique, hygrique et mécanique de briques de terre cuite. Une attention particulière sera portée sur les protocoles d'essais retenus, les conditions limites de ces protocoles, et les domaines de validité des résultats obtenus. Les résultats de chaque essai sont discutés, analysés et enrichis par des explications des phénomènes constatés, puis comparés à des résultats issus de la littérature.

Modélisation du comportement d'une paroi humide ventilée

La présence de l'humidité dans le bâtiment, tant lors d'une construction ancienne ou neuve, influence le confort à l'intérieur de l'habitat et les performances de l'enveloppe. L'humidité est considérée comme étant le facteur principalement responsable du développement et de la prolifération des moisissures, des salpêtres, et autres bactéries qui nuisent à la santé des habitants. L'eau peut également engendrer l'apparition de désordres structurels au sein de la construction. En effet, les parois construites à base de matériaux poreux sont exposées à une ambiance externe différente de celle de l'intérieur. Physiquement, ceci se traduit par des gradients de température et d'humidité, responsables d'échanges de chaleur et d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Par conséquence, l'étude des transferts hygrothermiques dans les bâtiments à travers les parois est primordiale pour prédire le comportement de l'enveloppe et améliorer leurs performances thermiques et hygriques et maintenir leurs propriétés mécaniques [ASHRAE, 1992].

Dans la littérature, on recense bon nombre de travaux de recherche qui portent sur cette thématique (cf chapitre 2), tant sur un volet expérimental que numérique. Généralement, les modèles numériques sont validés par des approches numériques ou expérimentales. Trois échelles d'études sont recensées dans la littérature [Piot, 2009] :

- A l'échelle microscopique où les lois physiques gouvernent les transferts de chaleur et de masse au sein du matériau.
- A l'échelle macroscopique où les parois sont le siège des phénomènes de transferts hygrothermiques à l'aide de potentiels moteurs mesurables (teneur en eau, pression de vapeur, température...). Le passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique a fait l'objet de plusieurs recherches dont celle phénoménologique proposée par Whitaker [Whitaker, 1977].
- A l'échelle de bâtiment où les transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe sont couplés avec les problématiques de traitement d'air, de renouvellement d'air et de prise en compte des conditions d'occupations et des particularités constructives.

En terme de modélisation numérique des transferts hygrothermiques, les équations des transferts couplés d'énergie et de masse traduisant les phénomènes physiques observés sont implantés dans des codes de calcul comme (Comsol Multi-physics, WUFI, SPARK, Trnsys, Fortran...).

Dans ce chapitre, nous nous intéressons, à la modélisation du comportement hygrothermique d'une paroi sous différentes conditions climatiques à l'aide d'un modèle numérique à l'échelle macroscopique. Le modèle proposé prend en considération une solution de rénovation de parois humides par création d'une lame d'air ventilée à l'interface entre la structure porteuse et l'isolant thermique. Ce procédé est au cœur du projet régional GAHB (Gestion Active de l'Humidité dans le Bâtiment), porté par le Laboratoire des Technologies Innovantes de l'Université de Picardie Jules Verne, et ses partenaires industriels.

3.1 Les transferts hygrothermiques à l'échelle de la paroi

De nombreux travaux de recherche s'appuient sur une description des lois de transfert à l'échelle microscopique, c'est-à-dire à l'échelle du matériau poreux, pour les appliquer à l'échelle macroscopique (au niveau de la paroi) [Whitaker, 1977]. En assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait, la diffusion de l'humidité sous la phase vapeur est initiée sous l'effet d'un gradient de pression de vapeur partiel. Le transport de l'humidité est ainsi régi par trois modes de transfert en fonction du libre parcours moyen d'une molécule de vapeur d'eau à travers le réseau poral [Glaser, 1959] :

- Le transport par effusion, déterminé par le nombre de collisions de particules d'eau avec les parois des pores.
- Le transport par diffusion moléculaire, déterminé par le nombre de collisions entre les particules d'eau elles-mêmes.
- Le transport par diffusion, déterminé à la fois par les collisions entre les particules et les parois des pores et par les collisions entre particules elles-mêmes.

Le transport d'humidité sous forme liquide est lié au gradient de pression capillaire et obéit microscopiquement à la loi de Poiseuille (cf. chapitre 2 qui synthétise les phénomènes de transport d'humidité sous forme liquide et gazeuse). La détermination des propriétés expérimentales d'un matériau réside dans la mesure de grandeurs macroscopiques découlant de la combinaison de phénomènes ayant lieu à l'échelle microscopique. Cependant, plusieurs précautions sont à prendre en compte pour effectuer ce changement d'échelle :

- lors de la détermination expérimentale des propriétés physiques du matériau, le milieu est considéré macroscopiquement homogène et le volume d'étude doit être supérieur au volume élémentaire représentatif (VER) [Merouani, 1987] ;
- le transport d'humidité sous forme de vapeur d'eau par diffusion est gouverné par la loi de Fick [Fang et al., 2000].
- le transport d'humidité sous forme liquide est gouverné par la loi de Darcy. Les coefficients de transfert des deux phases liquide et vapeur peuvent être déterminés

macroscopiquement soit expérimentalement, soit à l'aide de modèles empiriques en raison de la difficulté de distinguer ces deux phases [Darcy, 1856].

D'autres auteurs ont construit leur modèle à partir d'une approche phénoménologique basée sur une description macroscopique des phénomènes mis en jeu [Philip & De Vries, 1957]. En effet, dans les deux approches (microscopique et macroscopique), une formulation continue des transferts hygrothermiques est *in fine* obtenue. Elles sont donc en fin de compte étroitement équivalentes.

Dans notre cas, le raisonnement est mené dans le cadre d'une description macroscopique. Notre modèle se base ainsi sur la théorie de Philip et De Vries, qui considère que l'humidité pénètre dans matériau poreux sous forme liquide et vapeur. Le transport de la phase liquide se fait par capillarité alors que le transport de la vapeur se produit par diffusion en fonction d'un gradient de teneur en eau. Les équations traduisent les phénomènes de transferts d'humidité sous forme liquide et vapeur ainsi que le phénomène de transport de chaleur, tel que présentés dans le deuxième chapitre.

Par ailleurs, une paroi est sollicitée par des ambiances interne et externe, ce qui donne lieu à des échanges entre le milieu poreux et son environnement. Les conditions limites entre les surfaces d'échanges permettent d'assurer la continuité des équations bilans de chaleur et de masse entre les différentes couches de l'enveloppe, représentées en figure 3.1.

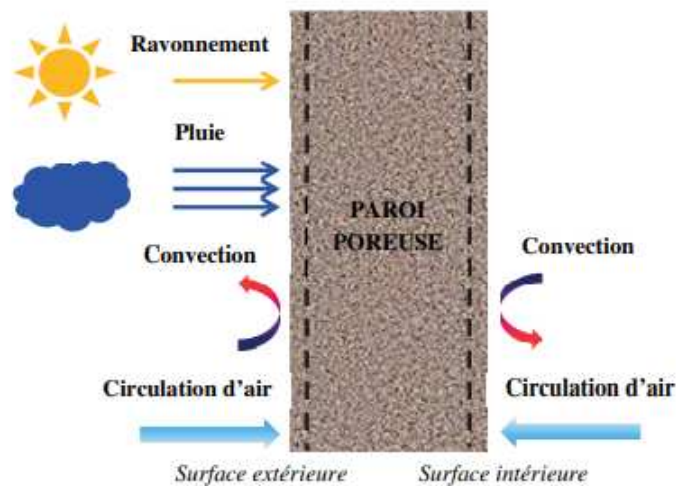


FIGURE 3.1: Sollicitation d'une paroi soumise à des conditions aux limites extérieure et intérieure

Les parois d'un bâtiment sont soumises à de complexes sollicitations externes et internes. Ces sollicitations sont la température, la pluie, la pression du sol, l'humidité, la chaleur, le vent, le bruit, des échanges radiatifs solaires s'opèrent essentiellement dans les courtes longueurs d'onde ; à l'intérieur, il y a les apports solaires par les vitrages mais aussi les échanges entre parois et appareils de chauffage par les grandes longueurs d'onde (GLO.) entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment [Hauglustaine et al., 2006a, Kuznik et al., 2011]. Les parois du bâtiment doivent donc être capables de supporter ces

sollicitations et de répondre au confort intérieur des occupants tout en limitant les besoins énergétique du bâtiment.

3.1.1 Les transferts de chaleur entre la paroi et le milieu extérieur

Les échanges de chaleur qui peuvent se produire au niveau de la paroi d'un bâtiment se font principalement par convection, par conduction et par rayonnement. Ces modes de transferts de chaleur justifient la consommation excessive d'énergie dans le bâtiment si celui-ci est peu ou mal isolé. En effet, la paroi doit pouvoir limiter les déperditions de chaleur vers l'extérieur en hiver et limite la climatisation pendant la période estivale. D'autre part, elle doit protéger l'ambiance intérieure contre les radiations solaires et les intempéries. Ces propriétés d'atténuation et de régulation dépendent fortement des caractéristiques de la paroi du bâtiment et essentiellement de son aptitude à transmettre la chaleur et de son inertie thermique [Hauglustaine et al., 2006b]. La compréhension des phénomènes physiques et leur description mathématique est alors nécessaire pour les prendre en compte pour simuler le comportement d'une paroi.

Le rayonnement

On distingue deux types de rayonnement solaire, le rayonnement incident (ou direct) et le rayonnement réfléchi par le sol et les autres bâtiments aux alentours. Ce sont également les échanges par rayonnement de courtes et de grandes longueurs d'ondes. Seuls les échanges par rayonnement à courtes longueurs d'ondes sont pris en considération au regard de la complexité dans l'estimation de celles à grandes longueurs d'ondes et de leur faible incidence [Freppel, 2018]. Les échanges radiatifs sont définis comme suit [Oumeziane et al., 2021, Tran Le, 2010] :

$$\phi_{ray,tot} = \phi_{ray} + \alpha I \quad (3.1)$$

avec

- $\phi_{ray,tot}$: la densité du flux radiatif à courte longueur d'onde [w/m^2]
- ϕ_{ray} : la densité de flux radiatif reçu [w/m^2]
- α : l'absorptivité à courte longueur d'onde
- I : le rayonnement solaire incident total reçu par la surface externe de la paroi du bâtiment [w/m^2]

Ainsi, la densité du flux radiatif reçu est caractérisée par la loi de Stefan - Boltzmann, et s'écrit comme suit :

$$\phi_{ray} = \varepsilon F \sigma (T_{\text{émission}}^4 - T_{\text{surface}}^4) \quad (3.2)$$

où

- ε : l'émissivité varie de 0 à 1
- F : un facteur de forme égale à 0.5
- σ : la constante de Boltzmann prise égale à $(5.67E-08 \text{ W}/m^2.K^4)$
- $T_{\text{émission}}$, T_{surface} : les températures respectivement d'émission et de la surface du corps [°K]

La convection thermique surfacique

La convection thermique est associée à un déplacement de fluide sous forme liquide ou gazeux. Physiquement, dans un fluide, il est impossible d'assister à un phénomène de conduction pure, car un gradient thermique engendre systématiquement des courants de convection. Néanmoins, la conduction est le phénomène dominant [Oulaid et al., 2010]. La convection est un phénomène physique assez complexe qui couple la thermique à la dynamique des fluides. On distingue trois types de convection :

- La convection naturelle qui se produit dans un fluide sous l'effet d'un gradient thermique. Elle engendre une différence de masse volumique au sein du fluide. Le fluide le plus chaud monte tandis que le fluide le plus froid, plus dense descend.
- La convection forcée qui se produit quand le mouvement d'un fluide est imposé artificiellement, ce qui va accélérer les échanges thermiques. Par exemple dans le bâtiment, ce mouvement est déclenché par le vent, un ventilateur...
- La convection mixte se produit lorsque les deux types de convection précédents ont lieu simultanément. Dans ce cas, le mouvement du fluide dépend des forces extérieures et de la gravité. Ce dernier cas est relativement rare en thermique du bâtiment [Aït Ouméziane, 2013].

La quantité de chaleur échangée par convection entre la paroi et un fluide, est définie par le flux convectif qui s'exprime en fonction d'un coefficient d'échange surfacique, noté h_t [$\text{w}/\text{K}.m^2$]. Ce coefficient traduit la proportionnalité de la densité de flux de chaleur reçu par rapport au gradient de température.

$$\phi_{conv} = h_{conv}(T - T_{surface}) \quad (3.3)$$

avec T la température du fluide éloignée de la paroi [°K]

Le coefficient d'échange thermique par convection est un paramètre difficile à quantifier. Il dépend de plusieurs paramètres physiques tels que les températures de fluide et de la paroi, le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), la viscosité et l'aspect géométrique de la surface de la paroi (lisse ou rugueuse)...

3.1.2 Les transferts de vapeur d'eau entre la paroi et le milieu extérieur

La paroi d'un bâtiment est une séparation environnementale qui protège le milieu intérieur contre la variation du climat extérieur. A l'instar des échanges thermiques, une paroi doit pouvoir gérer le problème de migration de la vapeur d'eau par pression différentielle due aux mouvements d'air (infiltration ou ex-filtration) et par diffusion pour éviter les risques de condensation à l'intérieur. Le transfert de vapeur par convection a lieu lorsqu'il y a une différence de température et de pression de vapeur d'eau entre le milieu extérieur et l'ambiance intérieure. Ces phénomènes peuvent provoquer une condensation à l'intérieur et en surface de la paroi.

La convection massique surfacique

Face à cette sollicitation, il existe un échange massique par convection à la surface de contact entre la paroi et l'ambiance extérieure. Par analogie à la convection thermique, la convection massique est définie comme étant une densité de flux massique à l'interface entre la paroi et la couche d'air à son contact. Elle s'exprime en fonction d'un coefficient d'échange massique et un gradient de pression partielle de vapeur. La relation s'écrit alors comme suit :

$$\phi_{conv} = \beta_{conv}(P_{v,air} - P_{v,surface}) \quad (3.4)$$

avec

- ϕ_{conv} : la densité de flux massique par convection [$\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$]
- β_{conv} : le coefficient d'échange massique [$\text{kg}/\text{Pa.s.m}^2$]
- $P_{v,air}, P_{v,surface}$: les pressions de vapeur partielle respectivement de l'air et de la surface de la paroi [Pa]

Le coefficient d'échange massique est lié au coefficient d'échange thermique par la relation de Lewis qui, à son tour, exprime le rapport entre la diffusivité thermique et la diffusivité massique :

$$Le = \frac{h_{conv}}{\beta_{conv} \times \rho \times C_p} \quad (3.5)$$

Ainsi, si on considère que l'air est un gaz parfait, le coefficient d'échange massique en fonction du coefficient d'échange thermique et du nombre de Lewis s'écrit :

$$\beta_{conv} = \frac{h_{conv}}{\rho_{air} \times C_{air} \times \frac{R}{M_{air}} T_{air}} Le^{-3/4} \quad (3.6)$$

Les changements de phase à la surface

L'humidité, qui vient se fixer au niveau de la surface d'une paroi, peut exister sous formes liquide ou vapeur, et changer de phase en fonction des conditions environnemen-

tales (pression de vapeur d'eau saturante, température). L'eau de pluie par infiltration est aussi susceptible de changer d'état physique lorsqu'elle est en contact avec une paroi chaude. Cet apport de matière intervient dans les échanges hygrothermiques entre une paroi et le milieu extérieur. La densité de flux latent due au changement de phase s'écrit en fonction du flux massique convectif total :

$$\phi_{latent} = L_v \times \phi_{convectif,total} \quad (3.7)$$

Les infiltrations d'eau par diffusion à l'intérieur de la paroi

L'eau de pluie est susceptible de s'infiltrer au sein d'une paroi, et devient par la suite une source d'humidité en surface. Physiquement, on l'introduit directement en terme de densité de flux liquide reçu.

$$\phi_{Liq,m,diff} = \phi_{Liq,ext} \quad (3.8)$$

Ce flux d'eau liquide génère évidemment un flux thermique qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\phi_{Liq,th,diff} = C_{Liq} \times \phi_{Liq,m,diff} \times (T_{air} - T_{surface}) \quad (3.9)$$

3.1.3 Application à une paroi multi-couche

La majorité des constructions présentent des parois multi-couche, afin de bénéficier des avantages de différents matériaux. De plus, la structure portante peut être complétée d'un enduit, d'un pare-vapeur, d'un isolant . . . pour répondre aux critères esthétique, architecturaux et constructifs d'aujourd'hui. La connaissance du comportement de telles parois permettrait d'améliorer considérablement le confort hygrothermique. [Qiu et al., 2003] a montré que la différence de pression capillaire à l'interface de contact entre deux couches crée une résistance aux transferts liquides, ce qui affecte d'une façon significative la distribution de la teneur en eau au sein de la paroi. [De Freitas et al., 1996] a distingué 3 cas possibles pour l'interface de contact entre deux couches qui composent une paroi. Ces 3 configurations se résument dans la figure 3.2 :

- un contact parfait, ou contact hydraulique, qui intervient lorsqu'il y a une connexion interne des deux matrices solides.
- un contact naturel qui est présent lorsqu'il y a pas de connexion interne entre deux matrices solides.
- un contact par lame d'air qui représente une couche d'air de faible épaisseur entre deux couches.

Peu de travaux de recherche se sont penchés sur l'étude de ces différents cas. On trouve principalement [Mendes et al., 2003] qui s'est intéressé à l'étude de la modélisation des transferts hygrothermiques dans le cas d'une paroi multi-couche avec un contact parfait. [Wilson et al., 1995, Karagiozis, 2001, De Freitas et al., 1996, Derluyn et al., 2008,

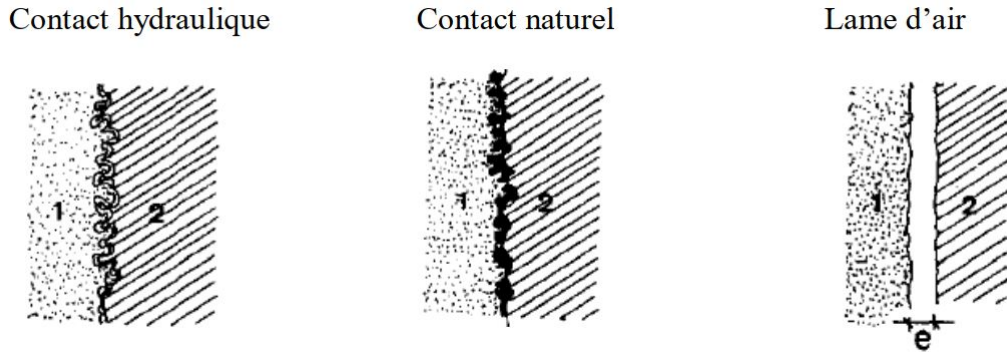


FIGURE 3.2: Configurations de contact entre deux couches composant une paroi

Nofal et al., 2001, Qiu et al., 2003] ont développé des modèles numériques des transferts de l'humidité dans une paroi multi-couche sous l'hypothèse d'un contact imparfait. L'interprétation des mécanismes décrivent les transferts hygrothermiques à l'interface de contact de deux couches. L'exploitation des résultats ne semble pas être évidente car il est difficile de parfaitement identifier l'état de contact qui est souvent inaccessible.

En considérant une paroi constituée de deux couches A et B, les équations présentées précédemment restent valables. Deux types de contact peuvent alors être identifiés :

- un contact parfait, sans résistance de contact
- un contact imparfait, avec résistance de contact

Dans le cas d'un contact parfait, [Mendes et al., 2003] suppose que la pression capillaire et la température sont continues. On obtient alors les deux conditions limites suivantes :

$$\begin{cases} T_A = T_B \\ P_{cap,A} = P_{cap,B} \end{cases} \quad (3.10)$$

En introduisant la loi de Kelvin :

$$\phi = \exp\left(\frac{P_{cap}g}{R_v T}\right) \quad (3.11)$$

Et finalement, en intégrant l'équation 3.10 dans la relation 3.11, on obtient :

$$\frac{R_{v,A}T_A}{g} \text{Ln}(\varphi_A) = \frac{R_{v,B}T_B}{g} \text{Ln}(\varphi_B) \quad (3.12)$$

où

- φ : l'humidité relative [%]
- R_v : la constante de gaz parfait (vapeur d'eau) [J/mol.K]
- g : la constante de gravitation [$m^3/kg.s^2$]

D'une manière similaire à la condition d'équilibre de la température à l'interface entre les deux couches, une condition de continuité de l'humidité relative peut être formulée

comme suit :

$$\varphi_A = \varphi_B \quad (3.13)$$

Ces dernières conditions impliquent qu'un contact parfait nécessite une interpénétration parfaite à l'interface des deux matériaux constituant les couches A et B, contrairement au cas d'un contact imparfait, où peuvent apparaître des vides entre les deux couches, phénomène complexe à formuler. Pour ce dernier type de contact, le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température qui s'écrit comme suit, dans le cas unidimensionnel :

$$\phi = -\frac{\delta T}{R_{th}} \quad (3.14)$$

avec R_{th} qui représente la résistance thermique de l'interface, exprimée en $[m^2.K/W]$, et dépendante de la conductivité thermique et de la distance entre les deux couches A et B.

Le flux d'humidité sous forme liquide traverse la paroi multi-couche sous l'effet d'un gradient de pression capillaire tandis que la vapeur se comporte par diffusion. De la même manière que le flux thermique, le flux massique total, dans le cas d'un contact imparfait, se caractérise par deux résistances de contact massique, liquide et vapeur [Tran Le et al., 2009] :

$$\phi_{massique} = -\frac{\Delta P_{cap}}{R_{m,Liq}} - \frac{\Delta P_v}{R_{m,vap}} \quad (3.15)$$

avec $R_{m,Liq}$ et $R_{m,vap}$ qui dépendent respectivement de la conductivité hydraulique et de la perméabilité à la vapeur d'eau.

3.1.4 Les avancées scientifiques sur l'assèchement des parois

Au regard des progrès techniques de l'acte de bâtir et des nouvelles normes en vigueur dans le secteur du bâtiment, les exigences en terme de demande d'énergie due aux pertes thermiques dans les logements anciens sont de plus en plus fortes. A ce titre, il sera inévitable de s'orienter vers une solution pérenne et durable à long terme. La présence de l'humidité en excès dans le bâti ancien, due principalement à la source majeure des remontées capillaires, réduit énormément l'efficacité et la durabilité de l'isolant et représente un frein technique pour des travaux de rénovation. A cela, s'ajoute les objectifs du développement durable, dont l'un des enjeux principaux est la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les bâtiments anciens présentent de nombreuses spécificités qui les distinguent des bâtiments contemporains (cf chapitre 1). Les matériaux utilisés massivement dans ce type de construction sont les briques ou les pierres et le bois qui sont des ressources locales, non standardisées et très sensibles à l'humidité. Par ailleurs, les constructions anciennes révèlent des qualités plus importantes comme une ventilation naturelle accrue. L'air pénètre par les défauts d'étanchéité à l'air ou les ouvertures des fenêtres. Les murs anciens, connus pour leur forte inertie, ont un rôle important de stockage et de régulation thermique en

saison froide et offrent un excellent confort pendant l'été. De plus ils représentent un subtil équilibre hygrothermique. Or, certaines techniques effectivement utilisées pour rénover les bâtiments anciens sont très difficiles à concilier avec le comportement de l'enveloppe. Ces solutions d'amélioration de la performance environnementale des bâtiments consistent majoritairement en la pose d'un doublage thermique, de l'isolation de la toiture et de l'installation de double vitrage. De telles interventions impliquent des transformations de l'enveloppe, voire de l'aspect architectural.

Ces solutions peuvent conduire à une dénaturation profonde des bâtiments anciens et constituent une contradiction en termes de comportement thermique de ce type de bâtiments, par le truchement de la dégradation de ses propres qualités initiales. De plus, la modification de l'aspect architectural peut également être un frein supplémentaire aux travaux de rénovation. Certains procédés contemporains visant à améliorer les performances thermiques de ces bâtiments anciens peuvent conduire à des aberrations. En effet, si les échanges gazeux sont perturbés, ils peuvent être à l'origine de graves troubles hygrométriques, rendant ces procédés inadaptés. Certaines simulations thermiques existantes, utilisées pour justifier ces choix techniques, ne prennent pas en considération les transferts d'humidité. Or, les bâtiments anciens sont particulièrement sensibles aux excès d'eau. En réduisant les infiltrations et le renouvellement d'air, l'humidité produite ne peut plus s'échapper et la pose d'une isolation thermique par l'intérieur modifie la capacité de séchage du mur ancien et accentue les ponts thermiques, entraînant de lourdes conséquences à long terme (telles que le développement de moisissures, l'apparition de désordre structurel ou la détérioration de l'isolation).

Les bâtiments antérieurs à 1948 sont soumis à plusieurs mesures particulières. Il est donc essentiel de bien les connaître et pour ce faire, un effort doit être fait pour les étudier le plus rigoureusement possible (cf section 1.3). Différents projets ont été nés récemment pour aborder cette problématique (projets BATAN [Sassine, 2013], ATHEBA [CETE, 2010], HYGROBAT [Woloszyn, 2014], HUMIBATex [Ferroukhi, 2015]...). En raison de la complexité des problèmes physiques impliqués (transferts couplés de chaleur, d'humidité et aéraulique), quelques publications scientifiques se sont penchées sur ce sujet. [Guimarães & de Freitas, 2009] et [Delgado et al., 2014] ont proposé une étude numérique et expérimentale sur la validation d'une nouvelle technique (un système de ventilation de la base des murs) pour réduire le niveau d'humidité ascensionnelle dans les bâtiments historiques portugais. Ce projet a été mené au Laboratoire de physique du bâtiment de la Faculté d'ingénierie de l'Université de Porto.

Cette technique consiste à ventiler la base d'une paroi par l'installation d'un dispositif de ventilation mécanique hygro-réglable. La ventilation de la base des murs augmente l'évaporation, ce qui entraîne une réduction du niveau atteint par le front d'humidité (voir figure 3.3). Ceci n'est possible que lorsque la nappe phréatique est plus basse que la base du mur. L'étude a donné des résultats intéressants : les expériences montrent que la présence

d'un système de ventilation à la base du mur des deux côtés empêche le front d'humidité d'atteindre un niveau plus élevé. L'utilisation d'un système hygro-réglable est essentielle pour contrôler les cycles indésirables de condensation et de cristallisation/dissolution. Cette technique semble efficace en cas de remontées d'humidité par capillarité. L'eau contenue dans le sol est évacuée au contact des zones ventilées situées de part et d'autre du pied du mur. Le système de ventilation en pied de mur est cependant inadapté aux murs enterrés humides où l'écoulement de l'eau est horizontal. Dans ce cas, une intervention sur un seul côté du mur est possible et devrait permettre d'assainir l'ensemble de la paroi.

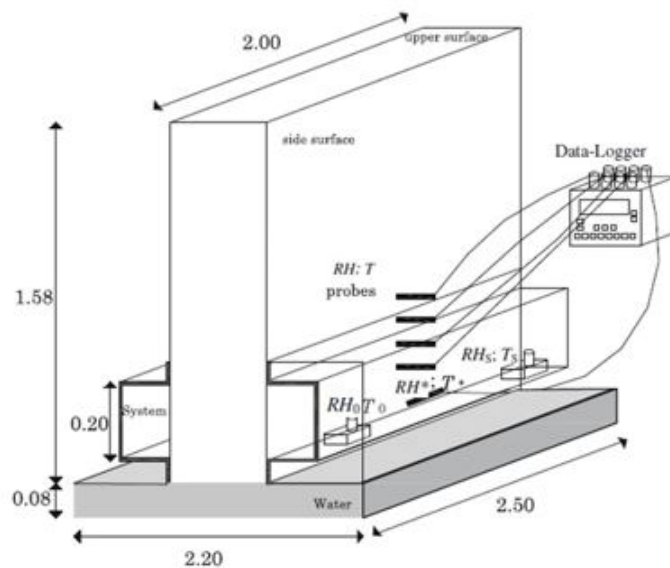


FIGURE 3.3: Principe du système de ventilation de la base des murs

Dans une autre étude, [af Klintberg et al., 2008] a proposé une nouvelle technique appelée méthode *Gap Air*. Cette méthode consiste en la modification profonde de l'enveloppe de l'habitat. Cette méthode d'assèchement des murs ventile l'intérieur des murs et du sol d'un bâtiment. Le procédé permet à l'air convectif de circuler à l'intérieur du bâtiment. L'objectif de la méthode est d'éliminer l'humidité de la construction et donc de protéger la structure de dommages telles que les moisissures. L'air entre par des trous dans les murs, traverse les murs et les sols, puis est évacué par des bouches de sortie. Lors de la rénovation d'une maison humide, la méthode *Gap Air* permet d'évacuer l'humidité sans période de séchage préalable, qui peut souvent durer 6 à 8 semaines ; les occupants peuvent donc réintégrer rapidement leur logement. La méthode permet également de renforcer et de prévenir la maison contre de tels dommages. Des tests de grandeur nature ont été réalisés et analysés afin d'identifier les mécanismes d'assèchement de l'enveloppe par ce procédé. Les essais ont été réalisés sur une structure en forme de L, censée représenter un plancher assemblé à un mur.

La figure 3.4 montre le banc d'essai composé d'un plancher et d'un mur, traversés par une lame d'air équipée d'un câble chauffant en partie basse. La lame d'air ventilée

est asséchée par la présence du câble chauffant délivrant une puissance de 15 W/m, dont la résistivité augmente avec la température. Toutefois, ce procédé présente l'inconvénient majeur de prévoir une restructuration importante de l'habitat. En effet, le passage de l'air ventilé et chauffé s'effectue dans la structure même de l'habitation et nécessite donc une intervention lourde et coûteuse.

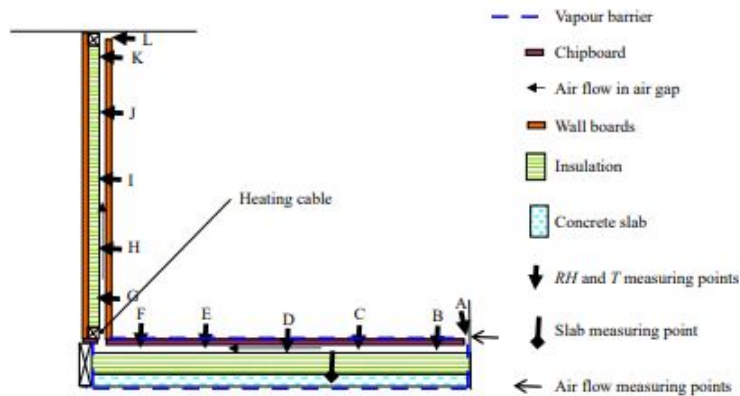


FIGURE 3.4: Principe de la méthode Air-gap

D'autre part, de nombreuses études ont porté sur des technologies de séchage appliquées au traitement des bâtiments. La plupart s'est concentrée sur des essais de performance globale des systèmes de refroidissement par évaporation. Les résultats dans des régions particulières (climats arides) ont fourni des orientations pour les applications locales d'ingénierie où le phénomène d'évaporation directe est utilisé, en conditions adiabatiques, pour refroidir des composants électroniques ou nucléaires ou différents fuseaux [Sellami et al., 2018, Gasgnier & Sénateur, 1980, Drissi et al., 2016, Lips et al., 2017].

3.2 Le système Aéraulec®, une technologie de rupture

À l'aune de cette littérature scientifique, seules quelques études théoriques et expérimentales ont étudié des solutions de traitement de paroi soumise à des remontées capillaires, notamment dans le cadre de rénovation et de réhabilitation énergétique. Peu d'études portent sur la modélisation des phénomènes de transfert au sein de ces parois. Pour répondre à cette problématique, nous étudions alors un procédé de gestion active et intelligente de l'humidité dans les murs grâce à un dispositif aéraulique générant une ventilation dans la lame d'air située entre le mur porteur et l'isolant thermique, développé avec nos partenaires (Aéraulec Conseil). Ce système présente une alternative efficace pour évacuer l'excès d'humidité sans assécher les murs [Promis, 2021]. La conception consiste à ventiler un mince espace tampon (la lame d'air) créé entre un mur ancien en briques

en terre cuite et l'isolation thermique intérieure prévue pour améliorer sa performance énergétique. La circulation de l'air est assurée par un réseau de canalisation en PVC de soufflage d'air frais, pris à l'extérieur, placé à la base du mur, et un réseau d'aspiration d'air humide, placé en tête de paroi prévue pour améliorer sa performance énergétique, comme présenté en figure 3.5.

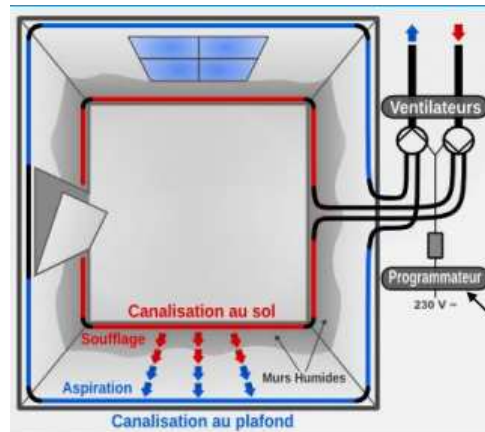


FIGURE 3.5: Réseau de soufflage et d'aspiration du dispositif Aéraulec

Le concept du dispositif aéraulique, présenté dans la figure 3.6, a pour but d'évacuer l'excès d'humidité accumulé dans la lame d'air et diffusé depuis le mur humide. L'humidité sera aspirée par le réseau d'aspiration et rapidement remplacé par de l'air frais grâce à un balayage quotidien et maîtrisé dans le réseau de soufflage. La pérennité de l'isolation sera alors assurée, sans assèchement excessif du mur. La paroi pourra alors "respirer" tout en maintenant ces performances mécaniques.

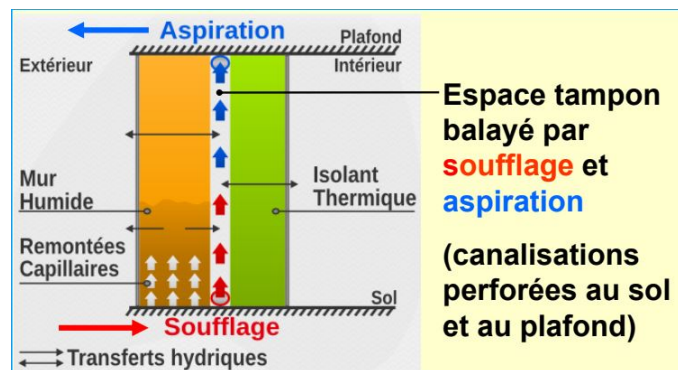


FIGURE 3.6: Le concept du système Aéraulec

Physiquement, le dispositif aéraulique est basé sur la génération d'un flux laminaire de convection forcée d'air frais dans un canal vertical (la lame d'air) en contact avec la face interne de la paroi humide. Ce phénomène crée un front d'évaporation à la surface interne de la paroi, où par conséquent, un échange hygrothermique simultané se produit entre la paroi et la lame d'air et entre la paroi et le milieu extérieur. Les transferts de chaleur et de masse sont décrits alors par un modèle mathématique et l'écoulement d'air

dans la lame d'air est décrit par les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

Ce système Aéraulec®est :

- une innovation de produit car il s'agit du seul dispositif qui permette d'assurer un balayage uniforme d'espaces tampons (brevet d'invention n°08-00660 déposé par notre partenaire industriel).
- une innovation de procédé car il porte sur la régulation active des transferts d'humidité par balayage (brevet d'invention n°13-00648 déposé par notre partenaire industriel).
- une innovation de rupture car le balayage Aéraulec a pour effet d'extraire de la vapeur d'eau contenue dans les espaces tampons. On démontre que le débit massique $m_v(t)$ de vapeur d'eau extraite par unité de surface d'un élément d'espace tampon au cours du balayage a la valeur suivante :

$$m_v(t) = a.q[P_e - P(t)] \quad (3.16)$$

avec a un coefficient fonction de l'aire de l'élément d'espace tampon, q le débit du balayage dans l'élément d'espace tampon, P_e la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air neuf insufflé et $p(t)$ la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'espace tampon à l'instant t . Le terme $a.q$ est homogène à une perméance à la vapeur d'eau. Proportionnelle au débit q du balayage, elle permet d'effectuer une régulation active des transferts de vapeur d'eau dans l'ensemble de la paroi : i) une évacuation à l'extérieur de la vapeur d'eau produite dans l'espace tampon par l'évaporation de l'humidité des murs et ii) une réduction nécessaire de la pression partielle de vapeur d'eau dans l'espace tampon afin de n'avoir aucun risque de condensation dans les matériaux d'isolation thermique et de maintenir l'équilibre hygroscopique des murs en toutes saisons.

Analyse physique des phénomènes de transferts

La paroi multi-couche est considérée composée, de l'extérieur vers l'intérieur, par un mur ancien en briques en terre cuite avec un niveau de remontée capillaire pouvant atteindre 1m de hauteur, une lame d'air ventilée d'épaisseur e et un isolant hygroscopique, comme décrit en figure 3.7.

Les mécanismes de transports au sein de cette paroi englobe plusieurs phénomènes physiques. Les deux phénomènes physiques qui sont à l'origine des transferts à travers cette paroi multi-couches sont double. En premier lieu, le transfert de chaleur est gouverné par un gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur de la paroi. En conduction pure, l'intensité du transfert thermique est quantifiable par le flux de chaleur qui est proportionnel au gradient thermique par l'intermédiaire de la conductivité thermique du milieu

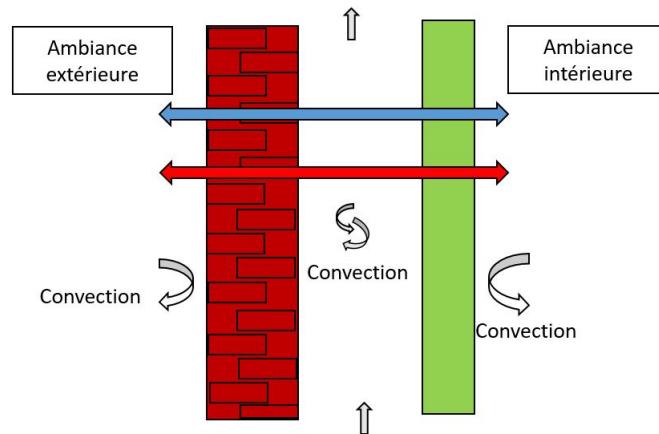


FIGURE 3.7: Les phénomènes physiques mis en jeu

(loi de Fourier). En second lieu, le mécanisme de transfert de masse, par analogie à celui de chaleur, est piloté par le déplacement de matière due à un gradient d'humidité relative entre l'intérieur et l'extérieur dont le moteur est une différence de pression partielle de vapeur d'eau. Le flux de vapeur d'eau est de même proportionnel au gradient potentiel (loi de Fick). Les remontées capillaires sont générées par un flux d'eau liquide proportionnel au gradient potentiel qui est la pression capillaire. Les échanges de la paroi avec le milieu extérieur et intérieur sont principalement des échanges convectifs qui dépendent des coefficients d'échanges convectifs thermique et massique. La lame d'air, est considérée comme étant un canal où règne un écoulement d'un fluide (l'air frais) en convection forcée et en régime laminaire. L'interface interne du mur est donc le siège de phénomènes d'évaporation et de condensation. Ces deux phénomènes dépendent fortement de la différence de température du mur et celle de l'air soufflé dans le canal, en sus des phénomènes de diffusion sous un gradient de masse et de thermodiffusion sous un gradient thermique. La problématique liée à la modélisation de ces mécanismes de transports est complexe car ces processus s'opèrent généralement d'une façon couplée. De plus, un gradient thermique gouverne les transferts de chaleur qui génèrent à leur tour un transfert de masse, et réciproquement.

En raison du caractère dynamique de ces phénomènes de transferts au sein d'une paroi multi-couche, une simplification du modèle semble être une étape indispensable dont l'objectif principal est de mettre en exergue les transferts hygrothermiques entre le mur (ancien et humide) et la la lame d'air ventilée, à l'échelle macroscopique. Pour ce faire, on suppose, dans premier temps, que la face externe de la paroi est adiabatique. En complément la mise en œuvre d'un pare-vapeur devant l'isolant thermique permet de bloquer les échanges de vapeur d'eau avec l'ambiance intérieure du local. Le modèle est, dans un second temps, étendu pour lever cette hypothèse simplificatrice (cf section 3.3).

3.2.1 Modélisation du système de ventilation d'un milieu saturé en conditions adiabatiques

Dans un premier temps, nous nous sommes consacrée à la modélisation numérique des transferts de chaleur et de masse dans une lame d'air représentée en tant qu'un canal ventilé dont l'une de ses parois verticales est constituée d'un mur en brique en terre cuite et l'autre est considérée adiabatique. La face externe du mur est également considérée adiabatique et le milieu poreux est supposé saturé dans ce modèle. L'écoulement d'air en convection forcée dans la lame d'air est décrit par les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et d'espèces. Le mur en brique terre cuite est assimilé à un milieu poreux saturé où les transferts de chaleur et de masse sont régis par le modèle de Darcy simple. La discrétisation des équations de bilans est effectuée par une méthode implicite aux volumes finies. La résolution numérique du système algébrique obtenu permet de déterminer l'évolution temporelle des distributions de température, de fraction massique et de champs de vitesse.

3.2.2 Formulation mathématique

Description physique du modèle

La configuration géométrique étudiée est présentée sur la figure 3.8. Il s'agit d'un espace tampon de largeur $e = 0.03\text{m}$ et de longueur $L = 1.5\text{m}$ pris en sandwich entre deux plaques dont une est le mur en briques terre cuite de longueur L et d'épaisseur $h = 0.35\text{m}$ et l'autre une paroi adiabatique de longueur L . La face externe du mur en briques est supposée adiabatique ainsi que la couche d'isolant intérieur. De plus, on considère dans un premier temps qu'il n'y a pas d'échange d'humidité entre la lame d'air et l'isolant (schématisation par un pare vapeur).

Le flux d'air frais ascendant dans la lame d'air est soufflé à une température T_0 , à une humidité relative ϕ_0 et à une vitesse U_0 . Un référentiel cartésien (Oxy) est utilisé, tel que l'origine O soit placée à l'extrémité inférieure de la paroi du matériau poreux. L'axe (Oy) est compté positivement dans la direction des remontées capillaires et dans la direction de l'écoulement. L'axe (Ox) est perpendiculaire à (Oy).

Hypothèses simplificatrices

Pour la formulation mathématique du problème, les hypothèses simplificatrices suivantes sont prises en considération :

- Le flux d'air est en écoulement laminaire et stationnaire (Reynolds inférieur à 2 000) ;
- Le problème est bi-dimensionnel ;

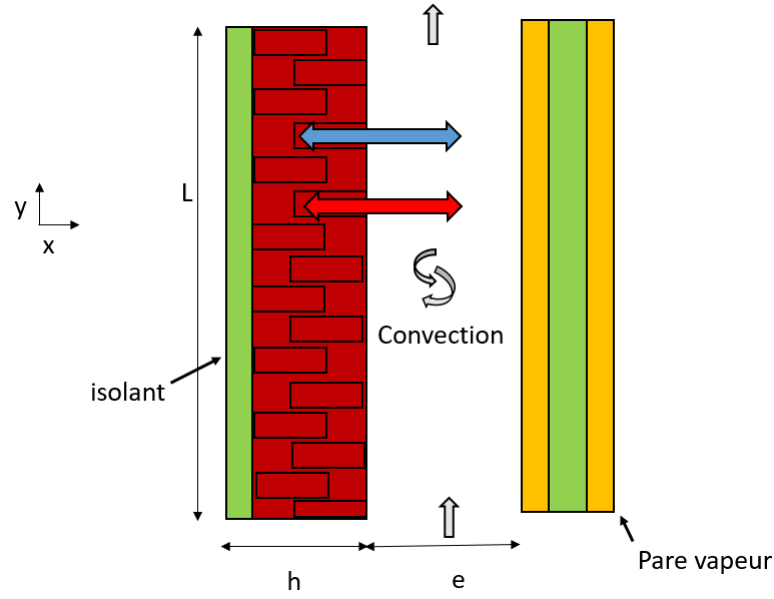


FIGURE 3.8: Configuration du modèle en condition adiabatique

- L'eau sous forme liquide, gazeux ou mixte est considérée comme un gaz parfait pour les champs de pression modélisés relativement petits ;
- Le rayonnement, la dissipation visqueuse et les autres effets secondaires sont supposés être négligeables ;
- Les effets Dufour et Soret représentant le flux de chaleur sous le gradient de masse et la diffusion de masse sous le gradient de température, respectivement, sont négligés ;
- Le milieu poreux saturé en liquide est considéré comme isotrope et homogène. Les propriétés locales du milieu poreux sont définies à l'échelle du volume élémentaire représentatif, macroscopiquement homogène. Ainsi, l'hypothèse d'équilibre reste valide ;
- L'interface entre le liquide et l'air est invariable à la surface de la couche poreuse ;

Équations de base dans la lame d'air

En se basant sur les hypothèses fondamentales précédentes, l'écoulement laminaire de la phase gazeuse par convection forcée dans la lame d'air peut être décrit par les équations suivantes, qui sont exprimées en fonction des équations laminaires bi-dimensionnelles de continuité, de la quantité de mouvement, de la conservation de l'énergie, du fractionnement de la masse et du transfert de chaleur :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3.17)$$

$$\rho(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y}) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (3.18)$$

$$\rho(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y}) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3.19)$$

$$\rho C_p (U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y}) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \quad (3.20)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} \right) \quad (3.21)$$

Équations de base dans le milieu poreux saturé

En incluant le modèle de Darcian, les équations décrivant la continuité bidimensionnelle, le transfert d'énergie et la quantité de mouvement dans la couche poreuse saturée de liquide sont présentées ci-dessous :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3.22)$$

$$U = -\frac{k}{\mu_L} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.23)$$

$$V = -\frac{k}{\mu_L} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.24)$$

$$\frac{k}{\mu_L} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial Y^2} \right) = 0 \quad (3.25)$$

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \alpha_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \quad (3.26)$$

avec

- K : la perméabilité à l'eau liquide
- μ_L : la viscosité dynamique de l'eau liquide
- $\alpha_{eff} = \alpha_{porous-layer}$: la diffusivité thermique effective exprimé en fonction de la porosité et la diffusivité thermique réelle du milieu poreux

Les conditions aux limites dans le milieu poreux saturé

Au pied du mur : pour $Y = 0$ et $0 < X < e$

$$V^{eau} = V_{inlet}^{eau} \quad (3.27)$$

$$T^{eau} = T_{inlet}^{eau} \quad (3.28)$$

$$U^{eau} = 0 \quad (3.29)$$

A la face externe du mur : pour $X = 0$ et $0 < Y < L$

$$U^{eau} = V^{eau} = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial T^{eau}}{\partial x} = 0 \quad (3.31)$$

Au haut du mur : pour $Y = L$ et $0 < X < e$

$$\frac{\partial T^{eau}}{\partial y} = \frac{\partial V^{eau}}{\partial y} = U = 0 \quad (3.32)$$

A l'interface milieu poreux - lame d'air : pour $0 < Y < L$ et $X = e$

$$T_{interface}^{eau} = T_{interface}^{air} \quad (3.33)$$

$$U_{interface}^{eau} = U_{interface}^{air} \quad (3.34)$$

$$V_{interface}^{eau} = V_{interface}^{air} \quad (3.35)$$

Conditions aux limites dans la lame d'air

A l'entrée de la lame d'air : pour $Y = 0$ et $e < X < h$

$$U^{air} = 0 \quad (3.36)$$

$$V^{air} = V_{inlet}^{air} \quad (3.37)$$

$$T^{air} = T_{inlet}^{air} \quad (3.38)$$

$$C_v^{air} = C_{v,inlet}^{air} \quad (3.39)$$

A la plaque droite de la lame d'air : pour $X = e + h$ et $0 < Y < L$

$$U^{air} = V^{air} = 0 \quad (3.40)$$

$$T_{\text{plaque à droite}} = T^{\text{air}} \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial C_v^{\text{air}}}{\partial X} = 0 \quad (3.42)$$

A la sortie de la lame d'air : pour $Y = L$ et $e < X < h$

$$\frac{\partial T^{\text{air}}}{\partial Y} = \frac{\partial C_v^{\text{air}}}{\partial Y} = \frac{\partial V^{\text{air}}}{\partial Y} = U = 0 \quad (3.43)$$

A l'interface lame d'air - milieu poreux : pour $X = e$ et $0 < Y < L$

$$-\lambda_{\text{eau}} \frac{\partial T^{\text{eau}}}{\partial x} = -\lambda_{\text{air}} \frac{\partial T^{\text{air}}}{\partial x} + \rho_{\text{air}} D L_v \frac{\partial C_v^{\text{air}}}{\partial x} \quad (3.44)$$

$$U^{\text{air}} = -\rho_{\text{air}} D \frac{\partial C_v^{\text{air}}}{\partial x} \quad (3.45)$$

$$V_{\text{interface}}^{\text{air}} = V_{\text{interface}}^{\text{eau}} \quad (3.46)$$

Adimensionnement des paramètres

Afin de généraliser les résultats, nous avons utilisé, dans le modèle numérique, les grandeurs adimensionnées suivantes :

$$X^* = \frac{x}{L}; Y^* = \frac{y}{L}; U_0^* = \frac{u}{u_0}; V^* = \frac{v}{u_0}; T^* = \frac{T}{T_0}; C^* = \frac{C}{C_0}; P^* = \frac{P}{\rho_{\text{air}} U_0^2};$$

En introduisant ces grandeurs sans dimensions dans les équations de la convection forcée pour le milieu fluide dans la lame d'air, nous obtenons :

$$\frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} = 0 \quad (3.47)$$

$$\rho(U^* \frac{\partial U^*}{\partial X^*} + v^* \frac{\partial U^*}{\partial Y^*}) = -\frac{\partial P^*}{\partial X^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U^*}{\partial X^{*2}} + \frac{\partial^2 U^*}{\partial Y^{*2}} \right) \quad (3.48)$$

$$\rho(U^* \frac{\partial V^*}{\partial X^*} + V^* \frac{\partial V^*}{\partial Y^*}) = -\frac{\partial P^*}{\partial Y^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V^*}{\partial X^{*2}} + \frac{\partial^2 V^*}{\partial Y^{*2}} \right) \quad (3.49)$$

$$U^* \frac{\partial T^*}{\partial X^*} + V^* \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} = \frac{1}{Re.Pr} \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial X^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^{*2}} \right) \quad (3.50)$$

$$U^* \frac{\partial C^*}{\partial X^*} + V^* \frac{\partial C^*}{\partial Y^*} = \frac{1}{Re.Sc} \left(\frac{\partial^2 C^*}{\partial X^{*2}} + \frac{\partial^2 C^*}{\partial Y^{*2}} \right) \quad (3.51)$$

avec :

- Nombre de Reynolds : $Re = \frac{L \times U_0}{\mu}$
- Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{\mu}{\alpha}$
- Nombre de Schmidt : $Sc = \frac{\mu}{D}$
- diffusivité thermique : $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$

Puis, en introduisant ces grandeurs dans les équations de transfert au sein de la paroi saturée, on obtient :

$$\frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} = 0 \quad (3.52)$$

$$\frac{1}{Da.Re} \left(\frac{\partial^2 P^*}{\partial X^{*2}} + \frac{\partial^2 P^*}{\partial Y^{*2}} \right) = 0 \quad (3.53)$$

avec

- Nombre de Darcy : $Da = K/L^2$

3.2.3 Protocole de résolution numérique

Le système d'équations différentielles couplées, dans les deux phases concernées (liquide et gaz), sous réserve du respect des conditions aux limites, est résolu numériquement en utilisant une méthode hybride qui associe à la fois la méthode des volumes finis et la méthode de Lattice - Boltzmann.

Cette méthode appelée HLBM (*Hybrid Lattice Boltzmann Method*) consiste à combiner la méthode de Lattice - Boltzmann et la méthode des volumes finis. Elle présente de nombreux avantages, particulièrement afin d'éviter le problème complexe du couplage entre la pression et la vitesse, compte tenu de l'absence de couplage direct entre l'écoulement de l'air, les champs de température et de concentration de vapeur. La méthode de Lattice - Boltzmann, proposée par [Mohamad, 2011], est utilisée pour résoudre les champs de pression et de vitesse, tandis que la méthode des volumes finis a été appliquée aux champs d'humidité et de température [Patankar, 1980]. En effet, la méthode des volumes finis est souvent utilisée lorsque l'objectif est de garantir principalement la conservation de l'énergie et de la masse, peu importe le choix de maillage, en raison de sa robustesse, même pour des maillages grossier.

L'objectif principal de la méthode Lattice - Boltzmann est de déduire les équations macroscopiques de l'échelle de la dynamique mésoscopique en utilisant la mécanique statistique. Les principales caractéristiques de cette méthode, hybride par rapport aux autres méthodes de calcul, sont la linéarité de l'opérateur de convection dans l'espace des vitesses, la simplicité du calcul de la pression en utilisant une équation d'état, et sa capacité à résoudre des problèmes plus complexes comme l'évolution des mélanges binaires et le trans-

fert combiné de chaleur et de masse. Cette méthode a été utilisée avec succès pour des problèmes similaires par différents auteurs [Mohamad & Kuzmin, 2010, Chen et al., 2012, Lubelli et al., 2018].

L'ensemble des équations discrétisées en volumes finis est ensuite converti en une équation matricielle tri-diagonale et est résolu par la méthode de Sur-Relaxation Successive (SOR) qui est proche de la méthode de Gauss-Seidel.

Le critère de convergence de la solution numérique est basé sur la variation des valeurs relatives. La convergence est considérée comme atteinte lorsque le plus grand résidu de toutes les variables est inférieur à 10^{-4} en tous points. Tous les essais paramétriques sont effectués avec un maillage de 31×151 dans le canal d'air et de 41×151 dans le milieu poreux. Une approche de la sensibilité du maillage est proposée en section 3.3.3.

Les différentes étapes de l'algorithme de résolution numérique, exposées au travers de l'organigramme présenté en figure 3.9, se résument comme suit :

1. Identification des paramètres thermodynamiques de l'eau et de l'air ;
2. Détermination des valeurs estimées des champs dynamiques dans le milieu poreux et dans la lame d'air ;
3. Calcul des niveaux de pression dans la couche poreuse ;
4. Calcul des composantes des champs de vitesse et de température dans la couche poreuse ;
5. Calcul des composantes des champs dynamiques, thermiques et massiques dans la lame d'air ;
6. Réalisation de tests de convergence ;
7. Affichage des résultats.

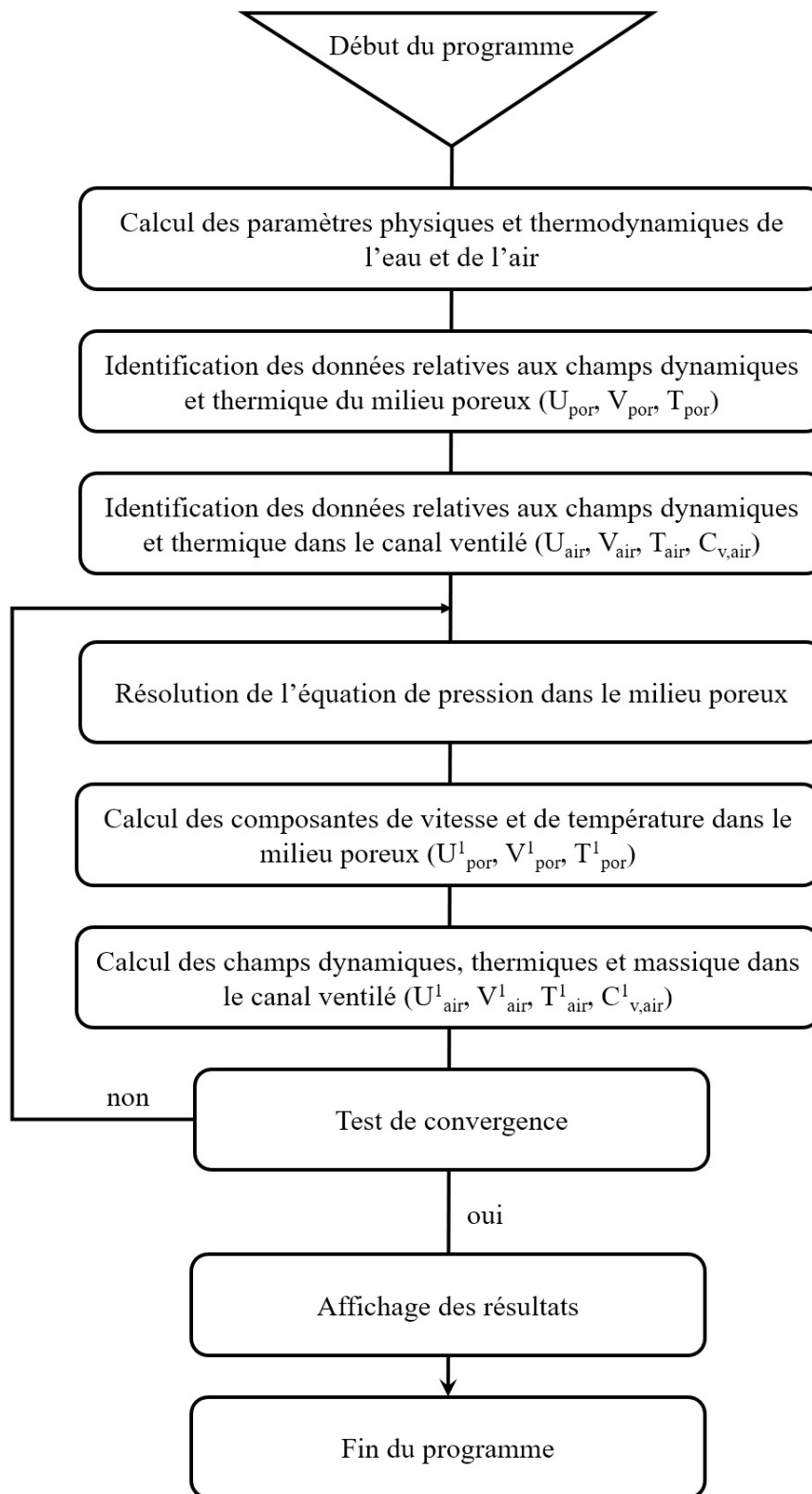


FIGURE 3.9: Organigramme modèle numérique en conditions adiabatiques

Cette approche se base donc sur un modèle simplifié de Darcy, sans introduction de l'approche de Brinkman qui consiste à modifier la loi de Darcy en ajoutant un terme de dissipation en vitesse. Ce modèle nous a permis de visualiser les phénomènes ayant lieu à l'interface entre un milieu poreux saturé en contact avec un fluide circulant dans un canal. Le fait de négliger les transferts hygrothermiques ayant lieu entre la paroi et l'ambiance externe, on supposant que la face externe de la paroi est adiabatique, limite par la suite les résultats exploités. Afin de pouvoir visualiser l'impact des échanges avec l'ambiance externe sur les phénomènes ayant lieu sur la face interne de la paroi en contact avec un fluide circulant dans la lame d'air, et de modéliser les remontées capillaires, on propose une extension de cette approche grâce à l'ajout d'une procédure numérique permettant de prendre en compte les différentes conditions aux limites que l'on souhaite aborder.

3.3 Extension du modèle vers un milieu non saturé en conditions diabatiques

Afin de pouvoir généraliser les résultats et répondre à notre problématique initiale, et après avoir modéliser les transferts hygrothermiques au niveau de l'interface entre un milieu poreux saturé en eau et un canal d'air ventilé, nous avons levé les hypothèses simplificatrices du modèle et augmenté le degré de liberté du modèle. Pour ce faire, nous considérons dans cette section un milieu poreux non saturé (présence simultanée des deux phases liquide et gazeuse) en conditions diabatiques, c'est-à-dire que nous tenons compte des transferts hygrothermiques entre la structure porteuse en brique de terre cuite et le canal ventilé et entre l'ambiance extérieure et la paroi. Sous cette dernière condition, les transferts hygrothermiques sont régis par le modèle de Luikov. La couche représentant l'isolant intérieur reste néanmoins en condition adiabatique. L'écoulement d'air en convection forcée dans le canal est décrit par les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et d'espèces. La discrétisation des équations bilan est effectuée par la méthode des volumes finies combinée à la méthode de Lattice - Boltzmann. La résolution numérique du système algébrique obtenu permet de déterminer l'évolution spatiale des distributions de température, de concentration de la vapeur d'eau et des champs dynamiques.

3.3.1 Formulation mathématique

Description physique de la configuration numérique

La configuration géométrique étudiée lors de l'extension du modèle initial est similaire à celle étudiée précédemment, visible en figure 3.8. Le modèle physique est constitué d'un espace tampon de largeur e et de longueur L , pris en sandwich entre deux parois, la couche

de briques en terre cuite de longueur L et d'épaisseur h et l'isolant thermique de longueur L , en condition adiabatique vers l'intérieur. La paroi en briques de terre cuite est assimilée à un matériau poreux non saturé dont la face externe est le siège d'échanges convectifs de chaleur et de masse avec le milieu extérieur. Nous associons à cette configuration un référentiel cartésien (Oxy) dont l'origine O est placée à l'extrémité inférieure de la paroi du matériau poreux. La figure 3.10 présente le modèle physique utilisé.

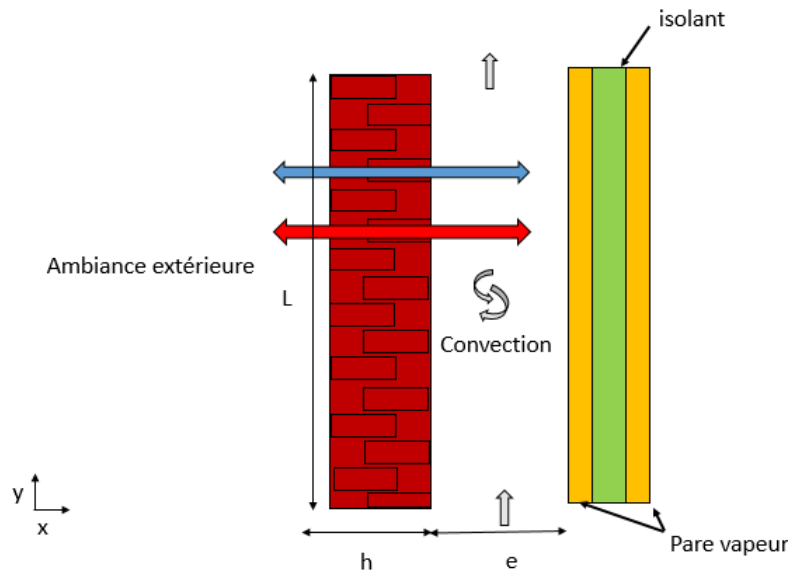


FIGURE 3.10: Extension du modèle numérique vers un milieu non saturé, en conditions diabatiques

hypothèses simplificatrices

- Le flux laminaire est considéré stationnaire (la valeur maximale de débit imposé de soufflage est inférieure 2 000 Reynolds).
- Le problème est tridimensionnel et constant.
- Les propriétés thermo-physiques du matériau sont constantes.
- Le matériau est assimilé à un milieu poreux homogène et isotrope.
- Le transfert de chaleur par rayonnement et la dissipation visqueuse sont négligeables. Les transferts radiatifs sont négligeables en raison de la différence de température relativement faible à l'interface entre la paroi poreuse et le fluide.
- Les effets Dufour et Soret représentant respectivement le flux de chaleur sous l'effet du gradient de masse et de la diffusion de masse sous le gradient de température peuvent être négligés car les processus de diffusion des espèces se produisent à un niveau de concentration très faible. Les transferts de chaleur et de masse sont principalement dus à l'évaporation.
- Absence de réaction chimique et de source de chaleur et de masse dans le système.
- Le fluide est newtonien et incompressible.

Équations de transferts

Au regard des hypothèses simplificatrices exposées précédemment, les équations qui régissent les transferts de chaleur et de masse dans le matériau poreux et la lame d'air s'écrivent séparément pour la paroi poreuse et pour le fluide en écoulement contre la couche poreuse. Les équations sont synthétisées comme suit :

— dans le milieu poreux

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \alpha_m \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} \right) + \varepsilon \frac{L_v}{C_p} \frac{\partial W_m}{\partial t} \quad (3.54)$$

$$\frac{\partial W_m}{\partial t} = D_m \left(\frac{\partial^2 W_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_m}{\partial y^2} \right) + D_m \delta \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} \right) \quad (3.55)$$

— dans la lame d'air

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} = D_f \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \quad (3.60)$$

3.3.2 Conditions initiales et aux limites

Conditions initiales

On admet initialement que le milieu poreux est partiellement saturé et à une température constante. A partir de l'instant t_0 , l'interaction entre le matériau poreux et le milieu ambiant se développe. Cet instant correspond également au soufflage de l'air ambiant dans la lame d'air. Pour $\forall t < t_0$, les conditions initiales s'écrivent comme suit au niveau de la paroi poreuse :

$$T_m(x, y, t_0) = T_{mi} \quad (3.61)$$

$$W_m(x, y, t_0) = W_{mi} \quad (3.62)$$

Au niveau de la lame d'air :

$$T_f(x, y, t_0) = T_0 \quad (3.63)$$

$$W_f(x, y, t_0) = W_0 \quad (3.64)$$

$$u(x, y, t_0) = U_0 \quad (3.65)$$

$$v(x, y, t_0) = 0 \quad (3.66)$$

Conditions aux limites

Pour $x = 0$ et $0 < y < L$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_{t,e}(T_{ext} - T(0, y)) - (1 - \epsilon)L_v h_{m,e} \rho_m (W(0, y) - W_{ext}) \quad (3.67)$$

$$D_m \frac{\partial W}{\partial x} + D_m \delta \frac{\partial T}{\partial x} = h_{m,e}(W(0, y) - W_{ext}) \quad (3.68)$$

Pour $x = h$ et $0 < y < L$

$$-\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - (1 - \epsilon)L_v D_f \rho_f \frac{\partial W_f}{\partial x} \quad (3.69)$$

$$D_m \rho_m \frac{\partial W_m}{\partial x} + \delta \frac{\partial T_m}{\partial x} = \rho_f D_f \frac{\partial W_f}{\partial x} \quad (3.70)$$

Pour $y = 0$ et $0 < x < h$

$$W_m = W_{inlet} \quad (3.71)$$

$$T_m = T_{inlet} \quad (3.72)$$

Pour $y = L$ et $0 < x < h$

$$\frac{\partial T_m}{\partial y} = \frac{\partial W_m}{\partial y} = 0 \quad (3.73)$$

A l'entrée du canal, en pied de mur : $h < x < e$ et $y = 0$

$$U = U_0 \quad (3.74)$$

$$T = T_0 \quad (3.75)$$

$$W = W_0 \quad (3.76)$$

A l'interface coté lame d'air : $x = h$ et $0 < y < L$

$$T_{interface} = T_a \quad (3.77)$$

$$W_{interface} = W_a = W_a(0, y) \quad (3.78)$$

$$V = 0 \quad (3.79)$$

$$U_a = -\frac{D_f}{1 - W_{int}} \frac{\partial W_f}{\partial x} \quad (3.80)$$

avec

$$W_{int} = \frac{M_v P_{vsat}}{M_a(P - P_{vsat}) - M_v P_{vsat}} \quad (3.81)$$

Pour $h < x < e$ et $Y = L$

$$\frac{\partial T_f}{\partial y} = \frac{\partial W_f}{\partial y} = 0 \quad (3.82)$$

Pour $x = e + h$ et $0 < y < L$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{\partial W_f}{\partial x} = 0 \quad (3.83)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3.84)$$

Dans l'équation 3.67, $W_m(0, y)$ est déterminé à partir des isothermes de sorption, grâce au modèle de lissage proposé par Henderson :

$$\varphi = 1 - e^{-(k \cdot T_m \cdot W_m^n)} \quad (3.85)$$

avec

- φ : l'humidité relative
- k et n : des constantes caractéristiques du matériau, déterminées expérimentalement
- W_m : la teneur en eau à base sèche

La teneur en eau en base sèche est reliée à la fraction massique contenu dans l'air C_m , exprimée par l'expression suivante :

$$W_m = \frac{C_m}{1 - C_m} \quad (3.86)$$

où

$$C_m = 0.622 \times \frac{\varphi \times P_{v,sat}}{P - 0,378 \times \varphi \times P_{v,sat}} \quad (3.87)$$

avec

- P : la pression de vapeur d'eau [Pa]
- $P_{v,sat}$: la pression de vapeur saturante à la température de surface du milieu poreux [Pa]

La pression de vapeur d'eau saturante est estimée à partir de la relation de Bertrand pour une plage de mesure de température entre 0°C et 200°C [Promis, 2020] :

$$P_v^{sat}(T) = \exp\left(23.5771 - \frac{4042.9}{T - 37.58}\right) \quad (3.88)$$

Équations adimensionnées

De la même manière que précédemment, ces différentes équations sont adimensionnées dans le code de calcul :

- Dans le milieu poreux, l'adimensionnement réside dans les relation suivante

$$x^+ = \frac{x}{L}; y^+ = \frac{y}{L}; W^+ = \frac{Wm}{Wm0}; t^+ = \frac{t\alpha_t}{L}; T^+ = \frac{(T_m - T_{m,min})}{(T_{m,max} - T_{m,min})} \quad (3.89)$$

Les équations de transfert s'écrivent alors

$$\frac{\partial T_m^+}{\partial t^+} = \left(\frac{\partial^2 T_m^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 T_m^+}{\partial y^{+2}}\right) + \varepsilon KO \frac{\partial W_m^+}{\partial t^+} \quad (3.90)$$

$$\frac{\partial w_m^+}{\partial t^+} = Lu \left(\frac{\partial^2 W_m^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 W_m^+}{\partial y^{+2}}\right) + LuPn \left(\frac{\partial^2 T_m^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 T_m^+}{\partial y^{+2}}\right) \quad (3.91)$$

avec les nombres adimensionnels suivants

$$Lu = \frac{\alpha_t}{D_m}; Pn = \frac{\delta \Delta T}{W_{m0}}; Ko = \frac{L_v W_{f0}}{C_p \Delta T} \quad (3.92)$$

- Dans la lame d'air, l'adimensionnement réside dans les relation suivante

$$x^+ = \frac{x}{L}; y^+ = \frac{y}{L}; Wf^+ = \frac{Wf}{Wf0}; t^+ = \frac{tU_0}{L}; Tf^+ = \frac{(T_f - T_{f,min})}{(T_{f,max} - T_{f,min})}; P^+ = \frac{P}{U_0 \rho_f} \quad (3.93)$$

Les équations de transfert s'écrivent alors

$$\frac{\partial u^+}{\partial x^+} + \frac{\partial v^+}{\partial y^+} = 0 \quad (3.94)$$

$$\frac{\partial u^+}{\partial t^+} + u^+ \frac{\partial u^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial u^+}{\partial y^+} = -\frac{\partial P^+}{\partial x^+} + \frac{1}{Re_f} \left(\frac{\partial^2 u^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 u^+}{\partial y^{+2}}\right) \quad (3.95)$$

$$\frac{\partial v^+}{\partial t^+} + u^+ \frac{\partial v^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial v^+}{\partial y^+} = -\frac{\partial P^+}{\partial x^+} + \frac{1}{Re_f} \left(\frac{\partial^2 v^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 v^+}{\partial y^{+2}}\right) \quad (3.96)$$

$$\frac{\partial T^+}{\partial t^+} + u^+ \frac{\partial T^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial T^+}{\partial y^+} = \frac{1}{Re_f Pr_f} \left(\frac{\partial^2 T^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 T^+}{\partial y^{+2}} \right) \quad (3.97)$$

$$\frac{\partial W^+}{\partial t^+} + u^+ \frac{\partial W^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial W^+}{\partial y^+} = \frac{1}{Re_f Sc_f} \left(\frac{\partial^2 W^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 W^+}{\partial y^{+2}} \right) \quad (3.98)$$

avec les nombres adimensionnels suivants

$$Re = \frac{u_0 L}{\mu}; Pr = \frac{\mu}{\alpha}; Sc = \frac{\mu}{D_f} \quad (3.99)$$

Conditions aux limites sous forme adimensionnelle

pour $x^+ = 0$ et $0 < y^+ < 1$

$$\frac{\partial T^+}{\partial x^+} = Bi_t (T_m^+(0, y^+) - 1) + (1 - \epsilon) Lu Ko Bi_m (W_m^+(0, y^+) - 1) \quad (3.100)$$

avec

$$Bi_t = \frac{h_t L}{\lambda}; Bi_m = \frac{h_m L}{D_m} \quad (3.101)$$

$$\frac{\partial W_m^+}{\partial x^+} + Pn \frac{\partial T_m^+}{\partial x^+} = Bi_m (W_m^+(0, y^+) - 1) \quad (3.102)$$

Nous obtenons donc :

$$Nu_s = \frac{-1}{T_p^+ - T_{moy}^+} \frac{\partial T f^+}{\partial x^+} \quad (3.103)$$

$$Nu_L = \frac{-L_v \rho D_f}{\lambda_f (1 - W_p)(T_p^+ - T_{moy}^+)} \frac{\partial W f^+}{\partial x^+} \quad (3.104)$$

$$Sh = \frac{-1}{W_p^+ - W_{moy}^+} \frac{1}{1 - W_p} \frac{\partial W f^+}{\partial x^+} \quad (3.105)$$

Les nombres de Nusselt sensible et latent moyen et de Sherwood moyen sont exprimés par :

- Le nombre de Nusselt sensible qui fournit une comparaison entre le flux transmis par convection thermique et celui transmis par conduction. Il est donné par l'expression suivante :

$$Nu_{smoy} = \int_0^L Nu_s dy^+ \quad (3.106)$$

- Le nombre de Nusselt latent qui définit par le rapport entre le flux transmis par convection massique et celui transmis par conduction. Il est donné par la relation suivante :

$$Nu_{Lmoy} = \int_0^L Nu_l dy^+ \quad (3.107)$$

- Le nombre de Sherwood qui est le rapport entre le flux transmis par convection massique et celui transmis par diffusion des espèces. Il est défini par la relation suivante :

$$Sh_{moy} = \int_0^L Sh dy^+ \quad (3.108)$$

- L'intégrale exprimant les nombres de Nusselt sensible, Nusselt local et Sherwood moyen qui a été déterminée numériquement par l'intermédiaire de la méthode de Simpson.

3.3.3 Méthodologie de résolution numérique

Dans la pratique, tous les phénomènes physiques décrivant des écoulements de fluides en régime laminaire sont décrits par le système d'équations aux dérivées partielles (E.D.P) non linéaires, qu'il convient de résoudre pour obtenir - et connaître - les caractéristiques de l'écoulement (c'est-à-dire, les champs d'écoulements et les champs thermiques). La résolution analytique de ce système d'équations n'est pas envisageable en raison de la non-linéarité d'une part, d'autre part, du couplage entre ces phénomènes. Il est donc nécessaire de faire intervenir une méthode numérique adéquate pour identifier les meilleures approximations.

Pour obtenir cette solution numérique, les équations différentielles doivent être transformées en un système d'équations algébriques au moyen d'une méthode de discrétisation. Les méthodes les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transferts thermiques sont : la méthode des différences finies [Saidi, 2018], la méthode des volumes finis et la méthode des élément finis [Lamnatou et al., 2010]. Au regard des avantages précédemment cités, nous avons retenu la méthode des volumes finis car cette méthode intègre les équations de transport sur un volume fini, le Volume de Contrôle, couvrant le domaine physique. Le résultat de discrétisation en un point est une équation algébrique liant la valeur d'une variable aux valeurs des variables des points voisins. La méthode des volumes finis permet également un traitement plus aisé des milieux hétérogènes et garanti les conservations de masse et de quantité de mouvement dans chaque volume de contrôle, dans tout le domaine de calcul. Enfin, cette méthode facilite la linéarisation des termes sources [Patankar, 1980].

Ainsi, le domaine d'étude est décomposé en mailles rectangulaires régulières, de dimensions δx et δy (voir figure 3.11). Ces mailles représentent les pas d'espace selon les directions (Ox) et (Oy).

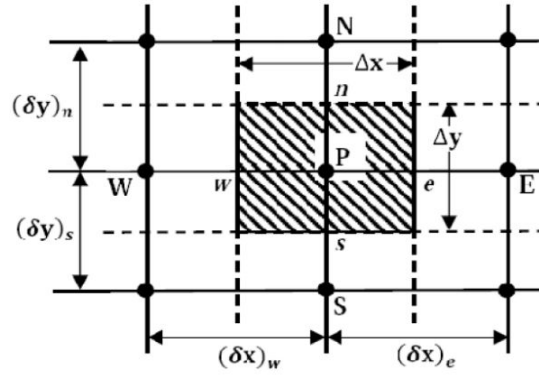


FIGURE 3.11: Configuration du volume de contrôle

Les équations sont discrétisées avec la méthode des volumes finies qui conduit à un système d'équations algébriques linéaires, de la forme matricielle suivante :

$$A[\phi] = b \quad (3.109)$$

La résolution de la matrice peut être effectuée selon deux techniques différentes de résolution des équations algébriques linéaires : les méthodes directes et les méthodes indirectes. Dans notre cas, nous avons retenu une méthode indirecte itérative, la méthode de sur-relaxation ponctuelle SOR [Patankar, 1980] qui présente l'avantage d'être moins exigeante en ressources informatiques.

Le problème de couplage entre la vitesse et la pression est résolu en utilisant la méthode de Lattice - Boltzmann [Mohamad, 2011]. Les étapes de l'algorithme de résolution des systèmes d'équations algébriques se résument de la manière suivante :

- Introduction des données
- Initialisation des grandeurs physiques
- Résolution de l'équation algébrique de température (T_m)
- Résolution de l'équation algébrique de masse (W_m)
- Résolution de l'équation algébrique de vitesse
- Résolution de l'équation algébrique de température dans la lame d'air (T_f)
- Résolution de l'équation algébrique de masse dans la lame d'air (W_f)

Le processus itératif est répété jusqu'à la convergence, assurée par :

$$\frac{|\psi_{i,j} - \psi_{i,j}^*|}{\psi_{i,j}} \leq 10^{-6} \quad (3.110)$$

où $\psi_{i,j}^*$ désigne un paramètre (T_m ou W_m) au noeud (i,j), à un instant t. Au temps t+1, la valeur est notée $\psi_{i,j}$. L'organigramme du modèle étendu est présenté en figure 3.12.

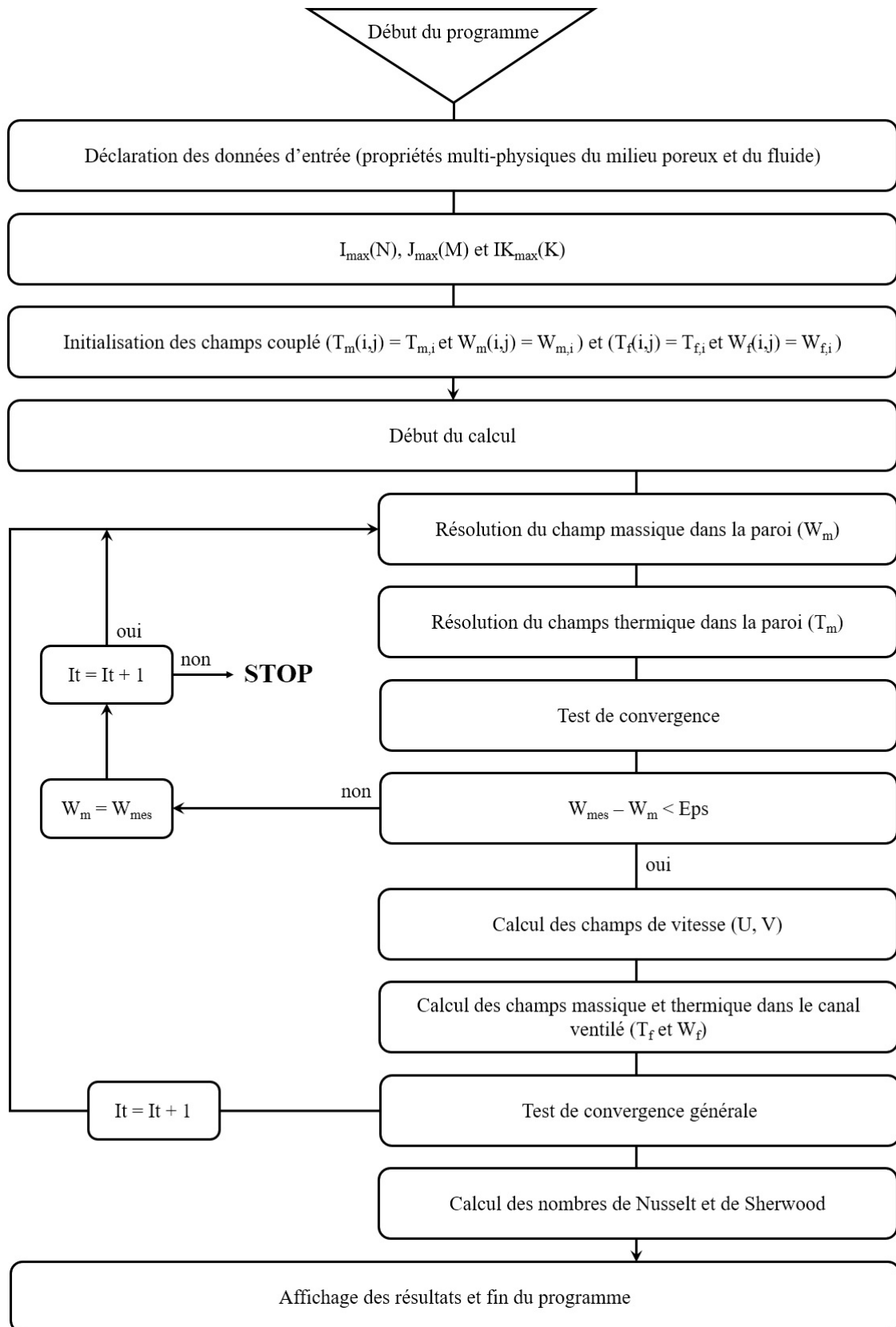


FIGURE 3.12: Organigramme du modèle numérique étendu au milieu non saturé et en conditions diabatiques

Sensibilité de maillage

Une étude de la sensibilité des résultats au maillage du domaine étudié est effectuée. On considère, pour un pas de temps donné, quatre finesses de maillage différentes ; 21×51 , 31×151 , 41×151 et 50×100 et 100×200 . La figure 3.13 illustre les profils axiaux de la température et de la teneur en eau du milieu poreux, sous des conditions aux limites invariantes, lors d'un test de sensibilité au maillage effectué pour 5 densités différentes de maillage. Les écarts maximaux entre les valeurs de température et de teneur en eau obtenues avec les différents maillages n'excèdent pas 1%. La finesse du maillage ne semble pas, comme attendu lors du choix des protocoles numériques, avoir une influence significative sur nos résultats. Ainsi, nous adoptons un maillage relativement fin, composé de 41 éléments sur l'axe (Ox) et 151 élément sur l'axe (Oy) qui semble être un juste compromis entre les coûts de calculs (et le temps) et la précision des résultats.

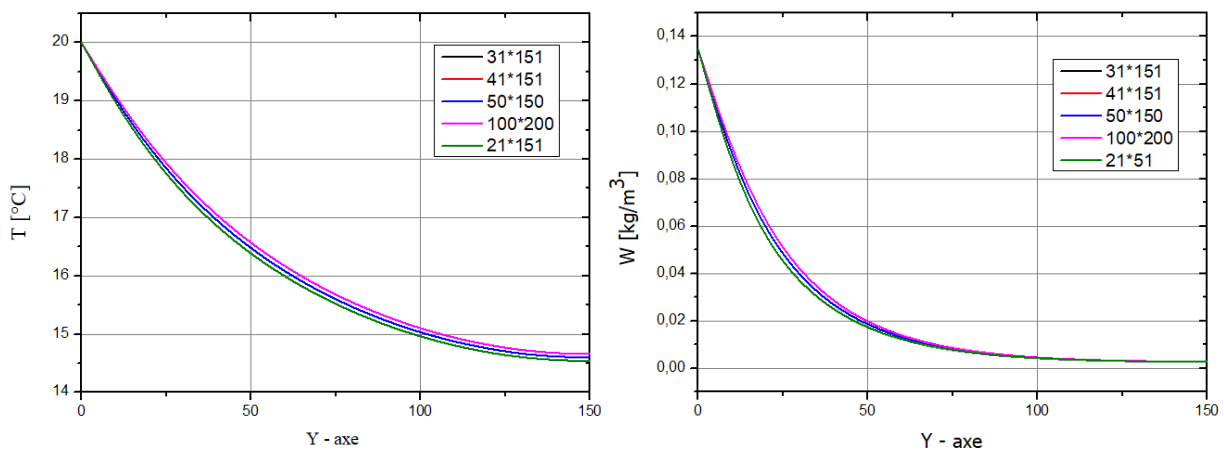


FIGURE 3.13: Influence des dimensions du maillage sur les profils axiaux de température et de teneur en eau du milieu poreux

3.4 Conclusion

Ce chapitre s'articule autour de l'analyse théorique des transferts couplés de chaleur et de masse dans un environnement ventilé (mixte et forcée) afin de formuler une approche numérique de résolution du problème physique. Ainsi, dans un premier temps, nous avons procédé à une synthèse bibliographique des travaux de recherche qui portent sur les transferts hygrothermiques au sein d'une paroi, avec la prise en considération de l'environnement extérieur, à l'échelle de l'ossature. Les phénomènes physiques à l'origine de ces transferts hygrothermiques (la conduction, la convection thermique et massique et le rayonnement) sont physiquement et analytiquement décrit.

Dans un second temps, et après une description physique de notre problématique, l'analyse des phénomènes physiques nous a permis d'identifier la complexité du modèle

afin d'apporter des solutions numériques. Une démarche scientifique explicite est mise en place en deux étapes distinctes :

- La première étape consiste en la formulation d'un modèle numérique simplifié où la paroi est considérée saturée en eau et en conditions adiabatiques. Pour identifier les phénomènes physiques prépondérants entrant en jeu à l'interface entre le milieu poreux et fluide circulant dans un canal, le modèle retenu est basé sur la loi de Darcy augmenté de la méthode de Lattice - Boltzmann pour modéliser le couplage entre les champs de vitesse et de pression. Les équations gouvernant le comportement du milieu poreux saturé et la convection forcée dans le canal sont présentées.
- La seconde étape consiste en l'introduction de complexités physiques supplémentaires afin de tenir compte des échanges hygrothermiques entre la structure (milieu poreux et canal ventilé) et l'ambiance externe. Le premier modèle est alors étendu grâce à l'approche proposée par Luikov. Après la description phénoménologique de la problématique, une formule mathématique du modèle est proposée, couplant l'approche de Luikov et celle de Lattice - Boltzmann avec la méthode de résolution par sur-relaxation ponctuelle.

Pour chaque modèle, les hypothèses fondamentales sont exprimées et justifiées, gouvernant alors les choix numériques retenus et les équations présentées. Des organigrammes généraux sont également mis en œuvre afin de synthétiser la structure globale de chaque code numérique.

Afin de valider et d'exploiter le modèle numérique formulé, il est tout d'abord nécessaire de constituer un jeu de données caractérisant les matériaux les plus couramment utilisés dans la patrimoine ancien. Ces propriétés pourront, par la suite, être utilisées dans notre modèle numérique en qualité de données d'entrée appliquées à la rénovation et l'assainissement de parois anciennes sujettes aux remontées capillaires.

Caractérisation multi-physique de briques anciennes en terre cuite

Les matériaux utilisés dans les constructions anciennes varient selon la région dans laquelle elles se situent. On trouve parmi celles-ci des constructions en pierre, matériau très perspirant et ouvert à la diffusion de vapeur d'eau, et en terre crue ou cuite, avec peu à beaucoup de mortier d'assemblage. . . Les techniques de construction et l'architecture sont extrêmement diverses, fortement dépendant des régions, de l'histoire, des traditions et des ressources locales. Dans de nombreuses régions de France, le bois et la pierre n'étaient pas présents en quantité suffisante ou accessibles aisément, plus particulièrement dans la région du Nord de la France où l'on trouve alors des bâtiments anciens en briques de terre cuite. Ces briques ont été fabriquées artisanalement à base notamment d'argiles naturelles [Coignet & Coignet, 2012].

4.1 La brique, matériau de longue tradition

4.1.1 L'apparition des briques comme élément porteur

L'histoire de la brique débute par l'usage de la terre crue. En effet, pour obtenir une maçonnerie stable l'Homme s'est vite aperçu qu'il était plus facile d'utiliser de l'argile moulée en éléments de taille régulière, appelés adobes, que d'utiliser des pierres irrégulièrement taillées. L'introduction de la brique en Europe se fait lors des civilisations grecque et romaine [Falk & Treiber, 1983]. Les grecs enduisent les briques porteuses avec d'autres matériaux plus nobles tels que des parements de marbre. Par la suite, les romains les mettent en avant dans la majorité de leurs ouvrages comme, par exemple, les aqueducs. Mais malheureusement les constructions en briques de terre cuite s'éclipsent avec le déclin de l'empire romain. Après la révolution industrielle, quand l'art de bâtir occupe une large place dans l'activité humaine, l'utilisation des briques en terre cuite était généralisée dans le patrimoine construit [Sartre, 1981, Rico, 1993]. En France, et plus particulièrement dans la Région des Hauts-de-France, la brique en terre cuite était fort utilisée de tous temps dans les constructions et la décoration. Ce choix s'explique par le fait que les matières premières utilisées, généralement le lehm, est aisément disponible dans le nord de la France, en Normandie et en région parisienne. Ces matériaux de base sont très

maigres et fortement chargés en silice. Les briques sont ainsi façonnées directement sur leurs sites d'extraction, des carrières, avec un faible pourcentage d'eau (de l'ordre de 15%) [Nègre, 2006]. Le mélange obtenu se travaille aisément et, grâce au moulage, permet d'acquérir des formes diverses. Les briques obtenues sont, après cuisson, facilement stockables et de façon durable. [Chabat, 1881].

4.1.2 La production de briques de terre cuite

A l'origine, les briques en terre cuite sont fabriquées, sur deux sites de production différents : soit directement dans les champs, là où la terre est extraite, soit, plus tardivement, dans des usines de production semi-industrialisées. Le processus de fabrication traditionnel est composé de la succession d'opérations suivante :

- **L'extraction et le transport des terres.** Lorsqu'un banc d'argile se présente par affleurement à la surface de sol ou lorsqu'il est couvert d'une couche de terre facile à enlever, l'argile est taillée par gradins à l'aide de bêches. Parfois, quand le sol argileux est situé à une certaine profondeur ou lorsqu'il est surmonté par une masse de roches dures, l'extraction se fait par puits et galeries. Ensuite la matière première est transportée à l'aide de brouettes, de chariots, voire parfois de wagonnets sur rails jusqu'au site de fabrication [Nau, 2020].
- **La préparation des terres.** La matière argileuse ne peut être mise en œuvre immédiatement juste après extraction. Il faut qu'elle soit traitée pour la débarrasser des corps nuisibles (morceaux de craie, pyrites de fer, cailloux, racines...). Le processus de traitement des terres se compose de deux phases importantes : le pourrissage et le lavage. Le pourrissage consiste à disposer la terre en tas qui sont remaniés et arrosés afin de maintenir la terre constamment dans un état humide pendant un certain laps de temps. Parfois, lorsque l'argile est grasse et compacte, la terre est déposée dans des fosses afin qu'elle acquiert un niveau de maturité convenable. L'opération de pourrissage favorise la décomposition des matières organiques qui accompagnent l'argile. Cette étape améliore la résistance mécanique des produits après cuisson. Le lavage, quant à lui, a pour objectif de délayer la terre dans l'eau en faisant couler de la boue. Il s'agit d'un moyen d'épuration efficace. Mais ces opérations sont onéreuses car elles nécessitent une main d'œuvre assez importante. Dans la plupart des régions, les pierres et autres agglomérats compacts sont écartées par taillage et broyage entre deux (ou plus) cylindres. Cette opération consiste alors à réduire la masse argileuse en petits fragments et à la broyer entre des cylindres très rapprochés, à surface unis, afin de concasser les granulats et réduire leur granulométrie pour éviter l'éclatement de la brique lors la cuisson [de Laage, 2007].
- **La fabrication de la pâte.** La terre argileuse, une fois rendue plus homogène par

le truchement des opérations précédentes, subit une étape de trempage. L'objectif de cette opération est d'ajouter une quantité d'eau suffisante pour obtenir une consistance idoine aux manipulations ultérieures. Le trempage se caractérise par l'imbibition de l'argile placée dans une fosse avec de l'eau. La durée du trempage dépend fortement du degré de ténacité de la terre argileuse. L'opération est considérée achevée lorsque l'on obtient une pâte homogène et lisse. Une fois imbibée d'eau, la masse argileuse est orientée vers le carroyage qui consiste à transporter la pâte dans une seconde fosse. La pâte est alors foulée (aux pieds) pour obtenir un malaxage homogène. L'objectif de cette phase est de faciliter le moulage. Lorsque la terre est bien malaxée, on l'introduit dans des moules (caisses rectangulaires en bois) aux dimensions souhaitées. Après le façonnage, les moules sont laissés à l'air libre pour séchage. Les briques subissent de temps en temps du rabattage pour assurer la régularité et l'uniformité des briques [Chabat, 1881].

- **La cuisson.** Lorsque les briques en terre crue ont acquis un degré de dessiccation convenable, elles sont prêtes pour la production de briques en terre cuite. La cuisson se fait dans des fours en maçonnerie, généralement de forme d'une galerie ou d'un tunnel dont les parois, assez épaisses, sont destinées à concentrer la chaleur. Ces fours comportent des foyers où le combustible (bois, tourbe, houille...) est placé. La contenance de ces fours varie généralement entre 25 000 et 400 000 briques. La cuisson des briques est l'une des opérations la plus délicates dans la fabrication des briques en terre cuite. La cuisson commence par l'enfumage, c'est-à-dire à faible température pour chasser progressivement l'humidité au cœur des briques sans les fissurer ou déformer. Puis on augmente progressivement la température du four jusqu'à atteindre 400°C à 800°C pendant 30 heures environ. La température doit être la plus régulière et homogène possible, grâce à la maîtrise de la distribution du combustible dans le foyer. Sous l'effet de la température, des réactions chimiques et physiques ont lieu au sein de la pâte, conduisant à plusieurs modifications du matériau [Kornmann, 2005]. En effet, à une température égale à 200°C il y a dégagement d'eau résiduelle. À une température comprise entre 200°C et 450°C la porosité du matériau augmente suite à une réaction d'oxydation des matières organiques qui libère de l'air, conférant ainsi une nature poreuse aux briques en terre cuite. Au delà de 450°C on assiste à une série de décomposition des composants de la matière première qui engendre la formation d'oxyde de fer (Fe_2O_3) responsable de la coloration rouge, ou la formation de magnétite (Fe_3O_4) qui donne une coloration bleu-noir aux briques (ce phénomène est couramment appelé "cœur noir" au regard de la couleur de la brique obtenue). De plus, de nombreuses autres réactions chimiques peuvent avoir lieu si la température est proche de 800°C, telle que, par exemple, la décomposition des sulfures, sulfates et des minéraux argileux. Une fois que la cuisson est suffisante on vient maçonner les bouches des foyers et on couvre

le dessus de terre gâchée. Ainsi la température intérieure s’abaisse lentement et les briques en terre cuite se refroidissent pendant quelques jours, avant de les défourner [Chabat, 1881].

Ces différentes étapes de transformation ne sont maîtrisées qu’au travers de l’expertise et des compétences des nombreux opérateurs intervenants dans la chaîne de production. Ces étapes gouvernent alors de nombreuses - et fortes - différences entre les multiples briques produites. La caractérisation des briques anciennes en terre cuite est alors soumise aux aléas de production qui justifient, à eux seuls, la forte disparité des propriétés qui peuvent être mesurées, même en respectant scrupuleusement un protocole expérimental de caractérisation multi-physique.

4.1.3 Présentation des briques de terre cuite étudiées

Le matériau étudié dans notre projet de recherche est la brique en terre cuite antérieure à 1948. Les briques utilisées proviennent de la déconstruction d’un mur d’enceinte d’une ancienne bâtisse proche d’Amiens. Les briques ont été nettoyées à l’eau claire afin de soustraire les restes de joint entre les briques. Elles n’ont été soumises à aucune transformation mécanique, physique ou chimique autre que celles éventuellement précisées dans les protocoles expérimentaux de mesures (voir sections suivantes). Ces éléments sont parallélépipédique de dimensions moyennes : $h_b = 6\text{ cm} \times e_b = 11\text{ cm} \times L_b = 21\text{ cm}$ (la dénomination des faces est présentée en figure 4.1). La face présentant la plus grande dimension est généralement la surface d’appui ; elle est délimitée par L_b et e_b . La tranche ou le chant ou la longue rive est la surface délimitée par L_b et h_b . Le bout, ou la petite extrémité, est caractérisé par e_b et h_b .

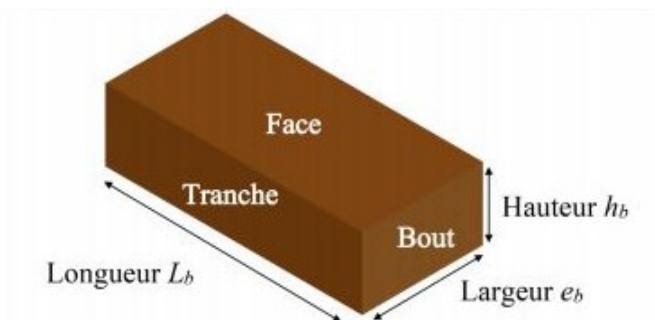


FIGURE 4.1: Dimension des briques en terre cuite

4.2 État de l'art

4.2.1 Analyse de la littérature

De nombreuses études traitent des structures et des matériaux anciens. Ces études ont été encouragées par l'importance culturelle et économique accordée aux monuments anciens et à la rénovation du patrimoine ancien. La plupart de ces études se sont concentrées sur la composition physique, chimique et minéralogique des briques d'argile anciennes.

Dans la littérature, plusieurs projets de recherches se sont focalisés sur la conception et la qualification des briques en terre cuite. Ces travaux consistent notamment à fabriquer des briques en terre cuite d'une manière artisanale, au sein de laboratoires dont l'objectif est d'améliorer principalement leurs performances mécaniques et thermiques. A cet égard, le développement de briques à base de déchets ou encore l'approfondissement de travaux de recherche, de développement et d'innovation sont nécessaires [Sridi, 2018]. En outre, il faut non seulement s'intéresser aux caractéristiques techniques, économiques et environnementales, mais aussi à la promotion auprès du grand public en matière de réutilisation des déchets et de développement durable [El Fgaier, 2013]. Enfin, le transfert de technologie est indispensable pour limiter le prix de vente de ces matériaux de construction élémentaires, vers une production et une application à grande échelle [Laibi, 2017].

Dans ce contexte, les travaux de [Abdeen & Shihada, 2017] peuvent être mis en exergue, où l'ajout des déchets de verre à la base argileuse influence significativement les caractéristiques physiques de la brique en augmentant la densité et la résistance à la compression et diminuant la porosité et le coefficient d'absorption capillaire. Ces résultats montrent également que l'ajout de 30% des déchets de verre, à une température de 1100°C, permettra d'obtenir des briques avec une résistance à la compression en forte progression, (de l'ordre de 96.37 MPa).

Dans le même sens, [El Fgaier, 2013] a étudié et amélioré les performances des briques en terre cuite fabriquées dans les briqueteries du Nord de la France. Dans ses études, les auteurs se sont focalisés sur la matière première en utilisant 3 types d'argile différentes (templeuve, lomme et leers) pour la fabrication des briques en terre cuite. Les travaux consistent à ajouter différents adjuvants à la composition initiale des briques, par exemple des anas de lin, des billes de polystyrène, de l'amidon de maïs. Une large campagne expérimentale de caractérisation des performances thermohygriques et mécaniques de ces briques est menée. Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout de l'amidon de maïs entraîne une diminution de la résistance à la compression de l'ordre de 37% quand l'ajout de lin diminue la résistance en compression de près de 22%. En revanche, ces adjuvants améliorent significativement les performances thermiques et morphologiques de la brique en terre cuite.

D'autres types de coproduits ont également été valorisés afin d'améliorer la perfor-

mance environnementale des briques. [Demir, 2008] utilise les résidus organiques (tabac, sciure de bois...) dans la fabrication des briques. Ces résultats prouvent une augmentation de la porosité des briques et, par la suite, une amélioration du comportement thermique. [Chiang et al., 2009] ajoute à l'argile des pailles de riz à haute teneur en silice utilisées avec des boues issues du traitement de l'eau potable. Les briques ainsi réalisées montrent un pouvoir isolant très élevé. L'ajout des sédiments portuaires [Hamer & Karius, 2002, Karius & Hamer, 2001, Samara et al., 2009] et les cendres volantes [Lingling et al., 2005] mènent à des résultats similaires, comme attendus. En effet, ces adjuvants gouvernent de nettes améliorations des propriétés thermiques des briques en terre cuite. Néanmoins, l'augmentation de la porosité implique une augmentation de l'absorption d'humidité et une diminution de la résistance mécanique.

[Vitiello et al., 2020] a étudié et tenté de quantifier, au travers de ses approches expérimentales, les évolutions des performances thermiques et mécaniques des briques dans les bâtiments historiques soumis à des problématiques liées à l'humidité. Les auteurs prouvent que les caractéristiques mécaniques d'une brique en terre cuite ancienne chute d'environ 50%, notamment la résistance à la compression, entre l'état sec et l'état saturé. De plus, ses études montrent que la conductivité thermique augmente de près de 130% entre ces deux états pour les briques en terre cuite anciennes, et de 160% pour les briques en terre cuite modernes, soulignant ainsi la nécessité de prendre en considération l'impact du changement d'état des briques élémentaires pour assurer la durabilité de la structure porteuse.

[Barbi et al., 2002] a étudié les propriétés mécaniques des briques anciennes utilisées lors de la construction du palais "Pienza Episcopal", en Italie. Les auteurs ont réalisé une analyse statistique des propriétés mécaniques les plus importantes afin de générer une base de données utile à destination des architectes qui vont concevoir la restauration d'anciennes constructions en maçonnerie. Dans le cas du palais épiscopal de Pienza, datant du XV^{ème} siècle, les auteurs ont identifié une valeur moyenne de la résistance à la compression d'environ 26.9 MPa. D'une manière similaire, [Bati & Ranocchiai, 1994] ont étudié les briques qui composent différents bâtiments italiens. Les auteurs ont rapporté des résistances comprises entre 21.7 MPa et 51.4 MPa, bien qu'une grande majorité des briques ait présenté des résistances à la compression comprises entre 20 et 30 MPa. [Binda & Baronio, 1985] ont étudié les briques de la cathédrale Saint Maria Incoronata à Milan, en Italie. Les travaux montrent des résistances à la traction comprises entre 0.1 et 2.6 MPa pour les briques du clocher de la cathédrale, bien inférieures aux résistances en compression.

Enfin, [Lourenço et al., 2000] ont étudié le comportement de la structure porteuse du monastère à Salzedas au Portugal. Leurs travaux consistent à réaliser une étude de caractérisation du mortier et des briques anciennes utilisées lors de la construction des monastères entre le XII^{ème} siècle et le XIX^{ème} siècle. Ces études expérimentales sont ac-

compagnées d'une étude numérique en utilisant le système MDDS (*Monument Damage Diagnostic System*, successeur du *Masonry Damage Diagnostic System*) pour la prédiction et le diagnostic des détériorations subis par le bâti ancien. Les auteurs précisent également la forte nécessité de tenir compte des paramètres liés aux mécanismes d'altération, au vieillissement des matériaux et aux effets à long terme, comme la fissuration, l'écaillage ou l'efflorescence lors du diagnostic d'un ouvrage. En effet, la détérioration des performances multi-physique des briques est généralement accentuée par les agents atmosphériques tels que le vent et l'eau. Ainsi, les propriétés affichées aujourd'hui par les briques ancienne en terre cuite ne représentent pas nécessairement leurs propriétés d'origine [Fernandes et al., 2010].

Tous ces travaux de recherche cités portent sur la valorisation de co-produits durables qui permettent de figer les éléments polluants (cendres, déchets de biomasse, paille de riz...) dans la phase vitreuse de la brique en terre cuite. Les résultats de ces différentes études ont permis de déterminer des optimums de substitution de l'argile naturelle afin d'améliorer les propriétés hygrothermiques, mécaniques et/ou environnementales des briques en terre cuite. Des travaux supplémentaires se sont également focalisés sur la restauration du patrimoine ancien, afin de générer une base de données utiles pour les architectes et les entreprises qui mèneront les travaux de rénovation. Cette base de données synthétise les différents paramètres physico-chimiques, mécaniques et thermohygriques de la brique en terre cuite.

Ainsi, cet étude de la littérature montre que les paramètres physiques, mécaniques, chimiques et minéralogiques sont des données pertinents pour l'évaluation de la durabilité et de la résistance des briques élémentaire de construction en terre cuite. Les caractéristiques matérielles sont alors fondamentales pour toutes simulations numériques. La compréhension des phénomènes physiques à l'échelle du matériau est essentielle, car elle permet d'analyser l'impact de l'humidité sur les performances hygrothermiques d'une paroi, ainsi que sa durabilité. Afin d'aboutir à une réponse à cette problématique, une large campagne expérimentale est menée par le truchement de différents dispositifs afin d'identifier les propriétés physique, morphologique, hygrique, thermique et mécanique des briques utilisées lors de notre projet. Tout au long de cette campagne de caractérisation, les données obtenues sont confrontées à celles issues de la littérature afin de critiquer et d'analyser nos protocoles de mesures.

4.2.2 La brique en terre cuite, un milieu poreux

La brique en terre cuite est, comme mis en évidence précédemment, un milieu poreux, constitué d'une matrice solide et de pores qui peuvent être connectés entre eux, ou non. Les pores connectés forment alors un réseau poral qui est souvent occupé par un ou plusieurs fluides, sous forme liquide (eau) ou gazeux (vapeur d'eau). En effet, la nature

micro-structurale d'un matériau est assez complexe. Il existe des pores inaccessibles et qui n'interviennent pas dans les phénomènes de transfert de masse, contrairement aux pores connectés. Ce phénomène est alors majoritairement traduit par l'identification de la porosité (ouverte, fermée, accessible et isolée) qui correspond au rapport entre le volume des vides et le volume total [Collet et al., 2012]. La figure 4.2 présente le squelette d'un matériau avec sa porosité qui peut contenir soit de l'eau, soit de l'air, dans nos cas d'étude.

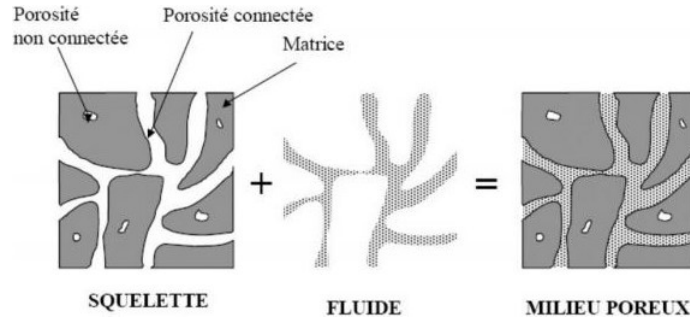


FIGURE 4.2: Identification des phases d'un milieu poreux

Les principales notations définissant un milieu poreux sont représentées dans la figure 4.3. Les phases liquide et gazeuse peut être inter-changées en fonction de l'état dans lequel se trouve la matériau (sec, non saturé ou saturé).

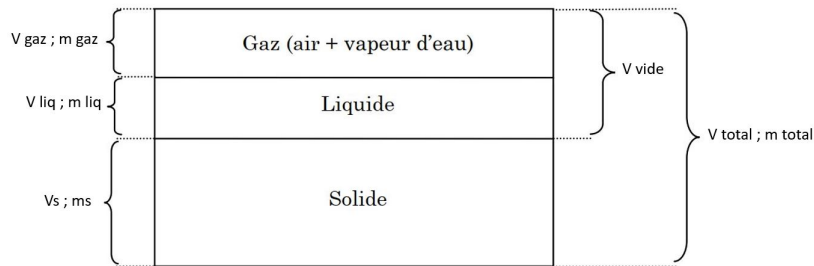


FIGURE 4.3: Diagramme des phases d'un milieu poreux

Nous pouvons alors définir les paramètres suivants, avec les notations qui seront utilisées ultérieurement :

- La masse totale : $m = m_s + m_l + m_g$ exprimée en $[kg]$
- Le volume total : $V = V_s + V_l + V_g$ exprimé en $[m^3]$
- Le volume du vide (ou volume des pores) : $V_p = V_l + V_g$ exprimé en $[m^3]$
- La masse volumique apparente : $\rho = m/V$ exprimée en $[kg/m^3]$
- La masse volumique à l'état sec : $\rho_0 = m_s/V$ exprimée en $[kg/m^3]$
- La masse volumique réelle : $\rho_r = m_s/V_s$ exprimée en $[kg/m^3]$
- La porosité totale : $n = \rho_s - \rho_0/\rho_s$ exprimée en $[\%]$
- La teneur en eau : $w = m_{\text{eau}}/m_s$ exprimée en $[kg/kg]$

4.3 Identification expérimentales des propriétés multi-physiques des briques en terre cuite

4.3.1 Caractérisation physique des briques

La mesure expérimentale de la masse volumique est réalisée par la méthode de la poussée d'Archimède. Ce choix est volontairement effectué en fonction de critères de rusticité des manipulations et du matériel mis en œuvre, qui permettent d'envisager son utilisation pour un faible coût dans des laboratoires. Elle consiste à plonger l'échantillon dans un récipient posé sur la balance. L'échantillon est retenu par une potence de façon à éviter tout biais de mesure grâce à un fil de laiton de 0.4 mm de diamètre et 80 mm de long. Ce dispositif correspond en effet à 0.01 cm³ soit 0.01 g de liquide déplacé qui sera déduit du résultat de la pesée afin d'identifier le volume exact de l'échantillon. Par la suite, la porosité ouverte est établie expérimentalement par saturation en eau et est obtenue par la relation suivante :

$$n = \frac{m_{saturé} - m_{sec}}{V} \times 100 \quad (4.1)$$

avec $M_{saturé}$ qui désigne la masse de l'échantillon à l'état saturé et M_{sec} , la masse à l'état sec.

Ces mesures expérimentales permettent également de déterminer la teneur en eau à saturation grâce à la relation suivante :

$$\omega = \frac{m_{saturé} - m_{sec}}{m_{sec}} \times 100 \quad (4.2)$$

Les essais ont été menés sur un ensemble de 10 briques afin d'identifier les valeurs moyennes de porosité, de teneur en eau et de masse volumique sèche. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.1. La dispersion des résultats est forte au regard du procédé de fabrication traditionnel des briques.

TABLEAU 4.1: Identification expérimentale des propriétés physiques des briques

| | Porosité [%] | Teneur en eau [kg/kg] | Masse volumique sèche [kg/m ³] |
|----------|------------------------|---------------------------------|--|
| Moyenne | 28.67 | 15.95 | 1814 |
| Écartype | 4.31 | 3.24 | 33 |

Les propriétés des briques en terre cuite sont dues à la matière première, l'argile, et à la méthode de cuisson. En effet, La cuisson des briques en terre entraîne une série de modifications minéralogiques, texturales et physiques, qui dépendent de nombreux

facteurs influençant la porosité. Ce paramètre, défini comme étant le rapport entre le volume des espaces vides (pores et fissures) et le volume total de l'échantillon, est un paramètre important concernant les briques en terre cuite en raison de son influence sur des propriétés telles que la réactivité chimique, la résistance mécanique, la durabilité et la qualité générale de la brique. Les briques anciennes présentent des valeurs de porosité élevées, comprises généralement entre 15 et 40% selon [Esbert et al., 1997]. La porosité des briques de l'époque byzantine a été signalée comme étant comprise entre 15 et 35% en volume, indépendamment du type et de l'origine de l'argile [Papayianni & Stefanidou, 2000]. [Livingston, 1970] a rapporté que la porosité des briques de l'église de Sainte-Sophie est comprise entre 26 et 30% pour les briques de couleur rouge et entre 40 et 55% pour les briques beiges (pour rappel, la couleur est caractéristique de la température de cuisson). [Maierhofer et al., 1998] ont obtenu des valeurs de porosité entre 21 et 35% dans des briques des IX^{ème}, X^{ème} et XIII^{ème} siècles, respectivement. [Fernandes, 2006] a rapporté que la valeur de la porosité des briques d'argile du XII^{ème} au XVIII^{ème} siècle, varie entre 12 et 43%, avec une valeur moyenne de 18%. Dans ce dernier cas, environ 80% des échantillons présentaient une porosité supérieure à 25%, la grande majorité des briques montrant une porosité entre 25 et 35%.

Comme les propriétés des briques anciennes varient considérablement en termes de matières premières, de méthodologie de production et de période, [Fernandes & Lourenço, 2007] ont porté une attention particulière sur la date de production des briques. L'analyse des propriétés est alors mise en résonance avec l'origine des briques issues de six monuments historiques portugais (l'Église d'Outeiro "OU", le Monastère de Pombeiro "PO", le Monastère de Salzedas "SA", le Monastère de São João de Tarouca "TA", le Monastère de Tibães "TI" et le Cloître du Christ de Tomar "TO"), datant entre le XII^{ème} et le XVIII^{ème} siècle. La distribution de la porosité de ces briques est illustrée dans la figure 4.4.

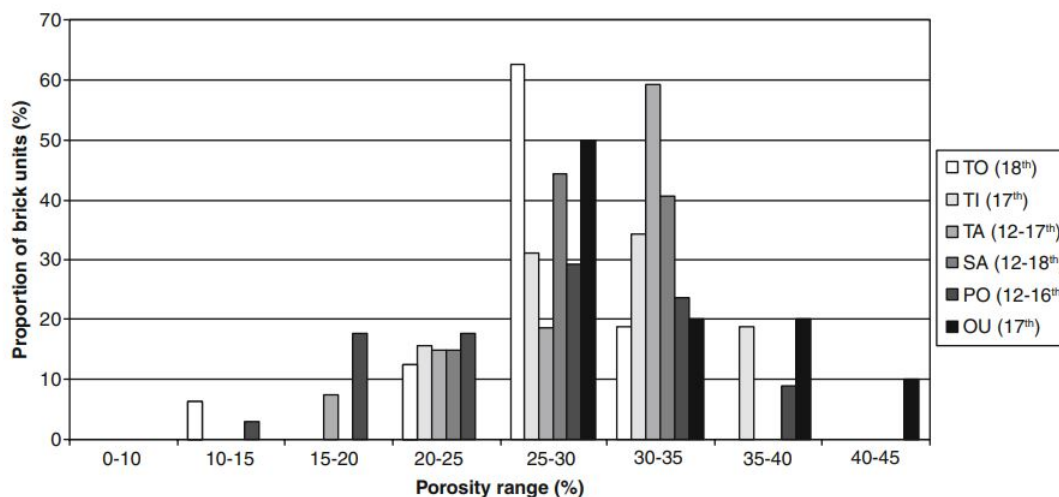


FIGURE 4.4: Distribution de la porosité de briques en fonction de leur date de production [Fernandes et al., 2010]

Selon la littérature précédemment présentée, la porosité des briques en terre cuite varie entre 20 à 35%, dont la valeur moyenne est égale à 28.67%. Ces valeurs sont similaires à celle des briques en terre cuite utilisées entre XVII^{ème} et XVIII^{ème}. Elles sont caractéristiques des modes de production (et de cuisson) antérieurs à la Seconde Guerre Mondiale et la révolution industrielle. Selon [Yedri et al., 2016], les briques en terre cuite présentent une porosité plus faible, qui varie de 15 à 40%, malgré une macro-porosité visible à l’œil nu. Les fours antérieurs au XVIII^{ème} siècle ne permettaient ni d’atteindre des températures très élevées, ni d’obtenir une chaleur homogène. Ces résultats peuvent alors être expliqués par le processus de fabrication, et notamment le procédé de filage. En effet, le filage limite l’apparition de pores de grand diamètre au profit de fissures plus nombreuses. Le frittage, quant à lui, permet de limiter les micro-pores en raison de la maîtrise de la densité, de la porosité et de la granulométrie, afin d’augmenter la résistance mécanique du matériau. La force motrice à l’origine du frittage consiste en un excès d’énergie en surface de la terre cuite. Le système tend ainsi, durant la cuisson, à éliminer cet excès d’énergie et à se rapprocher d’un état de stabilité, ce qui a un effet distinct sur la micro-structure. Les figures 4.5 et 4.6 montrent le mécanisme de frittage sur l’arrangement de la micro-structure et l’influence de celui-ci sur la densité relative du matériau [Yedri et al., 2016].



FIGURE 4.5: Mécanisme simplifié du processus de frittage [Yedri et al., 2016]

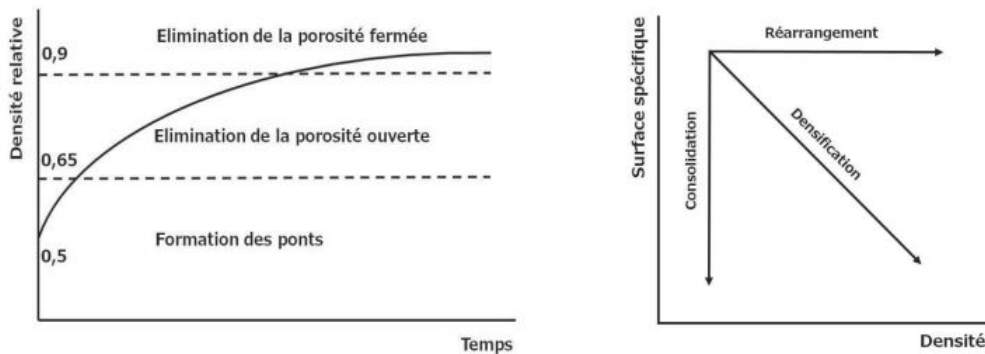


FIGURE 4.6: Influence de frittage sur la microstructure [Yedri et al., 2016]

La masse volumique apparente est décrite comme le rapport entre le poids de la brique sèche et le volume, mesurant la proportion de matière (argile) présente dans le volume.

Il ressort de cette description que plus cette valeur est élevée, plus la brique est dense, et évidemment, plus ses propriétés mécaniques et de durabilité peuvent être intéressantes. Les valeurs typiques de la densité apparente varient de 1 200 à 1 900 kg/m^3 . Le tableau 4.2 résume les valeurs identifiées dans la littérature en fonction de la période de fabrication.

TABLEAU 4.2: Valeurs typiques de la masse volumique apparente des briques en terre cuite au regard de la date de fabrication [Fernandes, 2006]

| Period (century) | Monuments and their location | Apparent density ($kg\ m^{-3}$) | References |
|------------------|--|-----------------------------------|--|
| 1st–5th | Walls, pillars, vaults and ovens of buildings | 1400–1900 | Papayianni and Stefanidou (2000) |
| 3rd–4th | Church of S. Lorenzo, Milan, Italy | 1550–1650 | Baronio et al. (1985), Baronio and Binda (1985) |
| 6th | Basilica of Hagia Sophia, Turkey | 1600–2000 | Livingston (1993) |
| 9th–10th | Bricks of the Church of S. Maria Rossa | 1600 | Maierhofer et al. (1998) |
| 12th–13th | Bricks from the city of Toledo, Spain | 1600 | López-Arce et al. (2003) |
| 13th | Bricks of the Church of S. Maria Rossa | 1830 | Maierhofer et al. (1998) |
| 13th–14th | Bricks from the city of Toledo, Spain | 1510 | López-Arce et al. (2003) |
| 12th–16th | Monastery of Pombeiro | 1680–1840 | Fernandes (2006) |
| 12th–17th | Monastery of São João de Tarouca | 1710–1820 | Fernandes (2006) |
| 15th–16th | Church of S. Maria Incoronata, Milan, Italy | 1550–1850 | Baronio and Binda (1985) |
| 16th | Clay bricks from Italian buildings | 1550 | Bati and Ranocchiali (1994) |
| 17th | Church of Outeiro | 1700–1780 | Fernandes (2006) |
| 17th | Monastery of Tibães | 1680–1790 | Fernandes (2006) |
| 17th–18th | Cloister of the Church of S. Eustorgio, Milan, Italy | 1650 | Baronio and Binda (1985) |
| 18th | Monastery of Salzedas | 1550–1870 | Fernandes (2006), Lourenço et al. (2000) |
| 18th | Christ Cloister in Tomar | 1560–1800 | Fernandes (2006) |

[Rodríguez-Esteban et al., 2020] présente une étude expérimentale sur la caractérisation de briques en terre cuite au cours du XIX^{ème} et XX^{ème} siècle, dans la province de Zamora en Espagne. Ces travaux consistent à étudier des échantillons de briques en terre cuite récupérées à partir des constructions historiques. Au regard des dates de construction, l'étude a pour objectif d'estimer la température de cuisson et de frittage des briques en terre cuite suite à une inspection visuelle, microscopique, optique et chimique. Parmi ces résultats, les auteurs révèlent que les échantillons dont la masse volumique apparente est comprise entre 1 800 et 1 900 kg/m^3 doivent être cuits à une température inférieure ou égale à 900°C.

Les pores constituent une grande partie du volume de la brique, et lorsque les briques

sont exposées à la pluie ou à l'humidité ascendante, l'eau pénètre généralement dans les pores. La teneur en eau détermine alors la capacité du fluide à être stocké et à circuler à l'intérieur de la brique, favorisant la détérioration et la réduction de la résistance mécanique. Dans les pays où les températures descendent en dessous de 0°C, l'eau à l'intérieur des pores peut geler, ce qui entraîne des délaminations, des désintégrations ou des fissures en surface. En outre, en présence de sels solubles, l'eau a tendance à réagir avec ceux-ci et à provoquer des efflorescences (une détérioration essentiellement esthétique de la surface de la brique). L'augmentation du volume engendrée par la cristallisation des sels solubles est un facteur important qui peut générer de graves dommages. Les valeurs de teneur en eau identifiées dans la littérature sont significativement dispersées, avec une grande quantité de briques ayant une teneur en eau élevées. [Binda et al., 2000] ont identifié les teneurs en eau pour différents échantillons de briques des constructions datant du XVIII^{ème} au XIII^{ème} siècle, provenant du clocher de la cathédrale de Crémone, en Italie. Les briques brunes et rouges ont montré une teneur en eau d'environ 20.1 kg/kg et 24.9 kg/kg, respectivement. Dans les briques des IX^{ème} et X^{ème} siècles, des valeurs d'absorption d'eau entre 18 kg/kg et 19 kg/kg ont été mesurées, tandis que des valeurs de 12 kg/kg et 24 kg/kg ont été attribuées à des briques du XIII^{ème} siècle [Maierhofer et al., 1998]. En outre, les briques d'argile du XII^{ème} au XVIII^{ème} présentent des valeurs d'absorption comprises entre 6 kg/kg et 32 kg/kg avec une valeur moyenne de 17 kg/kg [Fernandes, 2006]. Plus de 90% des valeurs se situent dans la gamme de 10 à 25 kg/kg.

4.3.2 Caractérisation micro-structurale des briques

L'objectif est d'identifier la structure porale et les dimensions des pores et capillaires afin de mieux comprendre les phénomènes physiques de transfert de masse à l'intérieur du matériau. Les intervalles d'échelle des pores sont définis comme suit [Rahim, 2015, Daïan, 2010] :

- à l'échelle microscopique : la taille maximale du pore est égale à 0.002 μm . A cette échelle la pression, la viscosité et les forces inter-faciales n'ont aucune signification physique.
- à l'échelle mésoscopique : la taille des pores est comprise entre 0.002 μm et 0.05 μm . A cette échelle, les pores peuvent contenir des molécules d'eau qui se forment par condensation.
- à l'échelle macroscopique : la taille des pores est supérieure à 0.05 μ . A cette échelle, les molécules d'eau peuvent se fixer sur les parois et se condenser à l'intérieur des pores.

Afin de caractériser au mieux les dimensions des pores et du réseau, des analyses au Microscope à Balayage Électronique (MEB) et à la Diffraction aux Rayons-X (DRX) sont menées.

Observations au Microscope Électronique à Balayage

Des analyses à l'aide d'un Microscope Électronique à Balayage sont produites afin d'apprécier l'aspect micro-structurel des briques en terre cuite. La technique de cet essai consiste à balayer une surface au moyen d'un faisceau électronique, les électrons projetés sur l'échantillon (électrons rétrodiffusés) rebondissent au contact de la matière évoquant une excitation des atomes qui, à leur tour, émettent un électron au retour à l'état fondamental statique (électrons secondaire). C'est ainsi que les détecteurs BSE captent ces électrons rétrodiffusés pour les convertir en un signal électrique et procurent un cliché à haut contraste chimique. Les sondes SE collectent les électrons secondaires et fournissent, selon leur angle d'incidence, un ensemble d'information quant à la topographie de l'échantillon [Rahmouni, 2019]. La figure 4.7 présente les clichés obtenus pour les briques en terre cuite.

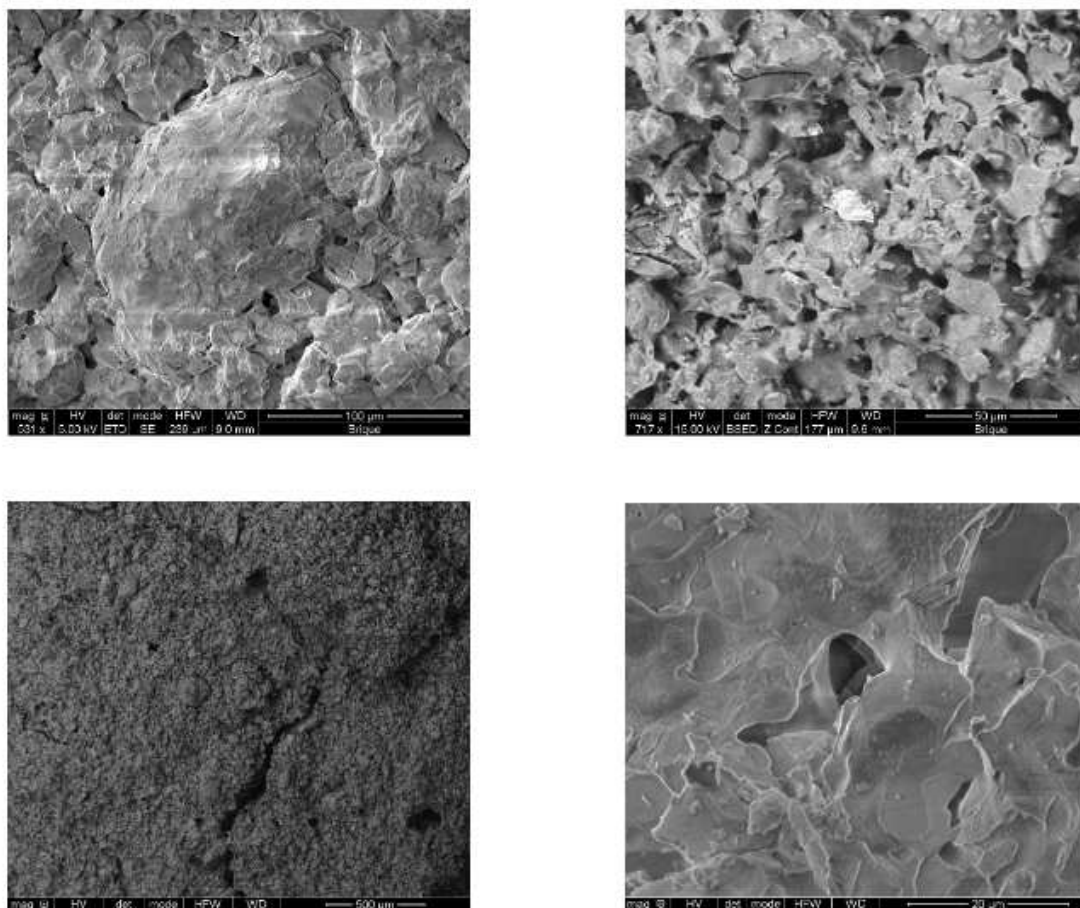


FIGURE 4.7: Clichés MEB de la brique en terre cuite

A la vue des clichés MEB, on constate que la terre argileuse s'établit naturellement sous forme d'agglomérats denses. Les pores sont de différentes tailles et peuvent atteindre 500 μm ; l'arrangement et la taille des pores sont à l'origine du pouvoir absorbant des briques. En effet, les minéraux argileux existant dans la composition de la terre cuite incluent, dans leur nature propre, une humidité naturelle et des surfaces spécifiques assez

importantes ce qui implique une association des particules qui se représentent sous forme des lamelles (cf figure 4.7). On constate également une répartition granulométrique qui ressemble à celle d'un sable aux particules de taille compris entre 20 et 50 μm , correspondant au dégraissant existant dans la matière première des briques en terre cuite (l'argile). L'argile naturelle présente parfois une plasticité excessive ou des caractéristiques particulières qui entraînent des difficultés de fabrication. Il est alors nécessaire de modifier leur comportement en mélangeant les argiles avec des éléments inertes (non plastiques), dégraissant dont le plus utilisé est le sable quartzes. Ces constituants se présentent sous la forme de granulats de quartz et reflètent, dans le dernier cliché de la figure 4.7, des lignes franches et un aspect lisse. Les grains de sable assurent avec cette morphologie une fonction de squelette granulaire au sein du matériau pour atténuer l'affinité à l'eau et favoriser le séchage.

Analyse de la Diffraction aux Rayons-X

La Diffraction aux Rayons-X est la technique la plus adaptée pour l'identification des différentes phases minérales des matériaux. Cet essai permet l'identification et la détermination semi-quantitative des principaux minéraux présents dans un échantillon. Elle est basée sur la diffraction des rayons-X par le réseau cristallin selon la loi de Bragg. L'état cristallin est une répartition tridimensionnelle dans l'espace d'un motif atomique. Cet arrangement forme des plans parallèles et équidistants (plans réticulaires (h, k, l)) séparés les uns des autres par une distance fonction de la nature du minéral concerné. La méthode consiste à bombarder l'échantillon avec un faisceau de rayons X sub-parallèles issus d'une anode métallique. Le faisceau est dirigé sur l'échantillon selon un angle qui est diffracté lorsque la condition de la loi de Bragg est validée [Xavier et al., 2012]. Cet essai est réalisé pour deux échantillons différents de briques en terre cuite. Le premier est prélevé d'une brique dont la coloration est rouge et le deuxième, issu d'une autre brique dont la coloration est plus foncée. Ces deux briques présentent alors de fortes différences de cuisson et, plus généralement, de fabrication.

La figure 4.8 présente les résultats obtenus de diffraction de l'échantillon de brique de couleur foncée. Le pic obtenu autour de 27° (en abscisse) montre la forte prédominance du quartz. De plus, la présence de carbonates comme le fer et le magnésium est également identifiable. En effet, les principaux constituants minéraux de l'argile sont exprimés sous forme de matière d'argile, matière feldspathique ou micacée, qui, quand elle est chauffée sous une température allant de 450 à 650°C, se décompose en constituants séparés. Donc la coloration brune foncée des briques en terre cuite ne semble pas uniquement provenir d'une cuisson excessive, comme cela est généralement proposé dans la littérature, mais de la présence des composants de différentes natures chimiques dans le sable quartzes utilisé pour la production des briques. Ce phénomène peut être lié à l'absence d'analyse granulométrique du sol à l'époque de la fabrication des briques.

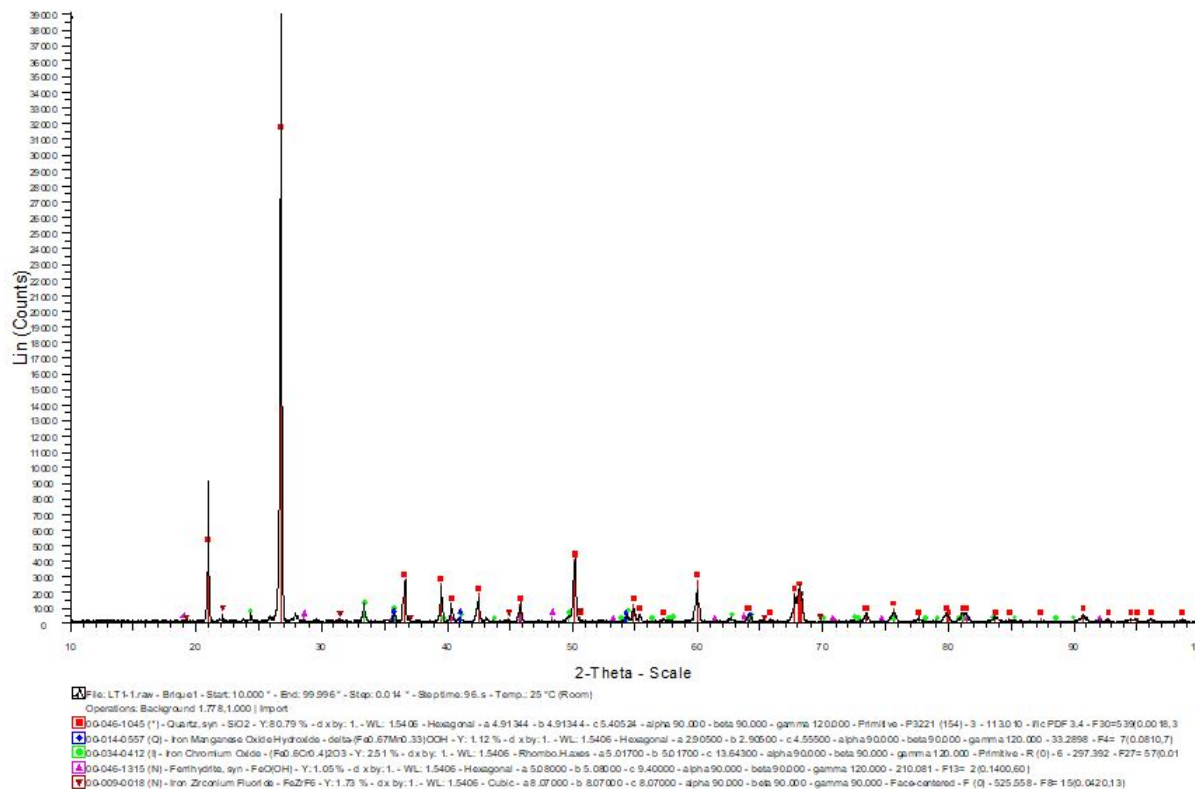


FIGURE 4.8: Diffractogramme de la brique en terre cuite de couleur brune foncé

La figure 4.9 montre le spectre de diffraction d'une brique de couleur rouge. On peut identifier deux raies principales : les silicates, composant principale de l'argile, et le quartz. De nombreuses raies secondaires sont également visibles, qui présentent les carbonates tels que l'oxyde de fer, responsable de la coloration rouge de la brique, ou encore l'oxyde de calcium qui renseigne sur une température de cuisson (*a priori* moins élevée).

Ces résultats confirment que la coloration brune foncée des briques en terre cuite est principalement due à une combinaison entre une cuisson excessive (au regard du fait que le (Fe_3O_4) est une oxydation supplémentaire sous l'effet de la chaleur de (Fe_2O_3) [Ratrimoarisonina et al., 2019]) et la présence de composés métalliques dans le quartz initialement utilisé). L'utilisation d'un sol sableux (riche en quartz) avec une faible proportion d'argile peut être un agent responsable de cette coloration qui semble apporter une excellente durabilité aux briques.

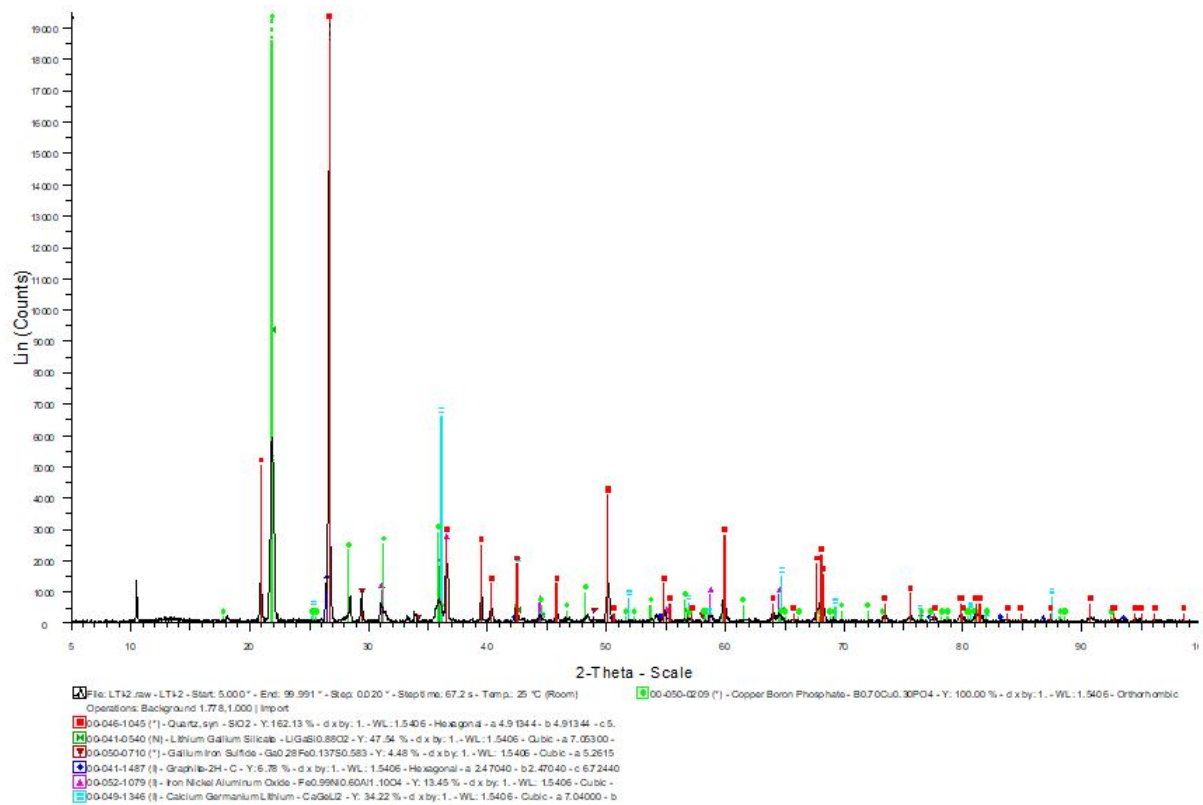


FIGURE 4.9: Diffractogramme de la brique en terre cuite de couleur rouge

4.3.3 Analyse des performances mécaniques des briques

Une paroi est un élément de construction généralement hétérogène et souvent multicouche, dont la résistance à la compression dépend de la performance mécanique de ses composants : brique, mortier et interface brique-mortier. Néanmoins, les résultats de la littérature indiquent que la résistance à la compression de parois maçonnées est principalement gouvernée par la résistance des briques élémentaires. Ainsi, nous avons caractérisé, dans un premier temps, la résistance à la compression, puis la résistance à la traction au travers d'essais de flexion.

Résistance à la compression uni-axiale

La résistance à la compression est fortement influencée par les propriétés de la matière première et par le processus de fabrication. L'argile brute des briques anciennes est souvent de mauvaise qualité et le processus de fabrication est relativement primitif et non maîtrisé. D'autres propriétés des briques peuvent également influencer sur la résistance à la compression : la composition minérale, la texture, le faciès de fissures ou encore le niveau de porosité en révélant les conditions de séchage et de cuisson [Li et al., 2020].

D'autre part, l'évaluation de la résistance mécanique des briques appartenant à des bâtiments anciens est souvent difficile en raison d'une grande variabilité de production et une variabilité supplémentaire causée par la détérioration due aux conditions climatiques

ou aux agents chimiques tels que les sels solubles, les cycles de gel-dégel ou les cycles de chargement-déchargement. En outre, les briques en terre cuite d'un élément structurel (mur de maçonnerie) ou d'un bâtiment donné peuvent appartenir à des périodes de construction ou à des productions différentes. Enfin, les conditions de mise en place des essais expérimentaux (teneur en humidité de l'échantillon, température...) peuvent également biaiser les résultats.

La littérature montre une gamme de résistance en compression assez large, entre 1.5 et 32 MPa [Fernandes et al., 2010]. Des valeurs typiques de résistance à la compression sur des briques en terre cuite provenant de six monastères au Portugal, construits entre le XII^{ème} et le XVIII^{ème} siècle sont disponibles dans [Fernandes, 2006]. L'auteur souligne que la plupart des briques ont été collectées dans des voûtes, des vestiges enterrés et à partir des éléments de dé-construction. Par conséquent, les actions et la détérioration de l'environnement pourraient avoir influencé les résultats obtenus. Les résistances s'étalent de 6.7 à 21.8 MPa et présentent un coefficient de variation très élevé (jusqu'à 60%). La plupart des études indiquent des valeurs faibles pour la résistance à la compression et une grande dispersion des valeurs, avec de forts coefficients de variation, variant entre 25 et 55%. Mais, des résistances inhabituelles, supérieures à 50 MPa, ont été rapportées par [Pauri et al., 1994]. La grande variabilité des briques historiques est évidente dans plusieurs cas : par exemple, dans le palais épiscopal de Pienza du XV^{ème} siècle, [Barbi et al., 2002] ont trouvé une valeur moyenne d'environ 26.9 MPa, tandis que [Bati & Ranocchiali, 1994] ont rapporté des résistances à la compression comprises entre 21.7 et 51.4 MPa, bien qu'une grande majorité des briques présentaient des résistances à la compression entre 20 et 30 MPa. Un deuxième exemple est donné dans deux études de [Baronio et al., 1985], qui ont analysé les briques de l'église de Saint Lorenzo à Milan. Les auteurs ont rapporté une résistance moyenne à la compression de 12.5 à 34.5 MPa.

Ainsi, à l'aune de l'état de l'art mené sur la caractérisation des briques et des analyses de la littérature précédente, nous avons ciblé l'étude des effets de la variation de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques des briques en terre cuites tout en ciblant les constructions antérieures à 1948.

L'objectif du premier essai de compression axiale est de déterminer l'effet de l'humidité sur la résistance à la compression des briques en terre cuite. Cette résistance correspond à la contrainte limite avant la rupture du matériau. Au regard de la forme géométrique des briques, il est impossible de produire des échantillons cylindriques. Ainsi, l'essai est réalisé sur des briques pleines et parallélépipédiques en terre cuite, initialement séchées, et des briques saturés en eau. Afin d'assurer une surface de contact parfaitement lisse, plate et parallèle, nous a procédé à un surfacage des deux bases, supérieure et inférieure, à l'aide d'une surfaceuse semi-automatique. La planéité des surfaces assure l'absence de sur-contraintes locales pour éviter l'endommagement du matériau qui pourrait conduire à une rupture prématurée de la brique et mésestimer la résistance en compression. Le dispositif

expérimental est constitué d'une presse électromécanique de puissance nominale de 250 kN de type SHIMADZU équipée d'un capteur de force de 250 kN et de deux capteurs de déplacements de technologie LVDT (voir figure 4.10). La presse est reliée à un système d'acquisition pour enregistrer les données à une fréquence de 10 Hertz. La machine est pilotée en déplacement, dont la vitesse de chargement est de 1 mm/min, afin d'identifier le comportement post-pic du matériau. Le plateau supérieur est équipé d'un système rotulé afin d'assurer un contact parfait avec la brique. De plus, la rotule permet de limiter les problèmes de perpendicularité et de maintenir la planéité entre les surfaces. Une précharge de 0.6 KN est appliquée sur l'échantillon pour assurer un contact parfait avec le plateau. Six échantillons différents ont été utilisés afin d'identifier les performances mécaniques en compression des briques, en choisissant des échantillons visuellement très différents pour tenir compte de la variabilité des performances.



FIGURE 4.10: Essai de compression des briques en terre cuite

La figure 4.11 présente les résultats obtenus pour une brique en terre cuite, caractéristique du comportement mécanique de ce matériau. Les données ont été post-traitées afin de masquer l'influence de la micro-fissuration et de l'endommagement superficiel ponctuel (effritement superficiel de la brique en cours d'essai, visible en figure 4.10). Le comportement mécanique en compression est quasi-linéaire jusque la charge maximale qui correspond à la propagation de macro-fissures, entraînant le brusque saut de la résistance (figure de gauche). La rupture est considérée atteinte pour une résistance correspondant à 50% de la charge maximale. Le graphique de droite présente un zoom sur le début de l'essai, afin d'estimer le module d'élasticité initial tangent. Le comportement est fortement linéaire jusqu'à atteindre environ 10 MPa, apparition des premières fissures.

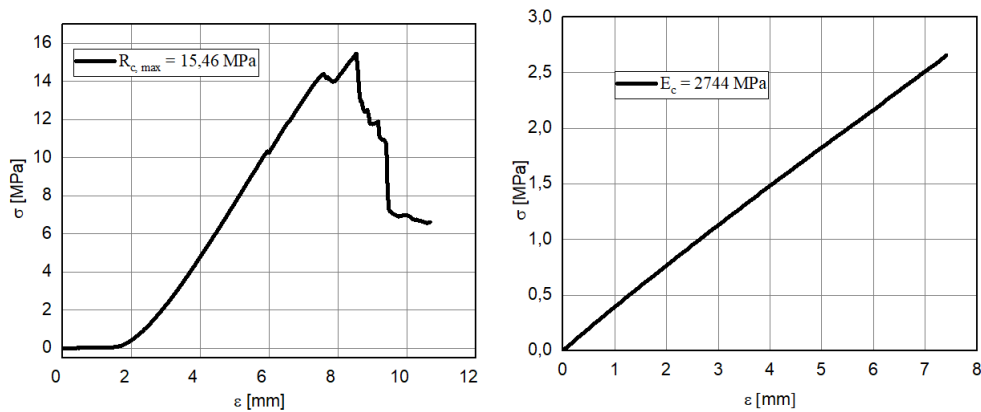


FIGURE 4.11: Allure du comportement en compression simple d'une brique en terre cuite à l'état sec

Les résultats obtenus sur les six échantillons secs et saturés sont présentés en figure 4.12. La résistance à la compression des briques à l'état humide varie entre 0.05 MPa et 31.69 MPa quand le module d'élasticité varie entre 0.11 GPa et 3,21 GPa. A l'état sec, la résistance moyenne en compression varie entre 36.25 MPa et 6.03 MPa, pour un module d'élasticité entre 1.95 et 3.97 GPa. On constate que l'humidité agit sur les propriétés mécaniques de la brique en terre cuite car la résistance moyenne en compression chute de 22 % entre l'état sec et l'état saturé.

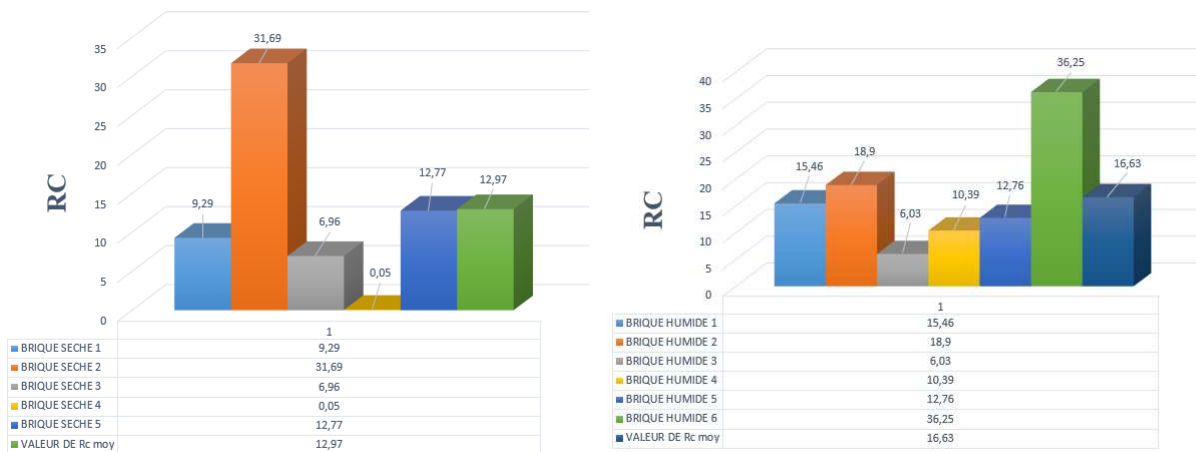


FIGURE 4.12: Essais de compression axiale des briques en terre cuite à l'état sec (gauche) et saturé (droite)

Résistance à la flexion et à la traction indirecte

En flexion, les briques en terre cuite se comportent comme la plupart des matériaux quasi-fragiles tels que le béton ou la pierre. Une fois la micro-fissuration amorcée et la charge maximale atteinte, le comportement post-pic est caractérisé par la diminution progressive de la résistance due à la propagation du faciès de fissuration. La résistance à

la traction est très faible par rapport à la résistance à la compression, et souvent négligée - et négligeable. La résistance à la traction dépend principalement de la résistance de l'interface entre des grains minéraux et la matrice qui les lie. En outre, elle dépend en partie de la composition chimique, des inclusions et de la quantité et de la dimension des pores. Comme la résistance dépend fortement des zones les plus faibles, l'argile brute homogène avec peu d'impuretés offre une plus grande résistance à la traction. Elle est souvent indiquée en pourcentage de la résistance à la compression, généralement entre 3% et 10%, et parfois jusqu'à 13.5%. [Binda et al., 2000] ont rapporté des résistances à la traction entre 0.1 et 2.6 MPa pour les briques du clocher de la cathédrale de Crémone, en Italie, ce qui représente 1% et 10% des résistances à la compression. [Baronio et al., 1985] ont trouvé une résistance à la traction de 5.5 MPa, ce qui correspond à 5% à 6.5% des résistances à la compression. Il est à noter que la résistance à la traction est plutôt dépendante du montage de l'essai [Van Mier, 1984].

Afin de déterminer la résistance ultime en traction, un essai de flexion 3-points est réalisé et exploité pour déterminer, analytiquement et indirectement, la contrainte de traction. Pour ce faire, nous supposons que notre échantillon est homogène, isotrope et linéaire afin de respecter les hypothèses fondamentales de la résistance des matériaux. L'essai de flexion 3-points consiste à placer longitudinalement les briques sous une presse, ici mécanique (Tinius Olsen 50kN, voir figure 4.14). Les trois échantillons sont testés sous un chargement piloté en déplacement et appliqué à mi-portée. La vitesse de chargement est de 0.4 mm/min.



FIGURE 4.13: Essai de flexion 3-points des briques en terre cuite

L'allure du comportement en flexion 3-points d'une brique à l'état sec est présenté en figure 4.14. Le comportement est quasi-linéaire, gouverné par l'association des comportements en compression et en flexion. Le comportement en compression étant linéaire, comme justifié précédemment, nous pouvons alors supposer que la loi de comportement en traction des briques sera également linéaire, justifiant ainsi une de nos hypothèses

fondamentales pour cet essai de traction indirecte. Contrairement à la compression, la rupture est de type fragile, avec un comportement post-pic inexistant. Le faciès de rupture en flexion souligne la propagation rapide et brutale de la fissuration en zone tendue, justifiant un comportement en traction de type linéaire fragile. La résistance à la traction des briques en terre cuite est faible, comme souligné dans la littérature, avec des contraintes moyennes de traction de 0.013 à 0.008 MPa aux états sec et saturé, respectivement [Fernandes et al., 2010]. La résistance à la traction semble fortement influencée par la présence de l'eau à l'intérieur des pores avec une chute des propriétés mécaniques de l'ordre de 58%.

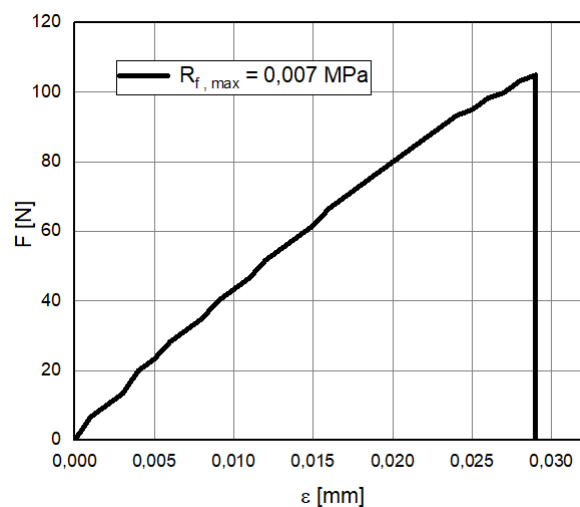


FIGURE 4.14: Allure du comportement en flexion 3-points d'une brique en terre cuite à l'état sec

4.3.4 Identification des propriétés hygriques des briques

Les briques en terre cuite sont des matériaux hygroscopiques. À l'aune des observations issues de la caractérisation physique et micro-structurale, les briques en terre cuite ont présenté une porosité assez élevée et une relative faible densité. Les clichés de MEB ont confirmé la présence de macro-pores. L'approche mécanique, vient renforcer ces conclusions. En effet, la présence de l'humidité sous forme liquide ou gazeuse au sein des pores du matériau influence significativement le comportement mécanique en fragilisant le matériau. La porosité est un paramètre physique prépondérant car elle représente une réserve potentielle de molécules d'eau ou de vapeur d'eau qui impacte le confort hygrothermique au sein d'un bâtiment. À ces fins, l'identification des caractéristiques principales hygriques des briques en terre cuite est proposée.

Nous détaillerons alors en suivant les essais réalisés afin de déterminer la sorptivité des briques (absorption d'eau par capillarité), l'absorption d'eau par immersion totale, les isothermes d'adsorption et de désorption, la perméabilité à la vapeur d'eau et, finalement,

la capacité tampon hygrique.

Absorption d'eau par capillarité

Cet essai consiste à mesurer la variation de la masse des briques en terre cuite en contact avec l'eau. La brique est disposée sur une grille métallique perforée, immergée sur une profondeur de 3 mm. La figure 4.15 présente le dispositif expérimental conçu au sein du laboratoire. Il est constitué d'un réservoir d'eau pour garantir l'approvisionnement en eau, grâce à une vanne qui contrôle le débit d'eau pour garantir une hauteur d'eau constante au niveau du contact avec l'échantillon. 6 échantillons différents ont été utilisés pour cet essai afin d'identifier la variabilité des propriétés. Avant l'essai, les briques sont préalablement séchées à l'étuve à 70°C jusqu'à atteindre une masse constante. Les faces des échantillons sont entourées par un papier cellophane et d'un ruban adhésif afin d'assurer un flux hydrique unidirectionnel vertical. Le suivi de l'évolution de la masse de chaque brique est réalisé à un intervalle de temps de 30s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 1h, puis toutes les 2h. Avant chaque pesée, chaque brique est égouttée et essuyée avec du papier absorbant afin d'enlever l'excès d'eau superficiel.



FIGURE 4.15: Absorption d'eau par capillarité

Le coefficient d'absorption capillaire A_c est exprimé par la relation suivante :

$$A_c = \frac{\Delta m}{S\sqrt{t}} \quad (4.3)$$

avec

- S : la surface de brique en contact avec l'eau
- Δm : la variation de la masse
- t : le temps

La figure 4.16 représente l'évolution de la masse de l'échantillon en fonction de la racine carrée du temps, pour les 6 échantillons de briques en terre cuite testés. Le taux d'ab-

sorption d'eau lors du contact avec l'eau est proportionnel à la racine carrée du temps. La sorptivité est déterminée à partir de la pente de la première partie droite de la courbe, et représente la proportion d'eau qui a été rapidement absorbée par les pores ouverts de la surface absorbante de la brique en terre cuite. La valeur moyenne du coefficient de sorptivité est $A_c = 0.52 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$, avec une dispersion de 0.16.

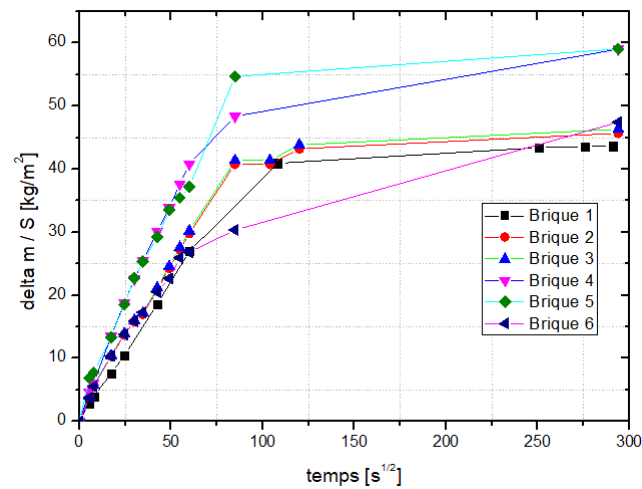


FIGURE 4.16: Résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité

Dans la littérature, cette valeur varie entre 0.08 et $0.25 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ [Oumeziane et al., 2021]. La sorptivité, assez importante, prouve que les briques en terre cuite sont des matériaux capillaires. Ce résultat est en accord avec les résultats de la caractérisation micro-structurale. La présence d'un réseau poral assez homogène avec des gros pores connectés est ainsi confirmée et appuie les conclusions de l'étude menée par [Sock et al.,] qui a étudié les propriétés des briques cuites à différentes températures. Ces résultats prouvent que le taux d'absorption augmente avec la température de cuisson. En effet, la cuisson des briques semble générer des pores provenant de la carbonisation de matières organiques et/ou de l'évaporation de l'eau interstitielle présent au sein de la matière première. Cette génération de pores rend la sorptivité du matériau plus importante.

Isothermes de sorption

Les briques en terre cuite, comme tout matériau poreux, ont une porosité élevée. Une fois placées en contact avec un air humide, celles-ci vont absorber une certaine quantité d'humidité (eau sous forme liquide et/ou de vapeur) qui dépend fortement de l'humidité relative de l'air ambiant. Ainsi, la masse d'une brique à l'état sec, placée dans l'air ambiant dont le taux d'humidité relative n'est pas nul, s'accroît jusqu'à atteindre un état d'équilibre. L'étude du comportement hygrique d'un matériau poreux dépend fortement de sa micro-structure. On distingue alors deux types de matériaux [Rahmouni, 2019, Rahim, 2015] :

- Les matériaux hygroscopiques telles que les briques en terre cuite, possèdent la capacité de fixer une certaine quantité d’humidité contenue dans l’air (ou d’eau liquide) à son contact.
- Les matériaux non hygroscopiques tel que le polystyrène, dont la particularité est l’absence d’influence des conditions d’ambiance. On identifie la même masse lorsque le matériau est sec ou placé dans une ambiance humide.

Le phénomène de sorption représente alors la capacité d’un matériau à adsorber ou désorber l’humidité ambiante, notamment grâce au mécanisme de transfert de vapeur d’eau représenté par la diffusion (ou transport) moléculaire. Ce phénomène obéit à la loi de Fick, exprimée comme suit :

$$g_v = -D_v \nabla P_v \quad (4.4)$$

Cette loi exprime le flux de vapeur g_v en fonction du coefficient de diffusion de la vapeur d’eau D_v et du gradient de la pression de vapeur P_v .

Par ailleurs, lorsque l’humidité est suffisamment abondante, des transferts liquide peuvent également apparaître au sein du matériau. Le transfert de l’humidité sous forme liquide se fait par succion, et obéit à la loi de Darcy :

$$g_L = -\rho_L \frac{k}{\mu} \nabla P_L \quad (4.5)$$

exprimant le flux liquide g_L en fonction de la masse volumique ρ_L , de la perméabilité liquide k , de la viscosité dynamique μ et du gradient de pression liquide ∇P_L .

Chaque matériau poreux et hygroscopique possédant la capacité de stocker l’humidité sous forme liquide ou/et vapeur est caractérisé par une courbe d’isothermes qui représentent les phénomènes d’adsorption et de désorption à une température constante. Celles-ci traduisent le comportement du matériau vis-à-vis des conditions atmosphériques du milieu où il est placé. Le phénomène d’adsorption se manifeste par une augmentation de la masse du matériau face à une hausse en humidité relative. La désorption est caractérisée par une perte de masse due à une diminution de l’humidité relative de l’air. Ces isothermes, selon [Künzel, 1995], décrivent les différents états d’équilibre du matériau lorsqu’il est soumis à un milieu ambiant où des conditions de température sont uniformes. Elles se divisent en 3 zones, visibles dans la figure 4.17.

- La région hygroscopique débute d’un état sec jusqu’à 95% d’humidité relative.
- La région super-hygroscopique correspond à la sorption d’humidité jusqu’à saturation capillaire en eau libre.
- La région de sursaturation localisée au-dessus de la saturation en eau libre, lorsqu’on atteint une saturation maximale. A ce stade le matériau devient saturé et ne peut plus adsorber de la vapeur d’eau.

Les isothermes de sorption servent à caractériser le comportement hygrique des matériaux, représenté en hystérésis formées par les courbes d’adsorption et de désorption. Ces

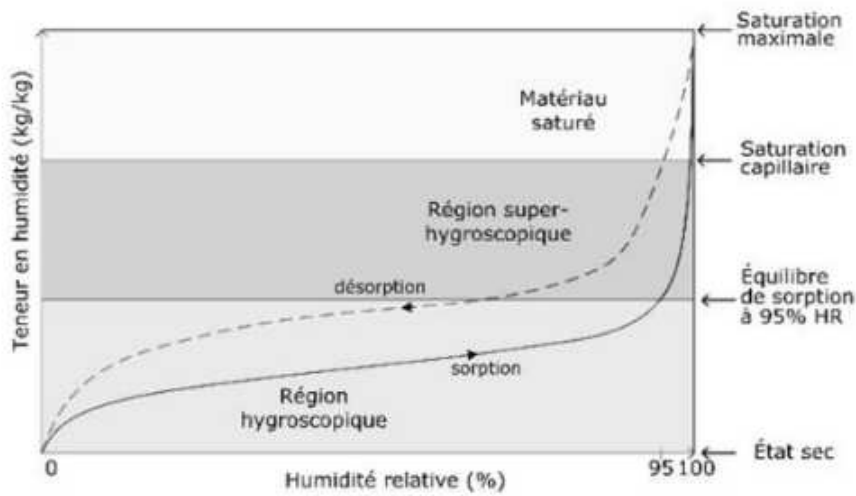


FIGURE 4.17: Isothermes de sorption

deux courbes ne sont pas superposées en raison des différences de forces et des liaisons physico-chimiques (voir chapitre 2). En effet, les chaleurs isostériques ne sont pas identiques lors de ces deux phases. L'I.U.P.A.C (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) propose une classification de six cinématiques d'adsorption possibles d'un matériau hygroscopique en fonction de l'allure de l'isotherme de sorption [Rouquerol et al., 1994]. Ces classes sont présentées en figure 4.18.

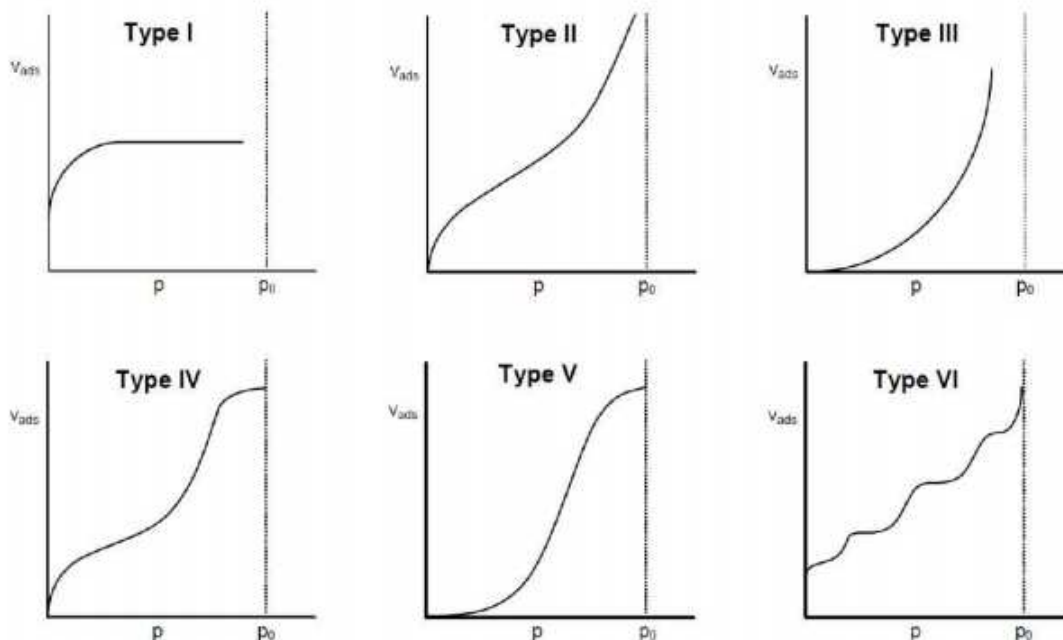


FIGURE 4.18: Classification des isothermes de sorption

- Le type I est caractérisé par le remplissage de micro-pores à faibles pressions relatives où des interactions chimiques peuvent avoir lieu. Ce cas décrit une adsorption mono-moléculaire.

- le type II correspond à des milieux macro-poreux. L'augmentation de la quantité d'humidité adsorbée traduit une faible interaction adsorbât - adsorbant. Ce type décrit l'adsorption mono-couche et multi-couche.
- Le type III est proche du type II. L'adsorption se produit sur la première couche et à la surface des macro-pores.
- Le type IV caractérise le cas où les méso-pores sont remplis. On assiste dans ce cas à un phénomène de condensation capillaire au niveau des pores. On peut noter la présence d'hystérésis de différents types (voir figure 4.19) : le type H1, où les courbes d'adsorption et de désorption sont parallèles (c'est le cas d'adsorbants ayant en général des pores de distribution cylindriques) et le type H2, où la courbe de désorption présente une pente plus importante que celle de la courbe d'adsorption. Le type H3 se caractérise par l'absence de palier à la fin d'adsorption. Les hystérésis dépendent principalement des conditions expérimentales et particulièrement de la saturation ou de la porosité du matériau. Le type H4 pareillement ne présente pas de palier. Il y a co-existence d'une micro-porosité assez importante.

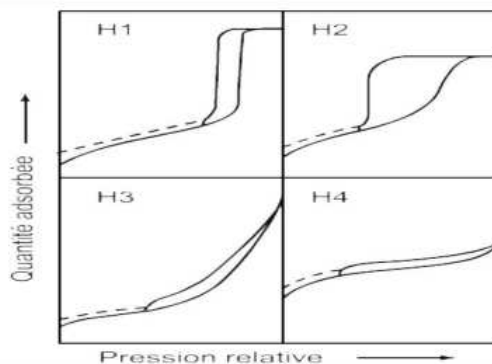


FIGURE 4.19: Hystérésis de sorption

- Le type V est similaire au type IV mais les interactions entre adsorbât et adsorbant sont moins importantes.
- Le type VI est très rare. Il correspond à un milieu poreux où les couches adsorbées se forment les unes après les autres alors que les surfaces des pores sont très homogènes.

L'essai de sorption consiste à mesurer la variation de la masse d'humidité adsorbée par l'échantillon mis dans une atmosphère dont l'humidité relative et la température sont constantes et contrôlées. Le taux d'humidité relative au sein d'un dessiccateur est fixé par une solution saline (figure 4.20). Les dessiccateurs, contenant dans leurs fonds une solution saline et une grille sur laquelle on pose l'échantillon, sont placés dans une pièce dont la température est maintenue constante, à 10°C, à l'aide d'une centrale de traitement d'air. L'essai de sorption peut se faire de deux manières différentes, soit par paliers successifs d'humidité relative croissante puis décroissante, soit inversement. Le protocole

expérimentale de cet essai est indiqué dans la norme NF EN 12571 [AFNOR, 2013]. Lors de nos essais, nous avons utilisé le protocole de paliers croissants, en commençant par l'état sec pour l'adsorption puis de l'état saturé pour la désorption.



FIGURE 4.20: Essai de sorption des briques en terre cuites

Les courbes d'isothermes d'adsorption et de désorption sont obtenues grâce à la mesure de la teneur en eau pour chaque niveau d'humidité relative. Les solutions salines, sont préparées en suivant le protocole standardisé par la procédure COST 90 [Carter & Fontana, 2008]. L'humidité relative au sein d'un dessiccateur, au-dessus de la solution saline, s'équilibre et se fixe à une valeur gouvernée par la solution saline utilisée. Une fois l'humidité relative stabilisée, les échantillons sont placés à l'intérieur des dessiccateurs. Le suivi de la variation de la masse se fait par des pesées, à intervalles réguliers (toutes les 48h), jusqu'à ce que la variation de masse soit inférieure à 0.01%. On estimera alors à ce stade que la masse des échantillons est en équilibre avec l'atmosphère environnante. Les solutions salines utilisées sont présentées dans le tableau 4.3. Cinq paliers d'humidité sont ciblés, entre l'état sec (c'est-à-dire $\approx 0\%$) et 97%.

TABLEAU 4.3: Présentation des solutions salines utilisées

| Solutions salines | Humidité Relative |
|--------------------|-------------------|
| Magnésium Chlorure | 33% |
| Magnésium Nitrate | 55% |
| Chlorure de Sodium | 75% |
| Ammonium Sulfate | 81% |
| Potassium Sulfate | 97% |

Les mesures ont débuté à l'état sec pour l'adsorption, après avoir coupé des échantillons cubiques des briques aux dimensions $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$. Les échantillons de brique ont été séchés dans une étuve à 70°C jusqu'à stabilisation de la masse. L'identification des l'isotherme de désorption est menée après le processus d'adsorption. Les échantillons, préalablement saturés en eau, sont placés dans une enceinte où l'humidité relative et la température restent constantes (HR=97% et T=10°C). Ils sont régulièrement pesés et la

masse à saturation est obtenue grâce au suivi de l'évolution des pesées. La teneur en eau est déterminée par pesée à l'aide d'une balance de précision de 0.1 mg. La phase d'adsorption est caractérisée par un gain de masse lorsque l'humidité relative augmente (isotherme d'adsorption) tandis que la désorption est caractérisée par une diminution de masse lorsque l'humidité relative diminue (isotherme de désorption).

Le phénomène de sorption présente une cinétique lente, notamment pour des humidités relatives importantes. Les briques en terre cuite étudiées ont atteint la stabilisation en 1 à 3 mois pour une humidité relative de 97%. Ceci s'explique par la présence des macro-pores qui sont inter-connectés, ce qui permet une absorption plus au moins rapide. Pour une humidité relative inférieure à 97%, les cinétiques d'adsorption présentent, d'une manière générale, une allure classique : une première phase pendant laquelle la teneur en eau augmente rapidement suivie d'une seconde phase durant laquelle la masse se stabilise lentement. Le graphique 4.21 montre l'évolution de la teneur en eau des briques en terre cuite, en adsorption et en désorption, à différents humidités relatives, de 33%, 55%, 75%, 81% et 97%.

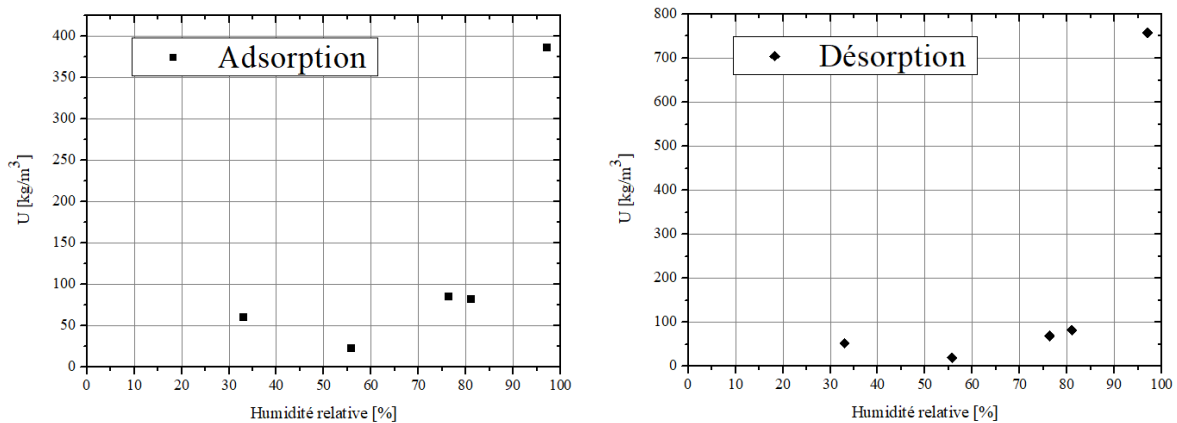


FIGURE 4.21: Courbe d'adsorption (à gauche) et courbe de désorption (à droite) des briques en terre cuite

Afin de modéliser le comportement hygrothermique des briques en terre cuite, différents modèles de lissage mathématique des isothermes de sorption sont proposés dans la littérature [Rahim, 2015]. Ces approches sont basées sur différents paramètres déterminés expérimentalement. Nous retiendrons ici le modèle GAB en raison de sa robustesse et de sa précision sur l'intégralité de la plage 0-100% d'humidité relative [Merouani, 1987]. Le modèle GAB se caractérise par l'équation suivante :

$$w = \frac{W \times C \times K \times \phi}{(1 - K \times \phi)(1 - K \times \phi + C \times K \times \phi)} \quad (4.6)$$

où les paramètres W, C et K correspondent respectivement à la teneur en eau moléculaire et à deux coefficients en fonction de la chaleur molaire d'absorption et de la chaleur molaire latente de vaporisation.

La figure 4.22 présente les résultats du modèle GAB sur les mesures du comportement d'adsorption et de désorption des briques en terre cuite étudiées. Les courbes obtenues sont caractéristiques du type III selon la classification de l'IUPAC. La cinétique de sorption met en lumière la présence des méso-pores de différents diamètres car la sorption est régulière dans les domaines mono-couche et multi-couche. La condensation capillaire apparaît pour une humidité relative proche de 95%. Le comportement de la brique en terre cuite, matériau capillaire, montre une capacité spécifique à stocker l'humidité, notamment à forte humidité relative, comparativement à d'autres matériaux de construction.

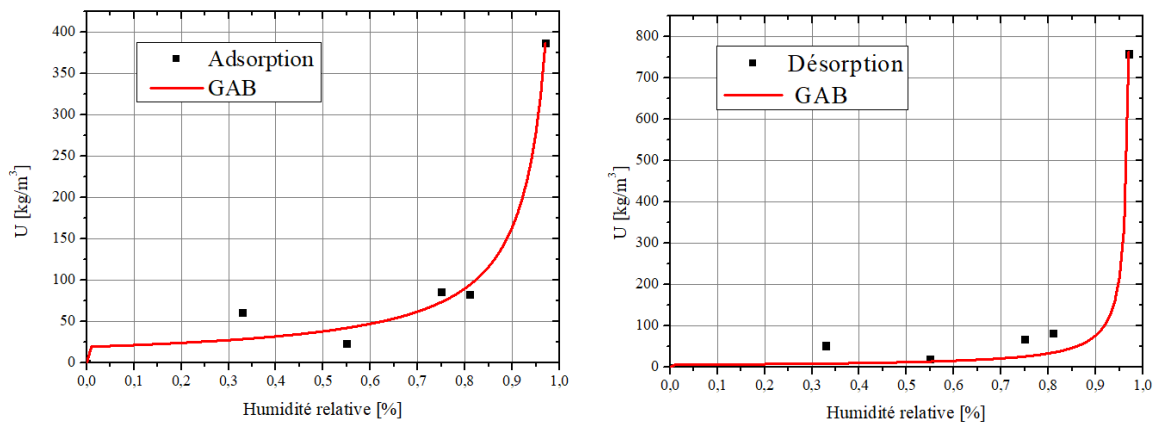


FIGURE 4.22: Application du modèle GAB pour le lissage des mesures d'adsorption (à gauche) et de désorption (à droite) des briques en terre cuite

La figure 4.23 présente le comportement de sorption (adsorption et désorption) des briques en terre cuite. La superposition des isothermes d'adsorption et de désorption met clairement en évidence le phénomène, relativement faible, d'hystérésis de sorption. Pour une même humidité relative, la teneur en eau en désorption est supérieure à celle en adsorption. Les courbes visualisant le phénomène d'hystérésis pour les briques en terre cuite peut être identifiées de type H2, selon la classification de l'IUPAC.

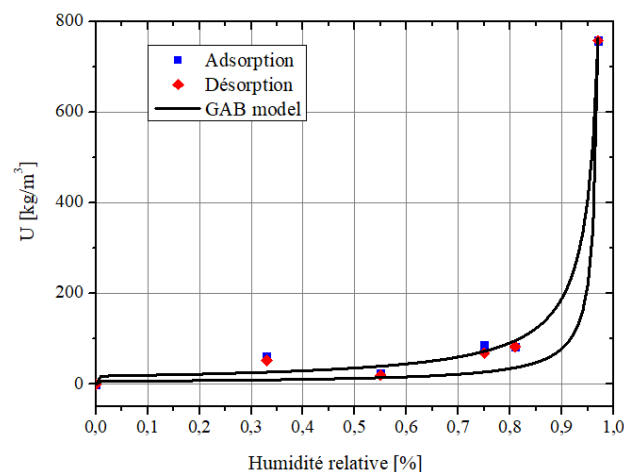


FIGURE 4.23: Isothermes de sorption des briques en terre cuite

L'exploitation de l'isotherme de sorption confirme les résultats précédents quant à la faculté des briques en terre cuite à conduire et à stocker l'humidité en leur sein. Les transferts d'eau, sous forme liquide ou vapeur, se trouvent plus importants pour les briques en terre cuite que pour d'autres matériaux de construction tel que le béton en raison de leur structure micro-structurale. La quantité et le diamètre des capillaires, mis en exergue par les essais de sorptivité et de sorption, constituent une réserve d'humidité non négligeable, identifiée grâce aux essais de sorption précédent. Le tableau 4.4 synthétise les coefficients du modèle GAB utilisés pour le lissage des points expérimentaux en adsorption et en désorption.

TABLEAU 4.4: Coefficients du modèle de GAB

| Adsorption | | | Désorption | | |
|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| W | C | K | W | C | K |
| 19.579 | 1.127 | 0.978 | 6.129 | 6.303 | 1.022 |

Teneur en eau maximale et teneur en eau libre

La teneur en eau maximale des briques en terre cuite W_{max} correspond à l'état de remplissage total de tous les pores (connectés et non connectés) du matériau étudié. Le calcul de ce paramètre est alors basé sur la porosité totale n et la masse volumique de l'eau ρ_{eau} :

$$w_{max} = \rho_{eau} \times n \quad (4.7)$$

La teneur en eau maximale des briques est mesurée égale à 280.4 kg/m^3 avec une dispersion de 32.1 kg/m^3 .

La teneur en eau libre W_L correspond à la saturation du matériau quand il est exposé à une ambiance à 100% d'humidité relative. L'essai consiste à immerger des briques en terre cuite dans un bac d'eau, afin de déterminer la porosité accessible à l'eau (voir figure 4.24). Les briques en terre cuite, initialement à l'état sec, sont placées sous immersion totale jusqu'à atteindre une masse constante et en mesurant à-fur-et-à mesure la variation de masse humide. Avant chaque pesée, la brique est égouttée et essuyée avec du papier absorbant afin de supprimer de l'eau superficielle. Le tableau 4.5 présente les résultats des essais d'immersion.

Les mesures de la teneur en eau libre montrent que les briques en terre cuite ont une haute teneur en eau de l'ordre de 160 kg/m^3 , symbole d'un taux important de porosité ouverte et accessible. Ces résultats, qui appuient les constatations précédentes, laissent envisager une perméabilité importante à la vapeur d'eau.



FIGURE 4.24: Immersion totale des briques en terre cuite en terre cuite

TABLEAU 4.5: Mesure de la teneur en eau libre

| Briques | w_L [kg/m^3] |
|---------|--------------------|
| 1 | 136.61 |
| 2 | 127.01 |
| 3 | 150.89 |
| 4 | 143.92 |
| 5 | 210.02 |
| 6 | 188.06 |
| Moyenne | 159,418 |

Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur permet d'évaluer la capacité d'un matériau à transmettre la vapeur d'eau. Le principe de cet essai consiste à imposer un gradient de vapeur constant mono-dimensionnel à un échantillon d'épaisseur e . La méthode utilisée et préconisée par la norme EN ISO 12572 est celle de la coupelle [Gherfi et al., 2017]. Pour ce faire, nous avons, dans un premier temps, effectué un carottage afin d'obtenir des échantillons de brique en terre cuite de forme cylindrique de diamètre $d=10$ cm et d'épaisseur $e=3$ cm (figure 4.25).



FIGURE 4.25: Carottage des briques en terre cuite

Après séchage à l'étuve, nos échantillons sont placés dans une enceinte climatique à une température de 23°C et 50% d'humidité relative jusqu'à stabilisation de la masse. Par la suite, les échantillons sont mis en œuvre dans une coupelle dans laquelle se trouve le gel de silice permettant de fixer l'humidité relative à l'intérieur de la coupelle et la garder proche de 0 à 2%. L'épaisseur de la lame d'air entre le gel et l'échantillon de la brique est de 15 mm. L'ensemble échantillon - coupelle est alors placé dans une ambiance régulée

à 23°C et 50% d'humidité relative à l'intérieur d'une enceinte climatique. Le caractère mono-dimensionnel du transfert est assuré par l'étanchéité latérale réalisée à l'aide de paraffine (voir figure 4.26).

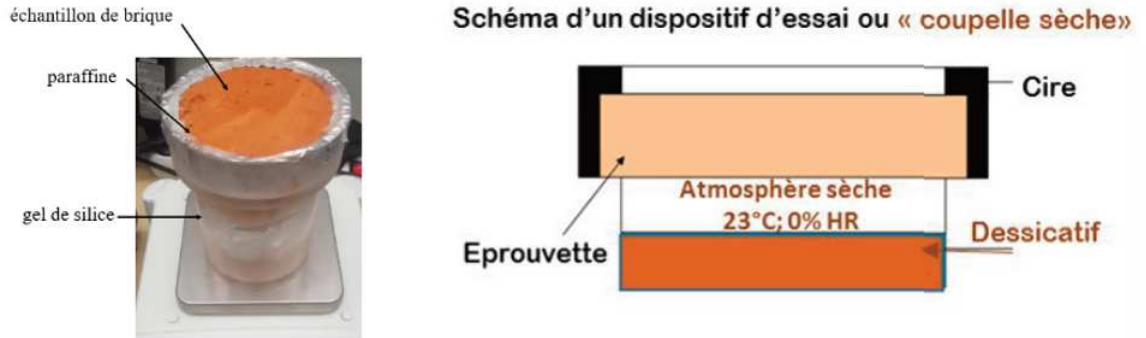


FIGURE 4.26: Perméabilité à la vapeur d'eau des briques en terre cuites

A la température de référence de 23°C, la différence entre ces deux humidités relatives (intérieure et extérieure à la coupelle) crée un gradient de pression partielle de vapeur qui génère ainsi un flux de vapeur à travers le matériau. A l'intérieur de l'enceinte climatique, les coupelles sont placées sur des balances analytiques avec une résolution de 1mg afin de suivre l'évolution de la masse de l'échantillon. De plus, différents capteurs enregistrent la variation des conditions hygrothermiques dans l'enceinte régulée, ainsi que la pression et la vitesse de l'air pour s'assurer d'une homogénéité minimale dans l'enceinte. Le régime permanent est supposé atteint lorsque l'on obtient, pour chaque ensemble (coupelle-échantillon), cinq mesures successives identiques de la variation de masse (avec une tolérance de 5% par rapport à la variation moyenne).

Lorsque le régime permanent est établi, on suppose que le flux de vapeur, qui est déterminé en fonction du suivi de la variation de masse au cours du temps, est purement diffusif et proportionnel à la différence des pressions de vapeur entre les deux faces de l'échantillon. Dans ce cas la perméabilité à la vapeur d'eau se calcule de la manière suivante :

$$\delta_p = g_v \frac{e}{\Delta P_v} \quad (4.8)$$

avec :

- g_v : la densité de flux de vapeur traversant l'échantillon de la brique en terre cuite [kg/m.s.Pa]
- e : l'épaisseur de l'échantillon de la brique [m]
- P_v : la pression de vapeur [Pa]

Le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau dans le matériau, exprimé en fonction de la perméabilité de l'air à la vapeur d'eau et de la perméabilité à la vapeur

d'eau du matériau, s'écrit :

$$\mu^* = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (4.9)$$

avec δ_a : la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air = $2.10^{-10} \text{ kg}/(\text{m.s.Pa})$

La résistance à la vapeur d'eau s'écrit alors :

$$S_d = \nu \times e \quad (4.10)$$

Dans le cadre de la mesure de la perméabilité à la vapeur en la coupelle sèche (0/50% d'humidité relative), l'évolution de masse de l'échantillon de brique en terre cuite en fonction du temps est exploitée. La figure 4.27 présente les résultats à partir de l'atteinte du régime permanent (au delà de la 100^{ième} heure d'essai).

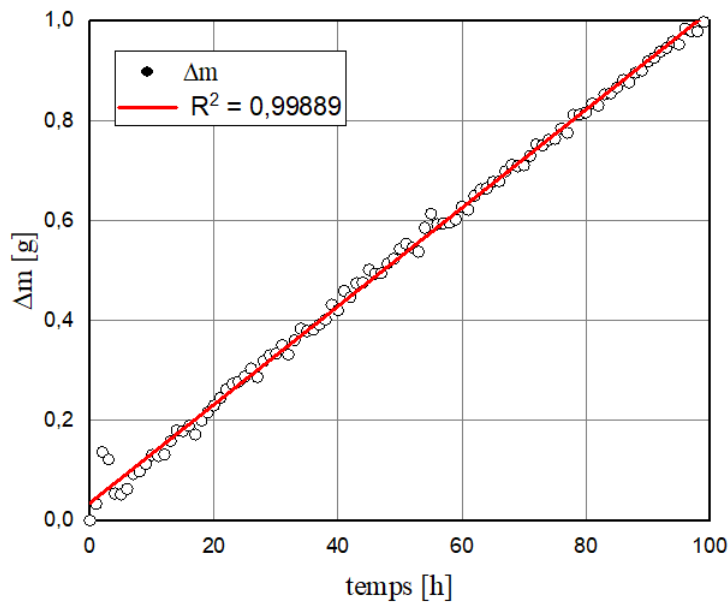


FIGURE 4.27: Perméabilité à la vapeur d'eau par la méthode de la coupelle en base sèche [0/50% HR] de briques en terre cuite

Le tableau 4.6 représente les valeurs moyennes obtenues pour l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau pour le cas de la coupelle sèche. On constate que la porosité relativement élevée confère à la brique en terre cuite une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau très faible par rapport à d'autres matériaux de construction tels que ceux présentés dans une étude de [Oumeziane et al., 2021] portant sur les propriétés hygrothermiques d'une brique en terre cuite du début du XX^{ème} siècle provenant de l'est de la France. L'auteur identifie des valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau de briques en terre cuite anciennes entre $1.15\text{E-}11$ et $2.8\text{E-}12 \text{ kg}/\text{m.s.Pa}$, ainsi qu'un facteur de résistance à diffusion de la vapeur proche de 12.6.

TABLEAU 4.6: Perméabilité à la vapeur d'eau sèche des briques en terre cuite

| Flux de vapeur [kg/m.s.Pa] | Perméabilité [kg/m.s.Pa] | Facteur de diffusion de vapeur [-] | Résistance à la vapeur [m] |
|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 3.18E-07 | 3.36E-13 | 594.23 | 17.82 |

Coefficients de diffusion de masse

En phase vapeur

Le transport de la vapeur d'eau obéit à la loi de Fick [Fang et al., 2000], qui peut être exprimée en fonction de la perméabilité à la vapeur d'eau et un gradient de pression de vapeur :

$$g_v = -\delta_p \nabla P_v = -\delta_p P_{vsat} \nabla \phi = -D_{v,\phi} \nabla \phi \quad (4.11)$$

avec :

- P_{vsat} : la pression de vapeur saturante [Pa]
- ϕ : l'humidité relative [%]

La relation 4.11 peut être exprimée en fonction du gradient de teneur en eau et s'écrit alors :

$$g_v = -\frac{\delta_p P_{vsat}}{\zeta_\phi} \nabla w = -D_{L,v} \nabla w \quad (4.12)$$

avec

- ζ_ϕ : la tangente à l'isotherme de sorption de la brique en terre cuite [kg/m³]
- w : la teneur en eau [kg/m³]

Dans ce cas, le coefficient de diffusion de la vapeur s'écrit :

$$D_{L,v} = \frac{\delta_p P_{v,sat}}{\rho_0 \frac{\partial w}{\partial \phi}} \quad (4.13)$$

En phase liquide

A l'échelle du matériau, le transport d'eau en phase liquide se produit par conduction capillaire ou par diffusion en surface. Ces deux phénomènes sont gouvernés par deux moteurs potentiels qui sont la pression capillaire et la teneur en eau. Le flux liquide s'exprime en fonction de la diffusivité liquide et un gradient de teneur en eau :

$$g_L = -D_{L,l} \nabla w \quad (4.14)$$

Dans le cas d'un contact de brique avec l'eau, le transport de l'eau liquide se fait principalement par succion capillaire. Ce phénomène l'emporte sur toute autre phénomène de transport liquide. [Künzel, 1995] a établi une approximation permettant de définir un

coefficient de transport de liquide D_L qui s'écrit comme suit :

$$D_{L,l} = 3.8 \times \left(\frac{A_c}{\rho_d \times w_{sat}} \right)^2 \times 1000 \left(\frac{w}{\omega} - 1 \right) \quad (4.15)$$

avec :

- A_c : le coefficient d'absorption capillaire [$kg/m^2 \cdot s^{1/2}$]
- w : la teneur en eau [%]
- ω : la teneur en eau libre [%]
- ρ_d : la masse volumique sec [kg/m^3]

Le coefficient de diffusion totale s'écrit alors :

$$D_{L,t} = D_{L,l} + D_{L,v} \quad (4.16)$$

La figure 4.28 montre l'évolution des coefficients de diffusion hydrique des briques en terre cuite. L'évolution globale des coefficients de diffusion en fonction de la teneur en humidité est pertinente avec la théorie de De Vries. Elle peut être divisée en trois parties principales :

- A des faibles teneurs en eau, l'humidité n'est transférée que sous forme de vapeur ; le transfert d'humidité en phase vapeur est prédominant. La phase liquide condensée est présente sous forme adsorbée ou dans des îlots capillaires.
- A des teneurs en eau plus élevées, les îlots capillaires augmentent en taille et en nombre. La section d'écoulement de la vapeur diminue à cause de stockage d'humidité et la vapeur se diffuse par les mécanismes de condensation et d'évaporation aux interfaces entre le liquide et la vapeur. L'eau en phase liquide se diffuse également

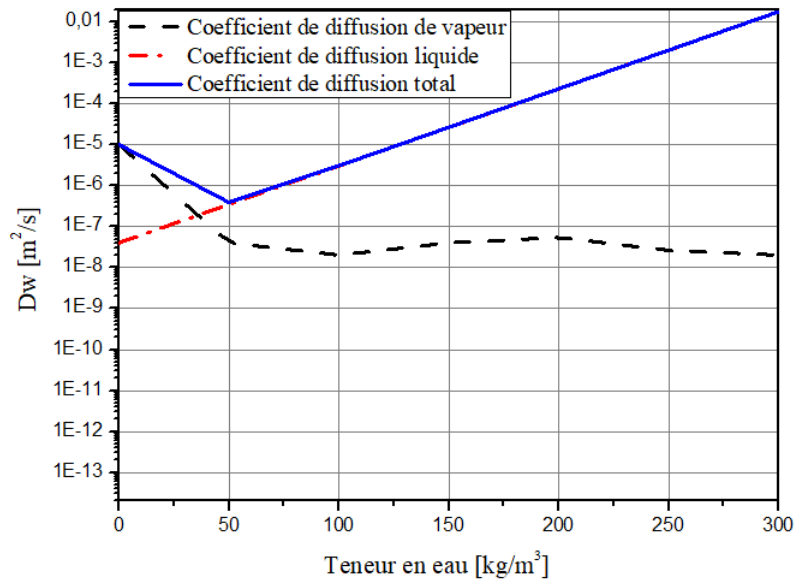


FIGURE 4.28: Coefficients de diffusion hydrique des briques en terre cuite

à la surface des pores.

- A des teneurs en eau très élevées, la continuité de la phase liquide est assurée. Le transfert dans la phase liquide devient largement prédominant et le coefficient de diffusion liquide augmente fortement.

Ces exploitations confirment à nouveau les observations précédents quant à la sensibilité des briques en terre cuite à conduire et stocker l'humidité. Les transferts d'eau, sous forme liquide ou vapeur, se trouvent plus importants en raison de leur micro-structure (quantité et diamètre des capillaires), mis en exergue par les essais de sorptivité et d'adsorption d'eau par immersion, ainsi que par mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau. Les capillaires et les pores constituent une réserve d'humidité non négligeable qui nous permettrait d'envisager une meilleure faculté de ce matériau à réguler le taux d'humidité relative au sein d'un local, participant à l'amélioration du confort hygrique des occupants. A ce titre, la capacité tampon hygrique est une approche envisageable afin d'identifier les performances des briques en terre cuite et leur impact sur la sensation de confort hygrique des occupants.

Capacité tampon hygrique

Afin d'évaluer les performances des briques vis-à-vis du confort hygrothermique dans le bâtiment, des essais d'identification de la capacité tampon hygrique sont menés. Par ailleurs, l'excès de l'humidité dans un bâtiment peut être dans de nombreux cas un déclencheur de développement de différentes pathologies.

Le protocole d'essai a été initialement proposé par le Nordtest Project afin d'estimer l'inertie hygrique d'un matériau [Rode et al., 2006]. La valeur tampon hygrique déterminée caractérise la capacité des briques en terre cuite à réguler l'humidité relative de l'air au sein d'une ambiance. La valeur MBV est définie comme suit :

$$MBV = \frac{\Delta m}{S(\phi_{max} - \phi_{min})} \quad (4.17)$$

avec :

- Δm : la variation de masse au cours d'un cycle de sollicitation hygrique, exprimé en [kg].
- ϕ_{max} et ϕ_{min} : l'humidité relative maximale et minimale respectivement sont égales à 75% et 33%
- S : la surface d'échange entre la brique en terre cuite et l'air ambiant, exprimée en [m^2].

Le dispositif expérimental utilisé lors du test MBV se compose d'une chambre climatique (Biaclimatic type CL2-25) contrôlable sur des plages de température allant de 8 à 65°C et une plage d'humidité relative variant entre 10 à 98% (précision de $\pm 0.3^\circ\text{C}$ et $\pm 2\%$ d'humidité relative). Au cours de cet essai, la température est maintenue constante

à 23°C tandis que l'humidité relative est programmée en une succession de cycles d'humidité relative à 75% et 33%, avec une durée de créneaux de 8h et 16h respectivement (voir figure 4.29). Les conditions de l'ambiance sont enregistrées en continu grâce à des sondes Sensirion SHT-75 (température, humidité relative et vitesse de l'air). La vitesse d'air est mesurée au voisinage des échantillons : les composantes verticales sont de 0.07 à 0.14 m/s alors que les composantes horizontales sont de 0.1 à 0.4 m/s.



FIGURE 4.29: Enceinte climatique utilisée pour les essais d'identification de la capacité tampon hygrique

Les échantillons de briques en terre cuite, de dimensions $7 \times 7 \times 6\text{cm}^3$ sont initialement séchés dans une étuve à 70°C, sont placés dans l'enceinte climatique et stabilisés à une température de 23°C et à 50% d'humidité relative avant le début des sollicitations hygriques. Le protocole précise que le suivi massique s'appuie sur 5 pesées durant les phases d'absorption et 8 pesées durant les phases de désorption. Les cycles sont répétés jusqu'à ce que l'écart entre les variations de masse mesurée soient inférieures à 5% sur les trois derniers cycles. Afin de faire le suivi de la masse des échantillons, l'enceinte est équipée de balances de capacité égale à 800g, dont la précision est de 0.01g. Le passage de 33% à 75% est automatique et s'effectue en moins de 10 minutes. Afin d'assurer un flux unidirectionnel, les échantillons de briques sont recouverts d'une feuille d'aluminium, imperméable à l'humidité, à l'exception de la surface d'échange supérieure.

La figure 4.30 montre la variation de l'humidité relative dans l'enceinte ainsi que l'évolution de la masse d'un échantillon de brique lors de l'essai. Une première phase transitoire est visible avant d'atteindre un régime stationnaire où les cycles de variation de masse des échantillons de brique en terre cuite sont répétables. L'essai MBV est réalisé sur 3 échantillons de brique en terre cuite.

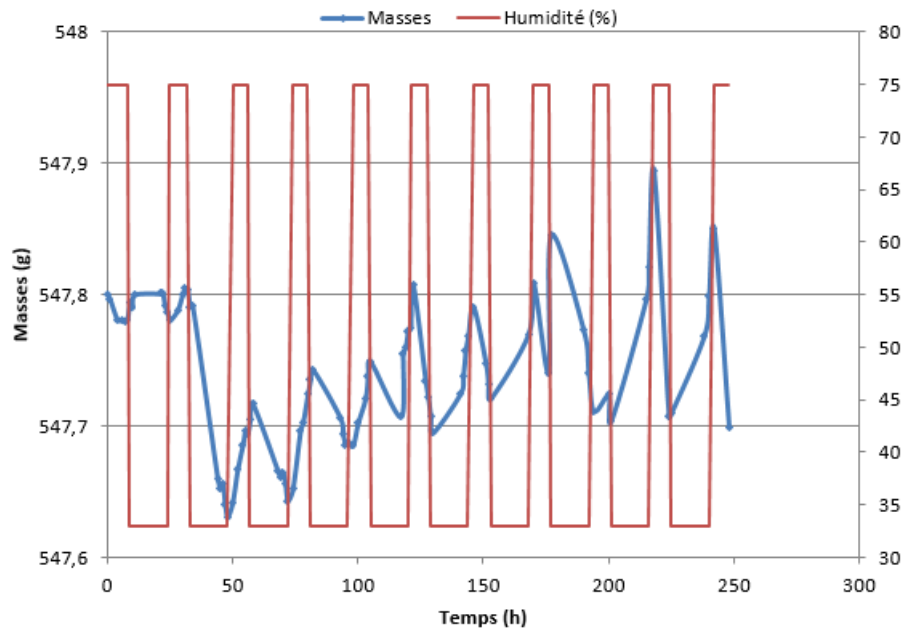


FIGURE 4.30: Cinétique de variation de la masse d'un échantillon de brique en terre cuite lors de l'essai MBV

L'analyse des résultats de l'essai permet d'estimer la valeur MBV d'un matériau. Cette valeur est comparée avec la classification des valeurs tampons hygriques définies par le projet Nordtest. La classification fait apparaître cinq classes différentes pour les matériaux présentant une excellente capacité à une capacité négligeable en terme de régulation d'humidité au sein d'un local. Ces classes sont représentées en figure 4.31.

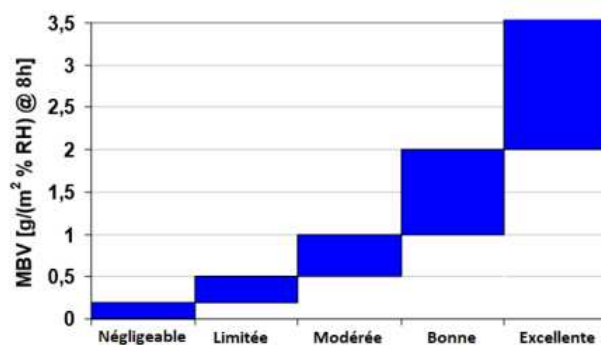


FIGURE 4.31: Classification des valeurs MBV selon le NORDTEST PROJECT

Le tableau 4.7 présente les valeurs MBV moyennes calculées à l'état d'équilibre, ainsi que leur classification selon Nordtest Project. A l'aune de ces résultats, nous pouvons en déduire que les briques en terre cuite ont une capacité modérée à réguler le taux d'humidité relative au sein d'un bâtiment. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats présentés dans les travaux de [Rode et al., 2006] sur 3 échantillons de briques dont les valeurs mesurées sont comprises entre 0.37 pour des briques de Suède, 0.4 pour des briques du Danemark, et 0.75 pour des briques Finlandaises. Ces valeurs correspondent à une capacité de régularisation d'humidité varié, de négligeable à modérée.

TABLEAU 4.7: Identification de la valeur tampon hygrique des briques en terre cuite

| Échantillon | MBV [$g/m^2.\%HR$] | Classification Nordtest Project |
|-------------|----------------------|---------------------------------|
| 1 | 0.321 | Limité |
| 2 | 0.128 | Négligeable |
| 3 | 2.215 | Excellente |
| Moyenne | 0.888 | Modéré |

La notion de la profondeur de pénétration nous renseigne sur la valeur théorique de l'épaisseur nécessaire pour la détermination de la valeur tampon hydrique. Cette profondeur est définie comme étant la distance entre la surface d'échange et le point où l'amplitude de variation de la concentration de la vapeur d'eau ne dépasse pas 1% de celle à la surface. Cette profondeur de pénétration est définie comme suit :

$$PP = 4,61 \sqrt{\frac{D_L \times T}{\pi}} \quad (4.18)$$

avec :

- D_L : le coefficient de diffusion hygrique de la brique en terre cuite présenté précédemment dans la relation (Eq. 4.13) .
- T : la période [s]

De plus, le projet Nordtest définit la valeur tampon hydrique théorique noté $MBV_{idéale}$ [$g/m^2.\%HR@16h$], qui contrairement à la valeur MBV réelle ou expérimentale, ne tient pas compte de la résistance de la lame d'air à la surface exposée :

$$MBV_{ideal} \approx 0.00568 P_{v,sat} \times b_m \times \sqrt{T} \quad (4.19)$$

avec b_m , l'effusivité hygrique du matériau [$kg/m^2.Pa.s^{1/2}$].

$$b_m = \sqrt{\frac{\rho_0 \delta_p \times \frac{\partial w}{\partial \phi}}{P_{v,sat}}} \quad (4.20)$$

Par analogie aux transferts thermiques, l'effusivité hygrique traduit la capacité d'un matériau à absorber ou à libérer l'humidité. Le tableau 4.8 synthétise les valeurs calculées de profondeur de pénétration, de $MBV_{idéal}$ et d'effusivité hygrique.

TABLEAU 4.8: Identification des paramètres hygriques des briques en terre cuite

| | $MBV_{idéal}$ [$g/m^2.\%HR$] | D_{vw} m^2/s | δ_p [$kg/m.s.Pa$] | PP [cm] | b_m [$kg/m^2.Pa.s^{1/2}$] |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------------|------------|----------------------------------|
| Brique en terre cuite | 1.77 | 1.47E-8 | 3.36E-11 | 2.94 | 3.53E-7 |

Ces résultats sont obtenus indirectement par l'exploitation de l'essai MBV. Cette méthodologie doit être encore validée par des résultats obtenus à partir des essais normalisés, ou complétée par la mise en place d'un modèle numérique de transferts hygrothermiques couplés au sein des briques qui permettra de déterminer la perméabilité hygrique par confrontation avec les résultats expérimentaux issus de test MBV. Néanmoins, ces résultats sont en excellent accord avec ceux trouvés dans la littérature. En effet, [Liuzzi et al., 2013] a étudié le comportement hygrothermique et la valeur tampon hygrique des briques composées d'argile stabilisée à la chaux et hydratée dans un climat méditerranéen. Dans ces travaux, il a déterminé la valeur de $MBV_{idéal}$, la perméabilité, et la profondeur de pénétration pour 6 échantillons de briques. Les valeurs de $MBV_{idéal}$ qu'ils ont obtenus varient entre 1.23 et 1.88 $g/m^2\%HR@16h$, la profondeur de pénétration varie entre 3.2 à 4.6 cm, tandis que l'effisivité hygrique varie entre 1.07E-07 à 4.92E-07 $kg/m^2.Pa.s^{1/2}$, similaires aux valeurs que nous obtenons.

4.3.5 Étude des performances thermiques

Les propriétés thermiques d'un matériau sont liées à ses constituants, à sa morphologie, à sa structure porale et aux différents phénomènes de transfert dans le matériau. Parmi les propriétés thermiques des briques en terre cuite, la conductivité thermique et la diffusivité sont les paramètres essentiels qui traduisent la capacité d'un matériau à transférer la chaleur.

Le transfert thermique est évalué tout échange de chaleur d'un milieu vers un autre. Il existe 3 modes de transfert différents :

- par conduction qui correspond à un transfert de chaleur sans déplacement de matière.
- par convection qui correspond au cas où une quantité de chaleur se transporte suite à un changement de phase ou un déplacement de matière.
- par rayonnement qui correspond au processus d'émission ou de propagation d'énergie.

La conductivité thermique est une propriété intrinsèque du matériau, paramètre qui traduit la capacité d'un matériau à se laisser traverser par un flux de chaleur. Il existe différentes méthodes et équipements permettent de mesurer la conductivité thermique :

La plaque chaude gardée est un dispositif expérimental qui permet la mesure de la conductivité thermique. Le principe de cette méthode consiste à prendre l'échantillon en sandwich entre deux plaques (chaude et froide) maintenues à des températures différentes, ce qui concède à établir un flux de chaleur constant et unidirectionnel à travers l'échantillon (figure 4.32). La température des plaques chaude et froide est assurée par deux plaques échangeuses reliées à des bains thermostatés. Le dispositif est instrumenté

par des thermocouples et des fluxmètres connectés à un système d'acquisition permettant d'enregistrer les températures aux surfaces supérieure et inférieure ainsi que le flux de chaleur à travers l'échantillon. La description de cette méthode est donnée par la norme EN12667-2001. Expérimentalement, la dimension de la plaque est de $40 \times 40 \text{ cm}$ et celle de l'échantillon est de $25 \times 25 \times 6 \text{ cm}$. Pour en limiter l'impact des phénomènes de bord, l'échantillon est entouré d'isolant en polystyrène. Afin d'obtenir des résultats cohérents, le contact entre l'échantillon et la plaque doit être le meilleur possible [Rahim, 2015], condition qui peut être difficile à obtenir dans le cas de matériau type brique en terre cuite où la planéité n'est pas assurée et la dimension n'est pas finement maîtrisée. Ainsi, la solution consistant à réaliser un assemblage de briques pour répondre aux contraintes de ce dispositif ne semble pas satisfaisant car nous sommes dans l'impossibilité de limiter la lame d'air entre le fluxmètre et l'échantillon et d'assurer un contact parfait entre les plaques échangeuses et l'échantillon.

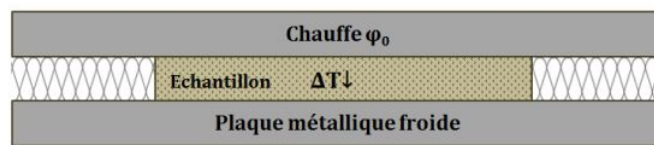


FIGURE 4.32: Principe de la plaque chaude gardée

La méthode du fil chaud vise à déterminer la conductivité thermique et l'effusivité de matériaux homogènes par l'application d'un choc thermique et le suivi de l'évolution de la température au cours du temps. Contrairement à la méthode de plaque chaude gardée qui s'exerce en régime permanent, la méthode du fil chaud appartient aux méthodes utilisées en régime quasi établi qui dépendent du temps. Les mesures sont réalisées dans un temps long, sans tenir compte de la phase transitoire et sans pour autant que le système ne soit en régime établi [Claude, 2018].

L'essai consiste à placer une sonde plate très fine entre deux éprouvettes parfaitement plates du matériau à tester. L'élément chauffant qui se présente sous la forme d'un fil ou une sonde plate est inséré entre les surfaces de deux échantillons du même matériau. Il délivre un flux de chaleur linéique de puissance assimilée à un échelon. Sans aucune exigence quant aux dimensions des échantillons, ni en épaisseur, ni en surface, le dispositif doit vérifier l'hypothèse d'un milieu semi-infini pendant un temps suffisamment long. Le transfert thermique autour du fil ou de la sonde plate est radial, comme présenté sur la figure 4.33. La mesure de la température du fil ou de la sonde est réalisée d'une façon ponctuelle, souvent en un point au milieu du fil ou de la sonde plate. La mesure peut être réalisée par un thermocouple ou par moyenne sur sa longueur en mesurant sa résistance électrique.

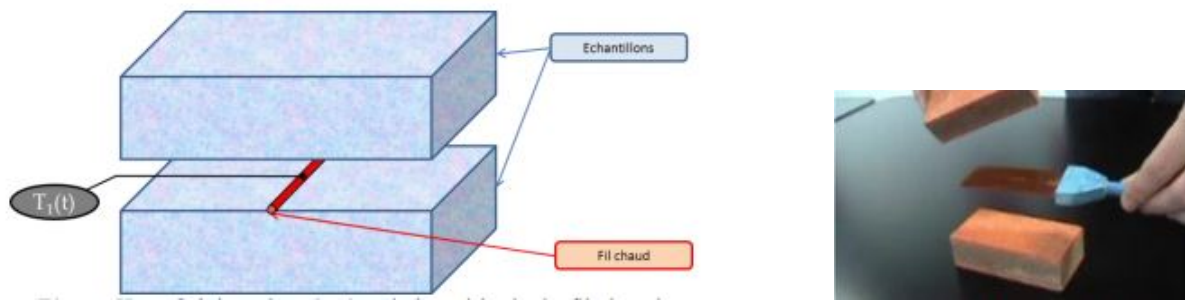


FIGURE 4.33: Principe de la méthode du fil chaud

La mesure par thermocouple possède l'avantage d'être insensible aux effets de bord dus aux extrémités du fil ou de la sonde plate. En revanche, cette méthode implique l'introduction d'un élément supplémentaire qui perturbe la qualité du contact entre les échantillons. Ainsi la température est exprimée en fonction du temps et de la longueur de la sonde plate ou du fil. Elle est décrite comme suit :

$$T(t) = \frac{\Phi}{4\pi\lambda L} \ln(t) + C^{ste} \quad (4.21)$$

L'identification de la pente, notée α de la partie linéaire du thermogramme de la fonction $T(\ln(t))$, conduit à une estimation de la conductivité thermique :

$$\lambda = \frac{\Phi}{4\pi L\alpha} \quad (4.22)$$

Les mesures de la conductivité thermique de deux échantillons de briques en terre cuite en utilisant la méthode de fil chaud, sont résumées dans le tableau 4.9. Cet essai a été réalisé sur deux échantillons de briques dont l'une est de coloration rouge et l'autre est de coloration foncée.

TABLEAU 4.9: La conductivité thermique des briques en terre cuite à l'état sec

| | λ [W/m.K] |
|----------|-------------------|
| Brique 1 | 0.45 |
| Brique 2 | 0.55 |

On constate que les valeurs sont proches, avec une légère différence de l'ordre de 10%. Nous justifions cette différence par la différence de composition de la brique ainsi que la température de cuisson. En effet, la brique N°1, de couleur rouge foncé, présente une conductivité thermique plus faible que la seconde brique, de couleur rouge. Cette différence peut être due principalement à la température de cuisson qui à son tour joue un rôle très important sur la porosité de la brique en terre cuite. Comme mise en exergue lors de l'état de l'art, les briques de couleur foncée sont cuites à une température plus élevée que celle

de couleur rouge .

Les travaux de [Claude, 2018] mettent en évidence une conductivité thermique en utilisant la méthode fil chaud pour les briques en terre cuite de l'ordre de $\lambda = 0.49$ W/m.K, une capacité calorifique de $C_p = 800$ J/K.kg, une effusivité thermique de 801 J/k.m².s^{0.5} et une diffusivité thermique de $\alpha = 0.38$ m²/s. [Cagnon et al., 2014] dans ses travaux qui portent sur la caractérisation hygorthermique des briques de terre, trouve une valeur de conductivité thermique à l'état sec comprise entre 0.47 et 0.59 W/m.K. Dans le même sens, [Oumeziane et al., 2021] a mesuré la valeur de conductivité thermique pour des briques en terre cuite de Vienne, fabriquées en 1900, de l'ordre de 0.6 W/m.K. En comparant nos résultats aux essais disponibles dans la littérature, pour des échantillons de masse volumique similaire à la notre, nous obtenons des valeurs cohérentes pour la conductivité thermiques des briques en terre cuite.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la caractérisation multi-physique des briques anciennes en terre cuite. Ces éléments de construction présentent une porosité et une teneur en eau maximale assez élevées et, par conséquent, une masse volumique plus faible. Ces résultats sont consolidés par la caractérisation micro-structurale des briques de terre cuite à travers les clichés MEB et la DRX. Ceux-ci mettent en évidence que les propriétés de la brique en terre cuite sont principalement dûes à la matière première utilisée lors de leur fabrication (l'argile) et le mode de cuisson dépendant des technologies de cette époque (antérieure à 1948). Ces paramètres sont essentiellement représentatifs des performances mécaniques de la brique. Nos résultats mettent également en exergue l'influence de l'eau retenue dans les pores des briques sur la résistance de compression et la résistance à la traction. En effet, la résistance en compression chute de 22% entre l'état sec et l'état saturé, tandis que la résistance à la traction chute de près de 50% entre l'état sec et saturé.

Les essais de caractérisation hygrique montrent que les briques en terre cuite utilisées dans cette étude sont fortement capillaires, avec un coefficient de sorptivité égal à 0.52 kg/m².s^{0.5}. Nos résultats corroborent ceux de la littérature et montrent que les briques en terre cuite sont fortement sensibles à l'humidité, avec notamment une résistance relativement faible à la diffusion de la vapeur d'eau. Enfin, les essais de caractérisation thermique conduisent à une conductivité thermique assez importante de l'ordre de 0.5 W/m.K.

L'ensemble de ces résultats constitue un jeu de données quasiment complet pouvant fournir l'ensemble des .. paramètres d'entrée de différents modèles numériques, comme ceux développés au cours du chapitre précédent.

Conclusion de la deuxième partie

La deuxième partie est consacrée à la formulation d'un modèle numérique d'analyse de la réponse hygrothermique d'une paroi humide équipée d'un système innovant d'assainissement face aux remontées capillaires. Dans un premier temps, à l'aune d'une synthèse présentant les mécanismes de transports de chaleur et de masse au sein d'une paroi et des phénomènes physiques entrant en jeu, nous avons présenté le procédé Aéraulec® qui cible la réhabilitation énergétique du patrimoine ancien humide. Une première étape consiste en la simplification du modèle physique du système composé de la structure porteuse, de la lame d'air et de l'isolant thermique. Nous avons alors imposé ces simplifications afin de mettre en exergue les phénomènes ayant lieu à l'interface entre la face interne de la paroi et le fluide qui s'écoule en convection forcée et en régime laminaire dans la lame d'air, tout en négligeant les échanges avec l'ambiance externe. Ce modèle suppose donc que la face externe est en conditions adiabatiques et que le milieu poreux (ossature porteuse) est saturé. Dans une seconde étape, le modèle numérique est étendu vers un milieu non saturé et en conditions diabatiques : les échanges entre la face externe de la paroi, au sein de la paroi et avec l'air qui s'écoule dans le canal sont pris en considération. Les formulations mathématiques, les hypothèses simplificatrices et les conditions aux limites sont présentées. Le choix de logiciel de simulation et les méthodes de résolution numériques des deux modèles numériques sont également justifiés. Ce modèle est caractérisé par une approche de Luikov, couplée à l'approche de Lattice - Boltzmann et fait intervenir la méthode de résolution mathématique par sur-relaxation ponctuelle.

Afin d'exploiter cette modélisation, il est indispensable d'identifier les caractéristiques multi-physique des matériaux, définissant les données d'entrée du modèle. Ainsi, une campagne expérimentale est menée sur la brique ancienne en terre cuite, matériaux de base de nombreuses constructions anciennes sujettes aux phénomènes de remontées capillaires. Nos résultats expérimentaux montrent que les propriétés physiques, hygrothermiques et mécaniques de la brique ancienne en terre cuite sont fortement influencées par l'âge et les techniques de fabrication et de cuisson utilisées avant 1948. Les résultats expérimentaux confirment également la forte sensibilité de ce matériau de construction vis-à-vis de l'humidité. En effet, la présence de l'eau retenue dans les pores de la brique influence significativement le confort à l'intérieur de l'habitat et les performances énergétiques de la paroi.

Le modèle numérique et les données d'entrée étant définis, la partie suivante s'intéresse à la validation et l'exploitation de nos résultats. Tout d'abord, une validation analytique et expérimentale du modèle est proposée, permettant d'exploitation de notre modèle eu

égard à l'influence des différentes paramètres d'entrée de l'air insufflé sur les transferts hygrothermiques au sein de la paroi. Enfin, une approche réelle, in situ, est réalisée, au travers de la réhabilitation d'une maison présentant des signes d'humidité sur l'enveloppe.

TROISIÈME PARTIE

Validation et Interprétation des Résultats

Introduction de la troisième partie

Dans le secteur de la construction, la brique ancienne en terre cuite est un matériau incontournable par son empreinte environnementale et sa capacité à participer efficacement aussi bien à la performance énergétique qu'au confort intérieur. Les matériaux hygroscopiques comme la brique en terre cuite échangent de l'humidité avec l'air ambiant afin d'atteindre un équilibre hygrothermique. Ces échanges de matière sont couplés à des transferts de chaleur, gouvernés par les propriétés des matériaux en présence.

Cependant, lors des travaux de rénovation du patrimoine ancien, l'absence de prise en compte des propriétés spécifiques des briques en terre cuite - et autres matériaux hygroscopiques - dans les transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des parois conduit fréquemment à une mauvaise estimation des performances énergétiques de l'enveloppe du bâti ancien. Ce constat montre la nécessité d'études scientifiques complémentaires pour contribuer à améliorer l'évaluation des performances des parois des constructions anciennes en briques de terre cuite, notamment lorsqu'elles sont soumises à des problématiques d'humidité telles que les remontées capillaires.

L'évaluation des performances hygrothermiques des enveloppes du bâtiment est généralement abordée au regard de deux méthodes : les mesures expérimentales et la simulation numérique. En général, la simulation numérique est souvent préférée aux méthodes expérimentales car ces dernières sont le plus souvent coûteuses, tant d'un point de vue financier que temporel. Mais en réalité, ces deux méthodes sont fortement complémentaires et offrent une vision claire et globale de l'efficacité des approches proposées. Une mesure expérimentale est ainsi toujours préférable pour valider un modèle de simulation numérique et envisager son exploitation dans ces conditions étendues.

Le principal objectif de cette dernière partie est donc de présenter et analyser les résultats issus des approches numériques précédemment détaillées dans le chapitre 3. Cette partie est scindée en deux chapitres. Le chapitre 5 s'intéresse, dans un premier temps, à la validation de notre modèle basé sur la loi de Darcy par comparaison de nos résultats numériques à ceux d'une étude analytique en conditions proches. Dans un second temps, un dispositif expérimental est conçu à l'échelle du laboratoire. La méthodologie expérimentale développée intègre des méthodes d'analyse de sensibilité, d'analyse d'incertitudes et d'estimation des paramètres pour s'assurer de la fidélité et de la justesse du modèle numérique. Dans un dernier temps, le modèle ainsi validé est exploité pour analyser l'influence des conditions de soufflage de l'air neuf sur le fonctionnement du dispositif de ventilation des parois humides saturées en conditions adiabatiques. Le chapitre suivant (chapitre 6) porte sur l'analyse des résultats du modèle étendu aux parois non saturées et en condi-

tions diabatiques. L'étude de l'influence des paramètres d'entrée de l'air ainsi que l'effet de l'ambiance externe et des propriétés physiques des matériaux est abordée dans ce chapitre. Les analyses sont adimensionnées afin d'interpoler des résultats vers des configurations de paroi étendues.

Interprétation de la modélisation adiabatique d'un milieu saturé

Afin de lutter contre les désordres engendrés par le phénomène de remontées capillaires, une solution aéraulique consiste en la création d'une lame d'air ventilée entre la structure porteuse et l'isolant thermique. Cette lame d'air est constituée d'un réseau de soufflage en partie inférieure de la paroi et d'un réseau d'aspiration en partie haute. Cette technique génère alors une évacuation de l'excès d'air humide et un remplacement par un air neuf, mais néanmoins dépendant des conditions de soufflage. A l'aune d'une première approche simplifiée, en accord avec la démarche scientifique explicite retenue, un modèle numérique est proposé pour reproduire les transferts de chaleur et de masse au sein d'une paroi humide saturée, en présence d'un canal d'air ventilé. Ce modèle se limite toutefois aux conditions adiabatiques du système (paroi/ventilation/isolation thermique) et à un milieu saturé en eau.

Dans un premier temps, ce modèle faisant intervenir le couplage entre les champs de température/humidité relative et de pression/vitesse, est validé au travers de deux étapes : la première consiste à comparer les résultats de notre modèle à ceux issus de la littérature, dans des conditions de simulation sensiblement différentes de notre problématique initiale. Pour ce faire, le modèle proposé par [Sellami et al., 2018] met en jeu une circulation convective forcée d'air chaud à la surface d'une paroi céramique saturée en eau. La seconde étape consiste en la conception d'un banc d'essai expérimental, reproduisant le comportement d'une paroi en briques anciennes soumise à des remontées capillaires, avec la présence d'une convection naturelle d'air ambiant en surface. Le banc d'essai est tout d'abord éprouvé pour vérifier que celui-ci satisfasse les exigences de notre modèle numérique. Puis les résultats expérimentaux sont confrontés aux résultats numériques.

Le modèle est ensuite utilisé pour examiner les caractéristiques du processus de transfert de chaleur et de masse entre deux parois verticales parallèles séparées par le canal d'air ventilé. Notre principal objectif est d'étudier les phénomènes de transfert de chaleur et de masse ayant lieu à l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air, afin d'évaluer l'effet des paramètres d'entrée (conditions de vitesse de l'air, de température et d'humidité relative de l'air insufflé) dans le canal sur la couche poreuse saturée d'eau.

5.1 Validation analytique et expérimentale du modèle numérique

5.1.1 Validation analytique

Afin de valider le code du programme élaboré pour étudier les transferts hygrothermiques à l'interface entre un milieu poreux saturé et un canal d'air ventilé, le modèle mathématique est confronté aux résultats numériques issus de la littérature, modélisant une application sensiblement différente de la configuration de notre problématique. Le modèle utilisé alors porte sur l'évaporation directe à partir d'une couche poreuse humide, en céramique, à l'intérieur d'un canal vertical pour une température constante imposée dans la couche poreuse. La seconde couche est isolée thermiquement ; le système est en conditions adiabatiques. Cette configuration a fait l'objet d'une solution analytique des équations de transferts de chaleur et de masse en convection forcée. Le modèle mathématique décrivant le transferts liquides au sein de la paroi poreuse est le modèle de Darcy généralisé. Les résultats ont été obtenus à partir des données reportées dans les travaux de Sellami [Sellami et al., 2018, Sellami et al., 2019a, Sellami et al., 2019b].

Le canal ventilé est constitué d'un air ambiant entrant à 35°C avec 30% d'humidité relative. Le milieu poreux humide est en contact direct avec l'air ambiant, à une température constante de l'eau égale à 20°C. La porosité du milieu poreux est égale à 0.3, l'épaisseur de la paroi est $d=0.01\text{m}$ et l'épaisseur du canal est $e=0.03\text{m}$. La figure 5.1 présente la configuration utilisée dans de travaux [Sellami et al., 2018].

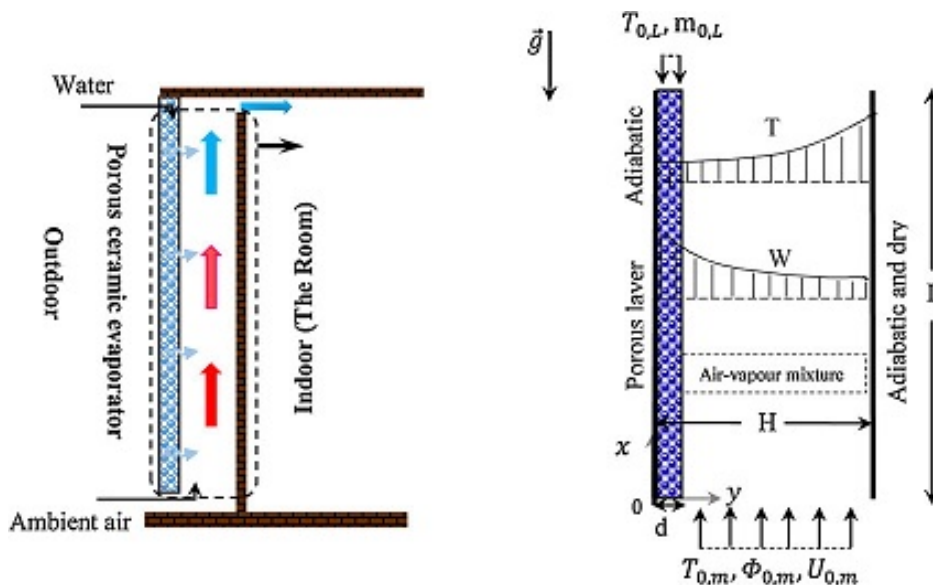


FIGURE 5.1: Configuration utilisée dans les travaux de [Sellami et al., 2018]

Les résultats de Sellami sont confrontés à ceux que nous obtenons à l'aide de notre modèle numérique. La figure 5.2 représente la distribution axiale de la température dans

le milieu poreux et dans le canal d'air des deux phases liquide et gaz à une position longitudinale ($y = 0.001\text{m}$), où l'axe x représente l'épaisseur de la paroi (de 0 à 0.01m) et l'épaisseur du canal (de 0.03m) utilisées dans l'étude [Sellami et al., 2018]. L'évolution de la température dans la phase liquide est constante à 20°C et prend une forme linéaire en régime établi. Une fois en contact avec l'air soufflé dans le canal, la température augmente de manière exponentielle jusqu'à atteindre la température de l'air de 35°C. L'interprétation des résultats de température montre un échange thermique intense à l'interface entre la couche poreuse et le canal avec une augmentation de la température de 20°C à environ 35°C. L'écart entre les résultats analytiques et ceux issus de notre modèle numérique est présenté sous la forme de résidus, déterminés par l'expression 5.1. Les résultats que nous obtenus sont en parfait accord avec ceux de l'étude utilisée.

$$r_i = \bar{y}_i - \bar{y} \quad (5.1)$$

avec r_i le résidu, \bar{y}_i la valeur analytique et \bar{y} la valeur numérique.

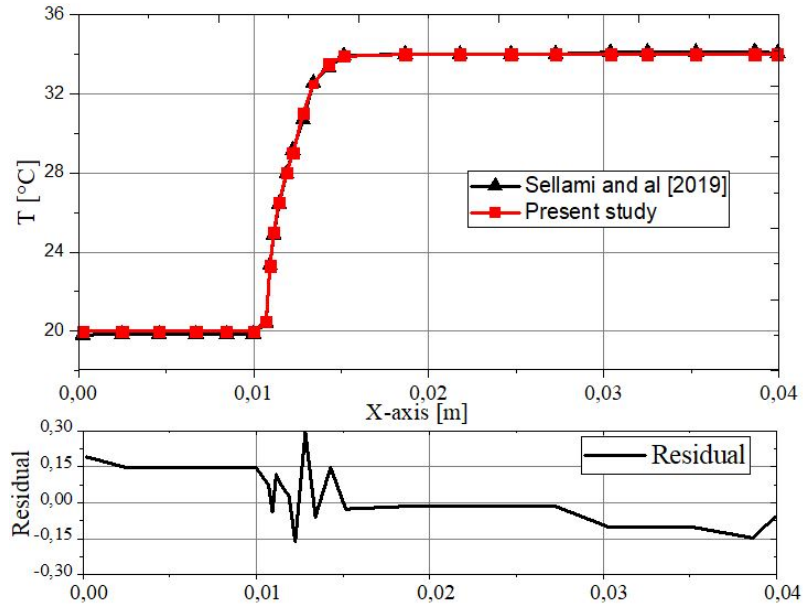


FIGURE 5.2: Distribution axiale de la température dans le milieu poreux et dans le canal

La figure 5.3 illustre le profil de vitesse dans les deux phases (liquide et gaz) à une position longitudinale égale à 1.5 m (à mi-hauteur du canal). Le profil de vitesse prend une forme parabolique dans la phase gazeuse mettant en évidence le flux laminaire dans le canal avec les effets de friction (forces de frottement) de chaque côté. L'évolution au long de l'axe horizontal de la température et de la vitesse dans l'ensemble des phases liquide et gazeuse, déterminée avec notre code numérique, est en bon accord quantitatif et qualitatif avec celle déduite des solutions analytiques de [Sellami et al., 2018]. En comparant les valeurs des deux modèles, les valeurs résiduelles sont faibles (moins de 1% des quantités physiques calculées) et distribuées de manière homogène autour de zéro.

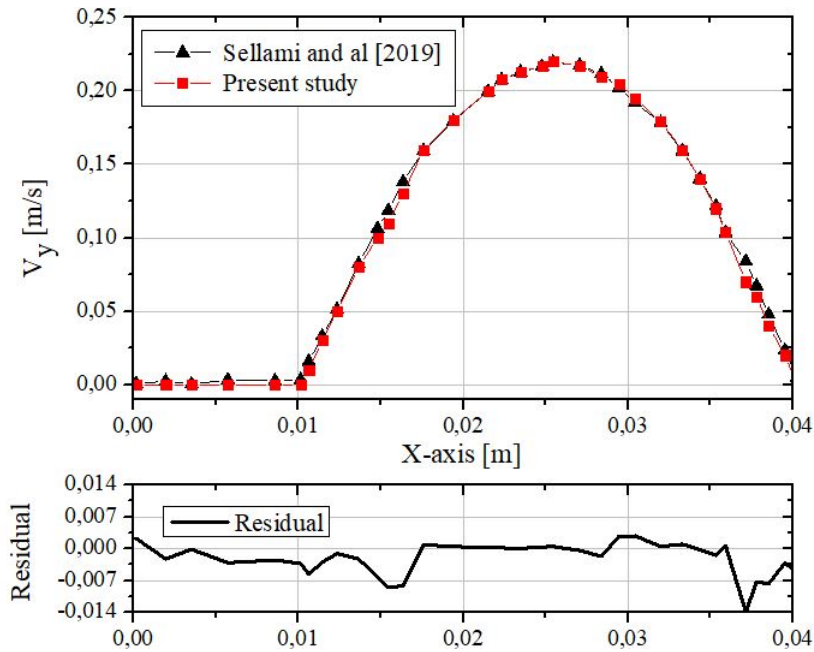


FIGURE 5.3: Distribution axiale de la vitesse dans le milieu poreux et dans le canal

5.1.2 Conception d'un banc d'essai expérimental

En sus de l'approche analytique précédente, une campagne expérimentale a été menée pour valider le modèle numérique développé. Nous avons alors conçu et réalisé un banc d'essai à échelle réduite au sein du laboratoire de recherche. Ce banc d'essai vise à reproduire les phénomènes de remontées capillaires par effet mèche au sein d'une paroi en briques anciennes, naturellement ventilée et doublée avec un isolant thermique. Le banc d'essai devrait ainsi permettre d'obtenir des jeux de données qualitatives et quantitatives en vue de valider le modèle numérique proposé et de confirmer les hypothèses fondamentales retenues.

La figure 5.4 présente le principe du banc d'essai, constitué d'un mur en briques maçonnées à chant (épaisseur du mur de 11cm) sur lequel un canal ventilé est réalisé à l'aide de PVC afin d'assurer l'absence de transfert hygrique vers l'isolant (épaisseur de la lame d'air de 3cm). Tout d'abord, le dispositif est composé d'un bac étanche, fabriqué en PVC, en pied de mur pour assurer les remontées capillaires. Dans l'objectif de reproduire les conditions thermiques maîtrisables et similaires à celle d'un sol, un bain thermostaté est utilisé pour piloter la température de l'eau et la maintenir constante à 20°C. L'eau provenant du bain thermostaté alimente en continu le bac. Un flotteur et une électrovanne sont utilisés pour contrôler le niveau du réservoir d'eau en pied du mur. La paroi testée est ensuite assemblée sur une grille métallique permettant d'immerger le pied du mur sur une hauteur de 2cm environ. Ce principe engendrera alors des remontées d'eau au sein de la paroi par capillarité (effet mèche, en l'absence de solutions salines dans l'eau pour éviter le phénomène d'électro-osmose). Dans une prochaine étape, un réseau de soufflage et d'aspiration pourra être installé en parties basse et haute de la paroi pour imposer une

vitesse de ventilation dans le canal entre le mur et l'isolant thermique.

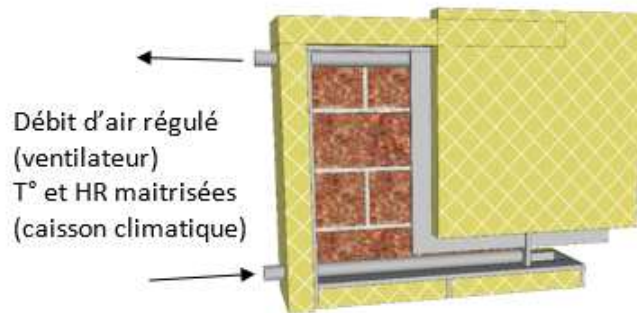


FIGURE 5.4: Descriptif du banc d'essai

La figure 5.5 illustre le bac étanche ainsi que la grille métallique support du mur. Le mur en lui-même est construit en briques de terre cuite, récupérées lors de la déconstruction d'une maison antérieure à 1948. Un mortier traditionnel, à base de chaux et de sable, est formulé pour assembler les briques en terre cuite. Le dosage du mortier est similaire à la technique traditionnelle de pose, à savoir 1 dose de chaux, 4 doses de sable et 0.5 dose d'eau. Le sable utilisé dans le mortier est de classe granulaire 0/5, riche en fines, avec une répartition granulométrique régulière. Le sable utilisé montre un indice de propreté important, avec un Equivalent de Sable supérieur à 75%. La propreté du sable assure l'absence de sels minéraux électriquement chargés pour limiter le phénomène d'électro-osmose, générateur de remontées capillaires hors effet mèche.



FIGURE 5.5: Conception du support expérimental

La paroi est constituée de huit briques à chant, disposées en quinconce pour assurer sa stabilité de la paroi et être le plus représentatif des techniques de pose traditionnelles. La faible épaisseur de la paroi (11cm) est choisie pour accélérer la saturation du mur et optimiser les transferts hygrothermiques en son sein. Au final, le mur présente une largeur de 42cm pour une hauteur de 45cm. Les briques ont été percées jusqu'à mi-épaisseur avant assemblage pour prévoir la mise en œuvre de différents capteurs.

Des sondes hygrothermiques de type HMP60 de chez VAISALA sont utilisées pour mesurer l'évolution de la température et de l'humidité relative dans la paroi. Ces sondes montrent une plage de mesure de -40°C à 60°C (précision de 0.1°C) et de 0%HR à 100%HR (précision de 3%HR), sans endommagement pour les hautes humidités relatives. Au total, huit sondes sont placées à différentes hauteurs (5.5cm, 17.5cm, 29.5cm et 41.5cm) selon deux axes verticaux séparés de 10cm, comme présenté sur la figure 5.5. Une bande d'étanchéité est collée sur la face externe du mur en briques pour annihiler les transferts d'humidité vers l'extérieur. De plus, un isolant en fibre de bois, de 8cm d'épaisseur, est ajouté pour garantir des conditions adiabatiques vers l'extérieur. La figure 5.6 illustre la mise en place de la bande d'étanchéité ainsi que du doublage avec l'instrumentation grâce aux sondes hygrothermiques qui viennent se loger dans les percements des briques composant le mur.



FIGURE 5.6: Mise en place des capteurs sur le mur

Sur la face intérieure, une plaque de PVC de 1cm d'épaisseur a été installée à une distance de 3 cm de la paroi testée afin de délimiter le canal ventilé. 8 capteurs supplémentaires (sondes HMP60) ont été placés pour suivre l'évolution de l'humidité relative et la température dans le canal, à mi-épaisseur. Les mesures de la vitesse et de température de l'air à l'intérieur du canal sont effectuées par 3 anémomètres (modèle CTV-210R de chez KIMO) en pied, à mi-hauteur et en tête du canal. Des supports spécifiquement conçus permettent de maîtriser l'horizontalité des capteurs de vitesse (voir figure 5.7). Les anémomètres présentent une plage de mesure de la vitesse de l'air de 0.15m/s à 30m/s (précision de 0.05m/s) et une plage de mesure de la température de 0°C à 50°C (précision de 0.1°C). Par ailleurs, 8 thermocouples de type-T sont utilisés pour vérifier la température de l'eau issue du bain thermostaté, l'uniformité de la température de l'air ambiant au voisinage du dispositif, la température en sous-face de la paroi en briques et la tempéra-

ture au sein des joints à base de chaux. Au total le dispositif présente 16 points de mesure de l'humidité relative, 27 points de mesure de la température et 3 points de mesure de la vitesse de l'air. Les données sont enregistrées par une centrale d'acquisition (multiplexeur MAQ20 de chez DataForth) à une fréquence de 10Hz, à l'exception des anémomètres qui utilisent des modules indépendants, de type C310 de chez KIMO.



FIGURE 5.7: Mise en place des capteurs sur la plaque

La figure 5.8 résume l'implantation des différentes sondes et capteurs sur le dispositif expérimental.

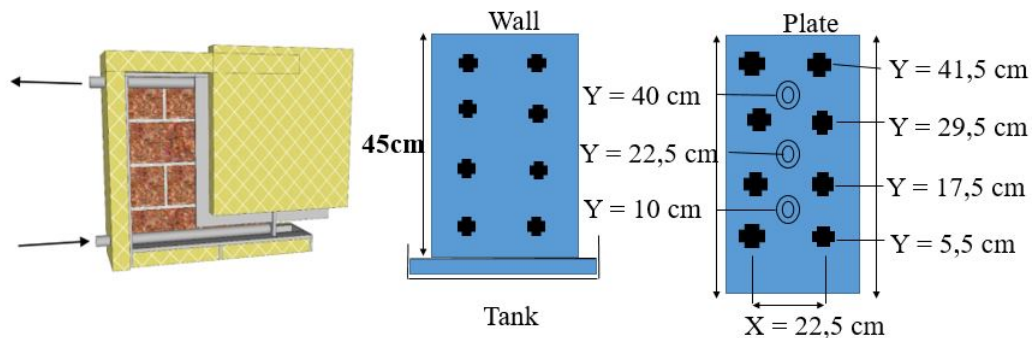


FIGURE 5.8: Position des capteurs hygrothermiques et des anémomètres

La figure 5.9 montre l'intégralité du banc expérimental avec les différents outils, capteurs, et instruments utilisés pour le pilotage du dispositif. Le complexe [paroi en briques et canal ventilé] est isolé grâce à un isolant hygroscopique en fibres de bois de 8cm d'épaisseur afin de reproduire les conditions adiabatiques simulées par l'approche numérique. En partie basse, l'isolant est recouvert d'un film en aluminium pour prévenir des éventuelles fuites et/ou débordement du réservoir d'eau.

Dans un premier temps, la température de l'eau du réservoir est maintenue constante à l'aide d'un bain thermostatique, à 16°C. L'évolution de l'humidité relative dans le mur

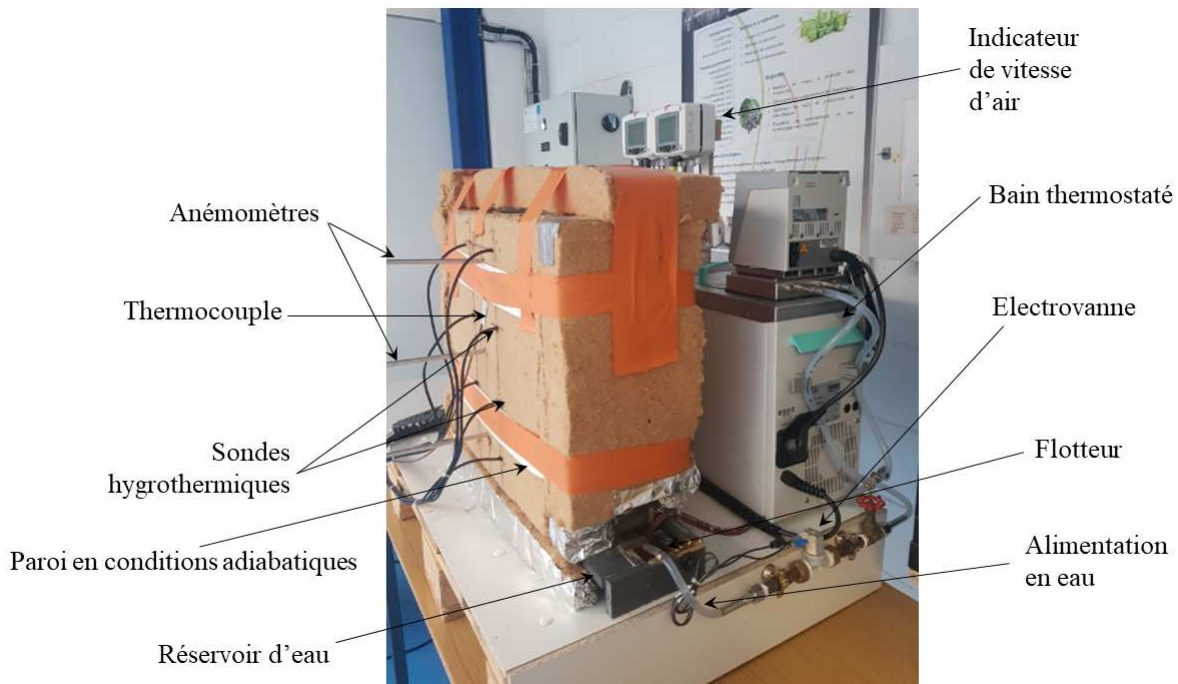


FIGURE 5.9: Conception et réalisation d'un dispositif expérimental de validation du modèle numérique

permet d'identifier l'état d'équilibre, où l'eau remonte dans le mur par effet succion au travers du réseau capillaire de la brique poreuse, et ce jusqu'à ce que la saturation soit atteinte. Dans ce cas, l'humidité relative dans le mur à différentes positions est mesurée égale à 100% (ou proche). Lorsque la saturation de la paroi est assurée, la circulation de l'air par convection naturelle à l'intérieur du canal est mesurée, à l'aide des anémomètres, à environ 0.05m/s, ce qui correspond à une ventilation naturelle. L'air insufflé présente une température moyenne de 18°C et une humidité relative de l'ordre de 70%, soit une humidité absolue 11g/kg. Ces conditions correspondent à celles de l'air ambiant du laboratoire.

5.1.3 Présentation des résultats expérimentaux

La figure 5.10 illustre les évolutions temporelles de la température et de l'humidité relative au sein du dispositif expérimental avant et après la génération des remontées capillaires. La première phase (avant l'apparition des remontées capillaires) présente les mesures de température et d'humidité relative dans la paroi lors de la mise en marche du dispositif expérimental sans l'alimentation du bac en eau. Cette phase s'étale sur une durée de 720 heures (ce qui correspond à 1 mois) où le principal objectif est de garantir le bon fonctionnement du dispositif avant la mise en eau. Ensuite le bac sur lequel repose le mur est alimenté en eau provenant du bain thermostaté. L'acquisition durant cette seconde période porte sur 1 mois également.

Les mesures sont reportées à l'aide des sondes hygrothermiques placées à différentes hauteurs dans le mur. Dans un premier temps, l'air pénètre dans le canal par convection

naturelle. La température et l'humidité relative de l'air correspondent à l'ambiance interne du laboratoire dont la température et l'humidité relative sont respectivement égales à 18°C et 70%. On constate dans la phase avant génération des remontées capillaires que la température dans le bas du mur varie entre 16°C et 17°C, tandis que la température tout au long de la paroi est proche de 18°C ce qui correspond à la température de l'air ambiant. Ceci peut être justifié par l'absence d'un isolant au pied du mur. De plus, l'humidité relative varie entre 40% et 50% tout au long de la paroi. Les échanges convectifs sont plus importants en pied de la paroi, au niveau de l'entrée de l'air neuf (convection naturelle). Le phénomène de convection engendre une distribution régulière de la température dans la paroi poreuse, avec une température plus froide en pied qui augmente au-fur-et-à-mesure de la progression du flux d'air plus chaud le long du mur.

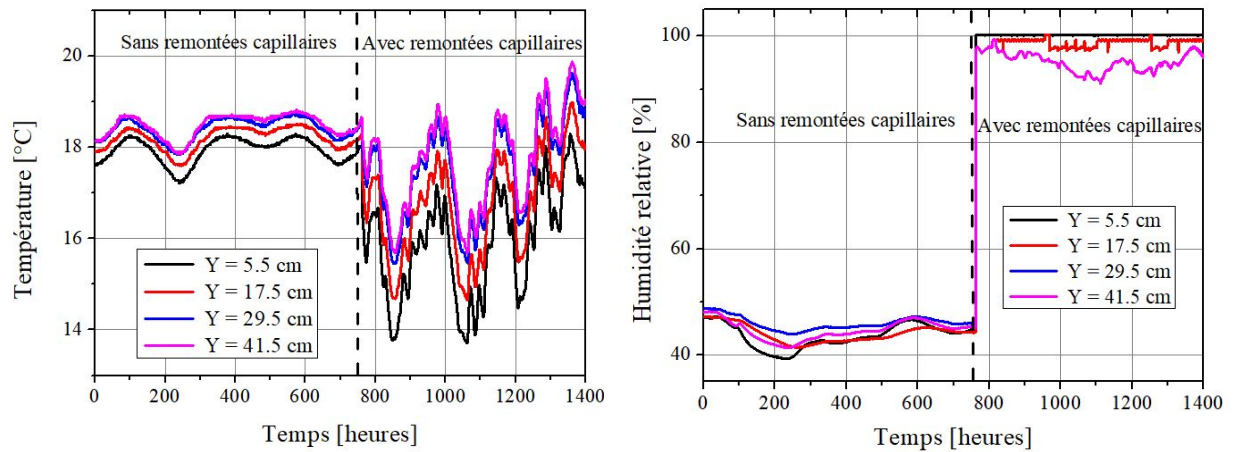


FIGURE 5.10: Évolutions temporelles de la température et de l'humidité relative au sein du mur

Lors de l'alimentation continue du bac en eau, on constate que l'évolution de la température dans le mur chute par rapport à la température initiale. En bas de mur la température varie autour de 16°C ce qui correspond à la température de l'eau mesurée à l'aide d'un thermocouple placé au fond du bac ($16^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). L'humidité relative en bas de mur s'accroît rapidement pour atteindre 100% ce qui correspond à la saturation des pores des briques composant le mur. A mesure que l'eau remonte dans le mur par succion capillaire, l'évolution de la température de la paroi au cours du temps varie de manière importante en fonction des remontées capillaires. La température le long de la paroi varie autour de 18°C quand l'humidité relative est proche de la saturation.

La figure 5.11 reporte les évolutions temporelles de la température de l'air dans le canal ventilé, mesurées par les sondes hygrothermiques placées à différentes positions verticales (5.5cm, 17.5cm, 29.5 cm et 41.5cm), et de l'humidité relative de l'air dans le canal, mesurée par les sondes hygrothermiques placées sur la plaque en PVC. La température de l'air à l'entrée du canal sans remontées capillaires correspond à la température de l'ambiance interne du laboratoire, qui est comprise entre 17°C et 19°C. Dès l'introduction des remontées capillaires, on constate que la température moyenne de l'air dans le canal

décroît tandis que l'humidité relative de l'air initialement comprise entre 35% et 45% augmente en fonction du temps, et varie entre 70% et 80%. Ceci est due aux transferts hygrothermiques entre le mur et l'air circulant à son voisinage. En effet, suite aux remontées capillaires l'air se refroidit car il se charge en humidité. Ce phénomène est gouverné par les échanges par convection de chaleur à l'interface entre le fluide et la paroi.

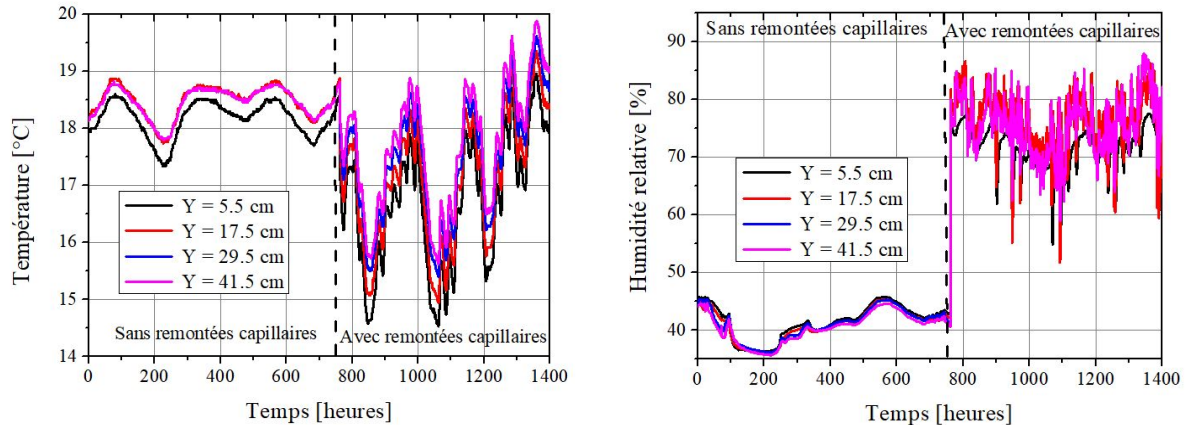


FIGURE 5.11: Évolutions temporelles de la température et l'humidité relative dans le canal

Enfin, le tableau 5.1 illustre les mesures expérimentales de la vitesse de l'air dans le canal, enregistrées par les différents anémomètres. On constate que la vitesse de l'air est constante tout au long du canal, à la précision du capteur près ($\pm 3\%$ de la lecture). La vitesse de l'air, en circulation libre, est gouvernée par le phénomène de convection thermique à la surface de la paroi poreuse qui induit un mouvement d'air dans le canal.

TABLEAU 5.1: Mesures expérimentales de la vitesse de l'air dans le canal

| | U_{10cm} | $U_{22.5cm}$ | U_{40cm} | Moyenne |
|---------------|------------|--------------|------------|---------|
| Vitesse [m/s] | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

La figure 5.12 reporte les évolutions de la température moyenne dans le mur et dans le canal, mesurées à l'aide des sondes hygrothermiques. La température en pied de mur est de 16°C , gouvernée par la température de l'eau du réservoir, elle-même pilotée par le bain thermostaté. L'air insufflé naturellement a une température moyenne de l'ordre de 18°C . Lorsque l'air pénètre dans le canal, en pied de mur, celui-ci se refroidit au contact de la paroi froide pour atteindre une température d'équilibre de l'ordre de 17.2°C . Au-fur-et-à-mesure de la progression de l'air le long de la paroi, des interactions avec la paroi se produisent, entraînant une augmentation progressive de la température du mur, jusqu'à 18°C en tête. Ce phénomène met clairement en lumière les échanges hygrothermiques entre le mur en briques et le canal d'air, notamment à l'entrée du canal. La température de l'air dans le canal se stabilise rapidement autour de 18°C , tandis que le mur montre un

équilibre plus lent en raison des propriétés thermiques de la paroi, notamment sa capacité thermique massique et sa diffusivité thermique.

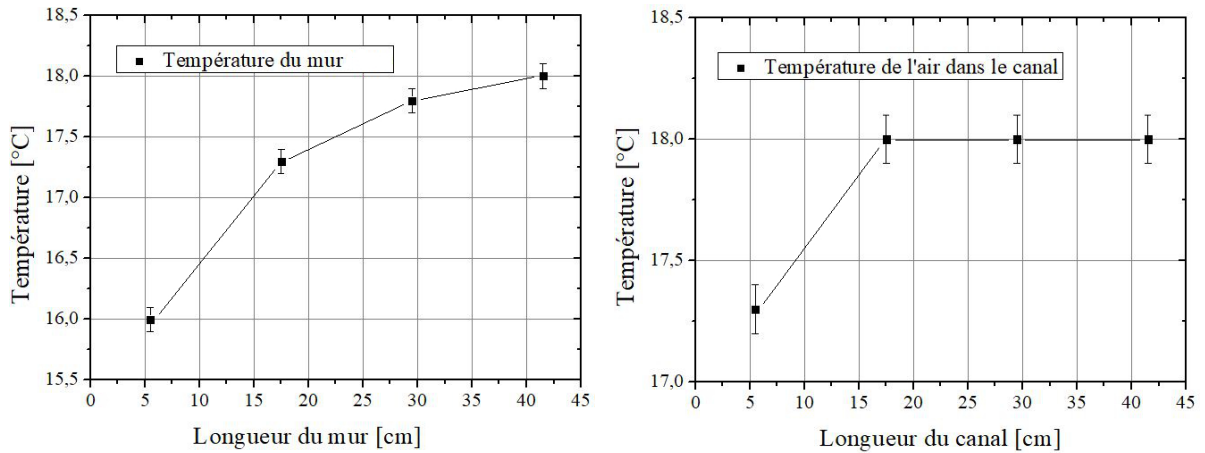


FIGURE 5.12: Évolutions expérimentales de la température dans le mur et dans le canal

La figure 5.13 illustre les évolutions de l'humidité relative mesurées dans la paroi et dans le canal. Comme attendu, l'humidité relative dans le mur est proche de 100%, démontrant l'influence des remontées capillaires par succion. La base du mur montre une humidité relative supérieure à 99,5% quand la tête de la paroi atteint 97%, malgré l'augmentation progressive de la température dans le mur, et ainsi l'accroissement de la capacité de l'air à stocker les particules d'eau. Dans le canal, l'air entre dans le canal avec une humidité relative de 70% et se charge progressivement d'humidité au contact de la paroi, pour atteindre une humidité relative moyenne de 74%. Couplée avec l'augmentation de la capacité de l'air à stocker l'eau (au travers de la pression de vapeur saturante), l'air dans le canal contient ainsi une plus grande quantité d'humidité, c'est-à-dire une humidité absolue supérieure. L'humidité absolue de l'air dans le canal atteint alors 10g/kg, soit une augmentation par rapport aux conditions hygrothermiques de l'air entrant de l'ordre de 10 à 20%.

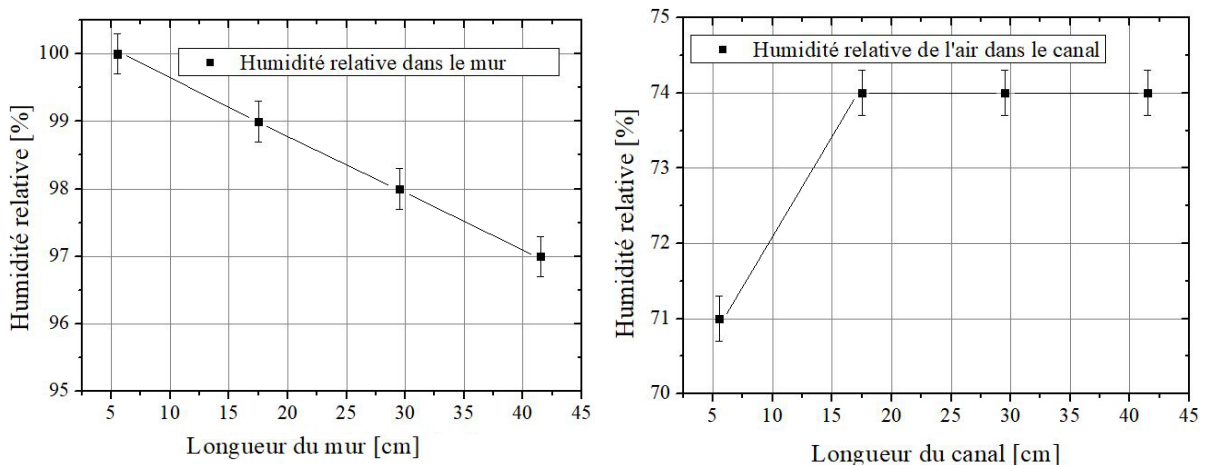


FIGURE 5.13: Évolutions expérimentales de l'humidité relative dans le mur et dans le canal

Ces observations expérimentales sont régies par les échanges hygrothermiques par convection à l'interface entre la paroi humide et froide et l'air circulant naturellement dans le canal. Les échanges sont, comme attendu, plus importants en partie basse de la paroi, là où, réellement, les remontées capillaires sont plus importantes, avec les humidités relatives les plus élevées. A l'entrée du canal, l'air est refroidi au contact avec le mur et son humidité relative augmente. Au-fur-et-à-mesure de la progression de l'air le long de la paroi, la température du mur augmente pour atteindre un état d'équilibre correspondant à la température de l'air, au travers d'un processus de transfert de chaleur sensible.

5.1.4 Validation expérimentale

Le code numérique que nous avons élaboré pour modéliser les transferts hygrothermiques à l'interface entre une paroi saturée en eau et un fluide circulant dans un canal, est basé sur des paramètres d'entrée déterminés expérimentalement dans le chapitre 4. Les propriétés physiques de l'air, communément admises, sont issues de la littérature. Les dimensions de la paroi et l'épaisseur de la lame d'air utilisée dans le modèle numérique sont identiques à ceux du dispositif expérimental : le mur, considéré homogène (les joints à la chaux ne sont pas modélisés), présente une épaisseur de 11cm (les briques en terre cuite sont maçonnées à chant sur une surface de 42×45 cm), la lame d'air est large de 3cm. Le tableau 5.2 résume les propriétés multi-physiques du milieu poreux et de l'air utilisées dans le code numérique. Les isothermes de sorption de la brique sont présentées sous la forme du modèle GAB, dont les coefficients sont résumés dans la tableau 4.4. Le coefficient de diffusion de l'eau liquide dans la brique est présenté en figure 4.28.

TABLEAU 5.2: Paramètres d'entrée du modèle numérique adapté au montage expérimental

| | Unité | Paramètres du milieu poreux | Paramètres de l'air |
|-------------------------------------|---|--------------------------------|------------------------|
| Masse volumique sèche | [kg/m ³] | 1814 | 1.2 |
| Porosité | - | 0.3 | - |
| Conductivité thermique | [W/m.K] | 0.45 | 0.026 |
| Capacité thermique | [J/K.kg] | 800 | - |
| Diffusivité thermique | [m ² /s] | - | 2E-5 |
| Chaleur latente | [J/kg] | - | 2.3E6 |
| Teneur en eau maximale | [kg/m ³] | 160 | - |
| Coefficient de diffusion hygrique | [m ² /s] | 1.47E-8 | - |
| Effusivité hygrique | [kg ² .Pa.s ^{1/2}] | 3.53E-7 | - |
| Perméabilité à la vapeur d'eau | [kg/m.s.Pa] | 3.36E-13 | 2E-10 |
| Perméabilité à l'eau | [m/s] | 10E-11 | - |
| Coefficient d'absorption capillaire | [kg/m ² .s ^{0.5}] | 0.52 | - |
| Viscosité dynamique | [kg/m.s] | - | 18.5E-5 |
| Viscosité cinématique | [m ² /s] | - | 15.6E-5 |

La figure 5.14 représente la distribution axiale de la température de la paroi humide mesurée expérimentalement et déterminée numériquement. L'eau (issue des remontées capillaires) entre en pied de mur à une température de 16°C. Le système est alors en régime établi avec une température de la paroi de 16°C. Le flux d'air insufflé dans le canal est considéré à une température de 18°C dans le modèle numérique. A mesure de la progression du flux d'air le long de la paroi, la température du mur se stabilise autour de 18°C, température de l'air insufflé dans le canal. L'interprétation de deux évolutions (expérimentale et numérique) montre une allure similaire avec un niveau de superposition satisfaisant. De plus, les courbes prouvent que le mur a une capacité de stockage de la chaleur assez élevée, qui est sensiblement supérieure à la capacité thermique réelle. En effet, le mur est supposé être homogène alors qu'en réalité celui-ci est hétérogène, car composé de briques et de mortier ce qui justifie la différence de capacité thermique du mur.

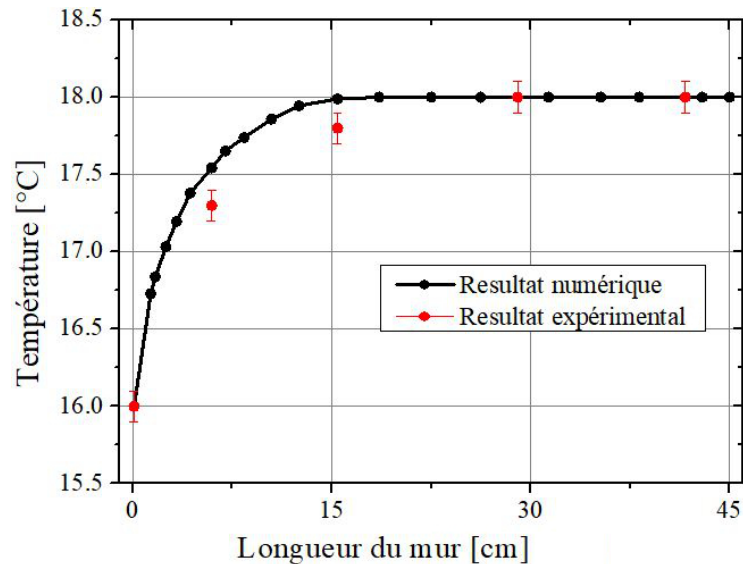


FIGURE 5.14: Validation expérimentale de la température au sein de la paroi poreuse saturée

Les sondes hygrothermiques placées le long du canal mesurent la température et l'humidité relative. Ces données permettent alors de déterminer l'humidité absolue ϕ^{abs} grâce à l'expression suivante :

$$\phi^{abs} = \frac{M_L}{M_a} \times \frac{P_v}{P_a} \quad (5.2)$$

avec

- M_L : la masse molaire de l'eau [g/mol]
- M_a : la masse molaire de l'air [g/mol]
- P_v : la pression de vapeur partielle [Pa]
- P_a : la pression de l'air [Pa]

La pression de vapeur P_v dépend de la pression de vapeur saturante P_v^{sat} déterminée comme suit, avec ϕ l'humidité relative :

$$P_v = \phi \times P_v^{sat}(T) \quad (5.3)$$

où

$$P_v^{sat}(T) = \exp\left(23.5771 - \frac{4042.9}{T - 37.58}\right) \quad (5.4)$$

Le tableau 5.3 présente une comparaison des températures et des humidités relatives et absolues issues des approches numérique et expérimentale, dans le canal d'air, pour différentes positions longitudinales. L'humidité absolue dans le canal reste constante lorsque la température de la paroi devient égale à celle de l'air. On constate un écart de 5% entre l'humidité absolue calculée numériquement et celle mesurée expérimentalement à l'entrée du canal. La vitesse de l'air est le facteur principal qui influence les échanges convectifs entre la paroi et le canal d'air. Numériquement, l'humidité absolue est plus importante que celle mesurée expérimentalement en pied de la paroi, probablement gouvernée par l'incertitude de mesure des capteurs de vitesse d'air (de l'ordre de 3%). La vitesse de l'air à l'entrée du canal est probablement sensiblement inférieure, freinée par les charges linéaires dynamiques engendrées par la géométrie du dispositif expérimental (le canal est orienté perpendiculairement par rapport à la source d'entrée d'air).

TABLEAU 5.3: Identification de l'humidité absolue, à partir de la température et de l'humidité relative, à différentes positions dans le canal

| | | Position verticale des capteurs | | | |
|----------------------------|---------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|
| | | 5.5cm | 17.5cm | 29.5cm | 41.5cm |
| T expérimentale | [°C] | 17.2°C | 18°C | 18°C | 18°C |
| ϕ expérimentale | [%] | 71% | 74% | 74% | 74% |
| ϕ^{abs} expérimentale | [g/m ³] | 11.0 | 11.5 | 11.5 | 11.5 |
| ϕ^{abs} numérique | [g/m ³] | 11.50 | 11.51 | 11.51 | 11.51 |

La confrontation des résultats numériques avec ceux issus du banc d'essai expérimental démontre que le modèle numérique développé semble validé. Cette seconde approche, couplée avec la validation analytique, nous permet d'approfondir les résultats obtenus en s'intéressant à des études numériques complémentaires, notamment centrées sur l'influence des conditions hygrothermiques (température et degré d'humidité relative) et aérauliques (vitesse) de l'air entrant dans le canal ventilé.

5.2 Analyse de l'influence des conditions hygrothermiques de l'air insufflé

Pour identifier l'influence de la réponse hygrothermique de la paroi face aux variations des conditions d'entrée d'air dans le canal, nous avons modélisé le comportement hygrothermique d'une paroi en briques de terre cuite de 35cm d'épaisseur soumise à des remontées capillaires. La paroi est considérée saturée en eau et homogène. Les propriétés des matériaux sont identiques à celles du banc d'essai expérimental (voir tableau 5.2). La face extérieure de la paroi est en conditions adiabatiques. Un canal d'air ventilé est adossé à la paroi (épaisseur du canal de 3cm). Finalement, un isolant non hygroscopique est modélisé du côté intérieur de l'enveloppe, en conditions adiabatiques. La modélisation numérique est en 2D, avec une hauteur de 150cm (voir figure 5.15)

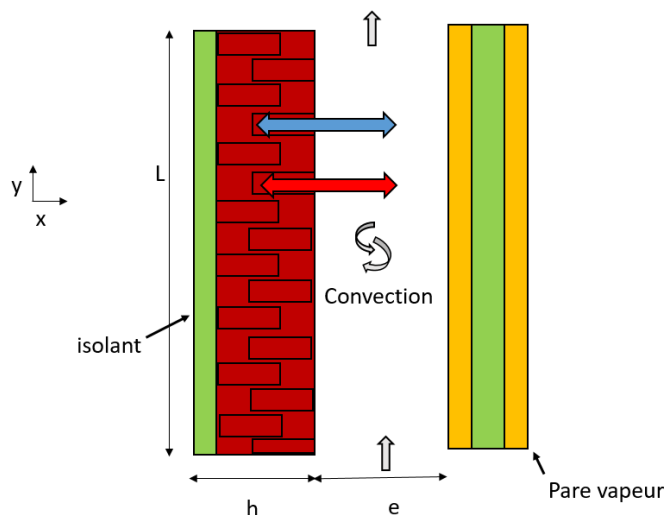


FIGURE 5.15: Géométrie modélisée

Le mur en brique terre cuite est assimilé à un milieu poreux saturé où les transferts de chaleur et de masse sont régis par le modèle de Darcy simple. L'écoulement d'air dans le canal ventilé, en convection forcée et en régime laminaire, est décrit par les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et d'espèces. La discrétisation des équations de bilan est effectuée par une méthode hybride, combinant à la fois la méthode des volumes finis et la méthode de Lattice-Boltzmann. La formulation mathématique du problème et la méthode de résolution numérique du modèle sont présentées dans le chapitre 3.

Dans un premier temps, une étude de la sensibilité du maillage est effectuée. Pour ce faire, trois finesses de maillage différentes sont étudiées, pour un pas de temps constant : 31×51 , 31×151 et 41×151 . La figure 5.16 illustre le profil axial de la température au coeur milieu poreux pour les trois différentes densités de maillage. Un très faible écart est visible dans ces résultats, démontrant que la densité du maillage a une faible incidence sur les résultats numériques, comme attendu lors de la formulation du modèle. Finalement, une

densité intermédiaire est retenue (composée de 31 éléments sur l'axe (Ox) et 151 éléments sur l'axe (Oy)) afin de conserver un juste compromis entre précision des résultats et coût en calculs.

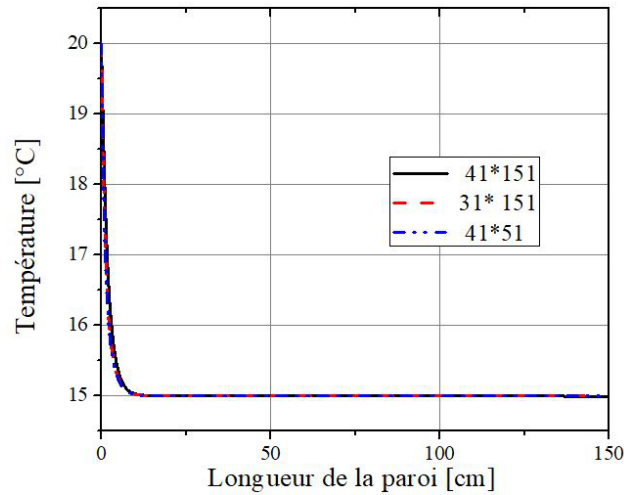


FIGURE 5.16: Étude de sensibilité de maillage utilisé

L'étude numérique porte sur la variation des paramètres d'entrée de l'air insufflé dans la lame d'air, tout en maintenant la paroi dans un état saturé en eau. L'objectif est de visualiser l'effet de la variation des conditions climatiques et dynamiques de l'air ambiant insufflé dans le canal sur les échanges hygrothermiques à l'interface entre le milieu poreux et le fluide circulant à son voisinage. Neuf cas différents sont simulés. La température de la paroi est initialement égale à 20°C et la vitesse de l'air est, dans un premier temps, constante, maintenue à 0.01m/s. Dans un second temps, la vitesse de soufflage de l'air est variable, entre 0.01m/s et 0.15m/s, pour les trois conditions de température et d'humidité relative correspondantes aux saisons estivale, hivernale et intermédiaire. Le tableau 5.4 résume ces conditions initiales de ventilation.

TABLEAU 5.4: Conditions climatiques de l'air insufflé

| | Unité | Hivernal | Estival | Intermédiaire |
|----------------------------|-------|----------|---------|---------------|
| Température de l'air | [°C] | 5 | 35 | 18 |
| Humidité relative de l'air | [%] | 95 | 30 | 50 |
| Vitesse de l'air (cas 1) | [m/s] | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Vitesse de l'air (cas 2) | [m/s] | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Vitesse de l'air (cas 3) | [m/s] | 0.15 | 0.15 | 0.15 |

5.2.1 En conditions hivernales

Afin d'évaluer l'effet du dispositif aéroulrique en conditions hivernales sur la paroi poreuse, un air ambiant est soufflé dans le canal à une température de 5°C et une humidité

relative de 95%, ce qui correspond à une humidité absolue proche de $5.5\text{g}/\text{m}^3$. La vitesse de l'air est considérée constante, égale à $0.01\text{m}/\text{s}$. La figure 5.17 illustre les champs de température sous forme d'isothermes dans les deux phases (liquide dans la paroi (a) et gazeuse dans le canal (b)), lors d'un soufflage d'air dans des conditions hivernales. La température de l'air observée dans le canal est fortement resserrée autour de 5°C avec une légère augmentation (négligeable) au voisinage de l'entrée d'air.

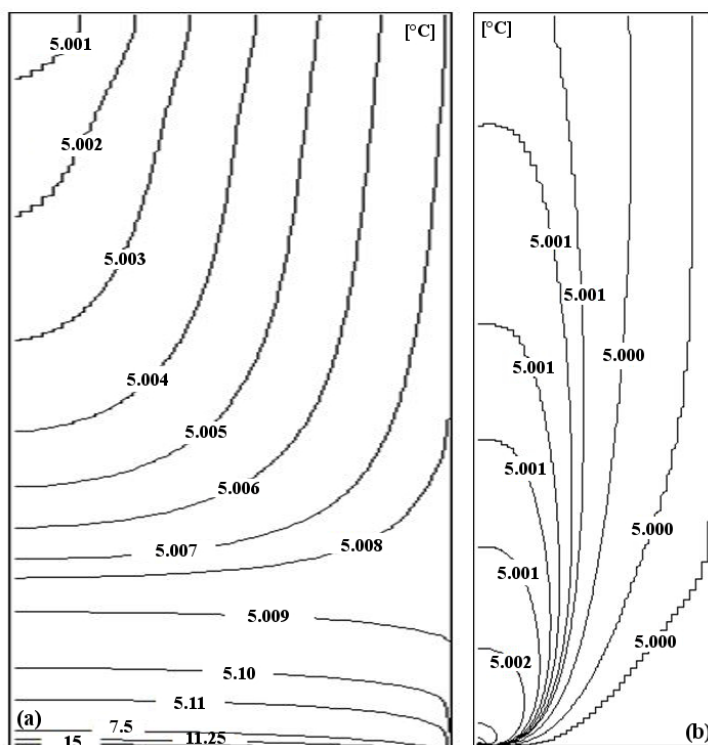


FIGURE 5.17: Champs des isothermes dans le milieu poreux (a) et dans le canal ventilé (b)

La figure 5.17(a) montre que la température de l'eau dans la couche poreuse diminue rapidement au-fur-et-à-mesure de la progression verticale du flux d'air dans le canal. L'eau liquide qui remonte dans la paroi par effet de succion entre à une température de 20°C , ce qui correspond à la température du sol. Au contact de l'air frais et froid soufflé en pied du canal, la paroi se refroidit rapidement pour tendre vers 5°C . La diminution de la température de la paroi est due aux actions couplées des transferts de chaleur et de masse par convection entre la paroi saturée en eau et le canal. Cette baisse de température par rapport à la température initiale de l'eau montre que la quantité de chaleur fournie par conduction à travers la paroi et par convection par l'air est inférieure à la quantité de chaleur latente utilisée pour l'évaporation de l'eau liquide de surface.

Les résultats prouvent ainsi que le fait de souffler de l'air en hiver, alors que la teneur en vapeur d'eau de l'air est considérablement élevée (car la pression de vapeur saturée est faible), affecte sensiblement les échanges de chaleur et de masse entre les phases gazeuse et liquide. En effet, lorsque l'humidité relative de l'air est élevée, la résistance du flux air-vapeur au transfert de masse augmente. De plus, le fait de souffler de l'air avec une

humidité relative élevée à l'entrée réduit le flux de chaleur latente. Cependant, il n'y a pas d'effet notable sur la chaleur sensible, ce qui justifie que la température de l'air soit moins affectée. Cette observation indique également que la direction du transfert de chaleur latente court du flux de gaz vers la paroi. Ceci justifie que la température dans la couche poreuse, présentée sur la figure 5.17(a) diminue progressivement dans la paroi lorsque la température de l'eau tend vers la température de l'air insufflé.

La figure 5.18 montre l'évolution des champs d'iso-concentration de la teneur en vapeur d'eau dans le canal d'air, où l'on met en évidence une baisse sensible de l'humidité absolue dans le canal depuis l'entrée vers la sortie du canal de $5.5\text{g}/\text{m}^3$ à $4.9\text{g}/\text{m}^3$. Cette diminution de $0.6\text{g}/\text{m}^3$ peut être justifiée par le phénomène de condensation qui se produit à l'interface entre la paroi chaude et le canal ventilé : la vapeur d'eau contenue dans l'air insufflé se condense sur la paroi interne de la couche poreuse. La condensation a lieu lorsque la température de la paroi est inférieure au point de rosée. L'apparition de la condensation à l'interface entre la paroi et la lame d'air peut engendrer des désordres structurels mais également du confort d'été, le cas échéant.

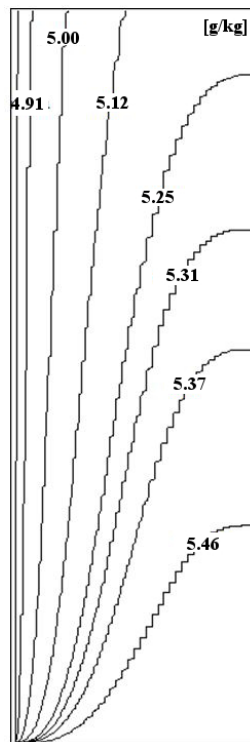


FIGURE 5.18: Champs d'iso-concentration de la vapeur d'eau dans la lame d'air

La figure 5.19 présente la quantité de vapeur d'eau transmise entre la couche poreuse et le flux d'air. Cette approche montre que la vapeur d'eau à l'interface entre la paroi et la lame d'air diminue progressivement lorsque le flux d'air se déplace vers la tête de la structure, confirmant la condensation à l'interface de la paroi interne entre la couche poreuse et le canal d'air ventilé notamment dans la partie inférieure de la paroi humide où la quantité de vapeur d'eau transmise est de $4.881\text{g}/\text{m}^3$.

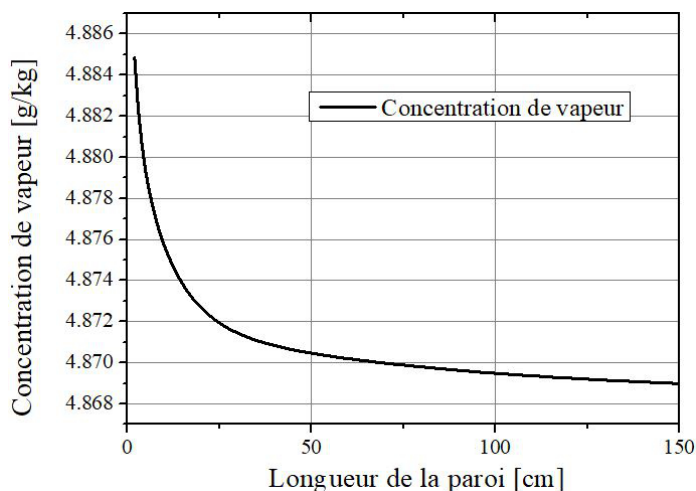


FIGURE 5.19: Concentration de vapeur à l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air

Les transferts hygrothermiques sont plus importants à l'entrée du canal d'air, où les gradients de température et d'humidité sont plus élevés. Le long de l'axe longitudinal de la paroi saturée, la température et l'humidité tendent à s'équilibrer, limitant les transferts de vapeur d'eau entre la couche poreuse et le flux d'air dans le canal. Dans ce cas précis, où un flux d'air proche de la saturation doit lécher une paroi saturée, la direction de la chaleur latente est depuis le flux d'air vers la paroi. La vapeur d'eau contenue dans le flux d'air est condensée à l'interface entre le canal et la paroi car la concentration de vapeur à l'interface est inférieure à la teneur en vapeur d'eau de l'air, ce qui conduit à la diffusion de la vapeur d'eau de l'air vers l'interface. Cette condensation libère de l'énergie sous forme de chaleur qui est partiellement absorbée par l'air. Ceci entraîne une légère augmentation (négligeable) de la température de l'air à proximité de l'interface entre la couche poreuse et le canal d'air (comme observé précédemment sur la figure 5.17).

5.2.2 En conditions estivales

Le modèle numérique est ensuite utilisé avec un air ambiant entrant dans le canal relativement sec et chaud. Le flux d'air insufflé est modélisé avec une vitesse d'entrée dans le canal U_0 égale à 0.01m/s, une température de 35°C et une humidité relative de 30%. Ces conditions hygrothermiques correspondent à une humidité absolue de 10.5g/m³. Le mur est continuellement saturé en eau provenant des remontées capillaires.

La figure 5.20 expose les évolutions des champs de température, au travers d'isothermes, dans la couche poreuse (a) et dans le canal d'air (b). On observe sur la figure 5.20(a) que la température de la couche poreuse augmente exponentiellement jusqu'à atteindre la température de l'air, dans un état d'équilibre. Un échange thermique intense se produit le long de l'interface entre la couche poreuse et l'air soufflé à l'intérieur du canal : lorsque le flux d'air remonte, la couche poreuse absorbe la chaleur sensible du flux gazeux et libère de la chaleur latente. L'échange de chaleur a lieu principalement par conduction.

Une fois en contact avec la couche poreuse, la température de l'air entrant, à 35°C, diminue légèrement en raison des transferts de chaleur et d'humidité par convection entre l'air et la couche poreuse. Cette diminution est légère car le flux d'air progresse le long de la structure froide à une vitesse de 0.01m/s. La lame d'air ne peut donc atteindre un état stationnaire en raison du mouvement aéraulique au sein de la lame d'air ventilée. L'air, par un contact direct avec une surface solide humide, perd de la chaleur sensible mais gagne de la chaleur latente due à l'évaporation de l'eau à l'interface entre la structure poreuse et la lame d'air. L'air insufflé est alors refroidi et humidifié simultanément. Par conséquent, une température plus élevée du flux d'air induit une évaporation significative en surface de la couche poreuse. Ce phénomène engendre un fort gradient de températures interfaciales, entraînant un flux de chaleur sensible important.

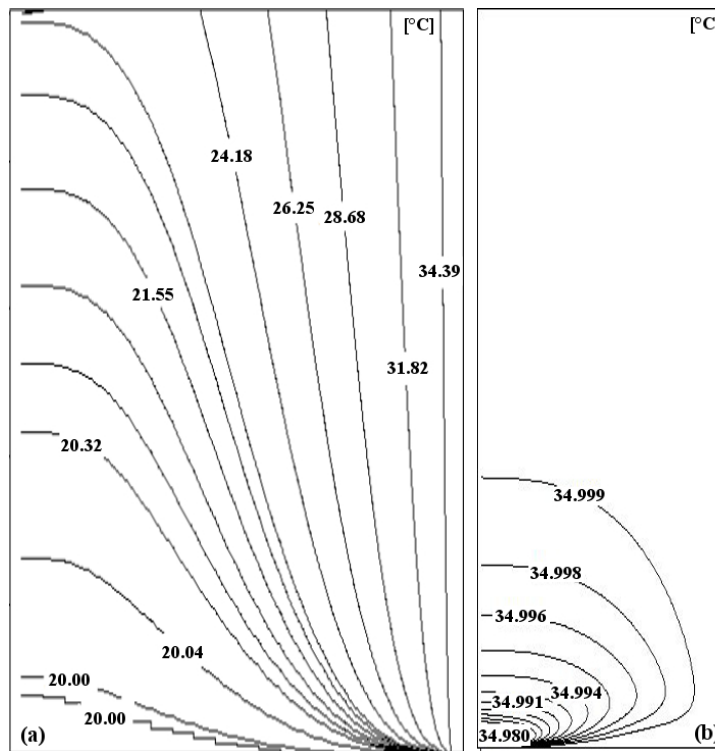


FIGURE 5.20: Évolutions des champs de température dans le milieu poreux (a) et le canal (b)

La figure 5.21 présente les évolutions des champs de concentration de vapeur d'air dans le canal. L'évolution axiale de la concentration de l'humidité de l'air le long du canal augmente de l'entrée à la sortie du canal en passant de $10.5\text{g}/\text{m}^3$ à $31\text{g}/\text{m}^3$. Ce résultat confirme le fait qu'un phénomène d'évaporation se produit à l'interface entre la paroi froide et la lame d'air chaud. La concentration de vapeur d'eau la plus faible est située à proximité de l'entrée du canal, zone dans laquelle l'évaporation de l'eau de la paroi poreuse est la plus intense. En effet, lorsque l'air traverse le canal, sa concentration en vapeur d'eau augmente le long de la face interne de la paroi. Cela entraîne une diminution du pouvoir évaporatoire du flux d'air le long de l'axe vertical, ce qui provoque une augmentation de la concentration de vapeur sur la paroi.

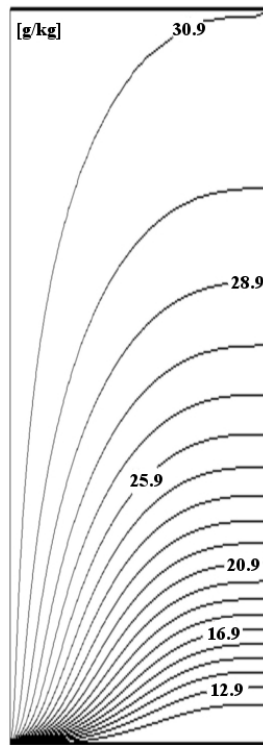


FIGURE 5.21: Champs de concentration de vapeur d'eau dans la lame d'air

La figure 5.22 montre le taux de vapeur d'eau à l'interface entre la paroi et le canal. Le phénomène d'évaporation semble justifier la chute du taux de vapeur d'eau en partie basse du mur. En effet, l'évaporation est normalement négative en raison de la convention de signe retenue pour la désignation des différents flux. La paroi humide gagne alors de la chaleur sensible au contact de l'air soufflé dans le canal. Réciproquement, la paroi perd de la chaleur latente en raison du phénomène d'évaporation.

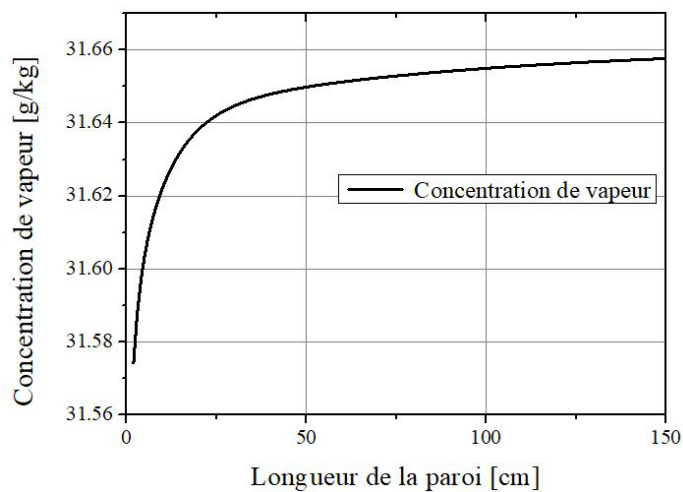


FIGURE 5.22: Taux de concentration de vapeur d'eau à l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air

5.2.3 En conditions intermédiaires

Le modèle numérique est conduit finalement avec un soufflage d'air dans le canal dans des conditions intermédiaires, entre les conditions hivernales et celles estivales. La vitesse de l'air toujours maintenue constante à 0.01m/s. Les conditions hygrothermiques de l'air sont les suivantes : la température est de 15°C et l'humidité relative est de 50%, soit des conditions proches des conditions initiales de la paroi humide saturée en eau. Ces conditions conduisent à une humidité absolue de $6g/m^3$. La température du sol est toujours modélisée à 20°C.

La figure 5.23 présente les évolutions des champs d'isothermes dans le milieu poreux (a) et dans le canal d'air (b). On observe sur la figure 5.23 que la température dans la couche poreuse diminue jusqu'à atteindre la température de l'air correspondante à l'état d'équilibre. Au-fur-et-à-mesure de la remontée du flux d'air dans le canal, un échange de chaleur sensible a lieu entre l'air et la paroi. Ce dernier est à l'origine du refroidissement de la paroi. Au niveau de l'entrée du canal, une augmentation négligeable de la température de l'air est visible, gouvernée par le faible gradient de température et d'humidité relative à l'interface entre la paroi et la lame d'air. Les échanges convectifs prédominent à l'interface entre les couches.

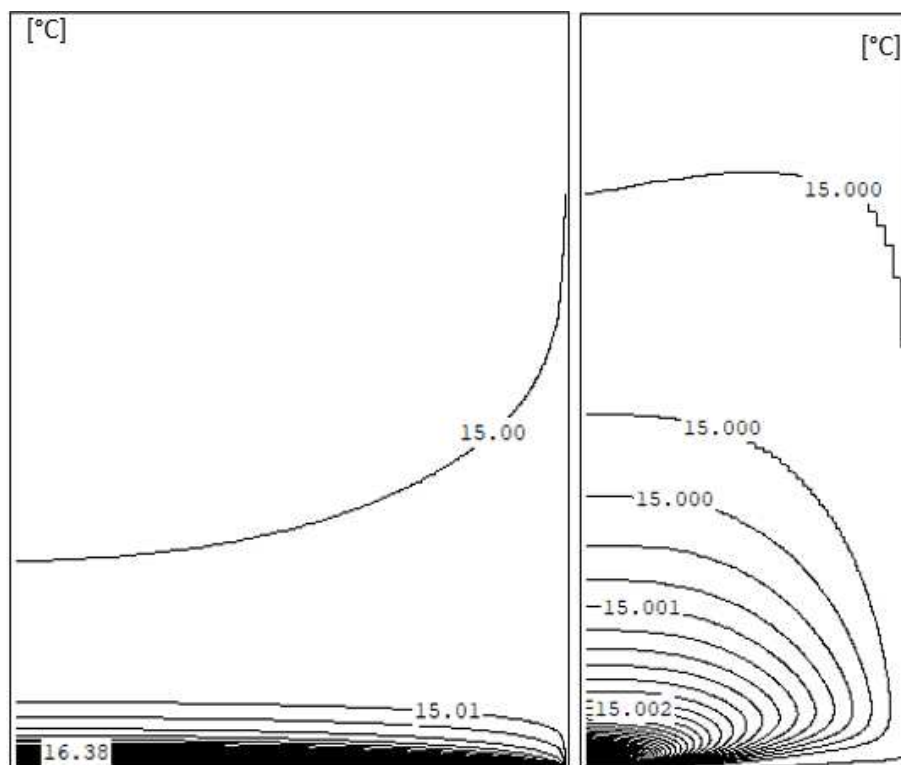


FIGURE 5.23: Champs des isothermes dans le milieu poreux et dans le canal

La figure 5.24 présente l'évolution des champs de concentration de la vapeur d'eau dans le canal, lors d'un soufflage d'air à une température de 15°C et à une humidité relative égale à 50%, équivalente à une humidité absolue égale à $6g/m^3$. Les résultats

montrent qu'à l'entrée du canal, la concentration de vapeur d'eau de l'air augmente de $6\text{g}/\text{m}^3$ jusqu'à atteindre $9.5\text{g}/\text{m}^3$. Cette augmentation est symbolique d'un phénomène d'évaporation de l'eau contenu dans le mur. En effet, la couche poreuse, qui absorbe un flux sensible, libère un flux latent qui est à l'origine du phénomène d'évaporation ayant lieu à l'interface entre la paroi et le canal d'air. Dans le même sens, l'air, sous l'effet des transferts convectifs, se réchauffe à l'entrée en contact avec la paroi, augmentant ainsi sa capacité à se charger en humidité.

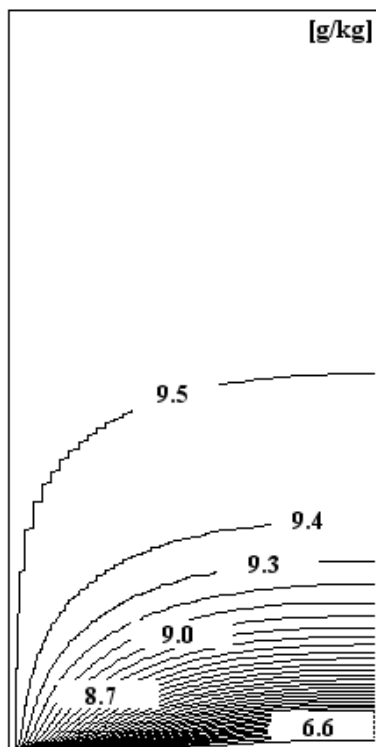


FIGURE 5.24: Champs de concentration de la vapeur d'eau dans le canal

La figure 5.25 présente la concentration de la vapeur d'eau à l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air. La concentration de vapeur d'eau à l'interface diminue à mesure de la progression le long de la paroi pour passer de $9.514\text{g}/\text{m}^3$ à $9.504\text{g}/\text{m}^3$ en tête du mur. En effet, lorsque l'air insufflé entre en contact avec une paroi saturée en eau, les gradients thermique et massique sont à l'origine des transferts hygrothermiques ayant lieu à l'interface. A l'entrée du canal, l'air, initialement froid et modérément sec, entre en contact avec paroi chaude et humide. A l'interface une réaction endothermique se produit. La paroi absorbe le flux sensible de l'air, quand l'air, à son tour, absorbe un flux latent libéré par le mur. L'air se réchauffe alors et se charge en vapeur d'eau. Au-fur-et-à-mesure que l'air remonte dans le canal, un état d'équilibre entre les fluides et le milieu poreux s'établit. La paroi se refroidit et sa température tend vers la température de l'air. La figure 5.25 montre que la concentration de vapeur diminue le long de la face interne de la paroi, qui est en contact avec un air chargé en humidité. Cette observation souligne le fait que la température de la paroi a atteint la température de rosée. La condensation

se produit et entraîne une diminution de la concentration de la vapeur d'eau dans l'air à l'interface entre la paroi et le canal.

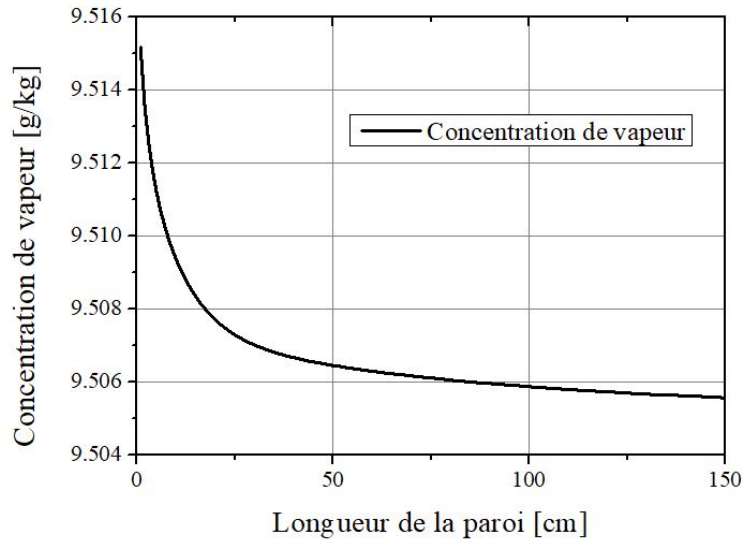


FIGURE 5.25: Concentration de vapeur d'eau à l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air

Finalement, en conditions hygrothermiques intermédiaires, les transferts hygrothermiques entre le fluide et la paroi saturée sont à l'origine d'un phénomène d'évaporation en phase transitoire. Lorsqu'un état d'équilibre thermodynamique est atteint à l'interface, un phénomène de condensation est mis en lumière, notamment en partie haute du canal.

5.3 Analyse de l'effet de la variation de la vitesse de l'air

Après avoir identifié l'influence des conditions hygrothermiques de l'air humide insufflé dans la lame d'air, nous interrogeons l'effet de la vitesse de l'air à l'entrée du canal sur les distributions des champs de température et d'humidité relative. Le modèle numérique simulé est identique à celui présenté dans la section précédente. Différentes conditions hygrothermiques de l'air insufflé sont mises en exergue, comme précédemment : en périodes hivernale, estivale et intermédiaire. Trois vitesses différentes sont exploitées (0.01m/s, 0.1m/s et 0.15m/s) qui correspondent une variation du nombre de Reynolds de 500, 1000 et 1500, respectivement. Le nombre de Reynolds permet de caractériser l'écoulement de l'air insufflé dans différentes configurations géométriques du système composé de la paroi humide, de la lame d'air ventilée et de l'isolant thermique intérieur, et de fournir des informations sur la nature du régime aéraulique atteint. Au regard des nombres de Reynolds investis, nous distinguons alors les régimes laminaire et transitoire.

Le nombre de Reynolds Re , adimensionné, représente le rapport des forces d'inertie

aux forces de viscosité, et s'exprime par la relation suivante :

$$Re = \frac{U_0 \times L_c}{\nu} \quad (5.5)$$

où

- U_0 la vitesse caractéristique de l'air [m/s]
- L_c la longueur de la paroi [m]
- $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ la viscosité cinématique de l'air [m²/s]
- μ la viscosité dynamique de l'air [Pa.s]
- ρ la masse volumique de l'air [kg/m⁻³]

Dans un premier temps, les lignes de champ de la vitesse de l'air dans le canal sont illustrées sur la figure 5.26, dans le cas où la vitesse de l'air insufflé est de 0.01 m/s. Les lignes de courant sont uniformes, confirmant un écoulement laminaire, que ce soit en pied de mur, à mi-hauteur ou en tête de mur. Sur les deux côtés du canal (la paroi et l'isolant thermique), les lignes de courant se rapprochent en raison de l'interaction avec les surfaces rugueuses délimitant le canal, ce qui entraîne un changement de la vitesse du fluide. En effet, à l'entrée du canal, la vitesse de l'air est freinée par les forces de frottement et de pression. Ces forces, qui agissent dans le sens inverse de l'écoulement de l'air, ralentissent le flux d'air ascendant.

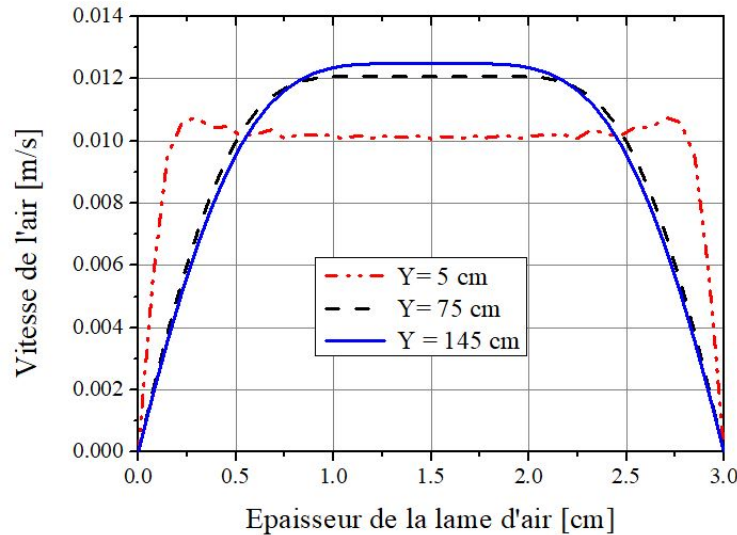


FIGURE 5.26: Profils de vitesse de l'air dans le canal lors de soufflage d'un air à 0.01m/s

Le ralentissement de l'écoulement près des parois verticales est compensé par une accélération au niveau du plan médian du canal, afin de satisfaire l'équation de conservation de la masse. Ainsi, à partir de la mi-hauteur du canal - et l'atteinte d'un état stationnaire -, le profil axial de la vitesse de l'air devient convexe, symbolisé par une forme parabolique dans l'axe du canal. La vitesse de l'air augmente de 1.3 fois la vitesse initiale et devient égale, dans cette configuration, à 0.013m/s. La pression exercée par la paroi et par la

plaque, de chaque côté du canal, diminue lorsque la vitesse du fluide augmente, régi par l'effet Venturi.

5.3.1 En période hivernale

En conditions hivernales, la température et l'humidité relative de l'air insufflé sont modélisées égales à 5°C et 95%, proche de la saturation en vapeur d'eau. La figure 5.27 montre l'influence de la variation du nombre de Reynolds sur la concentration de vapeur d'eau et sur la température à l'interface entre la paroi humide et le canal.

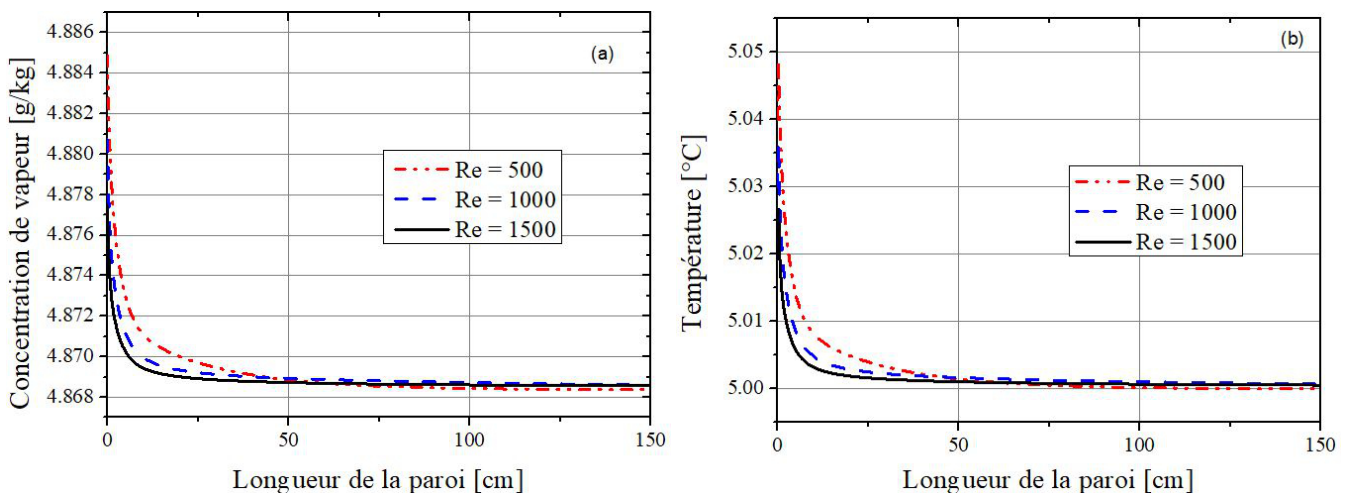


FIGURE 5.27: Effet de la variation de la vitesse de l'air insufflé sur la concentration de vapeur (a) et sur la température (b) à l'interface entre la paroi saturée et le canal en conditions hivernales

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal n'a un effet significatif que sur la température de l'air et la teneur en vapeur à l'interface entre la paroi saturée et le canal. En conditions hivernales, le résultat de l'augmentation du nombre de Reynolds accentue le phénomène de condensation en augmentant les transferts convectifs de chaleur et de masse entre le flux d'air insufflé dans le canal et la face interne de la paroi. L'apparition de l'eau liquide en surface de la paroi augmente avec la vitesse de l'air à l'entrée du canal. Il en résulte également une diminution de la concentration de vapeur d'eau et de la température à l'interface entre les deux phases.

Ce phénomène s'explique par le fait que le temps de transfert de la chaleur et de l'humidité entre l'eau et l'air est raccourci avec l'augmentation de la vitesse. La valeur la plus élevée de la concentration de vapeur est située à l'entrée du canal. La face intérieure de la paroi devient rapidement plus froide, engendrant une diminution du pouvoir d'évaporation de l'air sur la hauteur de la paroi. Par la suite, une condensation de la vapeur d'eau sur la face interne de la paroi est induite. L'augmentation du nombre de Reynolds génère une diminution de la concentration de vapeur au niveau de l'interface, d'autant plus importante que le nombre de Reynolds est élevé. Ce phénomène confirme l'impact

des transferts de chaleur et de masse par convection entre le flux d'air et la face interne de la paroi sur les distributions spatiales de température et de concentration de vapeur.

5.3.2 En période estivale

Une approche similaire est menée en conditions estivales, où le modèle numérique est conduit avec un air chaud (35°C) et sec (30% d'humidité relative). La figure 5.28 montre les évolutions de la concentration de vapeur d'eau (a) et de la température de l'air (b) sur la face interne de la paroi lors du soufflage de l'air pour les nombres de Reynolds identifiés précédemment. La concentration de vapeur à l'interface entre la couche poreuse et le canal d'air augmente avec l'augmentation de la vitesse de l'air, d'une manière similaire aux observations menées en conditions hivernales. Dans le même temps, la température de l'air augmente avec la vitesse de l'air. Ces résultats sont caractéristiques du phénomène d'évaporation en conditions estivales.

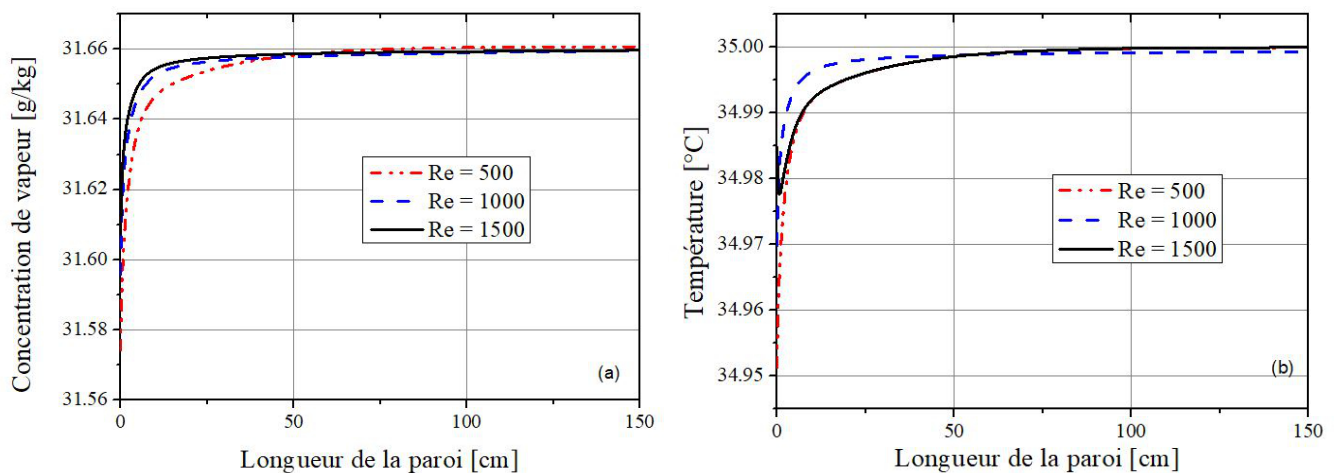


FIGURE 5.28: Effet de la variation de la vitesse sur la concentration de vapeur (a) et sur la température (b) à l'interface entre la paroi saturée et le canal en conditions estivales

L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal a un effet significatif sur la température et la concentration de vapeur sur la face interne de la paroi. En effet, les transferts convectifs de chaleur et de masse entre l'air insufflé dans le canal et la face interne de la paroi augmentent avec la vitesse de l'air à l'entrée du canal.

Enfin, l'augmentation du nombre de Reynolds semble atteindre rapidement un extremum avec un impact limité sur les échanges convectifs à l'interface entre la paroi et le canal, tant en période hivernale qu'estivale. L'allure des évolutions de la concentration de vapeur d'eau et de la température semble montrer qu'une vitesse excessive de l'écoulement de l'air limite fortement les transferts de chaleur et de masse entre les deux couches pour atteindre une valeur limite.

5.3.3 En périodes intermédiaires

Enfin, des conditions hygrothermiques intermédiaires de l'air insufflé sont considérées. L'air présente alors une température de 15°C et 50% d'humidité relative. Le nombre de Reynolds varie de 500 et 1500 selon la méthode utilisée précédemment.

La figure présente l'influence de la variation du nombre de Reynolds sur la concentration de vapeur d'eau et sur la température de l'air à l'interface entre la paroi saturée et le canal d'air. On observe que l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal a un effet significatif sur la température et sur la concentration de vapeur d'eau de l'air. Les échanges convectifs sont directement impactés par la vitesse de l'air.

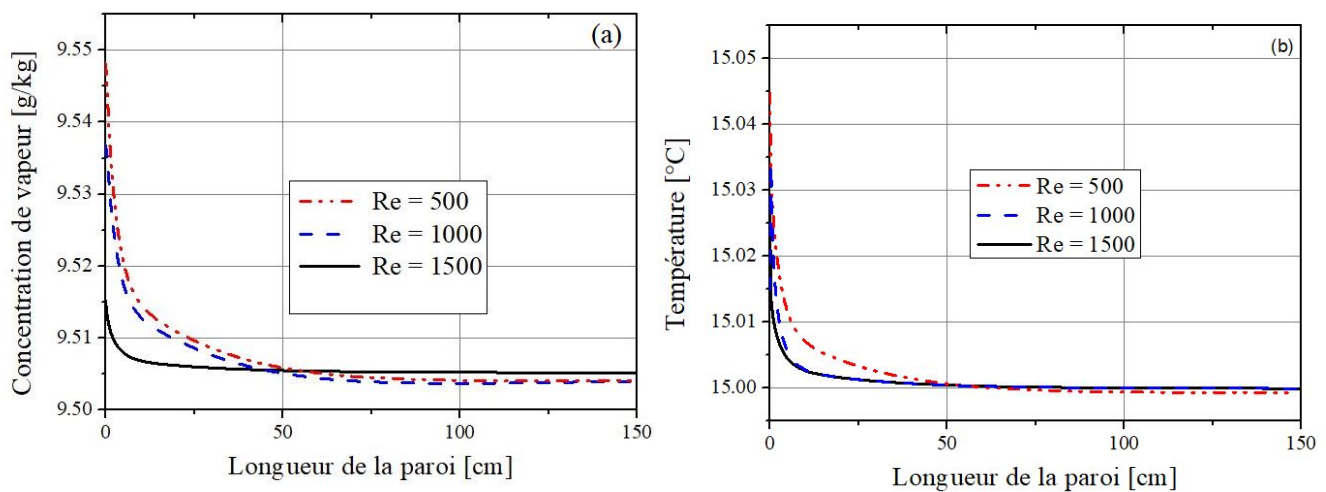


FIGURE 5.29: Effet de la variation de la vitesse sur la concentration de vapeur (a) et sur la température (b) à l'interface entre la paroi saturée et le canal en conditions intermédiaires

5.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons cherché à interpréter notre modèle numérique qui porte sur l'étude des processus de transferts de chaleur et de masse couplés dans un canal ventilé. Ce canal correspond à une lame d'air entre une ossature porteuse en briques saturées en eau et un isolant thermique non hygroscopique. Le système est étudié en conditions adiabatiques et doit permettre d'analyser le fonctionnement d'un système de rupture de lutte contre des remontées capillaires au sein d'une enveloppe de bâtiment. A l'intérieur du canal, de l'air extérieur est insufflé selon différentes conditions hygrothermiques et à différentes vitesses. Nous nous intéressons alors aux processus d'échanges hygrothermiques à l'interface entre la couche poreuse humide et le fluide circulant à son voisinage, en convection forcée et en régime laminaire. Le modèle proposé est basé sur l'approche de Darcy simple, couplée aux équations de convection forcée dans la lame d'air.

Dans un premier temps, nous avons axé notre démarche explicite sur la validation analytique et expérimentale du modèle numérique. Une première étape a consisté en la validation du code du programme élaboré par confrontation aux résultats analytiques d'une étude proche, issue de la littérature, basée sur une configuration sensiblement similaire. Ce modèle de référence est composé d'une couche céramique saturée en eau contre laquelle un flux d'air chaud circule. Les résultats que nous obtenons sont en bon accord avec ceux obtenus par le modèle d'appui. Dans une seconde étape, nous avons conçu un banc d'essai expérimental pour éprouver la validité de notre modèle par rapport à une paroi en briques poreuses anciennes soumise à des remontées capillaires par effet succion. Ce banc d'essai est lourdement instrumenté et l'exploitation des résultats préliminaires met en évidence le processus de remontées capillaires jusqu'à la saturation de la paroi. Une lame d'air naturellement ventilée est créée entre l'ossature porteuse et l'isolant thermique. Le système est isolé et les échanges de masse avec l'extérieur sont bloqués afin de reproduire les conditions adiabatiques imposées par le modèle numérique. Les résultats et observations expérimentales soulignent la validité de notre approche numérique quant à l'étude des transferts hygrothermiques et aérauliques couplés.

La validation du modèle nous a permis d'envisager la généralisation des résultats numériques sous différentes conditions de soufflage d'air (température, humidité relative et vitesse). Dans un premier temps, nous nous sommes intéressée à l'analyse des propriétés hygrothermiques de l'air insufflé, à une vitesse constante. Le cas d'étude modélisé porte sur une paroi à échelle réelle, constituée d'un mur en briques poreux saturés de 30cm d'épaisseur, d'une lame d'air ventilée de 3cm d'épaisseur et d'un isolant non hygroscopique. Les conditions hygrothermiques de l'air insufflé correspondent à des saisons hivernale, estivale et intermédiaire. Dans un second temps, notre attention s'est portée sur l'influence de la variation de la vitesse de l'air insufflé sur les transferts hygrothermiques à l'interface entre la structure porteuse et le canal ventilé, pour les trois périodes étudiées. Les résultats sont présentés en fonction du nombre de Reynolds afin de s'affranchir de la géométrie considérée et de mettre en lumière la nature de l'écoulement du fluide.

Nous avons conclu que le soufflage d'un air froid et humide provoque un phénomène de condensation sur la face interne de la paroi. Le soufflage d'un air chaud et sec, provoque un phénomène d'évaporation de l'eau contenue dans la paroi. Ainsi la réduction de la concentration en vapeur d'eau de la paroi peut être expliquée par l'échange de chaleur latente générée par l'évaporation de l'eau dans le milieu poreux. Le soufflage d'air sous conditions intermédiaires est suffisant pour réduire la quantité de vapeur d'eau de la paroi, sous réserve que la température de la paroi et celle de l'air restent supérieures à la température de rosée. Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse accentue les transferts hygrothermiques.

Le chapitre suivant est axé sur le modèle étendu aux milieux non saturés et en conditions diabatiques. L'influence des paramètres physiques de la structure est abordée, no-

tamment la porosité de la paroi qui influence les phénomènes de transfert et de diffusion de chaleur et de masse. Puis, l'effet des conditions de soufflage d'air est interrogé, notamment au travers des différents paramètres adimensionnés afin de généraliser nos résultats et observations.

Interprétation de l'extension du modèle vers un milieu non saturé et en conditions diabatiques

Ce chapitre porte sur la présentation et l'analyse des résultats de l'extension du modèle numérique vers la simulation des transferts de chaleur et de masse dans une paroi non saturée équipée d'une lame d'air ventilée. L'approche proposée comprend alors un canal ventilé dont l'une des parois est composée d'un mur en briques de terre cuite et l'autre de l'isolant thermique.

Les propriétés hygrothermiques et physiques de la brique en terre cuite ont été reportées dans le chapitre 3. De plus, le taux de changement de phase ε et le coefficient de thermo-migration δ sont égaux respectivement à 0.3 et $10^{-5} K^{-1}$. Initialement, la paroi est maintenue à une température T_{mi} égale à $13^\circ C$ et à une teneur en eau initiale w_{mi} de $135g/m^3$. Le pied du mur est en contact avec le sol où le phénomène de remontées capillaires a lieu. Dans cette zone, la température en bas de la paroi est égale à la température du sol, soit $20^\circ C$. Le nombre de Prandtl, qui définit le rapport entre la viscosité cinématique et la diffusivité thermique est égale à 0.71, quand le nombre de Schmidt, précisant le rapport entre la viscosité cinématique et la diffusion de masse est de 0.68. Ces deux nombres sont supposés constants [Saidi, 2018, Mechergui, 2017]. Le temps est compté à partir de l'instant initial où la paroi poreuse du canal entre en contact avec l'air ambiant insufflé dans le canal.

Une première section s'intéresse à l'influence des propriétés de l'ossature porteuse sur les échanges hygrothermiques au sein du système considéré. Cette étude de sensibilité s'articule autour de la porosité de la brique en terre cuite puis de ses propriétés hygrothermiques (conductivité thermique, capacité thermique, coefficient de diffusion hygrique et coefficient d'absorption capillaire).

Une deuxième section est consacrée à l'étude de la variation des paramètres physiques de l'air entrant dans le canal (conditions hygrothermiques et vitesse de l'air à l'entrée du canal) sur les phénomènes de transferts hygrothermiques ayant lieu à l'interface entre la paroi poreuse et le canal d'air. Les champs dynamiques, thermiques et massiques caractérisant l'écoulement d'air dans le canal ventilé et dans la paroi poreuse sont présentés et interprétés.

Enfin, la dernière section porte sur l'influence de la variation des conditions environnementales externes (température et humidité relative extérieures) sur les échanges hygrothermiques entre la paroi et l'air insufflé à l'intérieur du canal, ainsi que sur les champs thermiques et massiques au sein de la paroi.

Plan numérique : définition des paramètres d'entrée des différentes modélisations analysées

Nous avons modélisé le comportement hygrothermique d'une paroi en briques anciennes en terre cuite de 35cm d'épaisseur et de 150cm de hauteur, soumise à des remontées capillaires par effet succion. La paroi est considérée comme un milieu poreux partiellement saturé. La surface externe de la paroi est en échange continu avec l'ambiance extérieure quand la surface interne est en contact avec un air insufflé dans un canal ventilé (de 3cm d'épaisseur) en convection forcée et en écoulement laminaire. Finalement, un isolant non hygroscopique est modélisé du côté intérieur de l'enveloppe, en conditions adiabatiques. La modélisation numérique est en 2D, comme représentée sur la figure 6.1.

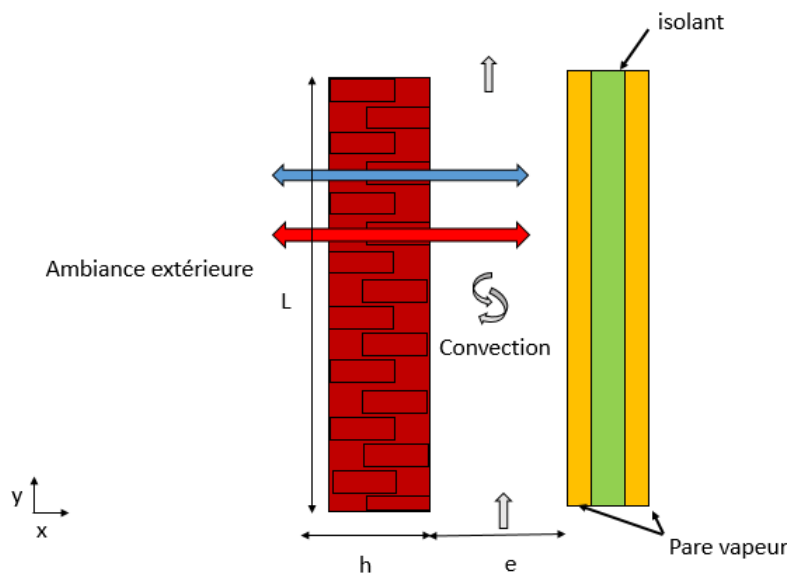


FIGURE 6.1: Modèle numérique d'un milieu non saturé, en conditions diabatiques

La paroi composée en multi-couche présente un siège des phénomènes physiques de transferts de masse et de chaleur. Ces transferts sont régis par le modèle de Luikov. L'écoulement de l'air dans le canal ventilé est décrit par les équations de conservation de masse, les équations de Navier - Stokes et les équations d'énergie et d'espèces. La formulation mathématique du problème physique et la méthode de résolution numérique sont présentées dans le chapitre 3.

L'étude numérique porte dans un premier temps sur la variation des propriétés multiphysiques de la paroi. Tout d'abord, une étude de l'impact de la porosité de la paroi sur les échanges hygrothermiques est interrogée. Trois cas d'études sont reportés avec des valeurs

de porosité variant entre 0.1, 0.3 et 0.5 (cas 1, 2 et 3). Les propriétés des matériaux considérées ont été précédemment présentées dans le tableau 5.2. Puis, une étude de l'impact de la variation des propriétés thermiques et massiques sur les échanges hygrothermiques au sein de la paroi est présentée. Cette approche est proposée par le truchement de la variation de Nombre de Biot thermique et du nombre de Biot massique, tout en conservant des coefficients d'échanges thermique et massique similaires. Les nombres de Biot (Eq. 3.101), de Lewis (Eq. 3.5) et de Posnov sont dépendants des propriétés hygrothermiques de la structure porteuse qui sont présentées dans le tableau 6.1. Enfin, une étude de la variation des facteurs de forme de la paroi et de la lame d'air, lié à leur géométrie (rapport hauteur sur largeur), est réalisée. Le cas 5 sera considéré comme référence dans les analyses qui s'en suivent.

TABLEAU 6.1: Paramètres d'entrée des modélisations numériques

| | | Section 6.1 | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | Unité | Cas 4 | Cas 5 | Cas 6 | Cas 7 | Cas 8 | Cas 9 | Cas 10 |
| Porosité | - | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Conductivité thermique | W/m.K | 0.35 | 0.45 | 0.55 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 |
| Capacité thermique | J/K.kg | 900 | 800 | 700 | 800 | 800 | 800 | 800 |
| Coefficient de diffusion hygrique | m ² /s | 1.5E-8 | 1.5E-8 | 1.5E-8 | 1.2E-8 | 2E-8 | 1.5E-8 | 1.5E-8 |
| Facteur de forme (paroi) | - | 4.28 | 4.28 | 4.8 | 4.28 | 4.28 | 4.28 | 7.5 |
| Facteur de forme (canal) | - | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 30 | 50 |

Dans un second temps, l'influence de variation des conditions climatiques et dynamiques de l'air insufflé dans le canal est investie, en maintenant les conditions externes fixes. Les propriétés des matériaux modélisés correspondent au cas 5 du tableau précédent. Le tableau 6.2 synthétise les paramètres d'entrée des modélisations réalisées au sein de la section 6.2.

TABLEAU 6.2: Conditions climatiques de l'air insufflé et de l'ambiance externe

| | | Section 6.2 | | | | | |
|--------------------------------|-------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Unité | Cas 11 | Cas 12 | Cas 13 | Cas 14 | Cas 15 | Cas 16 |
| Température de soufflage | °C | 20 | 25 | 18 | 20 | 20 | 20 |
| Humidité relative de soufflage | % | 50 | 30 | 60 | 50 | 50 | 50 |
| Vitesse de soufflage | m/s | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.01 | 0.1 |
| Température extérieure | °C | 15 | 15 | 15 | 10 | 10 | 10 |
| Humidité relative extérieure | % | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Température du sol | °C | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |

Dans un dernier temps, les conditions de soufflage de l'air dans le canal ventilé sont considérées fixes (cas 5 de la section 6.2). Les conditions hygrothermiques extérieures varient en fonction des saisons d'un climat tempéré. Le tableau 6.3 présente les conditions climatiques considérées lors de la section 6.3.

TABLEAU 6.3: Conditions climatiques de l'air insufflé et de l'ambiance externe

| | Unité | Section 6.3 | | |
|--------------------------------|-------|-------------|-------|-------|
| | | Printemps | Été | Hiver |
| Température de soufflage | °C | 20 | 20 | 20 |
| Humidité relative de soufflage | % | 50 | 50 | 50 |
| Vitesse de soufflage | m/s | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| Température extérieure | °C | 15 | 30 | 5 |
| Humidité relative extérieure | % | 70 | 35 | 95 |
| Température du sol | °C | 20 | 20 | 20 |

6.1 Étude de sensibilité aux propriétés multi-physiques de l'ossature porteuse

Dans cette section, une étude de sensibilité du modèle de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité développé vis-à-vis de la précision de mesure des propriétés hygrothermiques des matériaux est entreprise. L'objectif de celle-ci est d'identifier les paramètres les plus influents sur la réponse hygrothermique des enveloppes de bâtiments. Les paramètres d'entrée variant dans cette section sont présentés dans le tableau 6.1. On maintient les conditions hygrothermiques de soufflage à 20°C et 50% d'humidité relative, ainsi que l'ambiance externe fixe, à 10°C et 70% d'humidité relative.

Cette étude de sensibilité est menée face à la variabilité des paramètres d'entrée du modèle sur la prédiction du comportement hygrothermique des parois constituant l'enveloppe du bâtiment. Basée sur une méthode d'analyse locale, cette approche consiste à évaluer quantitativement la réponse du modèle par rapport à une variation d'une unique donnée d'entrée (la porosité, performance thermique et diffusion hygrique). Les résultats sont analysés par comparaison avec une simulation de référence, dont les caractéristiques ont été mises en évidence dans le tableau 6.2.

6.1.1 Impact de la porosité de la paroi humide

La porosité de l'ossature porteuse est fortement dépendante de la nature hétérogène des matériaux la constituant. Cette caractéristique est également délicate à déterminer expérimentalement et a une influence significative sur les phénomènes de transport de

chaleur et de masse, notamment au regard de la tortuosité et de la taille du réseau poral. De plus, lors de la modélisation du comportement d'une paroi, l'identification de cette caractéristique ne peut être entreprise au travers d'un prélèvement d'échantillon, essai destructif. Cette opération délicate n'est pas toujours possible et il convient alors d'évaluer la pertinence de telles investigations sur les résultats numériques. Ainsi, afin d'établir la sensibilité du modèle numérique face à ce paramètre, trois études sont menées, dans des conditions strictement identiques, en faisant varier la porosité du mur porteur de 0.1, 0.3 et 0.5 (soit $\pm 70\%$ de la porosité mesurée de la brique de terre cuite).

La figure 6.2 illustre l'influence de la variation de la porosité de la structure porteuse sur les profils longitudinaux et transversaux de la température au cœur de la paroi. Les valeurs correspondantes à une porosité de 0.3 sont considérées comme références. Une variation de la porosité de $\pm 70\%$ entraîne une modification $\pm 0.75^\circ\text{C}$ sur le profil de température du mur à mi-hauteur, ce qui correspond à un écart relatif de 5%. De la même manière, l'évolution de la température en fonction de la hauteur de la paroi est sujette à une modification maximale (en tête de paroi) de 0.75°C . Les conditions limites, imposées en pied de mur, justifient les températures identiques selon les trois cas d'études considérés. L'incertitude d'estimation de la porosité ne semble pas gouverner des modifications fondamentales des profils de distribution de la température dans l'ossature porteuse. Néanmoins, l'augmentation de la porosité de la paroi humide conduit à des températures supérieures. Ceci peut s'expliquer par l'accroissement des gradients thermiques interfaciaux, gouvernant les transferts thermiques entre le milieu poreux et le canal d'air ventilé. De plus, même si les conditions limites en pied de mur imposent une température fixe, les échanges entre l'air humide et le milieu poreux sont freinés par la faible porosité de la paroi. Ceux-ci semblent toutefois atteindre un comportement asymptotique à partir d'une hauteur de 1.3m, limitant les divergences entre les trois cas de porosités étudiées.

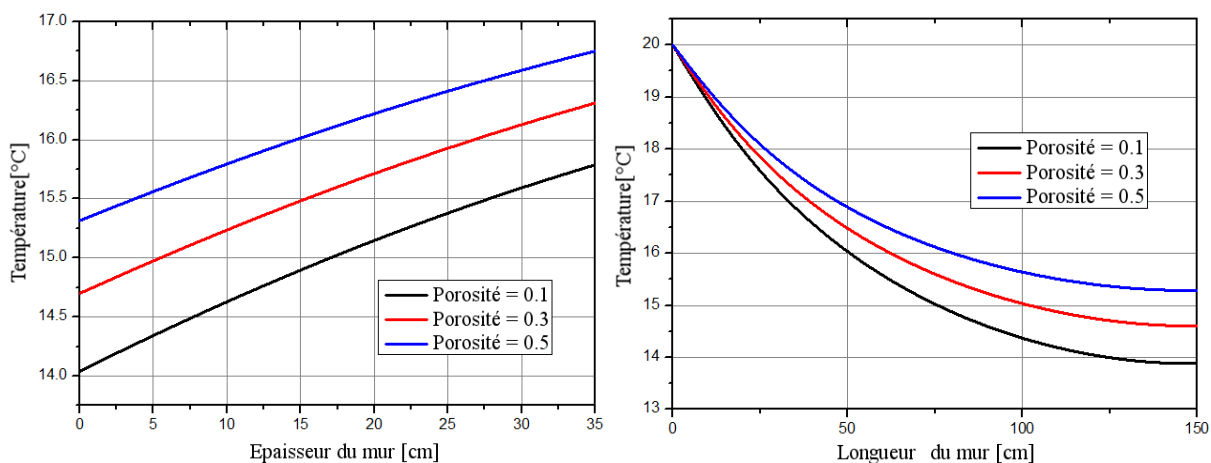


FIGURE 6.2: Évolutions de la température au sein du mur humide au regard de la porosité

La figure 6.3 présente l'influence de la variation de la porosité du milieu poreux sur les profils axiaux de température et de concentration de vapeur dans la lame d'air. Les distri-

butions axiales de la température de l'air et sa concentration en vapeur d'eau dans la lame d'air diminuent en allant de l'amont vers l'aval du canal, mais cette diminution est moins importante lorsque la porosité du milieu poreux est assez élevée. En effet, l'augmentation de la température de l'air dans la lame d'air ventilée engendre une augmentation de la pression de vapeur d'eau saturante, permettant ainsi à l'air de contenir une concentration de vapeur d'eau plus importante. L'augmentation de la porosité du milieu porteur augmente sa perméabilité à la vapeur d'eau, ce qui explique l'augmentation de l'humidité absolue dans la lame d'air. Néanmoins, de la même manière que précédemment, la variation de la porosité engendre une modification de la température de l'air de l'ordre de 0.7°C , soit un écart relatif de 5%, du même ordre de grandeur que l'écart relatif sur la concentration de vapeur d'eau ($5.4 \pm 0.2\text{g}/\text{m}^3$).

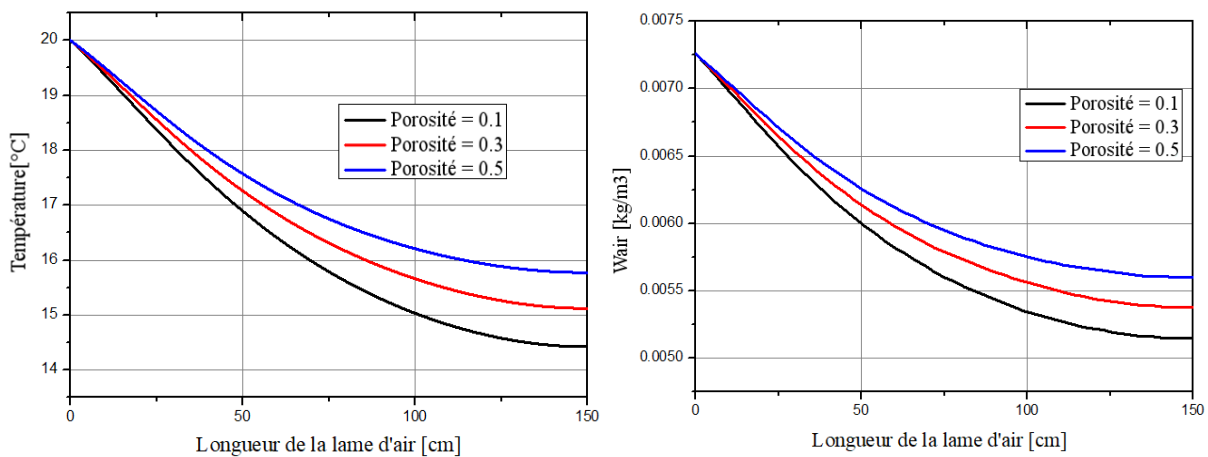


FIGURE 6.3: Évolutions de la température et de la concentration de vapeur d'eau dans la lame d'air au regard de la porosité

Afin d'interpréter la sensibilité des transferts hygrothermiques à la porosité de la paroi humide, les nombres adimensionnés de Nusselt et Sherwood sont investis. Le nombre Nusselt local caractérise le type de transfert thermique entre le fluide (l'air dans le canal) et la paroi. Il renseigne sur le rapport entre le transfert par convection et le transfert par conduction. Le nombre de Nusselt est d'autant plus élevé lorsque la convection prédomine sur la conduction. Le nombre de Sherwood, quant à lui, représente le rapport entre les transferts de masse par convection et les transferts par diffusion. Il est d'autant plus important lorsque la convection l'emporte sur la diffusion. Les évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood locaux au regard de la porosité sont présentées en figure 6.4. Plus la porosité de la paroi est élevée, plus les échanges thermiques entre la paroi et le fluide, traduits par le nombre de Nusselt local, sont importants. En effet, en pied de mur, là où les échanges thermiques sont importants, le nombre de Nusselt local atteint 65 à 82, en fonction de la porosité considérée. Cette valeur traduit des échanges par convection entre la paroi humide et le canal ventilé. En revanche, les transferts massiques, représentés par le nombre de Sherwood local, semblent être faiblement influencés par la porosité. Ainsi, la

modification de la concentration en vapeur d'eau au sein de la lame d'air ventilée semble être pilotée par la variation de la température, elle-même gouvernée par les phénomènes convectifs à l'interface entre la paroi et la lame d'air ventilée. Ces phénomènes convectifs dépendent pour partie de la porosité de la paroi. L'augmentation de la température engendre un accroissement de la capacité de stockage de l'humidité dans l'air, responsable de la progression de la concentration massique de vapeur d'eau. La porosité semble impacter directement les phénomènes de transferts hygriques à l'interface entre la paroi humide et la lame d'air ventilée sans modifier la nature des échanges hygrothermiques.

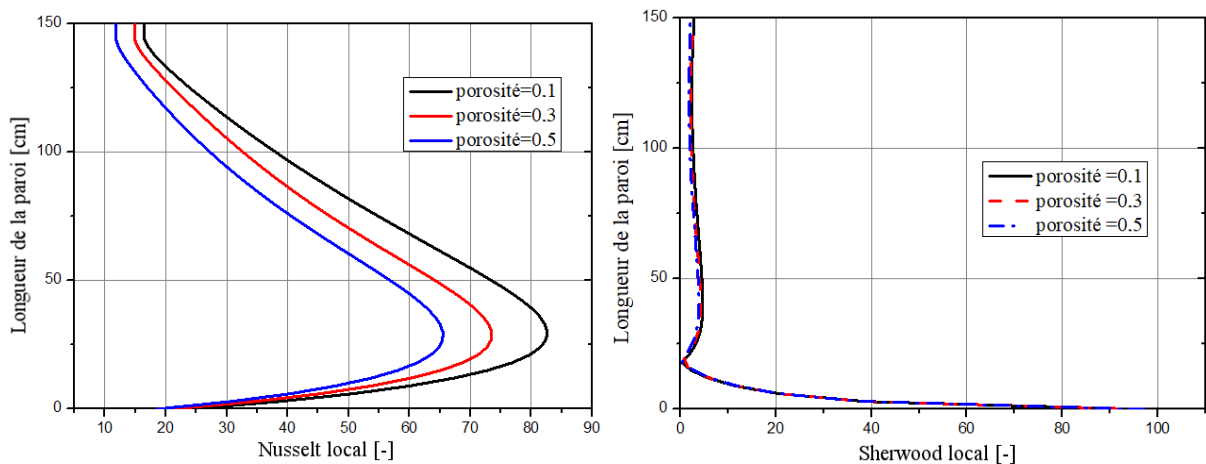


FIGURE 6.4: Évolutions des nombres de Nusselt et Sherwood locaux à l'interface entre la lame d'air et le milieu poreux au regard de la porosité

6.1.2 Impact des propriétés thermiques de l'enveloppe

Le modèle élaboré de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans l'enveloppe de bâtiment est basé sur une description phénoménologique des transferts hygrothermiques à l'échelle macroscopique. Cette approche de conception de modèle fait appel à des données d'entrée déterminées expérimentalement, et notamment les propriétés thermiques des matériaux telles que la conductivité thermique et la capacité thermique. Par conséquent, une bonne prédiction du comportement hygrothermique au niveau de la paroi est alors fortement tributaire du degré de précision dans l'identification de ces paramètres d'entrée du modèle. Or, les approches expérimentales montrent de fortes disparités de propriétés, même au sein de matériaux identiques. Ainsi, trois études sont menées, dans des conditions climatiques identiques, en faisant varier la conductivité thermiques du mur porteur de 0.35W/m.K , 0.45W/m.K et 0.55W/m.K et la capacité thermique de 700J/K.kg , 800J/K.kg et 900J/K.kg , respectivement.

La figure 6.5 illustre l'influence de la variation des propriétés thermiques de la structure porteuse sur les profils longitudinaux et transversaux de la température au cœur de la paroi. La variation des propriétés thermiques de la structure porteuse n'a un effet

significatif que sur les transferts thermiques dans le mur. Une variation de la conductivité thermique implique la variation de nombre de Biot thermique, qui caractérise les transferts thermiques à l'intérieur et à la surface de la structure porteuse. Pour une faible conductivité thermique et une capacité thermique plus importante, le matériau est plus isolant, d'une plus grande inertie thermique, visible grâce à la plus faible variation de la température transversale. De plus, les échanges thermiques surfaciques sont moins importants, caractérisés par une température de surface extérieure plus élevée. En revanche, comme attendu, les températures à mi-épaisseur de la paroi sont relativement constantes.

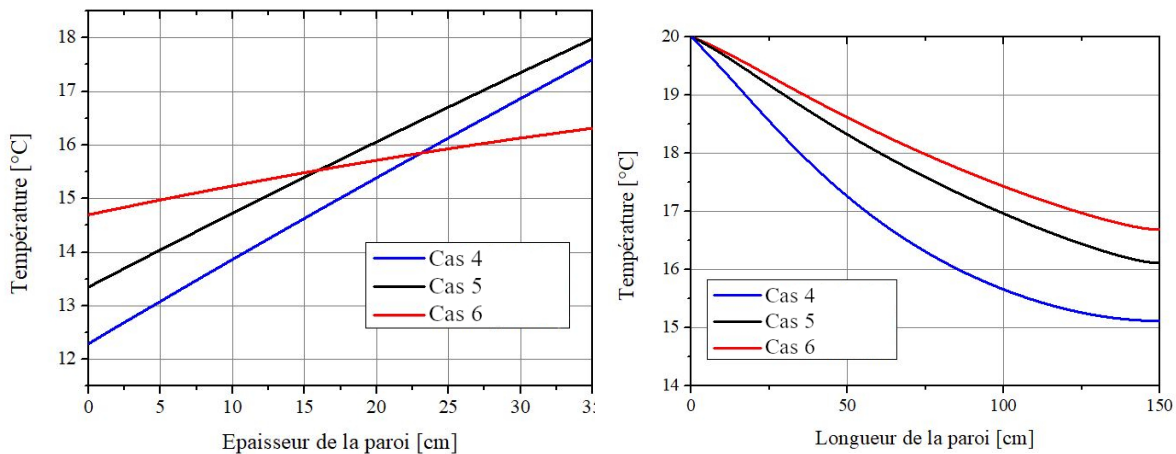


FIGURE 6.5: Évolutions de la température au sein du mur humide au regard de la conductivité thermique

Les distributions longitudinale et transversale de la température en fonction de la variation de la conductivité montrent que la conductivité thermique augmente en fonction du gradient thermique entre la surface externe et la surface interne de la paroi. En effet, l'augmentation de la conductivité thermique de la structure porteuse implique la diminution du nombre de Biot thermique. Par conséquent, le nombre de Biot thermique est inverse à la résistance thermique de convection, responsable du gradient de température entre les deux surfaces de la paroi.

La figure 6.6 présente les évolutions de la température et l'humidité absolue de l'air au sein de la lame ventilée en fonction de la variation de la conductivité thermique et la capacité thermique de la paroi. On constate que la température ainsi que l'humidité absolue de l'air dans le canal diminuent progressivement en allant de l'amont vers l'aval du canal. Cette diminution est moins importante lorsque la conductivité thermique de la structure porteuse est peu élevée. En effet, plus la conductivité thermique d'un matériau est faible plus la température de l'air qui s'écoule à son voisinage entre l'amont et l'aval de la lame d'air est importante. Par conséquent, l'augmentation de la température de l'air dans le canal ventilé engendre une augmentation de la pression de vapeur d'eau saturante, permettant par la suite à l'air de contenir une concentration de vapeur d'eau plus importante. On peut en conclure que l'augmentation de la conductivité thermique du milieu

poreux réduit les transferts de masse par convection mais n'a aucun effet sur le transfert diffusif de la matière. Ceci justifie l'augmentation de l'humidité absolue dans la lame d'air. Néanmoins l'augmentation de la conductivité thermique engendre une variation de température de l'air de 0.57°C , soit un écart relatif de 3.5%, similaire pour concentration de vapeur d'eau dans la lame d'air. La diminution de la conductivité thermique engendre une variation de température de l'air de 1°C , soit un écart relatif de 7%. Le même écart relatif est observable pour la concentration de vapeur d'eau de l'air.

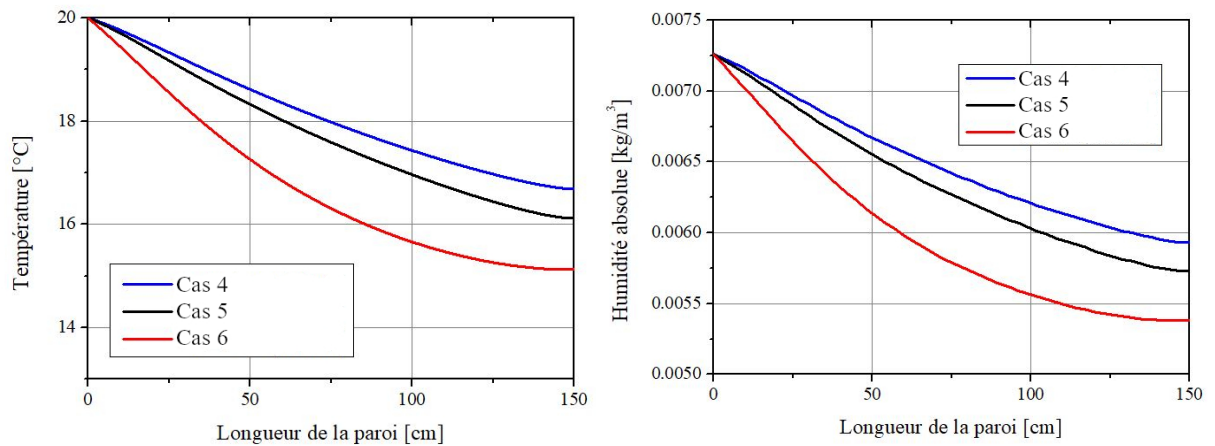


FIGURE 6.6: Évolutions de la température et de l'humidité relative au sein de la lame d'air au regard de la conductivité thermique

La figure 6.7 reporte la sensibilité des transferts hygrothermiques aux propriétés thermiques de la paroi. Les nombres de Nusselt et Sherwood locaux sont investis. L'évolution du nombre de Nusselt local au regard de la conductivité thermique montre que les valeurs les plus élevées de Nusselt local correspondent à des faibles valeurs de conductivité thermique. En effet le nombre de Nusselt local est inversement proportionnel à la conductivité thermique. L'augmentation de la conductivité thermique favorise les échanges thermiques

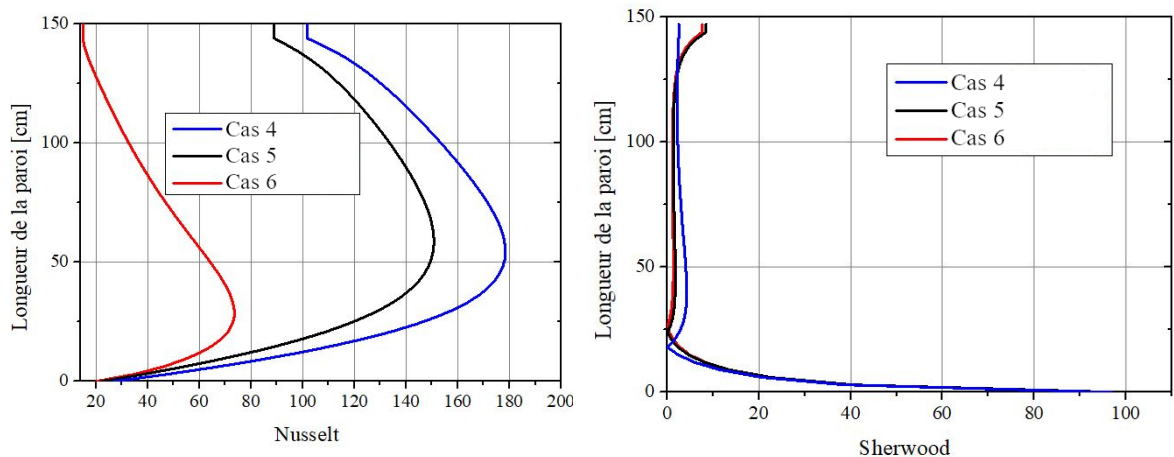


FIGURE 6.7: Évolutions des nombres de Nusselt et Sherwood locaux à l'interface entre la lame d'air et le milieu poreux au regard de la conductivité thermique

par conduction et, par la suite, réduit les échanges convectifs entre la paroi humide et le canal ventilé. En revanche, pour des faibles valeurs de conductivité thermique, le nombre de Nusselt local atteint des valeurs plus importantes, de l'ordre de 180. L'évolution du nombre de Sherwood en fonction de la performance thermique de la paroi montre que la variation de ce paramètre n'a qu'un effet faiblement marqué sur les échanges massiques. Néanmoins, pour des performances thermiques assez importantes, de faibles valeurs du nombre de Sherwood sont obtenues. Une conductivité thermique assez élevée stimule les transferts par diffusion par agitation thermique.

Une variation de $\pm 10\%$ de la valeur de la conductivité thermique, représentative d'une incertitude expérimentale admissible en laboratoire, a un impact sensible sur la modélisation du comportement de la paroi. Les résultats précédents montrent que la conductivité thermique a une influence non négligeable sur les profils de température au sein de la structure porteuse et de température de l'air dans le canal. L'analyse des nombres de Nusselt et de Sherwood locaux montre également qu'une variation de 10% de la conductivité thermique engendre un écart type relative pouvant atteindre 50% des résultats numériques, notamment sur les échanges thermiques.

6.1.3 Impact des propriétés hygriques de l'ossature

L'identification des performances hygriques de matériaux de construction montre une incertitude non négligeable dans les résultats des essais en laboratoire, sans même tenir compte des différences fortes de caractéristiques entre les multiples échantillons d'un même matériau prélevés au sein d'une même paroi. Ainsi, dans le but d'étudier l'impact de la variation des propriétés hygriques sur le comportement hygrothermique global de la paroi, une étude de sensibilité à la variation du coefficient de diffusion hygrique est menée. Trois cas de simulation sont considérés (cas 5, 7 et 8) tels que définis dans le tableau 6.1. L'effet de la sensibilité face au coefficient de diffusion hygrique s'explique par le degré de sensibilité sur l'état hygrothermique du matériau car ce coefficient traduit l'importance des phénomènes de diffusion de la vapeur d'eau au sein du matériau, de son transfert thermique par conduction et de son pouvoir tampon hygroscopique.

La figure 6.8 présente l'influence de la variation des propriétés hygriques de la structure porteuse sur les profils longitudinaux et transversaux de la température au centre de la paroi. Une variation de la diffusivité hygrique du matériau de construction composant le mur humide implique la variation du nombre de Biot massique. Pour une valeur de diffusivité massique importante (cas 8), le matériau est perméable, caractéristique visible en figure 6.8 grâce à la plus faible variation des températures transversale et longitudinale du mur. En effet, l'air chaud circulant dans la lame d'air a une plus grande capacité à contenir de la vapeur d'eau. Dans ces simulations, l'ambiance extérieure est maintenue dans des conditions constantes, à 10°C et 70% d'humidité relative, ce qui représente

des conditions climatiques hivernales. Ces conditions impliquent que la pression de vapeur résultante est souvent supérieure à l'intérieur du local par rapport à l'extérieur. Ce différentiel de pression de vapeur engendre une migration de vapeur par diffusion vers l'extérieur. Cette vapeur traverse le mur humide et se rapproche de l'extérieur, puis se refroidit progressivement. Si la température du point de rosée est atteinte, la vapeur se condense à l'intérieur du matériau et peut alors dégrader les performances des matériaux et avoir des conséquences sur la durabilité et la pérennité de la paroi, sur ses performances ainsi que sur le confort et la santé des occupants. L'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau, gouvernée par le coefficient de diffusion hygrique (voir Eq. 4.20), a pour conséquence de réduire le risque de condensation interne au travers de l'augmentation de la température au sein de la paroi. La pression de vapeur d'eau reste continuellement inférieure à la pression de vapeur d'eau saturante car la température de surface interne de la paroi reste suffisamment élevée. D'une manière similaire, une diminution de la diffusion hygrique engendre une augmentation de la résistance à la diffusion de vapeur (cas 7). Le matériau est moins perméable, ce qui a pour conséquence de condenser l'humidité à l'intérieur du matériau, et par la suite de refroidir la paroi.

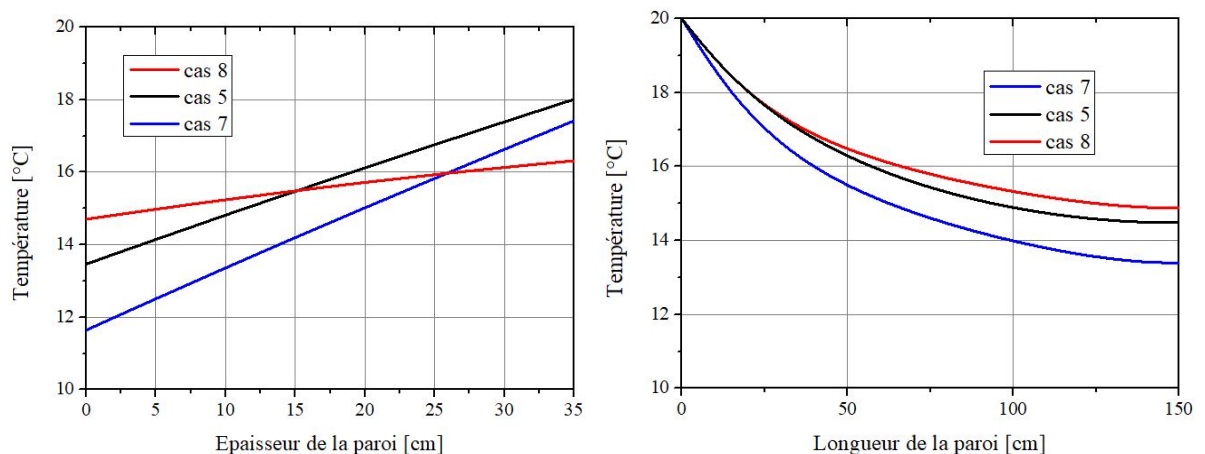


FIGURE 6.8: Évolutions de la température au sein du mur humide en fonction de la diffusion hygrique

La figure 6.9 montre l'évolution de la température et de l'humidité absolue de l'air circulant dans la lame ventilée adossée au mur humide. Ces résultats montrent que la résistance du matériau à la diffusion de vapeur d'eau, gouvernée par la diffusivité hygrique, stimule les transferts thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. L'air se refroidit et sa capacité à contenir de la vapeur d'eau est réduite. Une augmentation de la diffusion hygrique du mur de $\pm 30\%$ implique un écart type relatif de $\pm 7\%$ des résultats numériques, tant pour la température que pour l'humidité absolue de l'air (par rapport à la valeur de référence du cas 5). Une diminution de la diffusion hygrique du mur de $\pm 20\%$ engendre une variabilité des résultats de l'ordre de $\pm 3\%$ en température et en humidité absolue de l'air.

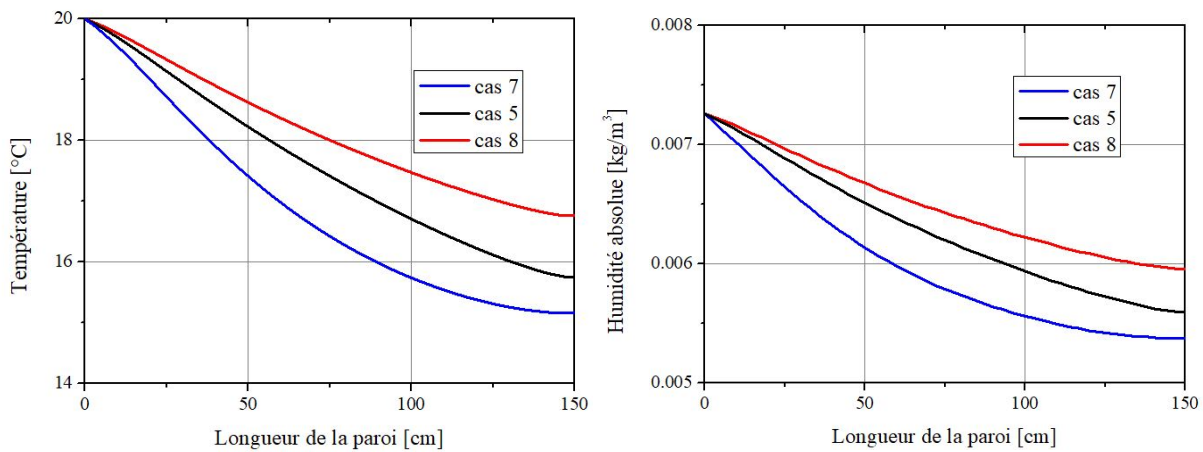


FIGURE 6.9: Évolutions de la température et de l'humidité absolue de l'air dans la lame d'air en fonction de la diffusion hygrique

L'influence du coefficient de diffusion hygrique sur les nombres adimensionnés de Nusselt et de Sherwood locaux est présentée en figure 6.10, à l'interface entre la lame d'air et le milieu poreux. Les transferts hygrothermiques sont sensiblement influencés par la variation de la diffusivité hygrique du milieu poreux. L'évolution du nombre de Nusselt local montre que les valeurs les plus élevées de Nusselt local le long de l'interface correspondent à une faible valeur de diffusivité hygrique. En effet, la diminution du coefficient de diffusion hygrique du milieu poreux augmente le gradient thermique, stimulant alors les transferts thermiques par convection. Il en résulte une augmentation significative du nombre de Nusselt. Le nombre de Sherwood est inversement proportionnel au coefficient de diffusion de vapeur d'eau. Un coefficient de diffusion hygrique élevée engendre alors une forte prédominance des transferts de masse par diffusion, par rapport à la convection (le nombre de Sherwood décroît).

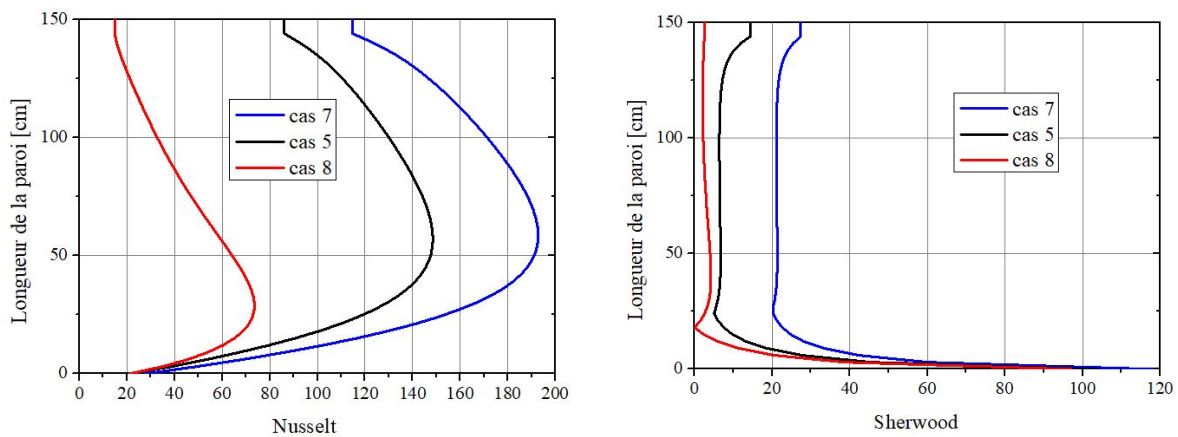


FIGURE 6.10: Évolutions des nombres de Nusselt et Sherwood locaux à l'interface entre la lame d'air et le milieu poreux au regard de la diffusion hygrique

Finalement, une variation moyenne de $\pm 25\%$ de la valeur du coefficient de la diffusion hygrique a un impact sensiblement important sur la modélisation du comportement hy-

grothermique de la paroi. Les résultats précédents montrent que ce coefficient de diffusion hygrique a une très forte incidence sur la température du mur humide et de l'air dans la lame ventilée. L'analyse des nombres de Nusselt et Sherwood locaux, dans le même sens, montre qu'une variation moyenne de $\pm 25\%$ de la valeur de la diffusivité hygrique, engendre un écart type relative respectivement de 50% et 6% pour les échanges thermique et massique.

6.1.4 Impact de la géométrie du modèle

L'analyse de l'impact de la géométrie de la paroi humide sur les transferts hygrothermiques est menée par le truchement d'un facteur de forme, dépendant du ratio de la hauteur de la paroi porteuse par rapport à son épaisseur (voir tableau 6.2 - Cas 9 et 10). Les deux facteurs utilisés représentent une paroi de 150cm de hauteur et de 35cm et 20cm d'épaisseur. Les conditions de modélisation sont similaires, à l'exception du facteur de forme.

La figure 6.11 illustre l'évolution de la température transversale et longitudinale du mur en fonction de la variation de l'épaisseur. L'évolution transversale de la température au centre de la paroi montre que l'épaisseur de l'ossature porteuse influence la température au sein de la paroi. En effet, le gradient de température entre les deux surfaces de la paroi est de 6°C lorsque l'épaisseur est de 20cm et 4°C pour une épaisseur de 35cm. L'évolution axiale de la température au centre de la paroi humide montre un écart type relatif de 20% lors qu'on réduit l'épaisseur de la structure porteuse de 40%.

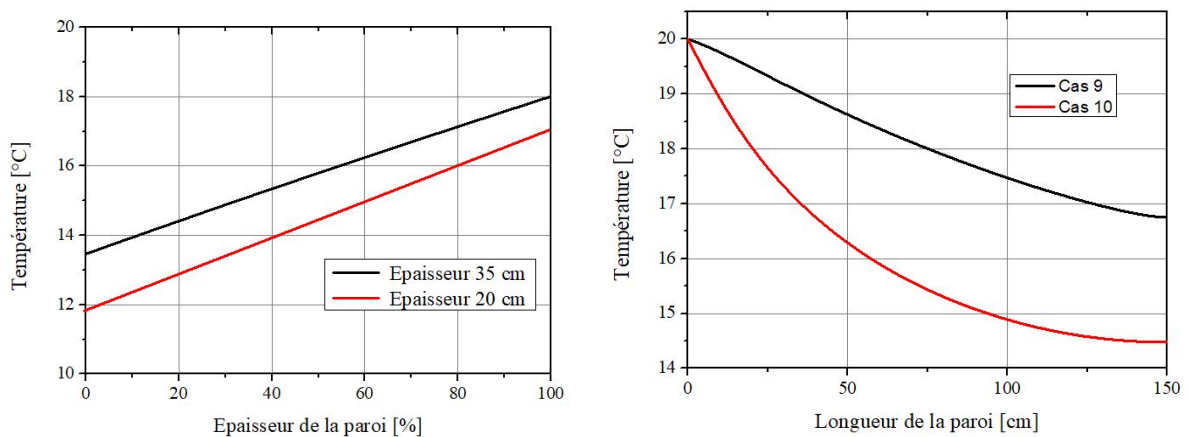


FIGURE 6.11: Évolutions transversaux et longitudinaux de la température de la paroi au regard de la géométrie

Le gradient thermique entre le pied et la tête de la paroi varie de 3°C lorsque son épaisseur est de 35cm, tandis que celui-ci est de 5°C avec une épaisseur est de 20cm. L'augmentation de l'inertie thermique, liée à l'épaisseur de la paroi, justifie cette observation. Comme attendu, une augmentation de l'épaisseur de la paroi entraîne un accroissement

de la capacité de la paroi à s'opposer aux changements extérieurs et à emmagasiner de la chaleur.

La figure 6.12 présente les évolutions transversales et longitudinales de la teneur en eau dans la paroi. Ces résultats mettent en lumière le fait que la réduction de l'épaisseur de 40% entraîne une augmentation de la teneur en eau de $3\text{g}/\text{m}^3$ sur la surface interne de la paroi. De plus, la réduction de l'épaisseur implique une augmentation de la teneur en eau en haut de la paroi de $5\text{g}/\text{m}^3$. En effet, la réduction de l'épaisseur implique la réduction de la surface au pied de la paroi qui est en contact avec le sol et où l'eau monte par effet succion sous un gradient de pression capillaire. Ce gradient de pression est plus important lorsqu'on réduit la section (effet Bernoulli).

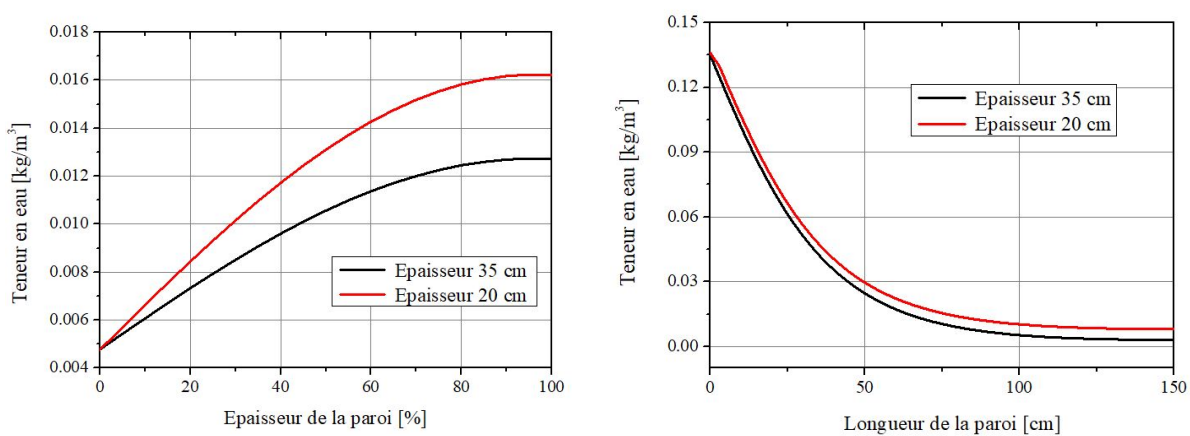


FIGURE 6.12: Évolutions transversales et longitudinales de la teneur en eau de la paroi en fonction de la géométrie

Les évolutions de la température et de l'humidité absolue de l'air s'écoulant dans le canal sont reportées en figure 6.13. L'épaisseur de la paroi impacte la température de l'air ainsi que son humidité relative. Pour une diminution de l'épaisseur de 15cm, l'écart type relatif est de 10%, tant en température qu'en humidité absolue. En effet, la

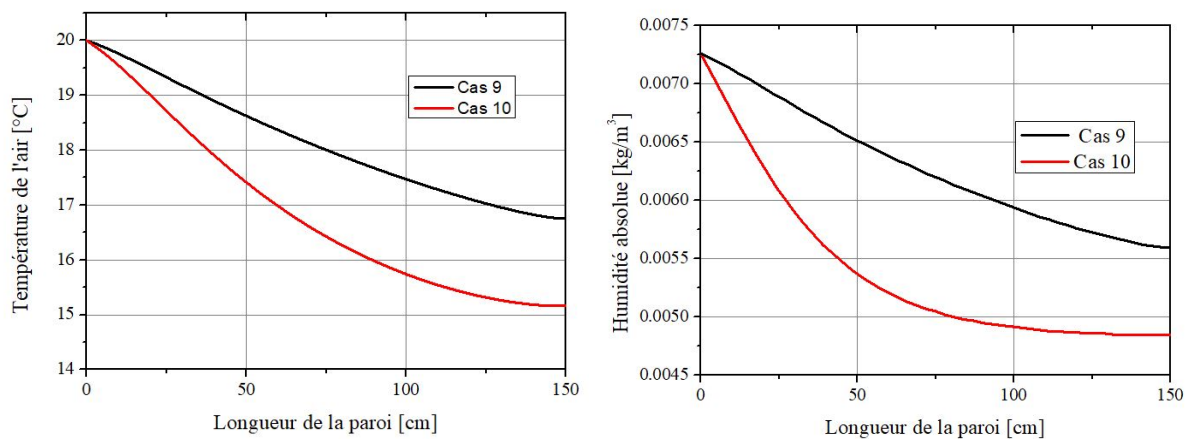


FIGURE 6.13: Évolutions de la température et de l'humidité absolue dans la lame d'air en fonction du facteur de forme

diminution de l'épaisseur de la paroi implique une diminution de l'inertie thermique et du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (S_d) qui exprime un rapport entre la perméance et l'épaisseur de la paroi. Ces paramètres favorisent les échanges hygrothermiques à l'interface entre la paroi et l'air du canal ventilé.

La figure 6.14 présente l'influence de la variation de l'épaisseur sur les nombres de Nusselt et Sherwood locaux. La diminution de l'épaisseur de 40% réduit le nombre de Nusselt. L'écart type relatif est de l'ordre de 70%. Ainsi, la diminution de l'épaisseur implique la diminution de la résistance thermique du milieu poreux qui est défini comme étant un rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique (Eq. 3.14). Une réduction de la résistance thermique favorise les échanges par conduction. Néanmoins la variation de l'épaisseur n'a pas un effet significatif sur le nombre de Sherwood. La diminution de l'épaisseur de mur humide réduit sa résistance thermique ainsi que sa résistance à la diffusion de vapeur mais n'engendre pas de modification de la nature des échanges à l'interface entre la structure porteuse et la lame d'air ventilée.

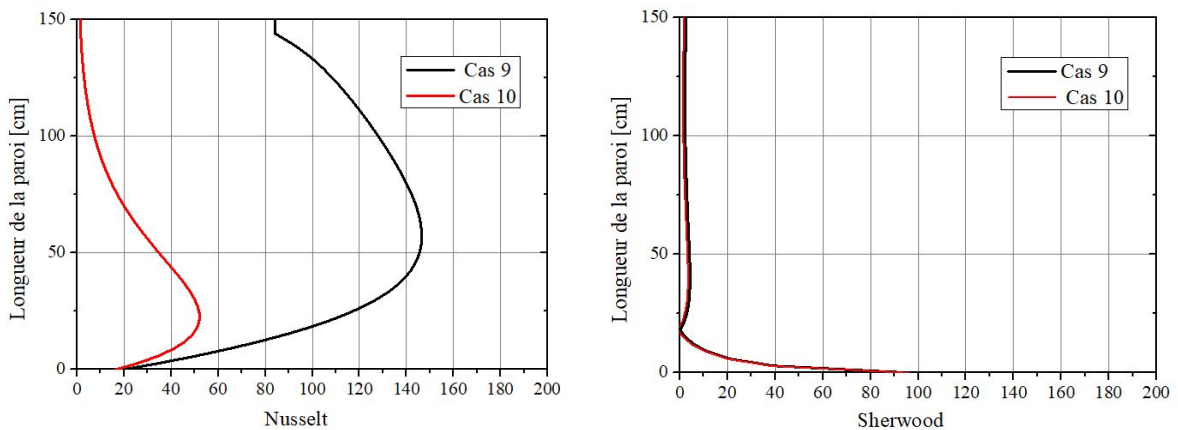


FIGURE 6.14: Évolutions des nombres de Nusselt et Sherwood locaux à l'interface entre la lame d'air et le milieu poreux au regard de l'épaisseur de la paroi

6.2 Influence des paramètres hygrothermiques et aérauliques de l'air insufflé

6.2.1 Variation des conditions hygrothermiques

Dans cette partie, l'influence de la variation des paramètres hygrothermiques de l'air dans la lame est investie, en régime permanent établi, soit après 64 jours. Les valeurs de température et d'humidité relative de l'air ambiant dans le canal sont considérées entre 18°C et 25°C et entre 30% et 70%, telles que définies dans le tableau 6.2. Dans un premier temps, la vitesse de l'air à l'entrée du canal est fixée à 0.001m/s, puis cette donnée est considérée égale à 0.01m/s et enfin 0.1m/s.

Soufflage d'air à 20°C et 50% d'humidité relative

L'air est insufflé dans la lame d'air à une température de 20°C et une humidité relative égale à 50%, ce qui correspond à une humidité absolue de 7g/m^3 . La vitesse de soufflage est égale à 1mm/s. Le mur est initialement stabilisé à 13°C, en contact direct avec le sol afin qu'un flux d'eau puisse pénétrer le pied de paroi pour assurer des remontées capillaires.

La figure 6.15 représente les champs des isothermes et d'iso-concentrations dans la paroi en briques, pour une ambiance extérieure de 10°C et 70% d'humidité relative. Le pied de mur prend la température de l'eau qui est égale à 20°C. La teneur en eau dans le bas de mur est égale à la teneur en eau maximale du matériau composant le mur en briques en terre cuite, soit 135g/m^3 . Les champs de température dans le mur évoluent de 20°C à 14°C à l'intérieur, avec une température moyenne au cœur de proche de 17°C. Cette variation de la température est gouvernée par les actions des transferts de chaleur et de masse par diffusion et convection entre la paroi (et l'extérieur) et l'air circulant dans le canal ventilé. Un accroissement du flux de chaleur transféré par conduction en surface interne de la paroi est visible, et, par conséquence, une diminution de la température du mur. Cette baisse de la température montre que les quantités de chaleur, apportées par conduction à travers cette paroi et par convection par l'air sur la surface interne, sont inférieures à la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation de l'eau de surface. A l'équilibre, cette température atteindra une valeur proche de celle de l'air ambiant.

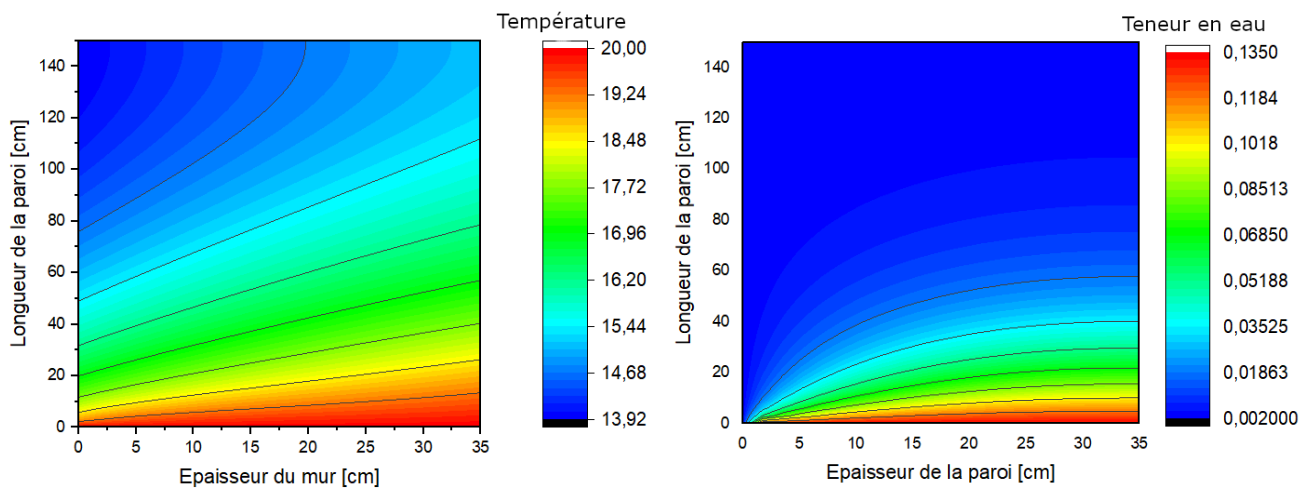


FIGURE 6.15: Cas 11 - Champs des isothermes et iso-concentrations dans la paroi humide

La teneur en eau est égale, en bas du mur, à la teneur en eau maximale du matériau de construction composant cette paroi en raison de la progression de l'eau liquide par effet succion. Les remontées capillaires atteignent 1m dans cette configuration. La surface externe est à l'équilibre avec l'extérieur. La teneur en eau au milieu de la paroi et sur la face interne diminue sous l'effet des forces de gravitation et des phénomènes d'évaporation qui s'additionnent aux actions de transfert de masse et de chaleur par diffusion massique et

par convection. Les transferts thermiques se font de la face interne vers la face externe. En effet, le refroidissement de la face externe de la paroi par l'air neuf circulant à l'extérieur de la paroi et l'air chaud insufflé dans le canal ventilé induit un gradient de température entre les deux faces de la paroi, impliquant un transfert par conduction. En pied de la paroi, la différence de températures est quasi négligeable entre les deux faces ce qui implique un gradient de chaleur très faible. A mi-hauteur comme en haut de la paroi, les transferts de chaleur et de masse par convection et par conduction sont plus importants, entraînant la diminution de la teneur en eau dans la paroi. Ainsi, les transferts massiques se font de l'extérieur vers l'intérieur.

La figure 6.16, qui illustre les champs d'isothermes et d'iso-concentrations dans la lame d'air, démontre que l'air dans la lame d'air pénètre à 20°C. De l'amont vers l'aval du canal, la température de l'air diminue pour atteindre un état d'équilibre avec la face interne de la paroi. En contrepartie, le champ d'iso-concentration montre que l'air, entrant à une humidité absolue de $7g/m^3$, se charge en humidité. Sa concentration en vapeur d'eau augmente dès qu'il entre en contact avec la paroi. Ensuite, au-fur-et-à-mesure de la progression de l'air dans le canal, sa température diminue. Il se refroidit et s'assèche, et par conséquent, son humidité absolue diminue. A la sortie du canal, l'air atteint une humidité absolue de l'ordre de $5.5g/m^3$. Ceci implique que les transferts massiques se font de la face interne vers la face externe de la paroi, justifiant les faibles teneurs en eau enregistrées sur la face externe.

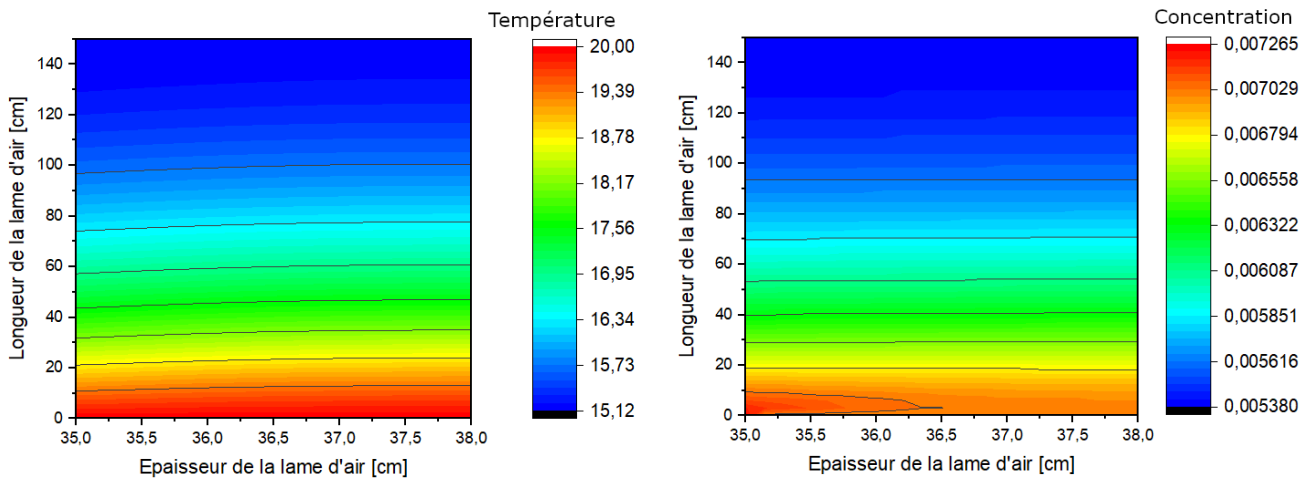


FIGURE 6.16: Cas 11 - Champs des isothermes et d'iso-concentration dans la lame d'air

La figure 6.17 illustre l'évolution axiale des nombres adimensionnels de Nusselt local et de Sherwood local le long de la paroi. Les transferts de chaleur à l'entrée du canal sont plus faibles car les gradients de températures sont faibles également. De plus à l'entrée, les échanges massiques sont assez importants. En effet, l'augmentation de l'humidité de l'air à l'entrée du canal engendre une diminution des transferts de chaleur par mode latent. Ensuite, l'air monte en aval, engendrant un accroissement du nombre de Nusselt.

Ce principe est gouverné par l'augmentation du gradient de températures qui influe sur le nombre de Nusselt sensible, et par le gradient de fractions massiques qui pilote le nombre de Nusselt latent. Les gradients thermique et massique entre la paroi en briques et son ambiance y sont plus importants, induisant un nombre de Nusselt local très important. Quand la température de l'air s'approche de celle de la paroi, l'état d'équilibre s'établit. Le nombre de Nusselt local diminue alors progressivement. Ainsi, une augmentation de la température de paroi engendre une augmentation de la fraction massique à la paroi et donc des transferts par mode latent. En revanche, l'augmentation de la température réchauffe le fluide et, par la suite, entraîne une diminution des transferts par mode sensible.

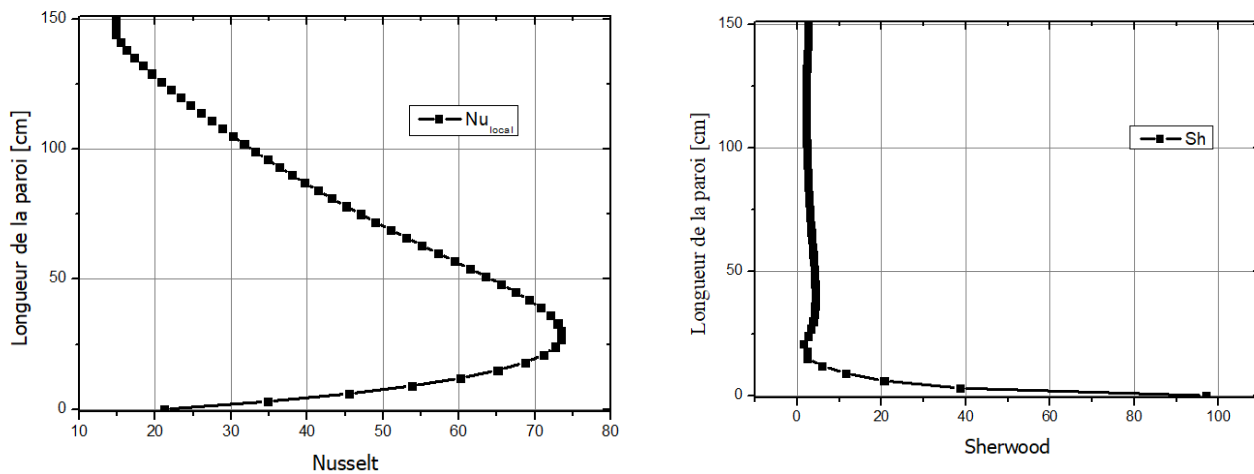


FIGURE 6.17: Cas 11 - Évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood à l'interface entre la paroi et la lame d'air

L'évolution du nombre de Sherwood (à droite sur la figure 6.17) caractérise le transfert de masse le long de l'interface entre la paroi et la lame d'air. L'augmentation de la fraction massique imposée en bas de la paroi engendre une augmentation du gradient de concentration entre la paroi et le fluide au voisinage - et donc une augmentation du nombre de Sherwood. La valeur la plus élevée du nombre Sherwood est obtenue à l'entrée de la lame d'air. En effet, les mêmes phénomènes justifiant l'évolution du nombre de Nusselt sensible s'appliquent au nombre de Sherwood car, dans ce cas de simulation, les nombres de Prandtl et de Schmidt, caractérisant les transferts thermiques et massiques, sont fortement similaires. La courbe d'évolution du nombre de Sherwood présente une légère diminution au voisinage de l'entrée du canal. A mesure du déplacement de l'air vers l'aval, la vapeur d'eau est retirée de l'air en raison des phénomènes de condensation sur la surface interne de la paroi. Ainsi, le gradient de fraction massique diminue. Le nombre de Sherwood tend asymptotiquement vers 3.16, domaine représentatif d'une convection forcée.

Soufflage d'air à 25°C et 30% d'humidité relative

Un air insufflé à une température de 25°C et de 30% d'humidité relative est considérée, équivalent à une humidité absolue de 9g/m^3 . La vitesse de l'air est maintenue à 0.001m/s quand les conditions hygrothermiques externes sont de 15°C et 70% d'humidité relative.

La figure 6.18 montre la distribution de la température et de la teneur en eau au sein de la paroi. La température de la surface externe de la paroi diminue progressivement en fonction de la hauteur de la paroi sous l'action des transferts de chaleur et de masse par convection entre la paroi en briques de terre cuite et l'air extérieur, jusqu'à atteindre une température de l'ordre de 15.5°C, assez proche de la température de l'air circulant à l'extérieur. A l'entrée du canal, en surface interne de la paroi, la température de la paroi augmente de 3°C pour atteindre une température de l'ordre de 23°C, assez proche de la température de l'air dans le canal. Cette augmentation de température à l'entrée de la lame d'air, sur la surface interne de la paroi, est due aux échanges hygrothermiques convectifs et conductifs. La baisse de la température au long de la paroi démontre un phénomène d'évaporation de surface, sous l'action des transferts de masse et de chaleur par diffusion et par convection. La teneur en eau enregistrée dans la paroi en briques de terre cuite est maximale en bas de mur. Au-fur-et-à-mesure de la progression de l'eau dans la paroi par effet de succion, la teneur en eau diminue progressivement. Le niveau des remontées capillaires est réduit à 60cm lorsqu'on effectue un soufflage d'air chaud et sec. En surface externe de la paroi, la teneur en eau demeure constante. Les échanges massiques avec l'extérieur et sur la surface interne, vers la lame d'air, sont prédominants. Un phénomène d'évaporation, ayant lieu aux interfaces, a pour conséquence une diminution de la teneur en eau et une augmentation de la température de la paroi par rapport à la température initiale.

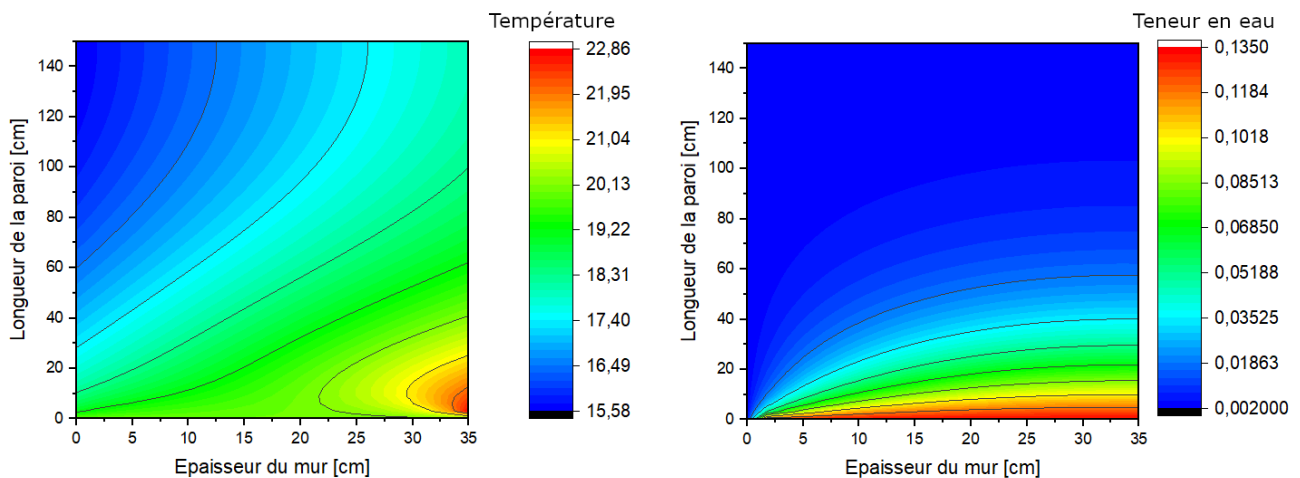


FIGURE 6.18: Cas 12 - Champs des isothermes et iso-concentrations dans la paroi humide

La figure 6.19 montre la distribution de la température et de la concentration de

vapeur d'eau dans la lame d'air lors du soufflage de l'air. La température de l'air diminue progressivement le long du canal pour passer de 25°C à l'entrée du canal à 18°C à la sortie de la lame d'air. Même si un refroidissement de l'air est observé, sa température reste supérieure à celle de la paroi en briques. L'air conserve ainsi son pouvoir évaporatif, engendrant une augmentation de l'humidité absolue identifiée dans la lame d'air ventilée. Le phénomène d'évaporation de surface entraîne une accumulation de la vapeur d'eau dans la lame d'air, et plus particulièrement à l'interface entre la paroi et le canal. L'humidité absolue de l'air s'accroît, de $6\text{g}/\text{m}^3$ à l'entrée du canal jusqu'à $11\text{g}/\text{m}^3$ à la sortie de la lame d'air.

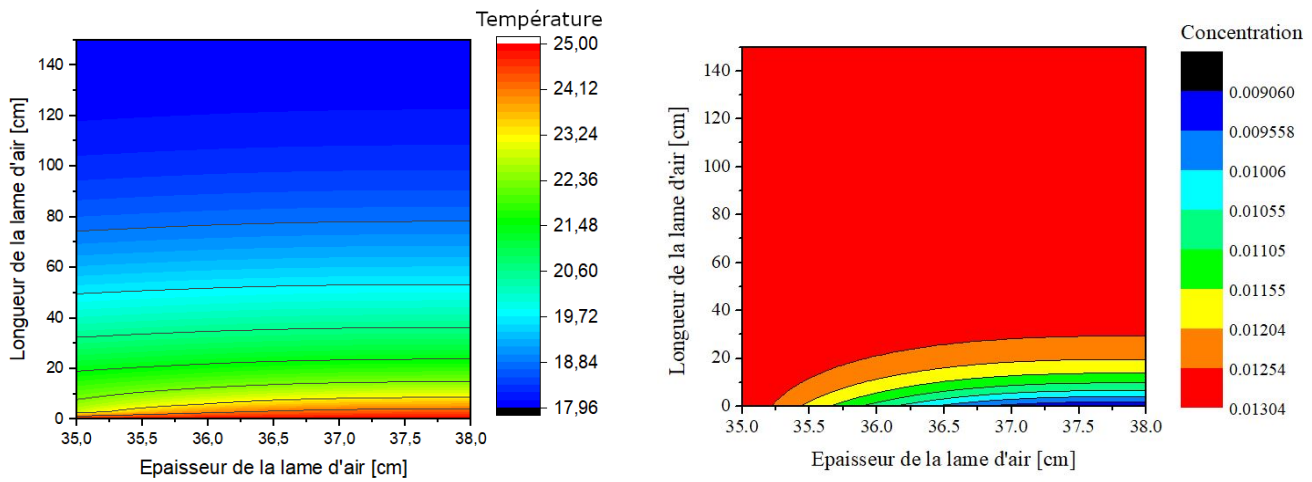


FIGURE 6.19: Cas 13 - Champs des isothermes et iso-concentrations dans la lame d'air

La figure 6.20 montre l'évolution des nombres de Nusselt et de Sherwood locaux le long de la surface interne de la paroi en contact avec l'air insufflé dans la lame d'air. Les valeurs les plus élevées des nombres de Nusselt et Sherwood sont identifiées dans la zone d'entrée du canal. Le nombre de Nusselt local augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de l'entrée du canal, au contact du fluide insufflé dans la lame d'air. Les échanges massique et thermique sont plus importants, gouvernés par les gradients thermique et massique. Ensuite, les échanges diminuent progressivement jusqu'à la sortie du canal. Le nombre de Nusselt tend asymptotiquement vers 15, qui est une valeur caractéristique du domaine de la convection forcée pleinement développée, dans un tel cas de modélisation. Les corrélations de calcul de Nusselt et de Sherwood locaux en convection forcée et en écoulement laminaire sont présentées dans les équations 6.1 et 6.2 [Bergman et al., 2011]. Le nombre de Sherwood, quant à lui, marque son maximum à l'entrée du canal. L'augmentation de l'humidité absolue dans le canal n'a pas d'effet sur le nombre de Sherwood.

$$Nu_{Local} = 0.664Re^{0.5}Pr^{0.33} \quad (6.1)$$

$$Sh_{Local} = 0.322Re^{0.5}Pr^{0.67} \quad (6.2)$$

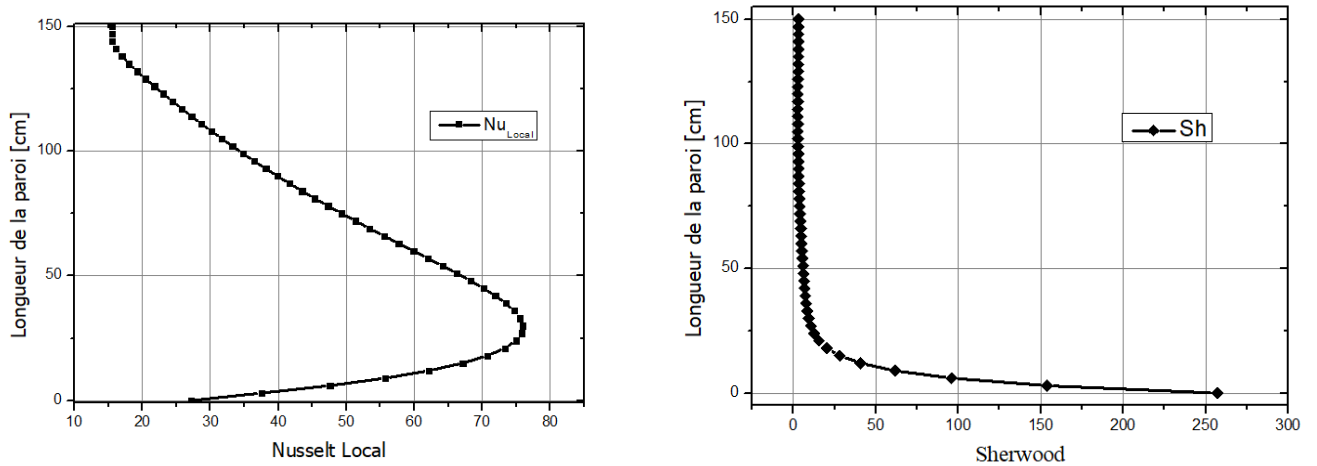


FIGURE 6.20: Cas 12 - Évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood à l'interface entre la paroi et la lame d'air

Soufflage d'air à 18°C et 60% d'humidité relative

Finalement, un air insufflé à une température de 18°C et à 60% d'humidité relative est considéré, correspondant à une humidité absolue de $9g/m^3$. La vitesse de l'air est de 1mm/s et l'air circulant à la surface extérieure de la paroi est maintenu à une température de 15°C et une humidité relative de 70%.

La figure 6.21 illustre les températures et teneurs en eau de la paroi en briques de terre cuite. De faibles gradients de températures et d'humidités relatives sont appliqués

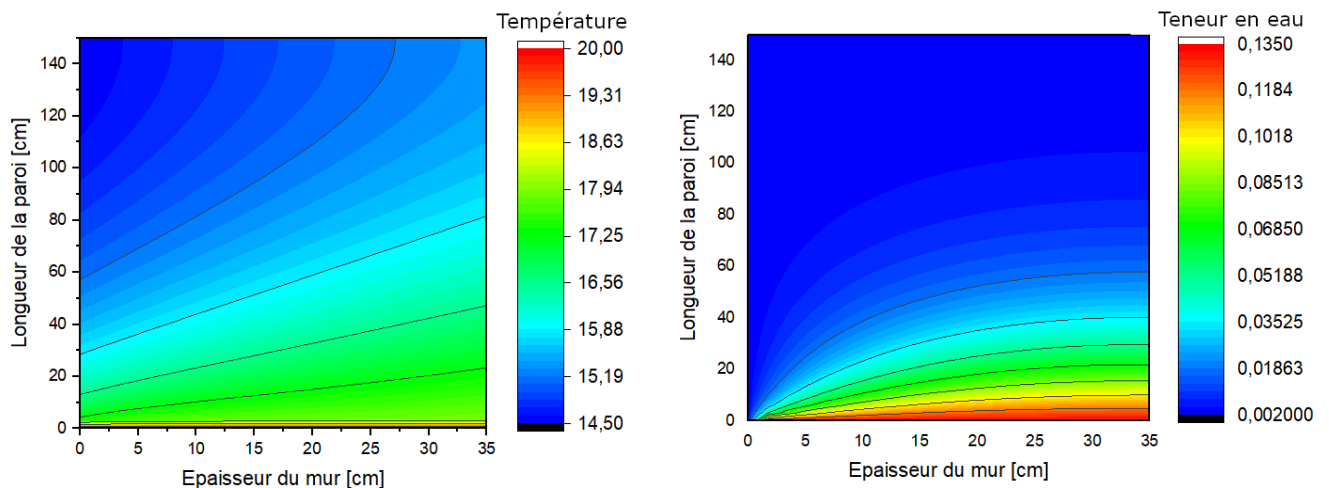


FIGURE 6.21: Cas 13 - Champs des isothermes et d'iso-concentration dans la paroi humide

de part et d'autre de la paroi, sensiblement impactée par les transferts hygrothermiques inhérents. La température de la surface externe diminue en fonction de la hauteur, pour atteindre rapidement une température de 15°C assez proche de la température de l'air extérieur. La température de la surface interne de la paroi, en contact avec un air soufflé dans le canal à 18°C, diminue à son tour progressivement jusqu'à atteindre un équilibre en tête de paroi, entraînant le refroidissement de l'air du canal. La teneur en eau dans la paroi est maximale au pied du mur, là où interviennent les remontées capillaires (sur une hauteur de 80cm sous ces conditions). La teneur en eau tout au long de la surface externe est relativement constante. En revanche, au milieu comme sur la surface interne, la teneur en eau de la paroi diminue progressivement sous l'effet des forces de gravitation et des échanges hygrothermiques convectifs entre la paroi et l'air au voisinage.

La figure 6.22 présente les températures et les humidités absolues dans la lame d'air. L'air entre initialement à une température de 18°C et, sous l'effet des échanges conductifs et convectifs avec la paroi en briques de terre cuite, voit sa température diminuer progressivement et tendre vers une température de l'ordre de 15°C à la sortie du canal. Cette observation implique la diminution de l'humidité absolue de l'air dans le canal qui passe de $9\text{g}/\text{m}^3$ à l'entrée du canal à près de $6.5\text{g}/\text{m}^3$ à la sortie du canal. Cette diminution se traduit par l'apparition d'un phénomène de condensation dans la lame d'air. En effet la température de l'air est abaissée au-dessous du point rosée impliquant une transformation de la vapeur d'eau en eau liquide qui se condense sur la surface interne de la paroi. Ce phénomène, en conditions défavorables peut engendrer une dégradation de l'isolation thermique. En revanche, en conditions favorables, la condensation de surface de la paroi pourrait générer un confort d'été au travers de la régulation de la température de surface du mur (grâce à la chaleur latente de condensation de l'eau).

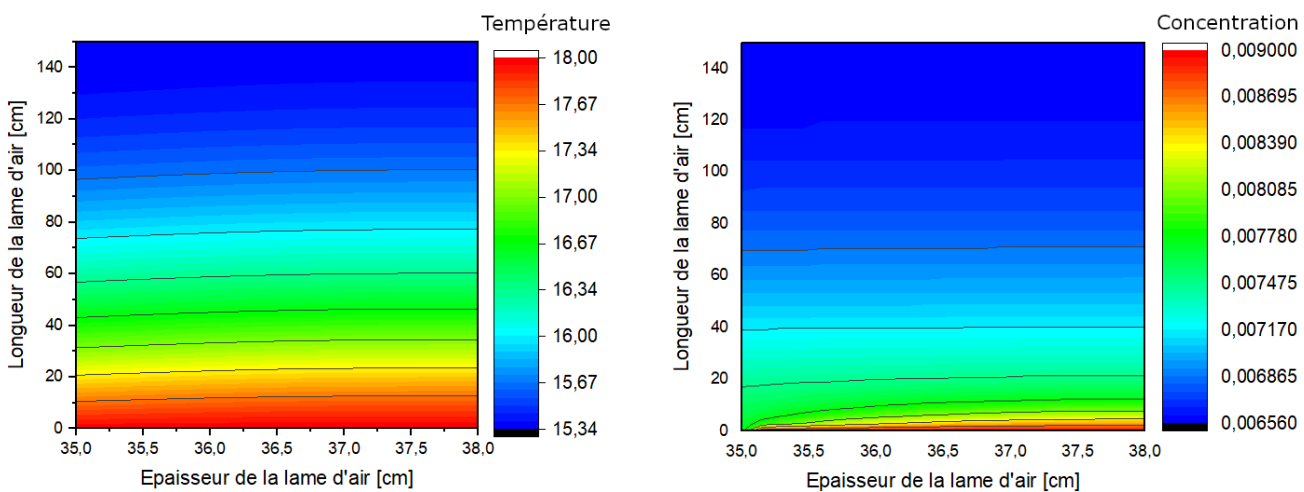


FIGURE 6.22: Cas 13 - Champs des isothermes et d'iso-concentration dans la lame d'air

La figure 6.23 reporte l'évolution axiale des nombres de Nusselt et Sherwood locaux sur la surface interne de la paroi en briques terre cuite. Le nombre de Nusselt atteint son

maximum au début du contact entre le fluide et la paroi, au regard de l'importance de gradients massiques entre eux, puis diminue rapidement. Le nombre de Sherwood marque son maximum à l'entrée du canal puis tends très rapidement vers 0.

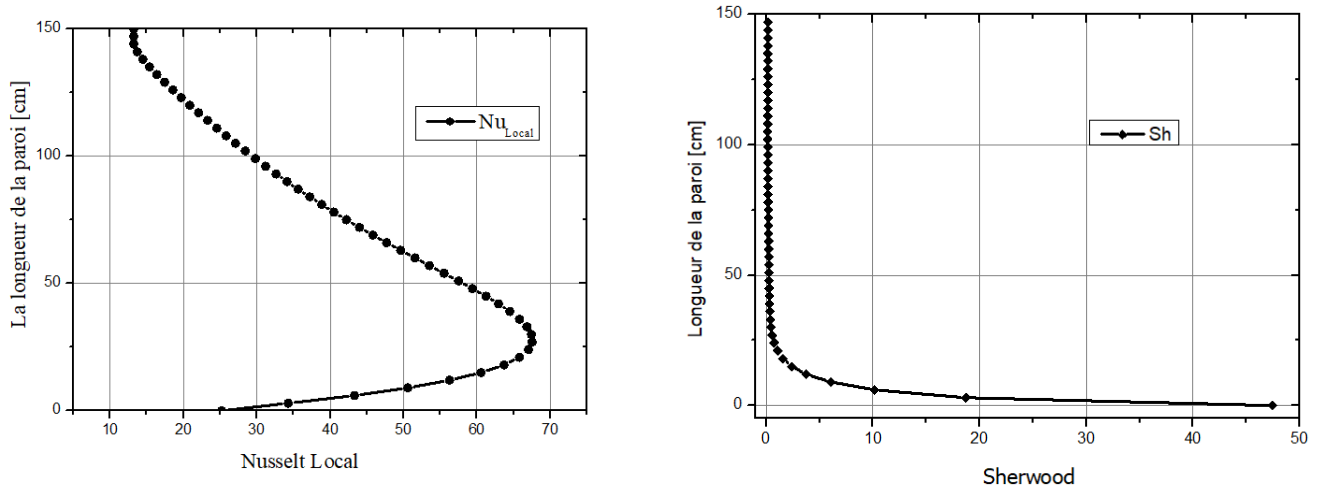


FIGURE 6.23: Cas 13 - Évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood à l'interface entre la paroi et la lame d'air

6.2.2 Vers l'optimisation des conditions de soufflages

Les analyses précédentes mettent en exergue l'influence prépondérante des conditions hygrothermiques du soufflage d'air neuf sur la réponse de la paroi humide ventilée. Ainsi, afin de tendre vers l'optimisation du fonctionnement du dispositif de ventilation de la lame d'air réalisée entre l'isolant thermique et la paroi humide, les principaux résultats des modélisations 11, 12 et 13 sont superposés et commentés afin de mettre en évidence des tendances de fonctionnement au regard des conditions climatiques environnementales.

Dans un premier temps, les répartitions des températures au cœur de la paroi humide sont présentées en figure 6.24. La figure de droite montre la distribution de la température dans la paroi humide quand la figure de gauche illustre la répartition de la température le long du canal ventilé. Les résultats démontrent que lorsque l'air insufflé dans la lame d'air a une température de 25°C et une humidité relative de 30% (cas 12), la température de la surface de la paroi augmente de 3°C dès l'entrée en contact avec l'air chaud. Puis, le flux d'air se refroidit progressivement - et assez lentement - jusqu'à atteindre une température d'équilibre de 18°C. Cette température à la surface de la paroi reste nettement supérieure à la température de l'air qui décroît, de 25°C à 15°C, entre l'amont et l'aval de la lame d'air. En revanche, pour les cas 11 et 13, la température dans la lame d'air chute au contact de la paroi. La température de surface de la paroi demeure sensiblement inférieure à la température de l'air dans le canal ventilé.

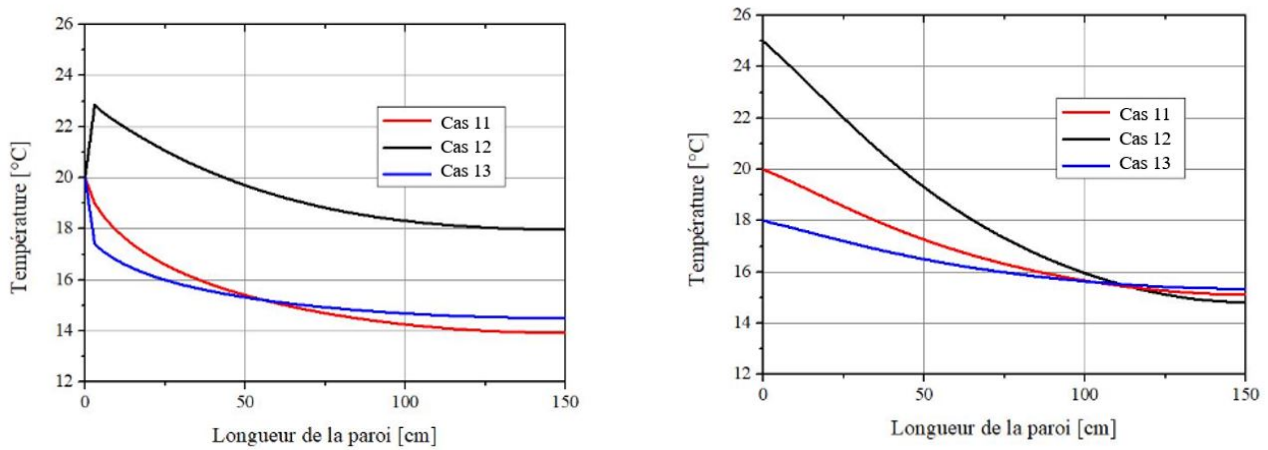


FIGURE 6.24: Comparaison des profils de température de surface de la paroi (à gauche) et de température de l'air dans le canal (à droite)

La figure 6.25 (à gauche) représente l'évolution de la teneur en eau de la surface de la paroi et (à droite) l'évolution axiale de l'humidité absolue de l'air qui s'écoule au voisinage de la paroi pour les cas 11, 12 et 13. Les résultats démontrent que lorsque l'air insufflé dans la lame d'air a une température de 25°C et une humidité relative de 30% (cas 12), l'humidité absolue de l'air augmente de $9\text{g}/\text{m}^3$ à $12\text{g}/\text{m}^3$, contrairement aux cas 13 et 11 où l'humidité absolue de l'air décroît respectivement de $3\text{g}/\text{m}^3$ et de $2.5\text{g}/\text{m}^3$ entre l'amont et l'aval du canal. En effet, l'air chaud a une capacité plus importante à absorber l'humidité qu'un air froid. La distribution axiale de la teneur en eau de la surface de la paroi demeure quasi-insensible, au regard des remontées capillaires. Néanmoins, on constate une légère diminution de la teneur en eau de la paroi pour le cas 12, en raison du transfert efficace de l'eau dans la paroi vers le canal ventilé. Ces résultats viennent en appui aux conclusions précédentes. Le soufflage d'un air chaud et faible en humidité

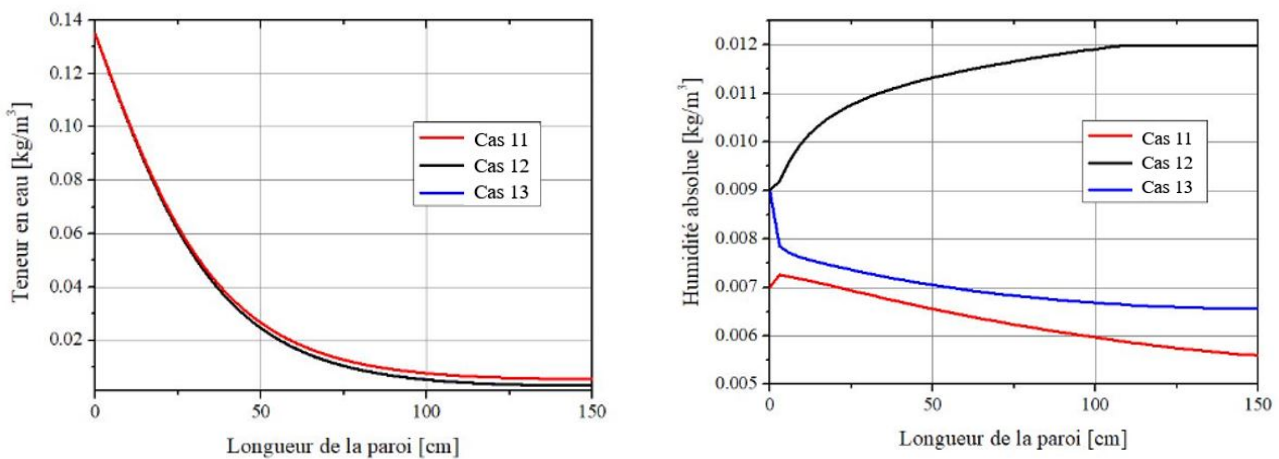


FIGURE 6.25: Comparaison des profils de teneur en eau de surface de la paroi (à gauche) et d'humidité absolue de l'air dans le canal (à droite)

favorise le phénomène d'évaporation à l'interface de la paroi humide et les échanges à l'interface entre la paroi et le canal.

La moisissure est une cause d'insalubrité et peut engendrer des allergies et d'autres problèmes respiratoires pour les occupants du logement. Les murs dont la température de surface est nettement plus froide que la température de l'air au contact permettent à la condensation de se former et, par conséquent, constituent un terreau idéal pour l'apparition et la prolifération de l'activité biologique. D'après ces résultats, la température à la surface interne de la paroi est supérieure à la température de l'air ambiant uniquement dans le cas 12. Sous des conditions de soufflage d'air ambiant à 25°C et 30% d'humidité relative, la température de la paroi augmente, ce qui empêche donc la formation de condensation, et favorise ainsi la bonne évaporation de l'humidité contenue dans le mur. Les évolutions des nombres locaux de Nusselt et de Sherwood à l'interface entre le milieu poreux et la lame d'air sont présentées en figure 6.26, pour les cas 11, 12 et 13. Les nombres de Nusselt et Sherwood locaux les plus élevés sont enregistrés pour le cas où le soufflage d'air s'effectue à une température de 25°C et une humidité relative de 30% (cas 12), ce qui favorise les échanges hygrothermiques par convection. La valeur la plus élevée du nombre de Nusselt local est à 25cm de l'entrée de la lame d'air, dont les valeurs maximales pour les cas 12, 11 et 13 sont respectivement de 78, 75 et 65. En revanche, la valeur la plus élevée du nombre de Sherwood local est à l'entrée du canal dont les valeurs maximales pour les cas 12, 11 et 13 sont respectivement de 250, 100 et 57. Les allures des évolutions de ces deux nombres sont fortement similaires, symbole du maintien de la nature des échanges entre la paroi et la lame d'air, tant d'un point de vue thermique et hygrique. Quelques soient les conditions de soufflage, sous ces conditions limites et initiales particulières, la convection hygrothermique, forcée, domine sur la conduction et la

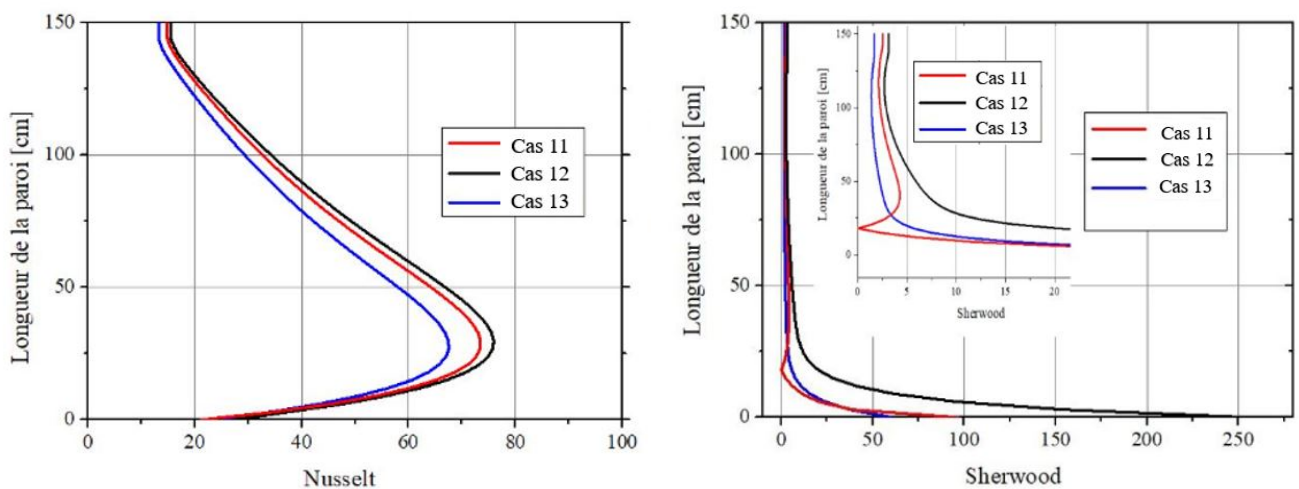


FIGURE 6.26: Évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood locaux à l'interface entre la paroi et la lame d'air pour différentes conditions hygrothermiques de soufflage

diffusion.

Néanmoins, même si le soufflage d'air sec et chaud (25°C et 30% d'humidité relative) conduit à une évaporation efficiente de l'humidité contenue dans la paroi, sous ces conditions hygrothermiques précises (15°C et 70% d'humidité relative), des plus amples investigations doivent être approfondies. En effet, sous ces conditions précises, les gradients thermique et massique sont optimaux, favorisant les flux depuis la paroi vers la lame d'air. Lorsque les conditions de soufflage sont proches de l'équilibre hygrothermique de la paroi, l'efficacité du système est moindre mais ne semble pas conduire à des désordres complémentaires au travers de l'apport d'une source d'humidité supplémentaires en surface intérieure de la paroi. Cette observation se limite uniquement à une condition hygrothermique bien précise, et ne peut en aucun cas être généralisé.

La ventilation d'air à une température de 25°C et à 30% d'humidité relative semble être une solution efficace uniquement lorsque les conditions hygrothermiques externes moyennes sont de l'ordre de 15°C et 70% d'humidité relative. Dans ce cas, les performances du canal ventilé semblent être optimales car le phénomène de condensation de surface est limité et l'évacuation de l'humidité dans la paroi est favorisée. La pérennité de l'isolant thermique semble être assurée.

6.2.3 Sensibilité à la vitesse de l'air insufflé

La vitesse de l'air peut également avoir une incidence prépondérante sur les phénomènes de transferts à l'interface entre la paroi partiellement humide et le canal d'air ventilé. En effet, les coefficients d'échanges surfaciques, tant thermique que massique, dépendent fortement de la vitesse de contact entre le milieu poreux et le fluide. Selon une démarche similaire aux études précédente, les nombres adimensionnés de Nusselt et Sherwood sont mis en lumière afin de dissocier les phénomènes fortement couplés gouvernant la dynamique de transferts thermique et massique.

La figure 6.27 présente le profil transversal de la vitesse de l'air à différentes hauteurs, lors d'un soufflage d'air à une vitesse de 0.001m/s. Ce profil correspond à un écoulement de Poiseuille en régime laminaire, à l'entrée du canal (à une hauteur de 5cm). A mesure de la progression de l'air le long des parois du canal, la vitesse de l'air est freinée par les forces de frottement contre les parois rigides qui tentent le ralentir le flux aéraulique (par l'effet Venturi [BROCH, 2006]). Cette décélération de l'écoulement d'air près des surfaces latérales est compensée par une accélération de la vitesse au centre de la lame ventilée. Le profil de vitesse à mi-hauteur est identique à celui de sortie de la lame d'air, ce qui démontre que le régime permanent est établi dès la mi-hauteur du canal. La courbe de vitesse devient convexe, de forme parabolique. La vitesse de l'air au centre du canal est égale à 0.0011m/s, soit en progression de 10% par rapport à la vitesse initiale.

Les conditions de soufflage de l'air et les conditions limites sont définies dans le tableau

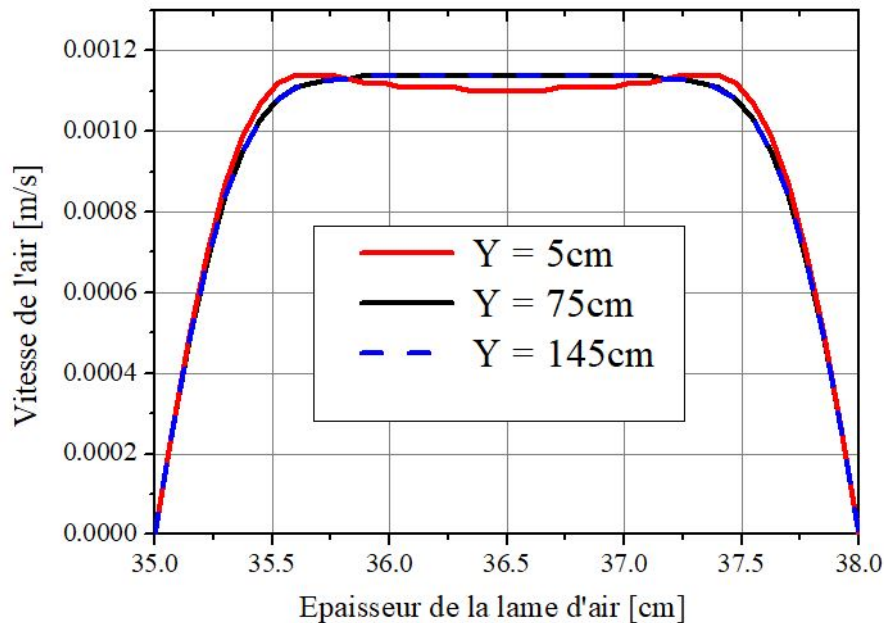


FIGURE 6.27: Profils axiaux de la vitesse de l'air dans le canal ventilé

6.2. La vitesse de l'air varie de 0.001m/s, 0.01m/s et 0.1m/s. La figure 6.28 représente l'influence de la variation de la vitesse de l'air dans le canal sur la température de la paroi (à droite) et sur la température de l'air (à gauche), tout en maintenant des conditions climatiques de soufflage fixes, à une température de 20°C et une humidité relative de 50%. L'ambiance externe est maintenue à 10°C et 70% d'humidité relative. L'accroissement de la vitesse de l'air à l'entrée de la lame ventilée influence de façon significative la distribution de la température sur les surfaces interne et externe de la paroi, ainsi que la température de l'air à l'intérieur du canal. En effet, les transferts convectifs de chaleur et de masse entre l'air qui s'écoule dans le canal et la surface interne de la paroi augmentent avec la vitesse de l'air à l'entrée du canal. En raison de l'évolution des coefficients d'échanges thermiques surfaciques, une augmentation de la température de surface interne de la paroi est observable ainsi qu'une diminution de la température de surface externe. On note aussi que l'accroissement de la vitesse augmente le gradient de température entre les surfaces externe et interne de la paroi. Le graphique de gauche sur la figure 6.28 montre l'influence de la variation de la vitesse sur la distribution axiale de la température tout au long du canal. L'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du canal provoque une modification de la structure de l'écoulement dans le canal. Une vitesse de soufflage d'air assez importante conduit à une variation significative de la température entre l'entrée et la sortie de la lame d'air. Ici, la convection forcée est prédominante. L'accroissement du nombre de Reynolds engendre une augmentation du gradient thermique entre la lame d'air et l'ambiance extérieure. Celui-ci gouverne alors des transferts convectifs de chaleur et de masse plus importants.

La figure 6.29 présente l'influence de la variation de la vitesse sur la distribution axiale

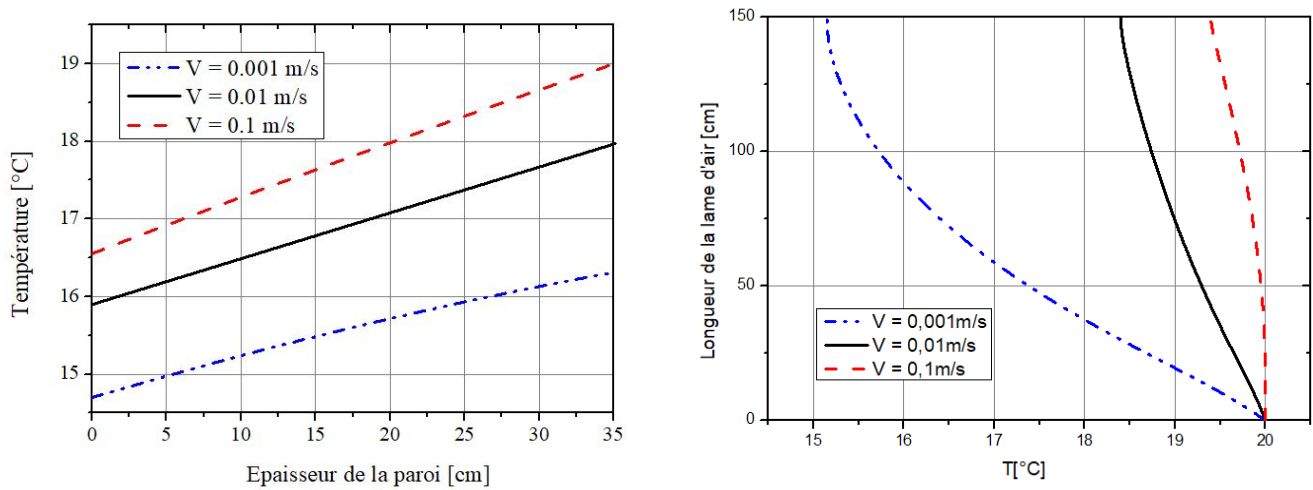


FIGURE 6.28: Influence de la variation de la vitesse sur la température de la paroi et de l'air

de la teneur en eau au niveau de la surface interne de la paroi et sur la concentration de vapeur d'eau de l'air dans la lame. La variation de la vitesse ne semble pas avoir d'un effet significatif sur l'évolution axiale de la teneur en eau au sein de la paroi, notamment en raison de la présence des remontées capillaires. En effet, l'augmentation de la vitesse de soufflage de l'air à l'entrée du canal provoque une diminution de la teneur en eau à la surface interne de la paroi. La concentration de vapeur d'eau de l'air est influencée par l'augmentation de la vitesse de l'air entrant dans le canal. La concentration de vapeur d'eau de l'air est directement régie par la vitesse de l'air insufflé au travers du coefficient d'échanges massiques surfaciques.

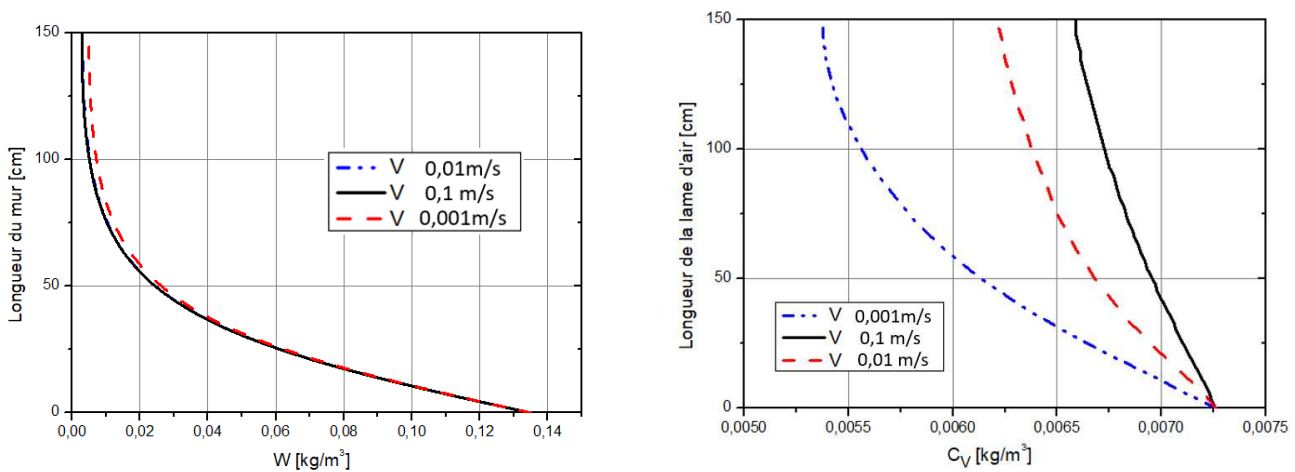


FIGURE 6.29: Influence de la variation de la vitesse sur la teneur en eau de la paroi et la concentration de vapeur dans la lame d'air

La variation de vitesse sur les nombres de Nusselt local et de Sherwood le long de l'interface entre la paroi et la lame d'air est visible en figure 6.30. L'accroissement du

nombre de Reynolds stimule les échanges hygrothermiques par convection forcée laminaire. Le nombre de Nusselt local est d'autant plus élevé que la convection prédomine sur la conduction. En effet, les valeurs des nombres locaux de Nusselt et de Sherwood augmentent dans le même sens que la vitesse de l'air. L'augmentation de la vitesse d'entrée de l'air accentue alors les coefficients d'échanges massique et thermique (h_m et h_t) et, par la suite, stimule les échanges hygrothermiques par convection.

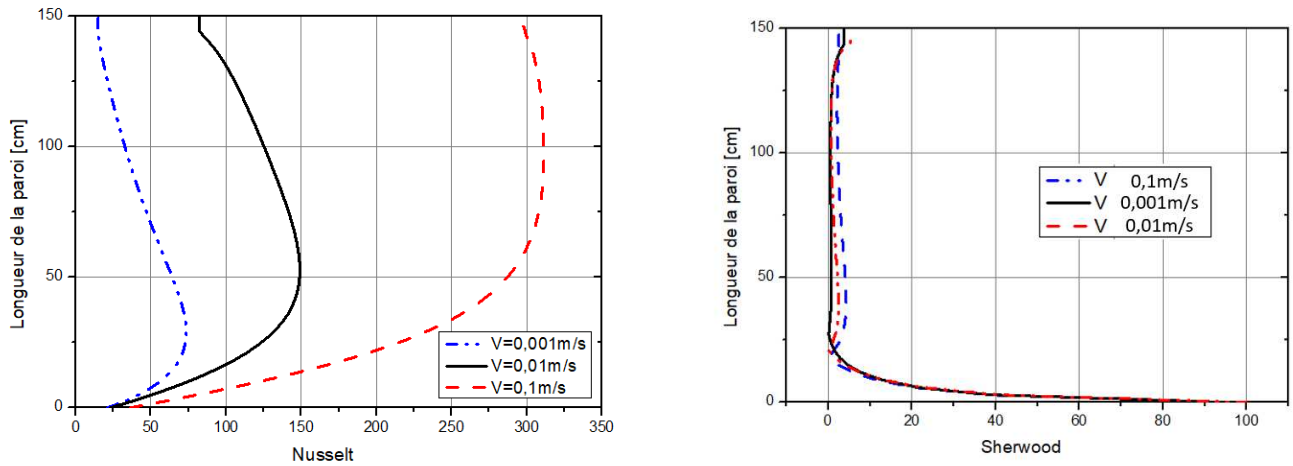


FIGURE 6.30: Influence de la variation de la vitesse de l'air sur les nombres du Nusselt et Sherwood locaux

6.3 Effet de la variation des conditions hygrothermiques extérieures

Une dernière section s'intéresse à l'impact des conditions hygrothermiques extérieures sur le comportement de la paroi partiellement humide ventilée. Les conditions d'entrée de l'air dans le canal sont les suivantes : une température de 20°C et une humidité relative de 50%. Les conditions hygrothermiques considérées sont synthétisées dans le tableau 6.3, correspondantes aux conditions hivernale, estivale et printanière de notre région à climat tempéré et relativement humide.

6.3.1 En conditions climatiques printanières

Dans un premier temps, les conditions printanières sont investies, avec une température de 15°C et une humidité relative de 70% appliquées en surface extérieure de la paroi. L'air insufflé dans la paroi présente une température de 20°C et une humidité relative de 50%. La vitesse de l'air est de 0.001m/s. Ces conditions initiales et limites sont constantes tout au long de cette section.

Effet sur la paroi humide

Les champs d'isothermes et d'iso-teneurs en eau au sein de la paroi en briques sont présentés en figure 6.31. La température en pied de la paroi est de 20°C, conformément aux conditions limites imposées pour la modélisation des remontées capillaires. La température de la face externe de la paroi décroît rapidement en fonction de la hauteur de la paroi pour atteindre une température de l'ordre 16°C, à l'équilibre avec la température de l'air extérieur. La température de la face interne de la paroi diminue légèrement à mesure de la progression de l'air dans le canal ventilé. Cette légère baisse est due à l'action des transferts de chaleur et de masse par diffusion et par convection entre cette paroi et l'air qui s'écoule dans le canal. La différence de températures entre la surface interne et la surface externe augmente en fonction de la hauteur de la paroi. Un accroissement du flux de chaleur transféré par conduction à la face externe de la paroi est alors observé. Le sens des transferts thermiques est de la surface interne vers la surface externe. De la même manière, la teneur en eau en pied de mur est égale à $140\text{g}/\text{m}^3$, valeur imposée par les conditions limites afin de saturer en eau le pied de la paroi (remontées capillaires). Puis, l'eau monte par effet succion, sous l'effet d'un gradient de pression capillaire. Elle s'accumule dans les pores de la paroi sous forme liquide. Les remontées capillaires atteignent une hauteur de 80cm dans ces conditions d'équilibre hygrothermique et aéraulique.

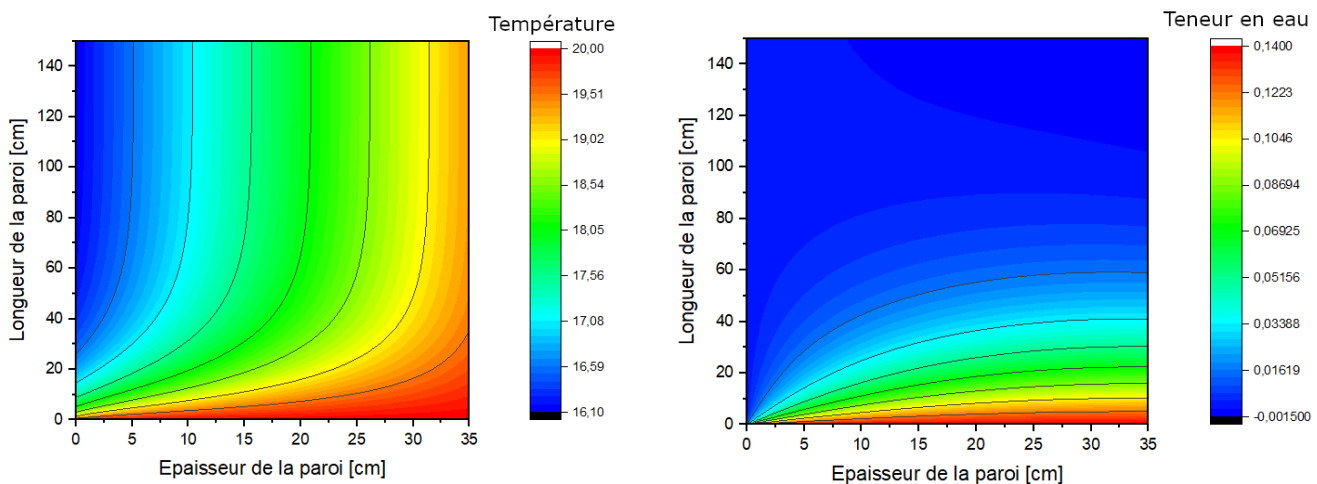


FIGURE 6.31: Isothermes et iso-teneur en eau dans la paroi humide en conditions printanières

En revanche, sur la surface externe de la paroi, la teneur en eau chute rapidement en raison de l'équilibre hygrique avec l'ambiance extérieure (figure 6.32). Cette diminution brusque de teneur en eau sur la surface externe de la paroi est due aux transferts convectifs. En effet, en pied du mur, l'écart entre la température de la paroi (20°C) et la température de l'air à l'extérieur (15°C) est important. Il en résulte un phénomène de refroidissement par évaporation de l'eau, c'est-à-dire un changement de phase de l'eau, de la forme liquide vers la forme vapeur. Cette évaporation est d'autant plus importante que la différence de

températures est élevée. La concentration en vapeur d'eau de l'air extérieur augmente en raison des échanges surfaciques entre l'extérieur et la paroi. La teneur en eau de la paroi diminue donc rapidement au contact de l'ambiance externe. Sur la surface interne de la paroi, la teneur en eau décroît lentement à mesure de la progression du flux d'air plus chaud et plus sec. On assiste à un phénomène de diffusion de masse depuis la paroi vers la lame d'air. Ce phénomène est caractéristique de transferts par convection forcée entre la surface interne de la paroi et l'air du canal ventilé. Le flux d'air contribue alors à la diminution de la teneur en eau au cœur des briques, notamment au voisinage du canal ventilé.

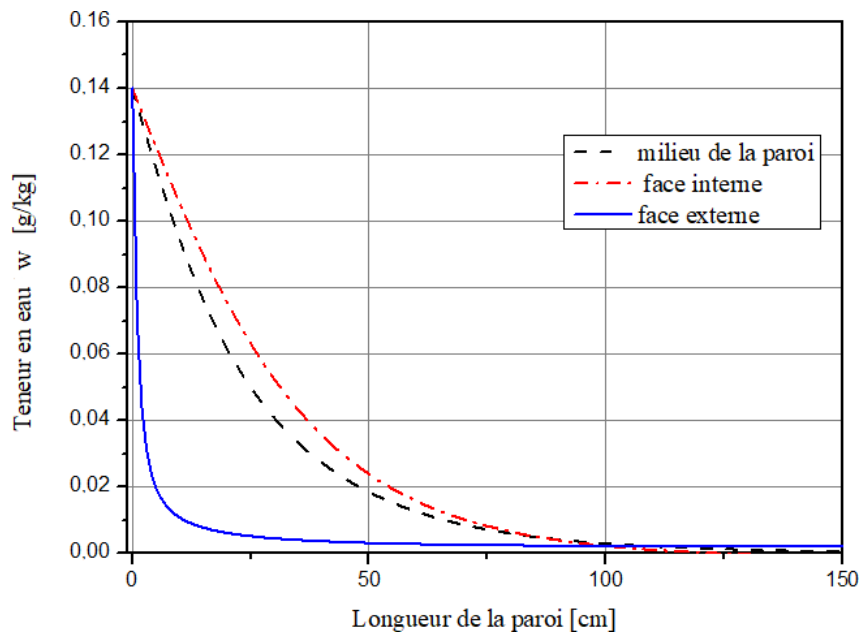


FIGURE 6.32: Distribution axiale de la teneur en eau dans la paroi en conditions printanières

Effet sur la lame d'air ventilée

Les champs des isothermes et iso-concentrations de vapeur d'eau dans la lame d'air sont représentés en figure 6.33. La structure des isothermes est stratifiée et parallèle, ce qui justifie que le transfert thermique se fait principalement par conduction, qui l'emporte sur la convection. Au-fur-et-à-mesure de l'écoulement de l'air vers la tête du canal, la température de l'air diminue progressivement et atteint un équilibre avec la température de surface interne de la paroi. Cette diminution de la température se justifie par les phénomènes de diffusion massique à l'interface entre la paroi poreuse et la lame d'air. Les champs d'iso-concentrations de vapeur d'eau met en exergue les phénomènes de transferts hygrothermiques à l'interface entre la paroi et la lame d'air. L'air entre dans le canal à une humidité absolue initiale de $7\text{g}/\text{m}^3$ et se charge en molécules d'eau. La concentration en vapeur d'eau de l'air augmente au voisinage de l'interface quand la température de l'air reste légèrement supérieure à la température de la paroi. L'évaporation de l'eau de

surface contribue à l'augmentation de la concentration de la vapeur dans le flux d'air insufflé. Lorsque la température de l'air dans le canal s'équilibre avec celle de la paroi, les transferts massiques sont limités et l'air perd son pouvoir évaporatif.

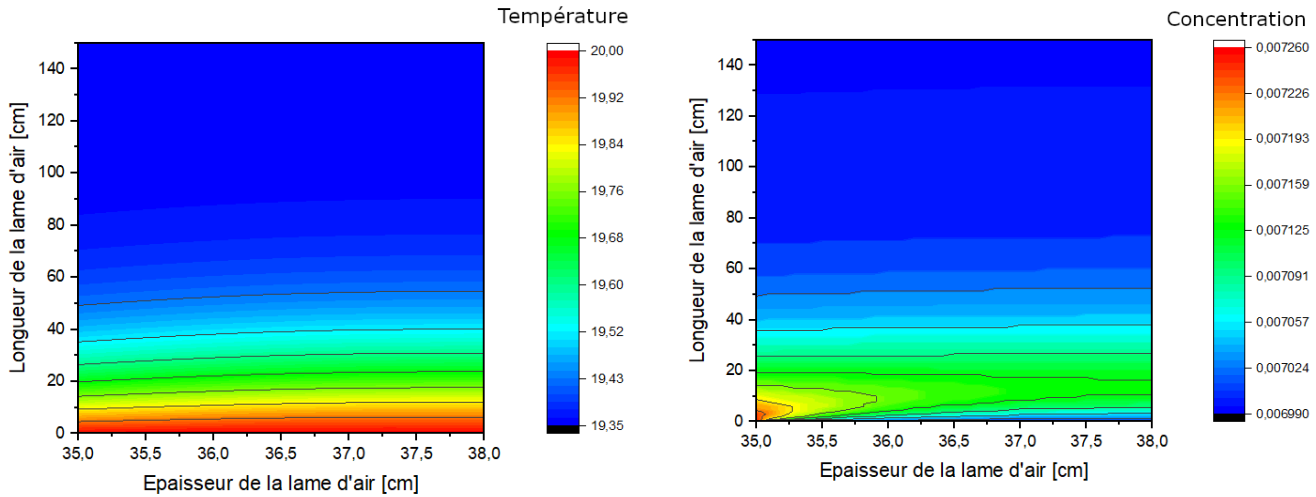


FIGURE 6.33: Isothermes et iso-concentrations en vapeur d'eau dans le canal ventilée en conditions printanières

6.3.2 En conditions climatiques estivales

La température de l'air extérieur est supposée égale à 35°C avec une humidité relative de 30%. Les conditions de simulation sont définies dans les tableaux 6.1, 6.2 et 6.3.

Effet sur la paroi humide

Les champs d'isothermes et d'iso-teneurs en eau au sein de la paroi en briques sont visibles en figure 6.34. Ces résultats montrent que l'apport de chaleur par convection entre l'air extérieur et la surface externe de la paroi est d'autant plus important que le gradient de température est élevé. La température de surface externe de la paroi augmente progressivement de 20°C à 33.5°C. Cette augmentation de température est due principalement à la quantité de chaleur apportée à la surface externe de la paroi par convection. Un transfert de chaleur en résulte, principalement par conduction dans la paroi, entre ses surfaces externe et interne. De plus, l'apport de chaleur par convection à la surface externe de la paroi implique l'évaporation de l'eau en surface, ainsi que la diminution de la teneur en eau tout au long de la surface externe. Le niveau des remontées capillaires est fortement influencé par le transfert de chaleur par convection et par conduction de l'extérieur vers l'intérieur. La surface interne de la paroi montre des teneurs en eau supérieures à celles de la surface externe, mettant ainsi en exergue les apports de chaleur par conduction à travers la paroi, et par convection entre l'air circulant dans le canal et la surface interne de

la paroi. L'évaporation de surface interne n'engendre pas la même quantité d'eau évaporée que celle de surface externe de la paroi. L'évaporation de l'eau au niveau de la surface interne de la paroi est d'autant plus importante que la différence entre la concentration de vapeur d'eau saturante et celle de l'air qui s'écoule en son voisinage dans le canal est élevée.

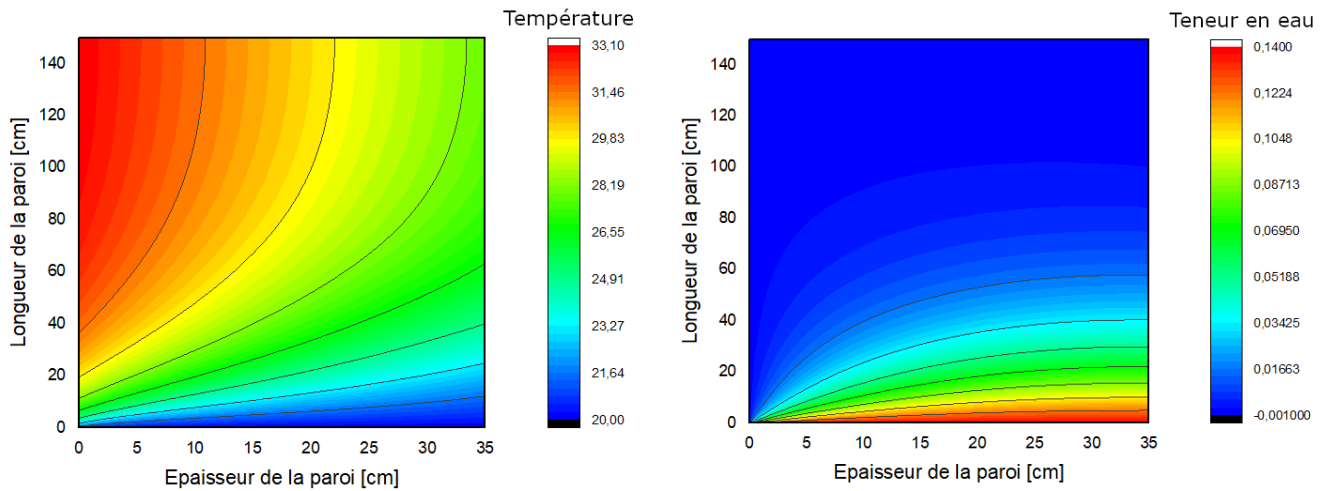


FIGURE 6.34: Isothermes et iso-teneurs en eau dans la paroi humide en conditions estivales

Effet sur la lame d'air ventilée

La figure 6.35 présente les isothermes et iso-concentrations de vapeur d'eau dans le canal d'air ventilé, en conditions estivales. L'important gradient de températures est à l'origine de transfert de chaleur par conduction à travers la paroi et par convection à l'interface entre la surface externe de la paroi et l'ambiance externe. Ces phénomènes contribuent à l'accroissement de la température de l'air circulant dans le canal au voisinage de la surface interne de la paroi. La température de l'air passe de 20°C à l'entrée du canal et s'accroît au-fur-et-à-mesure de l'écoulement de l'air vers l'amont de la lame d'air pour atteindre 28°C à la sortie du canal, qui est égale à la température de la face interne de la paroi. A l'entrée du canal, l'air pénètre avec une humidité absolue égale à 4g/m³. A l'amont du canal d'air, l'humidité absolue de l'air augmente jusqu'à atteindre une valeur de 11g/m³. La concentration de vapeur d'eau augmente depuis l'entrée du canal au contact de la surface interne de la paroi. Cette augmentation est induite par les phénomènes d'évaporation de l'eau le long de paroi. Une quantité d'eau s'évapore et la vapeur d'eau de la surface interne de la paroi est diffusée dans le canal d'air, participant à l'assèchement partielle de la paroi en briques humides.

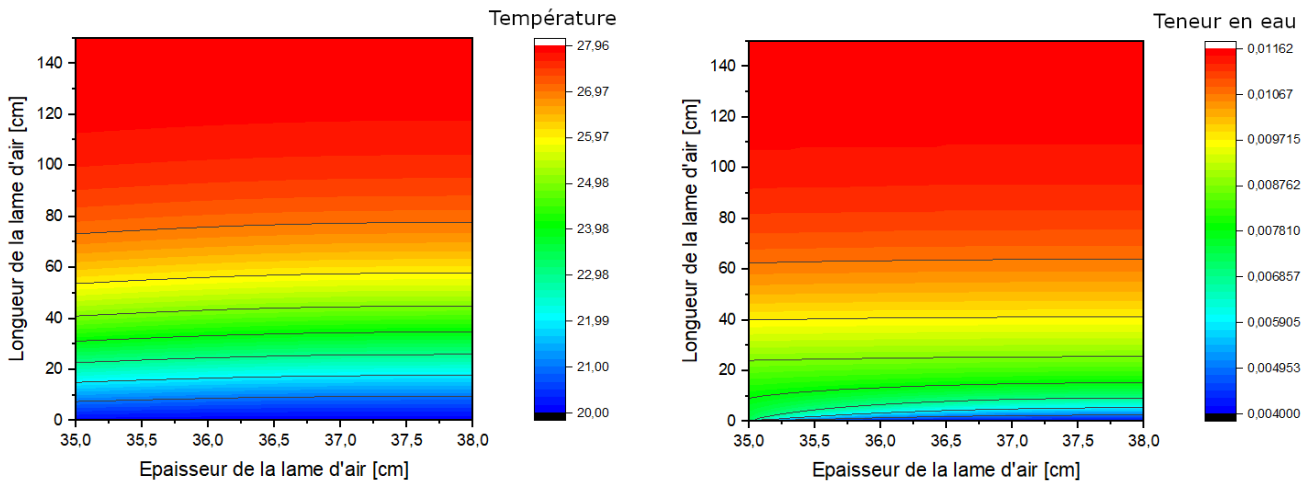


FIGURE 6.35: Isothermes et iso-concentrations en vapeur d'eau dans la lame d'air ventilée en conditions estivales

6.3.3 En conditions climatiques hivernales

Enfin, le comportement de la paroi en conditions hivernales est investi, avec une température de l'air extérieur de 5°C et une humidité relative de 95%. Les conditions de simulation sont identiques à celles des cas précédents.

Effet sur la paroi humide

Les champs d'isothermes et d'iso-teneurs en eau de la paroi en briques de terre cuite sont présentés dans la figure 6.36. La structure des isothermes dans la paroi démontre que la circulation d'un air extérieur froid et très humide contre la surface externe de la paroi engendre un abaissement de la température de la paroi, avec une chute depuis le pied de mur (20°C) à 6°C en tête de paroi. Le mode prédominant de transfert de chaleur entre la paroi et l'air ambiant est la convection. Sur le côté interne de la paroi, la quantité de chaleur apportée à la surface interne par convection compense le refroidissement par un apport de chaleur. La température surfacique est alors plus élevée que celle du côté externe, créant un gradient de température depuis la surface intérieure vers la surface extérieure. Un transfert de chaleur, principalement par conduction dans la paroi, est alors visible. De plus, la forte l'humidité relative extérieure entraîne un refroidissement de la paroi et l'apparition d'un phénomène de condensation de surface. Une formation d'eau liquide est alors produite en surface extérieure. Cette eau liquide est ensuite absorbée par la paroi et diffusée au sein de celle-ci. La diffusion d'eau liquide s'ajoute ainsi aux remontées capillaires qui atteignent une hauteur de 1m environ. La teneur en eau au sein de la paroi est alors très élevée.

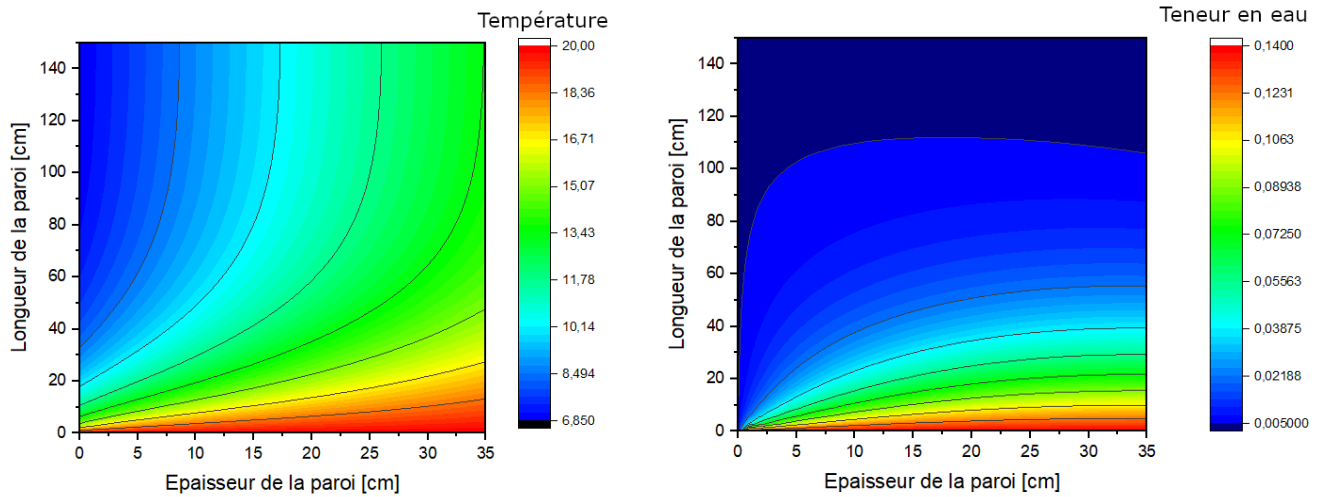


FIGURE 6.36: Isothermes et iso-teneurs en eau dans la paroi humide en conditions hivernales

Effet sur la lame d'air ventilée

L'influence de l'exposition de la surface externe de la paroi à un air frais et humide sur les champs des isothermes et iso-concentration de vapeur d'eau est présentée sur la figure 6.37. La structure des isothermes dans la lame d'air est stratifiée ce qui justifie que le mode prédominant des échanges de chaleur entre la paroi et la lame d'air est la conduction. L'air pénètre dans le canal initialement à une température de 20°C. Puis, la température de l'air diminue tout au long du canal jusqu'à atteindre une température de 13°C à la sortie du canal. Une chute de température de 7°C entre l'amont et l'aval du canal est relevée, symbole de la prédominance des transferts thermiques par conduction entre la paroi et le canal sur les échanges convectifs. Néanmoins, les échanges convectifs sont

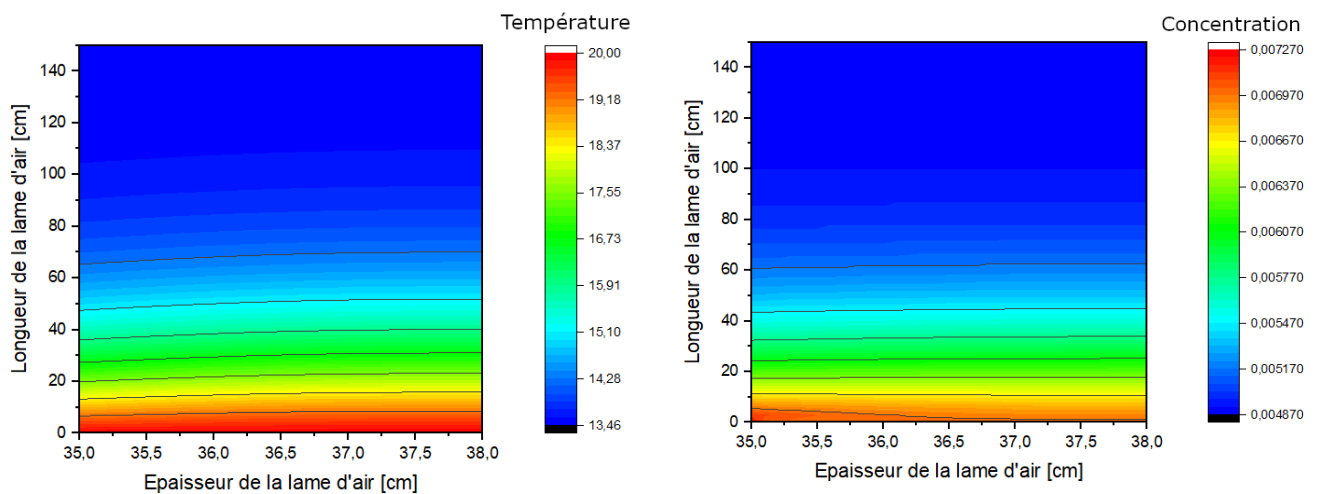


FIGURE 6.37: Isothermes et iso-concentrations en vapeur d'eau dans la lame d'air ventilée en conditions hivernales

plus importants à l'entrée du canal. L'air neuf, soufflé à une humidité absolue de $7\text{g}/\text{m}^3$, se charge dès son contact avec la paroi en vapeur d'eau en raison de l'importance des échanges convectifs entre la paroi et la lame d'air. Mais au-fur-et-à-mesure de l'avancée de l'air dans le canal, l'air perd son pouvoir évaporatif ; la concentration de vapeur d'eau dans l'air diminue. Les échanges thermiques à l'interface entre la paroi et le canal d'air se font depuis la surface interne vers le canal ventilé. Les échanges massiques se font dans le sens inverse, du canal vers la paroi. Ce résultat est corroboré par ceux présentés sur l'influence de la vitesse de l'air sur les échanges convectifs le long de l'interface entre la face interne de la paroi et le canal d'air.

La mise en place d'un canal ventilé entre la paroi humide et l'isolant, contribuent sensiblement à atténuer l'influence de l'ambiance externe sur les champ des isothermes et d'iso-concentrations de la paroi. En conditions printanières, les échanges convectifs entre la face interne et l'air circulant dans le canal participent à l'assèchement de la paroi. En conditions estivales, le confort thermique pourrait être éventuellement envisager grâce au phénomène de condensation de vapeur d'eau dans l'air qui s'écoule dans le canal. Ce cas se limite uniquement en condition estivale et ne peut être en aucun cas généralisé. En conditions hivernales, l'air insufflé dans le canal contribue à réduire l'humidité de la paroi au voisinage de l'entrée du canal, mais la diminution assez rapide de sa température limite ses performance. Dans ce cas l'augmentation de la vitesse de soufflage peut être envisagée comme une solution afin de maintenir la température de l'air et d'améliorer l'assainissement de la paroi.

6.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons établi un plan numérique afin d'interpréter les résultats de différentes simulations numériques réalisées à l'aide du modèle formulé précédemment. Ce modèle prend en considération les interactions hygrothermiques et aérodynamiques au sein d'une paroi partiellement saturée en eau, soumise à des remontées capillaires, et équipée d'un dispositif de ventilation entre la structure porteuse et l'isolant thermique. Ce modèle est fondé sur des moteurs de transferts qui assurent la continuité au niveau des interfaces entre les différentes couches d'une paroi. Les moteurs de transferts choisis sont des variables d'état (teneur en eau et température).

Après avoir défini notre démarche numérique et la variabilité des différents paramètres d'entrée du modèle, une étude de sensibilité du modèle aux propriétés des matériaux en présence a été menée. Cette première étape s'est concentrée sur la porosité de la brique, ses performances thermiques, puis hygriques et enfin, sur les épaisseurs physiques des composants du système. Tous ces paramètres ont une influence sur la réponse hygrothermique et sur l'équilibre de la paroi humide ventilée. Néanmoins, ces impacts ne sont pas équivalents.

En effet, la porosité, caractéristique physique délicate à déterminer expérimentalement, a une influence significative sur les phénomènes des transferts hygrothermiques. La conductivité thermique influence également sensiblement les transferts thermiques. Néanmoins, la nature des échanges reste identique (nombres de Nusselt et de Sherwood). Les mêmes observations sont valables pour une variation du coefficient de diffusion hygrique. Par conséquent, une bonne maîtrise des techniques de caractérisation expérimentale des propriétés hygrothermiques et physiques des matériaux de construction s'avère nécessaire pour assurer une bonne prédiction des transferts hygrothermiques dans les enveloppes ventilées de bâtiments humides.

Dans un second abord, une étude d'influence des paramètres hygrothermiques de l'air insufflé, en régime établi, a consisté à faire varier les conditions hygrothermiques de l'air insufflé tout en maintenant les conditions climatiques environnementales ainsi que la vitesse de soufflage constantes. L'étude numérique a montré que le soufflage de l'air neuf chaud et sec empêche le développement de l'activité biologique à la surface de la paroi, en favorisant l'évaporation de l'humidité dans le mur humide. Ce phénomène garantit la pérennité de l'isolant et assure le maintien de la qualité de l'air intérieur. De plus, sous ces conditions, l'isolant est protégé des phénomènes de condensation qui pourraient engendrer un endommagement de celui-ci et limiter ses performances thermiques. Dans un tel cas, la performance globale de la paroi est maintenue, tout en assurant un assèchement partiel de la paroi ne questionnant pas sa résistance mécanique. Néanmoins, cette étape a montré que la performance du système de ventilation est fortement liée aux gradients thermique et hygrique entre la paroi et l'air insufflé dans le canal et pourrait générer de la condensation en cas de sollicitations environnementales défavorables. La vitesse de soufflage de l'air a également un impact significatif car elle influe sur les gradients thermiques à l'interface entre la paroi et le canal. Finalement, cette étude a également mis en exergue le fait que la nature des échanges hygrothermiques à l'interface ne semble pas dépendante des conditions de soufflage. La convection thermique et hygrique, forcée, semble dominer sur la conduction et la diffusion.

Finalement, une dernière étude s'intéresse à l'influence des conditions climatiques de l'ambiance extérieure, où les conditions de soufflage de l'air sont constantes. Les principaux résultats numériques ont montré que la ventilation du canal contribue à assainir le mur, quelques soient les sollicitations extérieures. De plus, sous conditions favorables, un confort thermique pourrait être envisagé, en été, grâce à l'apparition du phénomène de condensation dans la lame d'air qui pourrait refroidir sensiblement la surface intérieure de la paroi. De plus, les résultats numériques en conditions hivernales semblent mettre en valeur l'importance de la vitesse de soufflage, tout en restant dans des plages de ventilation raisonnables, afin de favoriser les échanges par convection et assurer l'assainissement de la paroi.

Conclusion de la troisième partie

La troisième partie est consacrée à l'interprétation des résultats des simulations issues des deux modèles numériques formulés. Le premier modèle porte sur l'étude des processus des transferts hygrothermiques entre un canal ventilé et une paroi saturée, sous conditions adiabatiques quand le second modèle est une extension de la première approche afin de prendre en considération une paroi partiellement saturée et des conditions diabatiques.

Ainsi, le chapitre 5 se concentre, dans un premier temps, sur la validation du modèle numérique initial, modèle qui fait intervenir les équations de Darcy simple en milieu poreux saturé et les équations de convection forcée dans la lame d'air. La validation consiste tout d'abord à confronter nos résultats avec ceux, analytiques, issus d'une approche simplifiée relativement proche de nos conditions initiales. Néanmoins, cette étape est insuffisante au regard des spécificités de notre problématique. Une validation expérimentale a alors été menée à l'aide d'un banc d'essai conçu au sein du laboratoire de recherche. Suite à nos deux validations, nous avons cherché à monter nos résultats en généralité : en premier lieu, nous nous sommes focalisée sur l'effet de la variation des conditions hygrothermiques de soufflage ainsi que sur la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame ventilée sur les phénomènes d'échanges thermique (sensible et latent) et hygrique à l'interface entre l'ossature porteuse saturée et le canal ventilé. Ces simulations numériques ont mis en exergue les phénomènes de condensation et d'évaporation à l'interface et l'intérêt de la ventilation de l'espace tampon créé entre le mur saturé et l'isolant thermique.

Le dernier chapitre est axé sur la modélisation d'une paroi non saturée en conditions diabatiques. Le modèle est basé sur l'approche proposée par Luikov, couplée avec les équations de convection forcée. Ce couplage a permis d'étendre l'étude des transferts hygrothermiques au niveau de l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air à une étude hygro-thermo-aéraulique de l'enveloppe de bâtiment. Cette démarche a été réalisée dans l'objectif d'atteindre une analyse multi-critère de différentes stratégies de ventilation pour limiter, voire contrôler, d'éventuelles pathologies engendrées par la présence excessive d'eau au sein des parois. Tout d'abord, nous avons mené une étude de sensibilité aux paramètres d'entrée du modèle et analysé la réponse hygrothermique d'une paroi en briques de terre cuite saturée doublée. Cette étude a permis d'identifier les paramètres qui ont une influence significative sur la réponse hygrothermique d'une paroi sous sollicitations extérieures : l'identification de ces paramètres (porosité, conductivité thermique et diffusion hygrique) est indispensable pour assurer une bonne prédiction des transferts hygrothermiques au sein de l'enveloppe. Ensuite, les conditions hygrothermiques et dynamiques de l'air insufflé dans l'espace tampon sont investis. Les résultats mettent en

exergue que le soufflage d'air chaud et sec garantit la pérennité de l'isolant tout en limitant l'humidité contenue dans la paroi. La variation de vitesse accentue les phénomènes ayant lieu à l'interface et favorise les échanges convectifs de chaleur et de masse. Enfin, différentes conditions environnementales extérieures ont été étudiées afin d'identifier les phénomènes d'échanges hygrique et thermique au sein de l'enveloppe humide ventilée. Les résultats prouvent que les échanges convectifs sont prédominants et gouvernent des mouvements d'eau entre la paroi humide et le canal d'air neuf pour assurer un équilibre hygrothermique garantissant la pérennité de l'isolant thermique et de l'ossature porteuse. En effet, un phénomène d'évaporation de l'eau a lieu à l'interface entre la paroi et le canal permettant d'évacuer l'excès d'humidité au sein de la paroi, notamment piloté par les gradients hygrique et thermique qui sont dépendants des propriétés multi-physiques de la paroi.

Conclusion et perspectives de recherche

Dans le cadre de la rénovation énergétique durable du bâti ancien et afin d'améliorer l'efficacité énergétique des parois soumises aux remontées capillaires, nous nous sommes intéressés à une technologie innovante consistant à incorporer un système de ventilation dans l'espace tampon situé entre l'isolation thermique et l'ossature porteuse humide. Cette technologie apparaît comme l'une des solutions efficaces et peu onéreuses pour lutter contre les remontées capillaires, tout en assurant la durabilité de l'isolation et la pérennité structurelle de l'ossature.

Ce travail s'intéresse alors aux opérations de rénovation et de réhabilitation du patrimoine ancien humide, construit avant 1948, qui représente un potentiel important d'économies d'énergie. L'objectif principal de cette recherche est le développement d'un modèle numérique permettant de quantifier les échanges hygrothermiques à l'échelle d'une paroi humide composée, de l'extérieur vers l'intérieur, d'une structure porteuse en briques de terre cuite, d'une lame d'air ventilée et d'un isolant thermique. À terme le modèle pourra être employé pour optimiser le procédé industriel d'assainissement des parois.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse a été organisé autour de trois parties successives. Dans un premier temps, nous avons dressé un état de l'art, constituant ainsi le premier chapitre, qui porte sur les spécificités du bâti ancien. Les différentes technologies d'enveloppe utilisées avant 1948 font apparaître des matériaux biosourcés en raison de leur forte inertie thermique qui offrent un confort intérieur significatif pour les occupants. Par ailleurs, le bâti ancien est considéré comme un patrimoine historique à sauvegarder pour sa richesse culturelle et architecturale. Il évolue en équilibre hygrothermique constant avec son environnement. L'inconvénient majeur du bâti ancien réside néanmoins dans sa forte sensibilité à l'humidité. Par conséquent, la rénovation de ces bâtiments anciens s'avère délicate, car la moindre modification (par exemple la pose d'un isolant) perturbe son équilibre hygrothermique et peut entraîner un risque de condensation interstitielle qui pourrait conduire à l'apparition et la prolifération de micro-organismes.

Par la suite, les pathologies et les dégradations liées à une présence excessive de l'humidité dans le bâtiment ancien ont été classées dans deux catégories selon leurs localisations. En effet, ces désordres peuvent apparaître soit au niveau de l'ambiance habitable telle que la détérioration de la qualité de l'air intérieur, soit au niveau de la paroi avec, par exemple, la hausse des déperditions thermiques et la détérioration des performances mécaniques, la variation dimensionnelle et le développement d'agents biologiques. Les méthodes préven-

tives et curatives disponibles sur le marché actuel sont coûteuses et leur durabilité n'est pas garantie à long terme. Ainsi, une bonne connaissance du bâti ancien est indispensable, notamment au travers de la prise en considération des transferts d'humidité, pour concevoir une rénovation adaptée. Chaque rénovation doit être précédée d'une modélisation numérique des transferts hygrothermiques afin de garantir la performance du bâti. Pour ce faire, une bonne compréhension et maîtrise des phénomènes des transferts de chaleur et de masse est indispensable.

Nous avons consacré le chapitre 2 aux mécanismes des transferts hygrothermiques à l'échelle des pores. Les modes de transport et de stockage de l'humidité et de la chaleur sont détaillés. Puis, les modèles numériques et expérimentaux d'identification phénoménologique des transferts de chaleur, d'air et d'humidité, sont présentés aux échelles du matériau, de la paroi et de l'enveloppe du bâtiment. Ces approches sont implémentées dans différents logiciels commerciaux de simulation numérique.

Cette synthèse bibliographique met en exergue le fait que peu de recherches scientifiques abordent la modélisation numérique ou l'étude expérimentale des phénomènes de transfert au sein de parois anciennes où la présence excessive de l'humidité est due principalement aux remontées capillaires. Cette observation justifie alors la nécessité d'une étude approfondie d'une solution technologique innovante pour palier ces désordres spécifiques. Ainsi, la deuxième partie de ce travail est axée sur l'étude d'un procédé de gestion active et intelligente de l'humidité dans les murs anciens soumis à des phénomènes de remontées capillaires. Ce dispositif aéraulique de rupture génère une ventilation d'un espace tampon situé entre la structure porteuse et l'isolant thermique. Le principe est basé sur la ventilation d'une mince lame d'air créée entre la paroi et l'isolation thermique intérieure. La circulation de l'air est assurée par un réseau de canalisations en PVC de soufflage d'air neuf depuis l'extérieur, placé à la base du mur, et un réseau d'aspiration d'air humide, placé en tête de paroi. L'objectif est d'évacuer l'excès d'humidité accumulé dans la lame d'air, humidité qui se diffuse depuis le mur humide. L'air humide est rapidement remplacé par de l'air neuf grâce à un balayage quotidien et maîtrisé dans le réseau de soufflage. La pérennité de l'isolation est alors assurée, sans assèchement total de la paroi. Cette dernière peut alors "respirer" tout en maintenant ces performances mécaniques. Physiquement, le dispositif aéraulique est basé sur la génération d'un flux laminaire de convection forcée d'air neuf dans un canal vertical qui entre en contact avec la surface interne de la paroi humide. Ce phénomène crée un front d'évaporation à la surface interne de la paroi, où par conséquence, un échange hygrothermique simultané se produit entre la paroi et la lame d'air et entre la paroi et l'environnement extérieur.

La modélisation numérique de ces phénomènes physiques couplés est complexe. Nous avons alors suivi une démarche scientifique explicite qui consiste, dans un premier temps en une simplification du modèle grâce à l'approche de Darcy simple dans le milieu poreux et aux équations de la convection forcée. Notre objectif a été de mettre en exergue les

transferts hygrothermiques entre le mur humide et le canal d'air ventilé, en supposant que la face externe de la paroi est en conditions adiabatiques et que le milieu poreux est saturé en eau. Dans un second temps, le modèle est étendu vers un modèle généralisé basé sur l'approche de Luikov qui assimile la paroi à milieu poreux partiellement saturé sous conditions diabatiques. Ces équations de transferts hygrothermiques sont résolues par une méthode hybride combinant la méthode de Lattice - Boltzmann, la méthode des volumes finis, et la méthode itérative de sur-relaxation ponctuelle. La résolution mathématique de la problématique formulée est réalisée dans le langage de programmation Fortran.

Ce chapitre 3 a mis en évidence la nécessité d'une étude numérique couplée à une caractérisation expérimentale des propriétés des matériaux couramment utilisés afin d'identifier clairement les paramètres d'entrée. Le chapitre 4 porte alors sur une large campagne expérimentale de caractérisation physique, hygrothermique, hydrique et mécanique de briques anciennes en terre cuite. En effet, la brique de terre cuite représente une des techniques traditionnelles de construction du Nord de la France. Cette étape d'identification des propriétés multi-physiques de la brique nous a permis d'obtenir un jeu de données "matériau" servant de paramètres d'entrée des modélisations numériques.

Une troisième partie s'intéresse à la validation du modèle et à l'interprétation des résultats numériques. Dans le chapitre 5, deux démarches de validation ont été entreprises afin de vérifier l'aptitude du modèle à prédire fidèlement le comportement hygrothermique de la paroi. La première validation consiste en une comparaison à une solution analytique proposée par une étude similaire mais simplifiée. L'objectif de cette validation se résume à la vérification de la précision numérique obtenue par l'outil de simulation formulé, en comparaison avec une solution analytique exacte. Les résultats ont montré une bonne concordance entre les solutions analytique et numérique. Dans la deuxième validation, nous confrontons des données expérimentales avec les résultats issus de la simulation numérique. Un banc d'essai en laboratoire a été conçu. La méthodologie expérimentale développée intègre des méthodes d'analyse de sensibilité, d'incertitudes et d'estimations des paramètres. La comparaison entre les données numériques et expérimentales a confirmé l'aptitude du modèle de transferts hygrothermiques à prédire finement la réponse thermique et hygrique des parois ventilées de bâtiment. Le modèle ainsi validé est exploité pour analyser l'influence des conditions hygrothermiques et dynamiques de soufflage de l'air neuf sur le fonctionnement du dispositif de ventilation des parois humides saturées en condition adiabatiques.

Finalement, le dernier chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats de la modélisation numérique issue du modèle étendu au milieu partiellement saturé et en conditions diabatiques. Ce modèle prend en considération les interactions hygrothermiques et aérauliques au sein d'une paroi soumise à des remontées capillaires et équipée d'un dispositif de ventilation d'une lame d'air placée entre la surface interne de la paroi et l'isolant thermique. Ce modèle est fondé sur des moteurs de transferts qui assurent la

continuité au niveau des interfaces entre les différentes couches qui composent la paroi. Les moteurs choisis sont des variables d'état (teneur en eau et température). Les résultats numériques issus de ce modèle sont des variables primitives qui sont la température et la teneur en eau au sein de la structure porteuse, et la température et l'humidité absolue de l'air circulant dans l'espace tampon. Cette démarche a été réalisée dans l'objectif d'atteindre une analyse multi-critère de différentes stratégies de ventilation pour limiter, voire contrôler, d'éventuelles pathologies engendrées par la présence excessive d'eau au sein des parois. Dans un premier abord, une étude de sensibilité du modèle aux propriétés des matériaux en présence a été menée. Cette étude s'est concentrée sur la variation de la porosité, des propriétés thermiques et hygriques et enfin de l'épaisseur de la paroi. Les résultats ont montré que ces paramètres ont une grande incidence sur le comportement hygrothermique des enveloppes. Par conséquent, une bonne maîtrise des techniques de caractérisation expérimentale des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction s'avère nécessaire pour assurer une bonne prédiction des transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiments. Par la suite, une étude d'influence des paramètres hygrothermiques et dynamiques de l'air insufflé est réalisée, tout en maintenant les conditions de l'ambiance externe stables. Cette étude met en lumière les distributions spatiales de la teneur en eau et la température de la structure porteuse ainsi que les champs d'isothermes et d'iso-concentrations de vapeur d'eau dans la lame d'air ventilée. Les échanges hygrothermiques sont quantifiés par les nombres adimensionnels de Nusselt et de Sherwood locaux. En dernier abord, nous avons analysé l'influence de la variation des conditions hygrothermiques de l'ambiance extérieure sur la réponse de la paroi ainsi que sur les performances du canal ventilé.

Perspectives scientifiques

Eu égard aux résultats que nous obtenons, ce travail suggère quelques prolongations et perspectives scientifiques tels que :

- la validation expérimentale complexe du deuxième modèle numérique sous conditions diabatiques, sur un canal ventilé dont l'une de ses parois verticales est en briques de terre cuite et l'autre, un isolant thermique, en tenant compte de la dynamique de l'écoulement et les transferts hygrothermiques entre la paroi et la lame d'air contrôlée (en vitesse et en hygrothermie). Le dispositif expérimental initial est conçu pour un tel degré de complexité mais les travaux expérimentaux ont été freinés par la pandémie que nous avons traversée ;
- la simulation numérique des évolutions temporelles, en régime transitoire in-stationnaire, des échanges hygrothermiques entre la paroi et le canal ventilé. Ce deuxième axe de prolongement de nos travaux de recherche est en lien étroit avec les essais mis en lumière dans la première perspective de recherche ;

- la validation numérique du modèle sur un cas réel, en site occupé. La technologie de ventilation d'un espace tampon est actuellement mise en œuvre sur différentes habitations humides de notre région. L'acquisition de l'état initial, sans fonctionnement de la ventilation est réalisée, et les mesures se poursuivent pour obtenir des jeux de données expérimentales suffisantes pour démontrer l'efficacité du procédé et l'atteinte du confort intérieur des occupants ;
- l'élargissement de cas de simulation grâce à notre modèle numérique afin de tendre vers l'optimisation du système aéraulique et notamment son pilotage intelligent au regard des conditions climatiques extérieures et des usages intérieurs.
- le transfert de cette technologie peu onéreuse vers le marché de la rénovation et de la réhabilitation en augmentant le degré de maturité de projet. Cette étape vers l'industrialisation nécessite l'amélioration - ou la simplification - du paramétrage et de l'installation du dispositif notamment au travers de la formulation d'abaques simples à destination des usagers et des installateurs, ou, le cas échéant, la création d'un logiciel de dimensionnement pour les bureaux d'études énergétiques.

Bibliographie

- [Abdeen & Shihada, 2017] Abdeen, H. & Shihada, S. (2017). Properties of fired clay bricks mixed with waste glass. *Journal of scientific Research Reports*, 13(4), 1–9.
- [Actualité des bâtiments, 2017] Actualité des bâtiments (2017). Assèchement des constructions : l'électro-osmose pour lutter contre l'ascension capillaire. <https://www.batiweb.com/> [04/12/2017].
- [Adan, 1994] Adan, O. (1994). *On the fungal defacement of interior finished*. PhD thesis, THE Netherlands.
- [ADEME, 2007] ADEME (2007). journal officiel de la république française. décret relatif aux études de faisabilité des approvisionnements en énergie, aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants et à l'affichage du diagnostic de la performance énergétique. http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2005/pdf/decret_2007-363_19_mars_2007.pdf [13/02/2020].
- [ADEME, 2010] ADEME (2010). Journal Officiel de la République Française : Décret relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiment. http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/textes/Arrete_du_26_octobre_2010.pdf [13/02/2020].
- [ADEME, 2014] ADEME (2014). *Climat, Air et Energie*.
- [ADEME, 2020a] ADEME (2020a). Amélioration énergétique des bâtiments existants. <https://www.ffbatiment.fr/> [13/02/2020].
- [ADEME, 2020b] ADEME (2020b). Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie. Les économies d'énergie dans le bâtiment. <http://www.rt-batiment.fr/> [13/02/2020].
- [af Klintberg & Björk, 2008] af Klintberg, T. & Björk, F. (2008). Air Gap Method : Measurements of airflow inside air gaps of walls. *Structural Survey*, 26(4), 343–363.
- [af Klintberg & Björk, 2010] af Klintberg, T. & Björk, F. (2010). Air Gap Method : Drying of a concrete slab on ground construction. *Structural Survey*, 28(4), 281–299.
- [af Klintberg & Björk, 2012] af Klintberg, T. & Björk, F. (2012). Air Gap Method : Dependence of water removal on RH in room and height of floor air gap. *Building and Environment*, 56, 1–7.
- [af Klintberg et al., 2008] af Klintberg, T., Johannesson, G., & Björk, F. (2008). Air gaps in building construction avoiding dampness and mould. *Structural Survey*, 26(3), 242–255.
- [AFNOR, 2013] AFNOR (2013). *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique*. NF EN ISO standard 12571 :2013.
- [Agence Nationale de la Recherche, 2011] Agence Nationale de la Recherche (2011). Fiche projet bâtiment et villes durables (bvd). <http://www.agencenationalerecherche.fr/> [03/03/2020].
- [Agence Qualité Construction, 2014a] Agence Qualité Construction (2014a). Observatoire de la qualité de la construction, sycodes 2014 - base de données pathologies. <http://www.qualiteconstruction.com/> [13/02/2020].
- [Agence Qualité Construction, 2014b] Agence Qualité Construction (2014b). Observatoire de la qualité de la construction. sycodes 2014 - pathologies top 10. <http://www.qualiteconstruction.com> [16/02/2020].

- [Ait Oumeziane, 2013] Ait Oumeziane, Y. (2013). *Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre*. PhD thesis, INSA de Rennes.
- [Aït Ouméziane, 2013] Aït Ouméziane, Y. (2013). *Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre*. PhD thesis, Rennes, INSA.
- [Andres et al., 2009] Andres, A., Díaz, M. C., Coz, A., Abellán, M. J., & Viguri, J. R. (2009). Physico-chemical characterisation of bricks all through the manufacture process in relation to efflorescence salts. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(10), 1869–1877.
- [Angermann, 2010] Angermann, L. (2010). *Numerical Simulations : Examples and Applications*. Computational Fluid Dynamics. IntechOpen.
- [Annala et al., 2017] Annala, P. J., Hellemaa, M., Pakkala, T. A., Lahdensivu, J., Suonketo, J., & Pentti, M. (2017). Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 103–108.
- [Annala et al., 2018] Annala, P. J., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M., & Vinha, J. (2018). Need to repair moisture- and mould damage in different structures in finnish public buildings. *Journal of Building Engineering*, 16, 72–78.
- [ANSES, 2016] ANSES (2016). Moisissures dans le bâti [Online] Available at : <https://www.anses.fr/fr/system/files/air2014sa0016ra.pdf> [Accessed March 30, 2020].
- [AQC, 2021] AQC (2021). Fiches pathologies bâtiment. <https://qualiteconstruction.com/18/02/2021>.
- [ARCAD, 2015] ARCAD (2015). Le bâti ancien champardennais. <http://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/>.
- [Artola, 2009] Artola, P.-A. (2009). *Etude théorique et numérique de l'effet Soret*. PhD thesis, Université Paris Sud.
- [ASHRAE, 1992] ASHRAE, A. (1992). Standard 55-1992, thermal environmental conditions for human occupancy, atlanta : American society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers. *Inc., USA*.
- [ATHEBA, 2010] ATHEBA (2010). Comprendre le bâti ancien. <http://picardie.maisons-paysannes.org/> [18/04/2020].
- [Ayerst, 1969] Ayerst, G. (1969). The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. *Journal of Stored Products Research*, 5(2), 127–141.
- [Barbi et al., 2002] Barbi, L., Briccoli Bati, S., & Ranocchiali, G. (2002). Mechanical properties of ancient bricks : statistical analysis of data. In *seminar on structural masonry for developing countries, Belo Horizonte, Brazil* (pp. 27–33).
- [Baronio et al., 1985] Baronio, G., Binda, L., & Charola, A. (1985). Deterioration of bricks with and without perforations due to salt crystallization. In *7th International Brick Masonry Conference, Melbourne, Australia* (pp. 223–232).
- [Bati & Ranocchiali, 1994] Bati, S. & Ranocchiali, G. (1994). A critical review of experimental techniques for brick material. In *10th international brick/block masonry conference, Calgary* (pp. 1247–1255).
- [Baughman & Arens, 1996] Baughman, A. & Arens, E. A. (1996). Indoor humidity and human health—part i : Literature review of health effects of humidity-influenced indoor pollutants. *ASHRAE transactions*, 102, 192–211.

- [Bauklimatik Dresden, 2011] Bauklimatik Dresden, C. (2011). Simulation program for the calculation of coupled heat, moisture, air, pollutant, and salt transport. <http://www.bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php?aLa=en> [16/02/2020].
- [Beck et al., 2003] Beck, K., Al-Mukhtar, M., Rozenbaum, O., & Rautureau, M. (2003). Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau : building material in the loire valley—france. *Building and environment*, 38(9-10), 1151–1162.
- [Belarbi et al., 2006] Belarbi, R., Aït-Mokhtar, A., Qin, M., & Omikrine, O. (2006). Development of simplified approach to model the moisture transfer in building materials. *Revue européenne de génie civil*, 10(9), 1033–1048.
- [Belarbi et al., 2008] Belarbi, R., Qin, M., Aït-Mokhtar, A., & Nilsson, L.-O. (2008). Experimental and theoretical investigation of non-isothermal transfer in hygroscopic building materials. *Building and Environment*, 43(12), 2154–2162.
- [Benabdallah et al., 2018] Benabdallah, C. and Hammouda, A., Khedidja, K., & al. (2018). *Techniques de réhabilitation et de restauration du bâti ancien construit en terre Cas d'étude*. PhD thesis, Université Ahmed Draia-ADRAR.
- [Bennai et al., 2020] Bennai, F., Abahri, K., & Belarbi, R. (2020). Contribution to the modelling of coupled heat and mass transfers on 3d real structure of heterogeneous building materials : application to hemp concrete. *Transport in Porous Media*, 133, 333–356.
- [Berger, 2014] Berger, J. (2014). *Contribution to the hygrothermal modeling of buildings : application of model reduction methods*. Phd thesis, Université Grenoble Alpes.
- [Berger et al., 2012] Berger, J., Tasca-Guernouti, S., Woloszyn, M., & Buhe, C. (2012). L'humidité dans les bâtiments : Pathologies et paramètres gouvernants. *Réalités Industrielles*, (6), 55.
- [Bergman et al., 2011] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons.
- [Binda & Baronio, 1985] Binda, L. & Baronio, G. (1985). Physico-mechanical characteristics and durability of bricks from some monuments in milan. *Masonry International*, (pp. 29–35).
- [Binda et al., 2000] Binda, L., Saisi, A., & Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building materials*, 14(4), 199–233.
- [Bouddour et al., 1998] Bouddour, A., Auriault, J.-L., Mhamdi-Alaoui, M., & Bloch, J.-F. (1998). Heat and mass transfer in wet porous media in presence of evaporation—condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(15), 2263–2277.
- [BROCH, 2006] BROCH, H. (2006). Mécanique des fluides. *Université de Nice Sophia Antipolis*.
- [Cagnon et al., 2012] Cagnon, H., AUBERT, J., & Coutand, M. (2012). Propriétés hygrothermiques de briques de terre crue produites en midi-pyrénées. In *Colloque International Francophone NoMaD LMDC/AUGC*.
- [Cagnon et al., 2014] Cagnon, H., Aubert, J.-E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208–217.
- [Calame, 1988] Calame, F. (1988). L'entretien du patrimoine bâti : pour un diagnostic des savoir-faire. *Terrain. Anthropologie & sciences humaines*, (11), 120–125.
- [Caro, 2004] Caro, F. (2004). *Modélisation et simulation numérique des transitions de phase liquide vapeur*. PhD thesis, Ecole Polytechnique.
- [Carrayrou, 2001] Carrayrou, J. (2001). Modélisation du transport de solutés réactifs en milieu poreux saturé. *These de doctorat en Mécanique. Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strasbourg I*, 248.

- [Carter & Fontana, 2008] Carter, B. & Fontana, A. (2008). Dynamic dewpoint isotherm verses other moisture sorption isotherm methods. *Application note. Decagon Devices, Pullman, WA*, 210.
- [CEREMA, 2014] CEREMA (2014). *Rénovation énergétique du bâti ancien - Habitat ancien en Alsace : énergie, durabilité du bâti et patrimoine*. DREAL.
- [CETE, 2010] CETE (2010). *amélioration thermique du bâti ancien*. maisonspayssannesdeFrance.
- [CETE de l'Est, 2007] CETE de l'Est (2007). *Connaissance Des Bâtiments Anciens Economies D'Énergie*. DGUHC.
- [Chabat, 1881] Chabat, P. (1881). *La brique et la terre cuite... : Etude historique de l'emploi de ces matériaux... motifs de construction...* Vve A. Morel et Cie.
- [Chabriac, 2014] Chabriac, P.-A. (2014). *Mesure du comportement hygrothermique du pisé*. PhD thesis, ENTPE.
- [Chagneaud, 2001] Chagneaud, B. (2001). Les remontées capillaires dans les maçonneries anciennes. *Revue technique du bâtiment et des constructions industrielles*, 205.
- [Chen et al., 2012] Chen, L., Luan, H., Feng, Y., Song, C., He, Y.-L., & Tao, W.-Q. (2012). Coupling between finite volume method and lattice boltzmann method and its application to fluid flow and mass transport in proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(13-14), 3834–3848.
- [Chiang et al., 2009] Chiang, K.-Y., Chou, P.-H., Hua, C.-R., Chien, K.-L., & Cheeseman, C. (2009). Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 76–82.
- [Clarke et al., 1999] Clarke, J., Johnstone, C., Kelly, N., McLean, R., Anderson, J., Rowan, N., & Smith, J. (1999). A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings. *Building and Environment*, 34(4), 515–521.
- [Claude, 2018] Claude, S. (2018). experimental and numerical study of solutions based on eco-materials for the thermal renovation of urban buildings.
- [Cloux, 2012] Cloux, A. (2012). Du diagnostic énergétique du bâti ancien à la diffusion des connaissances : Méthodologie et cas pratiques de villes françaises à secteurs protégés.
- [Cognard, 2002] Cognard, P. (2002). Calfeutrement des joints dans le bâtiment. généralités. *Techniques de l'ingénieur. Construction*, (C3660), C3660–1.
- [Coignet & Coignet, 2012] Coignet, J. & Coignet, L. (2012). *La maison ancienne : construction, diagnostic, interventions*. Editions Eyrolles.
- [Collet et al., 2012] Collet, F., Prétot, S., Ouméziane, Y. A., Moissette, S., Bart, M., & Lanos, C. (2012). Comportement hygrothermique de parois en béton de chanvre. In *Journée technique Construction en Chanvre, C&B*.
- [Collins et al., 2013] Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., et al. (2013). Long-term climate change : projections, commitments and irreversibility. In *Climate Change 2013-The Physical Science Basis : Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1029–1136). Cambridge University Press.
- [Collombet, 1985] Collombet, R. (1985). *L'humidité des batiments anciens : causes et effets diagnostic, remedes*.
- [Commissariat Général du Développement Durable, 2010] Commissariat Général du Développement Durable (2010). "Le Point sur", vol. 61, septembre 2010 [Online] Available at : www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=486 [Accessed March 30, 2019].

- [Cony Renaud Salis et al., 2017] Cony Renaud Salis, L., Abadie, M., Wargocki, P., & Rode, C. (2017). Towards the definition of indicators for assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings. *Energy and Buildings*, 152, 492–502.
- [Coquillat, 1998] Coquillat, A. (1998). L’humidité dans le bâti ancien. *Revue technique du bâtiment et des constructions industrielles*, 194.
- [Daïan, 2010] Daïan, J.-F. (2010). Equilibre et transferts en milieux poreux i-etats d’équilibre.
- [Daïan, 2013] Daïan, J.-F. (2013). Equilibre et transferts en milieux poreux.
- [Darcy, 1856] Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : Détermination des lois d’écoulement de l’eau à travers le sable*. Victor Dalmont, Paris.
- [D’Ayala & Aktas, 2016] D’Ayala, D. & Aktas, Y. D. (2016). Moisture dynamics in the masonry fabric of historic buildings subjected to wind-driven rain and flooding. *Building and Environment*, 104, 208–220.
- [de Freitas, 2014] de Freitas, R. J. G. (2014). Técnicas de tratamento/controlo da humidade ascensional-catálogo. Master thesis, Universidade do Porto.
- [De Freitas et al., 1996] De Freitas, V., Abrantes, V., & Crausse, P. (1996). Moisture migration in building walls—analysis of the interface phenomena. *Building and Environment*, 31(2), 99–108.
- [de Freitas, 2008] de Freitas, V. P. (2008). *Humidade Ascensional*, volume 3. FEUP edições.
- [de Laage, 2007] de Laage, S. (2007). Les briques en héritage. *Vieilles maisons françaises*, (219), 60–62.
- [de Lapparent, 2007] de Lapparent, C. (2007). Responsabilité en rénovation d’immeubles anciens. *Les cahiers techniques du bâtiment*, (271), 121–121.
- [De Vries, 1952a] De Vries, D. (1952a). A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ. *Soil Science*, 73(2), 83–90.
- [De Vries, 1952b] De Vries, D. (1952b). The thermal conductivity of soil. *Wageningen, Meded. Landbouwhogesch*, 52, 1–73.
- [Delgado et al., 2014] Delgado, J. M. P. Q., Guimarães, A. S., & de Freitas, V. P. (2014). : (pp. 1–26). Springer, Cham.
- [Delmon, 1969] Delmon, B. (1969). *Introduction à la cinétique hétérogène*. Number 15. Editions Technip.
- [Demir, 2008] Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste management*, 28(3), 622–627.
- [Derluyn et al., 2008] Derluyn, H., Moonen, P., & Carmeliet, J. (2008). Moisture transfer across the interface between brick and mortar joint. In *Proceedings of the Nordic Symposium on Building Physics 2008*, volume 2 (pp. 865–872).
- [Derome, 1999] Derome, D. (1999). *Moisture occurrence in roof assemblies containing moisture storing insulation and its impact on the durability of building envelope*. PhD thesis, Concordia University.
- [Do Duong, 1998] Do Duong, D. (1998). *Adsorption analysis : equilibria and kinetics*. Imperial College Press.
- [DPE, 2012] DPE (2012). Bati ancien comportement thermique. https://caue37.fr/wp-content/uploads/2020/10/Fiche_6_Compportement_thermique.pdf.
- [DREAL, 2014] DREAL (2014). Réhabiliter le bâti ancien en tuffeau. *Etudes en DREAL Pays de la Loire*.
- [Drissi et al., 2016] Drissi, M., Noel, H., Glouannec, P., Nörtershäuser, D., Le, S., & Masson, J. M. C. (2016). Refroidissement d’un composant électronique par immersion dans un fluide diélectrique. In *SFT Congress*.

- [Dullien, 2012] Dullien, F. A. (2012). *Porous media : fluid transport and pore structure*. Academic press.
- [El Fgaier, 2013] El Fgaier, F. (2013). *Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille.
- [Enertech, 1992] Enertech (1992). Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, 1992. <https://www.effinergie.org/web>.
- [Esbert et al., 1997] Esbert, R. M., Ordaz, J., Alonso, F. J., & Montoto, M. (1997). *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*.
- [Falk & Treiber, 1983] Falk, E. & Treiber, D. (1983). *La brique, matériau architectural*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Beaux-Arts.
- [Fang et al., 2000] Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. O. (2000). Temperature and humidity : important factors for perception of air quality and for ventilation requirements. *ASHRAE transactions*, 106(2), 503–510.
- [Fernandes & Lourenço, 2007] Fernandes, F. & Lourenço, P. B. (2007). Evaluation of the compressive strength of ancient clay bricks using microdrilling. *Journal of materials in civil engineering*, 19(9), 791–800.
- [Fernandes et al., 2010] Fernandes, F. M., Lourenço, P. B., & Castro, F. (2010). Ancient clay bricks : manufacture and properties. In *Materials, technologies and practice in historic heritage structures* (pp. 29–48). Springer.
- [Fernandes, 2006] Fernandes, F. M. C. P. (2006). Evaluation of two novel ndt techniques : microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry.
- [Ferroukhi, 2015] Ferroukhi, M. Y. (2015). *Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : Evaluation des désordres causés par l'humidité*. PhD thesis, Université de La Rochelle.
- [Fourier, 1822] Fourier, J. (1822). *Théorie analytique de la chaleur*. Édouard Leroy.
- [France-humidité, 2021] France-humidité (2021). L'assèchement des murs par injection de résine. <https://www.francehumidite.com/> [12/02/2021].
- [Franzoni, 2014] Franzoni, E. (2014). Rising damp removal from historical masonries : A still open challenge. *Construction and Building Materials*, 54, 123–136.
- [Freppel, 2018] Freppel, W. (2018). *Analyse des interactions entre l'enveloppe du bâtiment et les systèmes thermiques, par l'expérimentation et la simulation*. PhD thesis, Université de Picardie Jules Verne.
- [Funk & Wakili, 2008] Funk, M. & Wakili, K. G. (2008). Driving potentials of heat and mass transport in porous building materials : a comparison between general linear, thermodynamic and micromechanical derivation schemes. *Transport in porous media*, 72(3), 273–294.
- [Gasgnier & Sénateur, 1980] Gasgnier, M. & Sénateur, J. (1980). Caractérisation par diffraction x, microscopie électronique et fluorescence x, des couches minces obtenues par évaporation de sms. structures cristallographiques après recuits par le faisceau électronique. *Journal de Physique*, 41(10), 1127–1133.
- [Général du Développement Durable, 2010] Général du Développement Durable, C. (2010). L'humidité dans les logements touchait un ménage sur cinq en 2006, Observations et Statistiques, n°61.
- [Gertis & und Erhorn, 1991] Gertis, K. & und Erhorn, K. (1991). Increased insulation in buildings-a way to avoid the coming change in climate. *Bauphysik*, 13(H. 5), 132–137.
- [Gherfi et al., 2017] Gherfi, A., Belakroum, R., Maalouf, C., Lachi, M., & Merabet, A. (2017). Perméabilité à la vapeur d'eau d'un composite d'isolation biosourcé à base de fibre de palmier dattier. *Constantine : Congrès Algérien de Mécanique (CAM 2017)*.

- [Giebeler et al., 2012] Giebeler, G., Fisch, R., Krause, H., & Musso, F. (2012). *Rénover le bâti*. PPUR Presses polytechniques.
- [Glaser, 1958] Glaser, H. (1958). Temperatur und dampfdruckverlauf in einer homogenen wand bei feuchteausscheidung. *Kältetechnik*, 31, 174—181.
- [Glaser, 1959] Glaser, H. (1959). Graphisches verfahren zur untersuchung von diffusionsvorgängen. *Kältetechnik*, 11(10), 345–349.
- [Glouannec et al., 2010] Glouannec, P., Colinart, T., Le Bideau, P., & Chauvelon, P. (2010). Etude expérimentale et numérique de la phase de séchage d’une paroi en béton de chanvre projeté. *Séminaire International sur le Génie Climatique et l’Énergétique, SIGGLE 2010 – Constantine, Algérie*.
- [Gornicki et al., 2017] Gornicki, K., Winiczenko, R., Kaleta, A., & Choinska, A. (2017). Evaluation of models for the dew point temperature determination. *Technical Sciences*, 20(3), 241–257.
- [Grau & Rode,] Grau, K. & Rode, C. A model for air flow in ventilated cavities implemented in a tool for whole-building hygrothermal analysis. *IEA Annex 41 report A41-T1-Dk-06-1*.
- [Green, 1985] Green, G. H. (1985). Indoor relative humidities in winter and the related absenteeism. *Ashrae Transactions*, 91(1), 643–653.
- [Gress et al., 2009] Gress, C., Dupre, K., & Flament, B. (2009). Renovation et developpement durable, cas de l’insa de strasbourg. *Annales du bâtiment et des travaux publics N*, 4, 16–23.
- [Guide-humidité, 2019] Guide-humidité (2019). Vmc anti humidité. <https://www.guide-humidite.be/types-humidite/> [07/08/2019].
- [Guimarães & de Freitas, 2009] Guimarães, A. S. & de Freitas, V. P. (2009). Wall base ventilation system as a new technique to treat rising damp in existent buildings. *Journal of Building Appraisal*, 5(2), 187–195.
- [Guimarães et al., 2016] Guimarães, A. S., Delgado, J. M., & de Freitas, V. P. (2016). Treatment of rising damp in historic buildings : Experimental campaign of wall base ventilation and interface effect analysis. *Journal of Cultural Heritage*, 20, 733–738.
- [Guimarães et al., 2012] Guimarães, A. S., Delgado, J. M. P. Q., & de Freitas, V. P. (2012). Rising damp in building walls : the wall base ventilation system. *Heat and Mass Transfer*, 48(12), 2079–2085.
- [Hadas, 1977] Hadas, A. (1977). Evaluation of theoretically predicted thermal conductivities of soils under field and laboratory conditions.
- [Hagentoft et al., 2004] Hagentoft, C.-E., Kalagasidis, A. S., Adl-Zarrabi, B., Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Grunewald, J., Funk, M., Becker, R., Shamir, D., et al. (2004). Assessment method of numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building components : benchmarks for one-dimensional cases. *Journal of thermal envelope and building science*, 27(4), 327–352.
- [Hall & Hoff, 2007] Hall, C. & Hoff, W. D. (2007). Rising damp : capillary rise dynamics in walls. In *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 463 (pp. 1871–1884). : The Royal Society.
- [Hall & Allinson, 2009] Hall, M. & Allinson, D. (2009). Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, 44(9), 1935–1942.
- [Hamer & Karius, 2002] Hamer, K. & Karius, V. (2002). Brick production with dredged harbour sediments. an industrial-scale experiment. *Waste management*, 22(5), 521–530.
- [Hauglustaine et al., 2006a] Hauglustaine, J.-M., Simon, F., Baltus, C., & Liesse, S. (2006a). La conception globale de l’enveloppe et l’énergie-guide pratique pour les architectes.

- [Hauglustaine et al., 2006b] Hauglustaine, J.-M., Simon, F., Baltus, C., & Liesse, S. (2006b). L'isolation thermique des façades verticales-guide pratique pour les architectes.
- [Hedenblad, 1996] Hedenblad, G. (1996). Material data for moisture transport calculations. *Bygghörsningsrådet : Stockholm*.
- [Hens, 1999] Hens, H. (1999). Fungal Defacement in Buildings : A Performance Related Approach. *HVAC&R Research*, 5(3), 265–280.
- [Horton & Wierenga, 1984] Horton, R. & Wierenga, P. (1984). The effect of column wetting on soil thermal conductivity [water content in laboratory-packed soil columns, cylindrical probe method, microwave oven technique]. *Soil Science*.
- [Hukka & Viitanen, 1999] Hukka, A. & Viitanen, H. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden materials. *Wood Science and Technology*, 33, 475–485.
- [IEA, 2020] IEA (Consulté le 22 février 2020). Iea. international energy agency's energy in buildings and communities programme. <http://www.iea-ebc.org/>.
- [IEA Annexe 14, 1996] IEA Annexe 14 (1996). Condensation and energy. *Acco, Leuven*.
- [INSEE, 2013] INSEE (2013). L'état du logement en 2013 [Online] Available at : www.insee.fr/fr/statistiques/1287961?sommaire=1912749tableau-figure6 [Accessed July 23, 2019].
- [INSEE, 2016] INSEE (2016). Humidité et installations électriques : des progrès à réaliser [Online] Available at : www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/1293620/revuehs5_humidite.pdf [Accessed July 23, 2019].
- [Janssen et al., 2007] Janssen, H., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2007). Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(5-6), 1128–1140.
- [Jerman & Černý, 2012] Jerman, M. & Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*, 53, 39–46.
- [Johansson et al., 2012] Johansson, P., Ekstrand-Tobin, A., Svensson, T., & Bok, G. (2012). Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 73, 23–32.
- [Johansson et al., 2010] Johansson, S., Wadso, L., & Sandin, K. (2010). Estimation of mould growth levels on rendered façades on surface relative humidity and surface temperature measurements. *Building and Environment*, 45, 1153–1160.
- [Kaddour & Dahli, 2016] Kaddour, L. I. & Dahli, M. (2016). Réhabilitation du patrimoine architectural en terre, un héritage à sauvegarder rehabilitation of the earthen architectural heritage, a heritage to save.
- [Kameni et al., 2013] Kameni, N. M., Tchinda, R., & Djongyang, N. (2013). Field study of thermal comfort in naturally ventilated classrooms of cameroon. *Universal Journal of Environmental Research & Technology*, 3(5).
- [Kantoush et al., 2011] Kantoush, S. A., Schleiss, A. J., Sumi, T., & Murasaki, M. (2011). LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5(4), 263–276.
- [Karagiozis, 2001] Karagiozis, A. N. (2001). Advanced hygrothermal models and design models. In *ESIM Canadian Conference on Building Energy Simulation, Ottawa, Ontario, Canada, June. Karagiozis, AN 2001b. Advanced hygrothermal modeling of building materials using Moisture-Expert*, volume 1 : Citeseer.

- [Karius & Hamer, 2001] Karius, V. & Hamer, K. (2001). pH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks. *Science of the total environment*, 278(1-3), 73–85.
- [Kassianides, 2011] Kassianides, Y. (2011). Efficacité énergétique des bâtiments, FIEEC.
- [Kim et al., 2013] Kim, K. H., Jahan, S. A., & Kabir, E. (2013). A review on human health perspective of air pollution with respect to allergies and asthma. *Environment International*, 59, 41–52.
- [Kornmann, 2005] Kornmann, M. (2005). *Matériaux de construction en terre cuite : fabrication et propriétés*. lasim.
- [Kreiger & Srubar, 2019] Kreiger, B. K. & Srubar, W. V. (2019). Moisture buffering in buildings : A review of experimental and numerical methods. *Energy and Buildings*, 202, 109394.
- [Krus et al., 2007] Krus, M., Kilian, R., & Sedlbauer, K. (2007). Mould growth prediction by computational simulation on historic buildings.
- [Künzel et al., 2005] Künzel, H., Holm, A., Zirkelbach, D., & Karagiozis, A. (2005). Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Solar Energy*, 78(4), 554–561.
- [Künzel, 1995] Künzel, H. M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. *One-and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB-Verlag Stuttgart, 65.
- [Kuznik et al., 2011] Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J.-J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379–391.
- [Laibi, 2017] Laibi, B. (2017). *Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kéraf à des terres argileuses*. PhD thesis, Normandie.
- [Lamnatou et al., 2010] Lamnatou, C., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., & Kyriakis, N. (2010). Finite-volume modelling of heat and mass transfer during convective drying of porous bodies—non-conjugate and conjugate formulations involving the aerodynamic effects. *Renewable Energy*, 35(7), 1391–1402.
- [Lautre, 2018] Lautre, Y. (2018). Isolation thermique rénovation énergétique de l’habitat dans l’yonne : Stage : Réhabilitation thermique : Samedi 27 octobre 2018 à la mairie de rosoy.
- [Lee et al., 2019] Lee, H., Ozaki, A., Lee, M., & Cho, W. (2019). A fundamental study of intelligent building envelope systems capable of passive dehumidification and solar heat collection utilizing renewable energy. *Energy and Buildings*, 195, 139–148.
- [Legifrance, 2020] Legifrance (Consulté le 13 février 2020). journal officiel de la république française. loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du grenelle de l’environnement 2009-08-03. <http://www.legifrance.gouv.fr/>.
- [Lermier, 2021] Lermier, C. (2021). Humidité et logement : les principales causes, les meilleurs remèdes. <https://www.systemed.fr/isolation-interieure/principales-causes-meilleurs-remedes,3707.html> [02/02/2021].
- [Li et al., 2019] Li, B., Hua, L., Tu, Y., & Wang, R. (2019). A Full-Solid-State Humidity Pump for Localized Humidity Control. *Joule*, 3(6), 1427–1436.
- [Li et al., 2020] Li, Y., Wen, K., Li, L., Huang, W., Bu, C., & Amini, F. (2020). Experimental investigation on compression resistance of bio-bricks. *Construction and Building Materials*, 265, 120751.
- [Lingling et al., 2005] Lingling, X., Wei, G., Tao, W., & Nanru, Y. (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and building materials*, 19(3), 243–247.
- [Lips et al., 2017] Lips, S., Narcy, M., Barrière, A., & Sartre, V. (2017). Définition d’un critère d’utilité appliqué aux diffuseurs thermiques diphasiques pour le refroidissement de composants électroniques. In *Congrès de la SFT (Société Française de Thermique)*.

- [Liuzzi et al., 2013] Liuzzi, S., Hall, M., Stefanizzi, P., & Casey, S. (2013). Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a mediterranean climate. *Building and Environment*, 61, 82–92.
- [Livingston, 1970] Livingston, R. (1970). Materials analysis of the masonry of the hagia sophia basilica, istanbul. *WIT Transactions on The Built Environment*, 4.
- [Lourenço et al., 2000] Lourenço, P., Vasconcelos, G., Barreiros Martins, J., Ramos, L., & Jalali, S. (2000). Diagnóstico sobre as condições de estabilidade do claustro do séc. xvii do mosteiro de salzedas, em tarouca. *Process LEC*, 31, 2000.
- [Louvigne & Peccard, 1985] Louvigne, M. & Peccard, J.-P. (1985). Prevention et traitement de l’humidité. techniques et produits.
- [Lubelli et al., 2018] Lubelli, B., van Hees, R. P., & Bolhuis, J. (2018). Effectiveness of methods against rising damp in buildings : Results from the EMERISDA project. *Journal of Cultural Heritage*, 31, S15–S22.
- [Luikov, 2012] Luikov, A. v. (2012). *Analytical heat diffusion theory*. Elsevier.
- [Luth, 1993] Luth, H. (1993). *Surfaces and interfaces of solids*. Springer-Verlag.
- [Maierhofer et al., 1998] Maierhofer, C., Leipold, S., Schaurich, D., Binda, L., & Saisi, A. (1998). Determination of the moisture distribution in the outside walls of s. maria rossa using radar. In *7th International Conference on Ground Penetrating Radar* (pp. 509–514).
- [Maskell et al., 2015] Maskell, D., da Silva, C. F., Mower, K., Rana, C., Dengel, A., Ball, R., Ansell, M., Walker, P., & Shea, A. (2015). Properties of bio-based insulation materials and their potential impact on indoor air quality. *Academic Journal of Civil Engineering*, 33(2), 156–163.
- [Mchirgui, 2012] Mchirgui, W. (2012). *Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires*. PhD thesis, Université de La Rochelle.
- [Mechergui, 2017] Mechergui, O. (2017). *Etude numérique des transferts de masse et de chaleur en convection naturelle dans un canal : influence de la forme de la paroi*. PhD thesis, Perpignan.
- [Medjelakh & Abdou, 2008] Medjelakh, D. & Abdou, S. (2008). Impact de l’inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment. *Journal of Renewable Energies*, 11(3), 329–341.
- [Medjelekh, 2015] Medjelekh, D. (2015). *Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygroscopiques*. PhD thesis, Université de Limoges.
- [Meille, 2001] Meille, S. (2001). *Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*. PhD thesis, INSA de Lyon.
- [Mendes, 2014] Mendes, C. A. (2014). *Modeling a fixed bed using Comsol Multiphysics and CFD*. PhD thesis, Worcester Polytechnic Institute.
- [Mendes & Philippi, 2005] Mendes, N. & Philippi, P. (2005). A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(1), 37–51.
- [Mendes et al., 2003] Mendes, N., Winkelmann, F., Lamberts, R., & Philippi, P. C. (2003). Moisture effects on conduction loads. *Energy and buildings*, 35(7), 631–644.
- [Merouani, 1987] Merouani, L. (1987). *Phénomènes de sorption et de transfert d’humidité dans des matériaux du bâtiment : étude expérimentale comparative d’un mortier de ciment et d’un enduit de façade*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.

- [Meukam, 2004a] Meukam, P. (2004a). Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments. *Thèse de Doctorat, Université Cergy-Pontoise*.
- [Meukam, 2004b] Meukam, P. (2004b). Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments. *Université de Yaoundé I*, (5.00), 10–00.
- [Mohamad, 2011] Mohamad, A. (2011). *Lattice Boltzmann Method*, volume 70. Springer.
- [Mohamad & Kuzmin, 2010] Mohamad, A. & Kuzmin, A. (2010). A critical evaluation of force term in lattice boltzmann method, natural convection problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(5-6), 990–996.
- [Molle & Patry, 2015] Molle, D. & Patry, P.-M. (2015). *RT 2012 et RT Existant : réglementation thermique et efficacité énergétique*. Editions Eyrolles.
- [Moujalled et al., 2008] Moujalled, B., Cantin, R., & Guarracino, G. (2008). Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings. *Energy and buildings*, 40(12), 2215–2223.
- [Nau, 2020] Nau, C. (2020). Le patrimoine culturel immatériel comme outil d'étude et de valorisation d'un savoir-faire : la fabrication de terre cuite architecturale dans les pyrénées-orientales. *Patrimoines du Sud*, (11).
- [Nègre, 2006] Nègre, V. (2006). *L'ornement en série : architecture, terre cuite et carton-pierre*. Editions Mardaga.
- [Neto, 1992] Neto, J. A. B. d. C. (1992). *Transport d'humidité en matériau poreux en présence d'un gradient de température : caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.
- [Nicolai, 2008] Nicolai, A. (2008). *Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials*. Syracuse University.
- [Nicolai et al., 2007] Nicolai, A., Zhang, J., & Grunewald, J. (2007). Coupling strategies for combined simulation using multizone and building envelope models. In *Proc. of Building Simulation*, volume 66 : Citeseer.
- [Nofal et al., 2001] Nofal, M., Straver, M., & Kumaran, K. (2001). Comparison of four hygrothermal models in terms of long-term performance assessment of wood-frame constructions. In *Proceedings of the 8th conference of Canadian building science Solutions to moisture problems in building enclosures. Straube J.,(Ed.)* (pp. 118–138). : Citeseer.
- [Nord, 2010] Nord, C. (2010). renforcement de l'isolation dans l'existant et évaluation des risques liés à l'humidité (humirisk). <http://www.cetenordpicardie.developpementdurable.gouv.fr>.
- [Nord, 1992] Nord, A., G. (1992). Efflorescence salts on weathered building stone in sweden. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 114(4), 423–429.
- [Nord-humidité, 2021] Nord-humidité (2021). maison et humidité. <https://nord-humidite.com/> [16/02/2021].
- [Ojanen et al., 2011] Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Lahdesmaki, K., Vinha, J., & Salminen, K. (2011). Classification of materials sensitivity - new approach for mould growth modeling. In *9th Nordic symposium on building physics*, volume 2 (pp. 867–874).
- [Oulaid et al., 2010] Oulaid, O., Benhamou, B., & Galanis, N. (2010). Combined buoyancy effects of thermal and mass diffusion on laminar convection in a vertical isothermal channel. *Computational Thermal Sciences : An International Journal*, 2(2), 125–138.
- [Oumeziane et al., 2021] Oumeziane, Y. A., Pierre, A., El Mankibi, F., Lepiller, V., Gasnier, M., & Desevaux, P. (2021). Hygrothermal properties of an early 20th century clay brick from eastern france : Experimental characterization and numerical modelling. *Construction and Building Materials*, 273, 121763.

- [Oura et al., 2003] Oura, K., Lifshits, V., Saranin, A., & Zotov, A.V. and Katayama, M. (2003). *Surface Science, An Introduction*. Springer.
- [Papayianni & Stefanidou, 2000] Papayianni, I. & Stefanidou, M. (2000). Characteristics of bricks of byzantine period. In *12 th Int. Brick/Block Masonry Conf. Proc.*, volume 3 (pp. 1729–1736).
- [Patankar, 1980] Patankar, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow.
- [Pauri et al., 1994] Pauri, M., Stazi, A., Mastrosanti, F., & D’orazio, M. (1994). The decay of ancient building masonry, a case study. In *Proc., 10 th International Brick/Block Masonry Conference* (pp. 1295–1304).
- [Peuportier, 2013] Peuportier, B. (2013). Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments mines paris les presses paristech, 2013.
- [Philip & De Vries, 1957] Philip, J. & De Vries, D. (1957). Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(2), 222–232.
- [Pien, 1985] Pien, A. (1985). Traitements contre l’humidité ascensionnelle. In *Ve congrès international sur l’alteration et la conservation de la pierre. Actes. Vth international congress on deterioration and conservation of stone. Proceedings, Lausanne, 25-27.9. 1985* (pp. 921–929).
- [Piot, 2009] Piot, A. (2009). *Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique*. PhD thesis, INSA de Lyon.
- [Poiseuille, 1840] Poiseuille, J.-L. M. (1840). Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètre. *Comptes rendus des séances de l’Académie des Sciences*, 11, 1041–1048.
- [Pouget, 2011] Pouget, A. (2011). Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974. *Le guide ABC, Les éditions parisiennes (EDIPA)*, (pp. 350).
- [Poupeleer, 2007] Poupeleer, A.-S. (2007). Transport and crystallization of dissolved salts in cracked porous building materials.
- [Promis, 2020] Promis, G. (2020). *Valorisation d’éco-coproduits industriels pour la construction durable*. HDR thesis, Université de Picardie Jules Verne, <https://hal.archives-ouvertes.fr/te1-03272065> [20/08/2021].
- [Promis, 2021] Promis, G. (2021). An innovative system for the treatment of rising dampness in buildings located in cold climates. *Energies*, 14, 3421.
- [Promis et al., 2019] Promis, G., Freitas Dutra, L. and Douzane, O., Tran Le, A. D., & Langlet, T. (2019). Temperature-dependent sorption models for mass transfer throughout bio-based building materials. *Construction and Building Materials*, 197(2), 513–525.
- [Qin, 2006] Qin, M. (2006). Etude des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les parois des bâtiments. *Revue Européenne de Génie Civil*, 10(8), 1016–1016.
- [Qin et al., 2008] Qin, M., Belarbi, R., Ait-Mokhtar, A., & Nilsson, L.-O. (2008). Nonisothermal moisture transport in hygroscopic building materials : modeling for the determination of moisture transport coefficients. *Transport in Porous Media*, 72(2), 255–271.
- [Qiu et al., 2003] Qiu, X., Haghghat, F., & Kumaran, K. (2003). Moisture transport across imperfect hydraulic contact interfaces.
- [Quintard & Whitaker, 1988] Quintard, M. & Whitaker, S. (1988). Two-phase flow in heterogeneous porous media : The method of large-scale averaging. *Transport in porous media*, 3(4), 357–413.
- [Rahim, 2015] Rahim, M. (2015). *Analyse et caractérisation du comportement hygrothermique de parois agro-sourcées à l’échelle 1 : expérimentation et modélisation*. PhD thesis, Université de Picardie Jules Verne.

- [Rahim et al., 2016] Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A., Promis, G., & Langlet, T. (2016). Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 102, 679–687.
- [Rahmouni, 2019] Rahmouni, I. (2019). *Optimisation de la formulation des bétons d'éco-granulats obtenus par carbonatation accélérée des déchets d'incinérateurs*. PhD thesis, Université de Picardie Jules Verne.
- [Ratrimoarisonina et al., 2019] Ratrimoarisonina, H. A., Ramaleoharinjato, J., Randriamalala, T. R., & Rakotovololona, F. (2019). Contribution a la mise en place d'un systeme de gestion de base de donnees de lateritede la region analamanga madagascar.
- [Rico, 1993] Rico, C. (1993). Production et diffusion des matériaux de construction en terre cuite dans le monde romain : l'exemple de la tarraconaise d'après l'épigraphie. *Mélanges de la Casa de Velázquez*, 29(1), 51–86.
- [Rirsch & Zhang, 2010] Rirsch, E. & Zhang, Z. (2010). Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties. *Construction and Building Materials*, 24(10), 1815–1820.
- [Rode et al., 2006] Rode, C., Peuhkuri, R., Lone, H., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Harderup, L.-E., & Arfvidsson, J. (2006). *Moisture buffering of building materials*. Technical University of Denmark DTU.
- [Rodríguez-Esteban et al., 2020] Rodríguez-Esteban, M. A., Sáez-Pérez, M. P., Camino-Olea, M. S., Frechilla-Alonso, M. A., & Ramos-Gavilán, A. B. (2020). Urban layout around markets built of iron in the 19th and 20th centuries : A current consequence of their location sites in castilla & león, spain. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, volume 960 (pp. 042071). : IOP Publishing.
- [Roulet, 2004] Roulet, C.-A. (2004). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*, volume 22. PPUR presses polytechniques.
- [Rouquerol et al., 1994] Rouquerol, J., Avnir, D., Everett, D., Fairbridge, C., Haynes, M., Pernicone, N., Ramsay, J., Sing, K., & Unger, K. (1994). Guidelines for the characterization of porous solids. In *Studies in surface science and catalysis*, volume 87 (pp. 1–9). Elsevier.
- [Rousseau, 2003] Rousseau, M. Z. (2003). Heat, air and moisture control strategies for managing condensation in walls. *Building Science Insight 2003 Proceedings. National Research Council Canada. NRCC*, 46734, 1–11.
- [Roussel, 2017] Roussel, I. (2017). Qualité de l'air intérieur et bâtiments performants en énergie. *2268-3798*.
- [Rénovation et travaux, 2021] Rénovation et travaux (2021). traitement des remontées capillaires. <https://www.renovationetravaux.fr/> [18/02/2021].
- [Saidi, 2018] Saidi, M. (2018). *Etude des transferts hygrothermiques dans un matériau écologique*. PhD thesis, Université de Perpignan.
- [Samara et al., 2009] Samara, M., Lafhaj, Z., & Chapiseau, C. (2009). Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks : Factory scale experiment. *Journal of hazardous materials*, 163(2-3), 701–710.
- [Samri, 2008] Samri, D. (2008). *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction*. PhD thesis, INSA de Lyon.
- [Samson et al., 1999] Samson, E., Marchand, J., & Beaudoin, J. (1999). Describing ion diffusion mechanisms in cement-based materials using the homogenization technique. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1341–1345.

- [Samson et al., 2005] Samson, E., Marchand, J., Snyder, K. A., & Beaudoin, J. (2005). Modeling ion and fluid transport in unsaturated cement systems in isothermal conditions. *Cement and Concrete Research*, 35(1), 141–153.
- [Sartre, 1981] Sartre, J. (1981). *Châteaux" brique et pierre" en France : essai d'architecture*. Nouvelles éditions latines.
- [Sassine, 2013] Sassine, E. (2013). *Analyse typologique et thermique des maisons anciennes de Lille : Etude expérimentale et numérique des parois verticales*. PhD thesis, Université d'Artois.
- [Sellami et al., 2019a] Sellami, K., Feddaoui, M., Labsi, N., Najim, M., Oubella, M., & Benkahla, Y. (2019a). Direct evaporative cooling performance of ambient air using a ceramic wet porous layer. *Chemical Engineering Research and Design*, 142, 225–236.
- [Sellami et al., 2018] Sellami, K., Labsi, N., Feddaoui, M., Oubella, M., Benkahla, Y., & Najim, M. (2018). Comparative study of reversal flow during the evaporation or condensation of water and ethanol film in a vertical channel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(5), 1421–1432.
- [Sellami et al., 2019b] Sellami, K., Labsi, N., Najim, M., Benkahla, Y. K., et al. (2019b). Numerical simulations of heat and mass transfer process of a direct evaporative cooler from a porous layer. *Journal of Heat Transfer*, 141(7).
- [SFNF, 2021] SFNF (2021). Syndicat des fabricants de produits en terre cuite du nord de la france. la brique dans le monde.. et dans l'histoire. <http://www.briques-nord.org/brique-traditionnelle-monde/> [05/09/2019].
- [Shepherd & Wiltshire, 1995] Shepherd, R. & Wiltshire, R. (1995). An analytical approach to coupled heat and moisture transport in soil. *Transport in porous media*, 20(3), 281–304.
- [Smith & Hill, 1982] Smith, S. & Hill, S. (1982). Influence of temperature and water activity on germination and growth of *Aspergillus restrictus* and *A. versicolor*. *Transactions of the British Mycological Society*, 79(3), 558–560.
- [Sock et al.,] Sock, O., Gomina, M., Sambou, V., Ndiaye, L. G., Kobor, D., & Blanchart, P. Matières premières argileuses du sénégal : caractéristiques et applications aux produits céramiques de grande diffusion.
- [Sridi, 2018] Sridi, A. (2018). *Modélisations thermomécanique et numérique du comportement de maçonneries en briques alvéolées en terre cuite sous chargements mécanique et thermique sévères*. PhD thesis, Université Paris-Saclay.
- [Stephan et al., 2014] Stephan, E., Caucheteux, A., & Bourru, L. (2014). Maîtrise d'ouvrage.
- [Subashi De Silva & Hansamali, 2019] Subashi De Silva, G. H. & Hansamali, E. (2019). Eco-friendly fired clay bricks incorporated with porcelain ceramic sludge. *Construction and Building Materials*, 228, 116754.
- [Talukdar et al., 2007] Talukdar, P., Olutmayin, S. O., Osanyintola, O. F., & Simonson, C. J. (2007). An experimental data set for benchmarking 1-d, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. part i : Experimental facility and material property data. *International journal of heat and mass transfer*, 50(23-24), 4527–4539.
- [Taoukil et al., 2013] Taoukil, D., Sick, F., Mimet, A., Ezbakhe, H., Ajzoul, T., et al. (2013). Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Construction and Building Materials*, 48, 104–115.
- [Toftum et al., 1998] Toftum, J., Jørgensen, A. S., & Fanger, P. O. (1998). Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin. *Energy and Buildings*, 28(1), 1–13.

- [Torres & de Freitas, 2010] Torres, I. & de Freitas, V. P. (2010). The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings.
- [Torres & de Freitas, 2007] Torres, M. I. M. & de Freitas, V. P. (2007). Treatment of rising damp in historical buildings : wall base ventilation. *Building and environment*, 42(1), 424–435.
- [Trabelsi et al., 2012] Trabelsi, A., Belarbi, R., Abahri, K., & Qin, M. (2012). Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient. In *Building Simulation*, volume 5 (pp. 107–115). : Springer.
- [Trabelsi et al., 2013] Trabelsi, A., Belarbi, R., Abahri, K., & Qin, M. (2013). Reply on the comments regarding the paper “assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient”. In *Building Simulation*, volume 6 (pp. 109–110). : Tsinghua Press.
- [Tran Le et al., 2009] Tran Le, A. D., Maalouf, C., Mendonça, K. C., Mai, T. H., & Wurtz, E. (2009). Study of moisture transfer in a double-layered wall with imperfect thermal and hydraulic contact resistances. *Journal of Building Performance Simulation*, 2(4), 251–266.
- [Tran Le, 2010] Tran Le, D. A. (2010). *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*. PhD thesis, Université de Reims.
- [Udawattha et al., 2018] Udawattha, C., Galkanda, H., Ariyaratne, I. S., Jayasinghe, G., & Halwatura, R. (2018). Mold growth and moss growth on tropical walls. *Building and Environment*, 137, 268–279.
- [Ünver et al., 2004] Ünver, R., Akdağ, N. Y., Gedik, G. Z., Öztürk, L. D., & Karabiber, Z. (2004). Prediction of building envelope performance in the design stage : an application for office buildings. *Building and Environment*, 39(2), 143–152.
- [Valenza II & Scherer, 2007] Valenza II, J. J. & Scherer, G. W. (2007). A review of salt scaling : II. mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1022–1034.
- [Van Der Kooi, 1971] Van Der Kooi, J. (1971). Moisture transport in cellular concrete roofs.
- [Van Mier, 1984] Van Mier, J. G. M. (1984). *Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions*. Citeseer.
- [Vereecken & Roels, 2012] Vereecken, E. & Roels, S. (2012). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*, 51, 296–310.
- [Viitanen et al., 2010] Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paaajanen, L., & Lähdesmäki, K. (2010). Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics*, 33(3), 201–224.
- [Vitiello et al., 2020] Vitiello, V., Castelluccio, R., & Merino, M. D. R. (2020). Experimental research to evaluate the percentage change of thermal and mechanical performances of bricks in historical buildings due to moisture. *Construction and Building Materials*, 244, 118107.
- [Vorhauer, 2018] Vorhauer, N. (2018). *Experiment based development of a non-isothermal pore network model with secondary capillary invasion*. PhD thesis.
- [Vu, 2007] Vu, X. H. (2007). *Caractérisation expérimentale du béton sous fort confinement : influences du degré de saturation et du rapport eau/ciment*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier.
- [Whitaker, 1977] Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media : a theory of drying. In *Advances in heat transfer*, volume 13 (pp. 119–203). Elsevier.
- [Whitaker, 1986] Whitaker, S. (1986). Flow in porous media i : A theoretical derivation of darcy’s law. *Transport in porous media*, 1(1), 3–25.
- [Wilson et al., 1995] Wilson, M. A., Hoff, W., & Hall, C. (1995). Water movement in porous building materials—xiii. absorption into a two-layer composite. *Building and environment*, 30(2), 209–219.

- [Wolkoff & Kjærgaard, 2007] Wolkoff, P. & Kjærgaard, S. K. (2007). The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment international*, 33(6), 850–857.
- [Woloszyn, 2014] Woloszyn, M. (2014). Towards a method of hygro-thermal design of efficient buildings : project approach HYGRO-BAT.
- [Woloszyn et al., 2009] Woloszyn, M., Kalamees, T., Olivier 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. *Building and Environment*, 44(3), 515–524.
- [Woloszyn & Rode, 2008] Woloszyn, M. & Rode, C. (2008). Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings. In *Building Simulation*, volume 1 (pp. 5–24). : Springer.
- [Woloszyn et al., 2008] Woloszyn, M., Rode, C., & Roux, J.-J. (2008). Synthèse sur la modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments dans l’annexe 41 de l’agence internationale de l’énergie. In *Conférence IBPSA France*.
- [Wufi, 2005] Wufi (2005). [Online] Available at : www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/downloads_e.html [Accessed April 25, 2019].
- [Xavier et al., 2012] Xavier, G., Saboya, F., Maia, P., & Alexandre, J. (2012). Durability of fired clay bricks containing granite powder. *Materiales de Construcción*, 62(306), 213–229.
- [Yedri et al., 2016] Yedri, A. B., Ammari, M., & Ayadi, H. (2016). Contribution à l’élaboration des briques en terre cuite à base d’une boue industrielle (contribution to the development of fired bricks made of industrial sludge). *J. Mater. Environ. Sci*, 7(2), 497–504.
- [You et al., 2017] You, S., Li, W., Ye, T., Hu, F., & Zheng, W. (2017). Study on moisture condensation on the interior surface of buildings in high humidity climate. *Building and Environment*, 125, 39–48.
- [Yu et al., 2019] Yu, S., Yu, Z., Liu, P., & Feng, G. (2019). Influence of environmental factors on wall mold in underground buildings in Shenyang City, China. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101452.
- [Zuber & Marchand, 2000] Zuber, B. & Marchand, J. (2000). Modeling the deterioration of hydrated cement systems exposed to frost action : Part 1 : Description of the mathematical model. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1929–1939.

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Consommation énergétique moyenne des bâtiments anciens | 14 |
| 1.2 | Approche ancestrale de la conception bioclimatique | 15 |
| 1.3 | Principes de comportement thermique de constructions | 17 |
| 1.4 | Évolution de la température intérieure au cours d'une journée | 18 |
| 1.5 | Origines de l'humidité au sein de l'enveloppe des bâtiments | 20 |
| 1.6 | Exemple de fissuration d'un mur en briques terre cuite | 21 |
| 1.7 | Évolution de la loi de comportement mécanique du béton saturé | 22 |
| 1.8 | Définition de l'indicateur de pathologie liée aux effets de l'humidité | 23 |
| 1.9 | Exemple d'un pignon en pierres gonflé et fissuré | 24 |
| 1.10 | Effet de l'humidité sur la conductivité thermique de différents matériaux | 25 |
| 1.11 | Phénomène de gel d'eau dans un pore | 25 |
| 1.12 | Efflorescence d'un mur en briques terre cuite | 26 |
| 1.13 | Processus de cristallisations des sels | 27 |
| 1.14 | Développement de bio-contaminants à l'intérieur du bâtiment | 28 |
| 1.15 | Plages d'humidité relative optimale pour une bonne qualité d'air | 28 |
| 1.16 | VMC double flux <i>vs</i> VMC simple flux | 30 |
| 1.17 | Principe d'hydrofuge d'une façade | 31 |
| 1.18 | Mise en œuvre d'une barrière physique jouant le rôle de coupure capillaire | 32 |
| 1.19 | Mise en place d'un drain | 32 |
| 1.20 | Principe d'injection de résine | 33 |
| 1.21 | Principe de l'électro-osmose permettant de repousser l'eau ascensionnelle | 34 |
| 1.22 | Principe physique du siphon atmosphérique | 34 |
| 1.23 | Organigramme des techniques de traitement de l'humidité ascendante | 35 |
| | | |
| 2.1 | Représentation d'un milieu poreux | 40 |
| 2.2 | Les modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore | 42 |
| 2.3 | Les moteurs de transport de la matière au sein des matériaux de construction | 43 |
| 2.4 | La cinétique de stockage de l'humidité à l'intérieur des pores d'un matériau | 44 |
| 2.5 | Processus de diffusion de l'eau liquide dans un milieu poreux | 44 |
| 2.6 | Transport de chaleur dans un milieu poreux | 45 |
| 2.7 | Volume élémentaire représentative | 47 |
| 2.8 | Homogénéisation par prise de moyenne d'un milieu poreux | 47 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.1 | Sollicitation d'une paroi sous conditions aux limites extérieure et intérieure | 63 |
| 3.2 | Configurations de contact entre deux couches composant une paroi | 68 |
| 3.3 | Principe du système de ventilation de la base des murs | 71 |
| 3.4 | Principe de la méthode Air-gap | 72 |
| 3.5 | Réseau de soufflage et d'aspiration du dispositif Aéraulec | 73 |
| 3.6 | Le concept du système Aéraulec | 73 |
| 3.7 | Les phénomènes physiques mis en jeu | 75 |
| 3.8 | Configuration du modèle en condition adiabatique | 77 |
| 3.9 | Organigramme modèle numérique en conditions adiabatiques | 83 |
| 3.10 | Modèle numérique d'un milieu non saturé, en conditions diabatiques | 85 |
| 3.11 | Configuration du volume de contrôle | 92 |
| 3.12 | Organigramme du modèle en conditions diabatiques | 93 |
| 3.13 | Influence des dimensions du maillage | 94 |
| | | |
| 4.1 | Dimension des briques en terre cuite | 100 |
| 4.2 | Identification des phases d'un milieu poreux | 104 |
| 4.3 | Diagramme des phases d'un milieu poreux | 104 |
| 4.4 | Distribution de la porosité de briques en fonction de leur date de production | 106 |
| 4.5 | Mécanisme simplifié du processus de frittage [Yedri et al., 2016] | 107 |
| 4.6 | Influence de frittage sur la microstructure | 107 |
| 4.7 | Clichés MEB de la brique en terre cuite | 110 |
| 4.8 | Diffractogramme de la brique en terre cuite de couleur brune foncé | 112 |
| 4.9 | Diffractogramme de la brique en terre cuite de couleur rouge | 113 |
| 4.10 | Essai de compression des briques en terre cuite | 115 |
| 4.11 | Allure du comportement en compression d'une brique à l'état sec | 116 |
| 4.12 | Essais de compression des briques en terre cuite à l'état sec et saturé | 116 |
| 4.13 | Essai de flexion 3-points des briques en terre cuite | 117 |
| 4.14 | Allure du comportement en flexion d'une brique à l'état sec | 118 |
| 4.15 | Absorption d'eau par capillarité | 119 |
| 4.16 | Résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité | 120 |
| 4.17 | Isothermes de sorption | 122 |
| 4.18 | Classification des isothermes de sorption | 122 |
| 4.19 | Hystérésis de sorption | 123 |
| 4.20 | Essai de sorption des briques en terres cuites | 124 |
| 4.21 | Courbes de sorption des briques en terre cuite | 125 |
| 4.22 | Application du modèle GAB pour le lissage des mesures de sorption | 126 |
| 4.23 | Isothermes de sorption des briques en terre cuite | 126 |
| 4.24 | Immersion totale des briques en terre cuite | 128 |
| 4.25 | Carottage des briques en terre cuite | 128 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.26 | Perméabilité à la vapeur d'eau des briques en terre cuites | 129 |
| 4.27 | Perméabilité à la vapeur d'eau par la méthode de la coupelle en base sèche | 130 |
| 4.28 | Coefficients de diffusion hydrique des briques en terre cuite | 132 |
| 4.29 | Enceinte climatique pour un essai MBV | 134 |
| 4.30 | Cinétique de variation de la masse d'un échantillon de brique | 135 |
| 4.31 | Classification des valeurs MBV selon le NORDTEST PROJECT | 135 |
| 4.32 | Principe de la plaque chaude gardée | 138 |
| 4.33 | Principe de la méthode du fil chaud | 139 |
| 5.1 | Configuration utilisée dans les travaux de [Sellami et al., 2018] | 148 |
| 5.2 | Distribution axiale de la température dans le milieu poreux et dans le canal | 149 |
| 5.3 | Distribution axiale de la vitesse dans le milieu poreux et dans le canal . . . | 150 |
| 5.4 | Descriptif du banc d'essai | 151 |
| 5.5 | Conception du support expérimental | 151 |
| 5.6 | Mise en place des capteurs sur le mur | 152 |
| 5.7 | Mise en place des capteurs sur la plaque | 153 |
| 5.8 | Position des capteurs hygrothermiques et des anémomètres | 153 |
| 5.9 | Conception d'un dispositif expérimental de validation du modèle numérique | 154 |
| 5.10 | Évolutions de la température et de l'humidité relative au sein du mur . . . | 155 |
| 5.11 | Évolutions de la température et l'humidité relative dans le canal | 156 |
| 5.12 | Évolutions expérimentales de la température dans le mur et dans le canal . | 157 |
| 5.13 | Évolutions expérimentales de l'humidité relative dans le mur et dans le canal | 157 |
| 5.14 | Validation expérimentale de la température au sein de la paroi saturée . . | 159 |
| 5.15 | Géométrie modélisée | 161 |
| 5.16 | Étude de sensibilité de maillage utilisé | 162 |
| 5.17 | Champs des isothermes dans le milieu poreux (a) et dans le canal ventilé (b) | 163 |
| 5.18 | Champs d'iso-concentration de la vapeur d'eau dans la lame d'air | 164 |
| 5.19 | Concentration de vapeur à l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air | 165 |
| 5.20 | Évolutions de la température dans le milieu poreux et dans le canal d'air . | 166 |
| 5.21 | Champs de concentration de vapeur d'eau dans la lame d'air | 167 |
| 5.22 | Concentration de vapeur à l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air | 167 |
| 5.23 | Champs des isothermes dans le milieu poreux et dans le canal | 168 |
| 5.24 | Champs de concentration de la vapeur d'eau dans le canal | 169 |
| 5.25 | Concentration de vapeur à l'interface entre le milieu poreux et le canal d'air | 170 |
| 5.26 | Profils de vitesse de l'air dans le canal lors de soufflage d'un air à 0.01m/s | 171 |
| 5.27 | Variation de la vitesse de l'air sur la concentration de vapeur | 172 |
| 5.28 | Variation de la vitesse de l'air sur la concentration de vapeur | 173 |
| 5.29 | Variation de la vitesse de l'air sur la concentration de vapeur | 174 |
| 6.1 | Modèle numérique d'un milieu non saturé, en conditions diabatiques | 178 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.2 | Température de la paroi en fonction de la porosité | 181 |
| 6.3 | Température et humidité dans le canal sous différentes porosités | 182 |
| 6.4 | Évolutions des nombres de Nusselt et Sherwood au regard de la porosité | 183 |
| 6.5 | Température du mur humide en fonction de la conductivité | 184 |
| 6.6 | Température et humidité relative en fonction de la conductivité | 185 |
| 6.7 | Nombres de Nusselt et de Sherwood en fonction de la conductivité | 185 |
| 6.8 | Température du mur humide en fonction de la diffusion hygrique | 187 |
| 6.9 | Température du mur humide en fonction de la diffusion hygrique | 188 |
| 6.10 | Nombres de Nusselt et Sherwood au regard de la diffusivité hygrique | 188 |
| 6.11 | Évolutions de la température de la paroi épaisseur | 189 |
| 6.12 | Évolutions de la teneur en eau de la paroi en fonction de l'épaisseur | 190 |
| 6.13 | Température et humidité dans le canal en fonction du facteur de forme | 190 |
| 6.14 | Nombres de Nusselt et Sherwood au regard de l'épaisseur de la paroi | 191 |
| 6.15 | Cas 11 - Champs des isothermes et iso-concentrations dans la paroi humide | 192 |
| 6.16 | Cas 11 - Champs des isothermes et d'iso-concentration dans la lame d'air | 193 |
| 6.17 | Cas 11 - Évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood | 194 |
| 6.18 | Cas 12 - Champs des isothermes et iso-concentrations dans la paroi humide | 195 |
| 6.19 | Cas 13 - Champs des isothermes et iso-concentrations dans la lame d'air | 196 |
| 6.20 | Cas 12 - Évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood | 197 |
| 6.21 | Cas 13 - Champs des isothermes et d'iso-concentration dans la paroi humide | 197 |
| 6.22 | Cas 13 - Champs des isothermes et d'iso-concentration dans la lame d'air | 198 |
| 6.23 | Cas 13 - Évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood | 199 |
| 6.24 | Profils de température de la paroi et de température de l'air | 200 |
| 6.25 | Profils de teneur en eau de la paroi et d'humidité absolue de l'air | 200 |
| 6.26 | Optimisation des conditions hygrothermiques du soufflage d'air neuf | 201 |
| 6.27 | Profils axiaux de la vitesse de l'air dans le canal ventilé | 203 |
| 6.28 | Influence de la vitesse sur les températures de paroi et d'air | 204 |
| 6.29 | Influence de la vitesse sur la teneur en eau | 204 |
| 6.30 | Influence de la vitesse sur Nusselt et Sherwood | 205 |
| 6.31 | Cas 18 - Isothermes et iso-teneur en eau dans la paroi | 206 |
| 6.32 | Cas 18 - Distribution de la teneur en eau dans la paroi | 207 |
| 6.33 | Cas 18 - Isothermes et iso-concentrations en vapeur dans le canal | 208 |
| 6.34 | Cas 19 - Isothermes et iso-teneurs en eau dans la paroi | 209 |
| 6.35 | Cas 19 - Isothermes et iso-concentrations en vapeur dans la lame d'air | 210 |
| 6.36 | Cas 20 - Isothermes et iso-teneurs en eau dans la paroi | 211 |
| 6.37 | Cas 20 - Isothermes et iso-concentrations en vapeur dans la lame d'air | 211 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|-----|
| 1.1 | Effet de l'humidité sur les propriétés physiques de différents matériaux . . . | 23 |
| 1.2 | Synthèse des solutions curatives et palliatives aux remontées capillaires . . . | 35 |
| 2.1 | Grandeurs physiques définissant l'état d'un milieu poreux | 41 |
| 4.1 | Identification expérimentale des propriétés physiques des briques | 105 |
| 4.2 | Valeurs typique de la masse volumique apparente des briques en terre cuite | 108 |
| 4.3 | Présentation des solutions salines utilisées | 124 |
| 4.4 | Coefficients du modèle de GAB | 127 |
| 4.5 | Mesure de la teneur en eau libre | 128 |
| 4.6 | Perméabilité à la vapeur d'eau sèche des briques en terre cuite | 131 |
| 4.7 | Identification de la valeur tampon hygrique des briques en terre cuite . . . | 136 |
| 4.8 | Identification des paramètres hygriques des briques en terre cuite | 136 |
| 4.9 | La conductivité thermique des briques en terre cuite à l'état sec | 139 |
| 5.1 | Mesures expérimentales de la vitesse de l'air dans le canal | 156 |
| 5.2 | Paramètres d'entrée du modèle numérique adapté au montage expérimental | 158 |
| 5.3 | Identification de l'humidité absolue à différentes positions dans le canal . . | 160 |
| 5.4 | Conditions climatiques de l'air insufflé | 162 |
| 6.1 | Paramètres d'entrée des modélisations numériques | 179 |
| 6.2 | Conditions climatiques de l'air insufflé et de l'ambiance externe | 179 |
| 6.3 | Conditions climatiques de l'air insufflé et de l'ambiance externe | 180 |

Dans le cadre de la rénovation énergétique durable du bâti ancien soumis aux remontées capillaires, une nouvelle technologie de rupture consiste à incorporer un système de ventilation d'un espace tampon situé entre l'isolation thermique et l'ossature porteuse humide. Cette technologie est considérée comme l'une des solutions efficaces et peu onéreuses pour lutter contre les remontées capillaires tout en assurant la durabilité de l'isolation et la pérennité structurelle de l'ossature. Physiquement, le dispositif aéraulique est basé sur la génération d'un flux laminaire de convection forcée d'air neuf dans un canal vertical en contact avec la surface interne de la paroi humide. Cette technologie crée alors un front d'évaporation à la surface interne de la paroi, où par conséquent, un échange hygrothermique simultané se produit entre la paroi et la lame d'air ventilée et entre la paroi et l'environnement extérieur. La modélisation numérique suit une démarche scientifique explicite qui consiste, dans un premier temps en une simplification du modèle grâce à l'approche de Darcy simple dans le milieu poreux et aux équations de la convection forcée. Notre objectif est de mettre en exergue les transferts hygrothermiques entre le mur humide et le canal d'air ventilé, en supposant que la face externe de la paroi est en conditions adiabatiques et que le milieu poreux est saturé en eau. Dans un second temps, le modèle est étendu vers un modèle généralisé basé sur l'approche de Luikov qui assimile la paroi à milieu poreux partiellement saturé sous conditions diabatiques. Ces équations de transferts hygrothermiques sont résolues par une méthode hybride combinant la méthode de Lattice - Boltzmann, la méthode des volumes finis, et la méthode itérative de sur-relaxation ponctuelle. Un jeu de données "matériaux" est identifié par le truchement d'une campagne expérimentales de caractéristiques physiques, hygrothermiques et mécanique afin de constituer des paramètres d'entrée des modèles numériques. Le modèle est validé analytiquement et expérimentalement, via un dispositif expérimental conçu au sein du laboratoire. Une étude de sensibilité du modèle aux paramètres d'entrée du modèle est proposée, suivie de l'analyse de l'influence des conditions de soufflage d'air neuf (hygrothermie dynamique) et des conditions environnementales extérieures sur la performance du canal ventilé adossé à une paroi partiellement saturée. De nombreuses perspectives de recherche peuvent se dégager de notre étude, notamment au travers du transfert de cette technologie sur le marché de la rénovation énergétique du patrimoine humide.

Mots clés : Rénovation énergétique, Remontées capillaires, Transferts hygrothermiques, Modélisation

As part of the sustainable energy renovation of old buildings subjected to capillary rise, a new breakthrough technology consists of incorporating a ventilation system of a buffer space located between the thermal insulation and the wet load-bearing framework. This technology is one of the effective and inexpensive solutions to fight against capillary rise, while ensuring the durability of the insulation and the structural durability of the framework. Physically, the aeraulic device based on the generation of a laminar flow of forced convection of fresh air in a vertical channel in contact with the internal surface of the wet wall. This technology then creates an evaporation front at the internal surface of the wall, where as a result, simultaneous hygrothermal exchange occurs between the wall and the ventilated air space and between the wall and the external environment. Numerical modeling of these coupled physical phenomena follows an explicit scientific approach, which firstly consists in a simplification of the model thanks to the simple Darcy approach in the porous medium and to the forced convection equations. Our objective is to highlight the hygrothermal transfers between the humid wall and the ventilated air channel, assuming that the external face of the wall is in adiabatic conditions and that water saturated the porous medium. Secondly, the model extends to a generalized model based on the Luikov approach, which assimilates the wall with a partially saturated porous medium under diabetic conditions. A hybrid method, combining the Lattice - Boltzmann method, the finite volume method, and the iterative successive over-relaxation method, solves these hygrothermal transfer equations. A "materials" data set identified by means of an experimental campaign of physical, hygrothermal and mechanical characteristics in order to constitute input parameters for the numerical models. The numerical model is validated through analytically approche and experimental one via an experimental device designed in the laboratory. A study of the sensitivity of the model to the input parameters of the model proposed, followed by the analysis of the influence of the fresh air blowing conditions and of the external environmental conditions on the performance of the ventilated duct leaned against a partially saturated wall. Many research perspectives can emerge from our study, in particular through the transfer of this technology to the energy renovation market for wet properties.

Keywords : Energy renovation, Capillary rise, Dynamic hygrothermal transfers, Multi-physic numerical modeling