

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان  
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE



## **THESE**

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3<sup>ème</sup> Cycle**

**En :** Génie mécanique

**Spécialité :** Energétique et thermique appliquée

**Par :** FRAINE Youssouf

### **Sujet**

**Etude et analyse de transfert de chaleur et d'humidité  
avec changement de phase dans les matériaux de  
construction poreux**

Soutenue publiquement, le 16 / 06 / 2020, devant le jury composé de :

|                            |            |              |                       |
|----------------------------|------------|--------------|-----------------------|
| M. SAIM Rachid             | Professeur | UAB. Tlemcen | Président             |
| M. SELADJI Chakib          | Professeur | UAB. Tlemcen | Directeur de thèse    |
| M. AIT-MOKHTAR Abdelkarim  | Professeur | ULR. France  | Co-Directeur de thèse |
| M. KORTI Abdel Illah Nabil | Professeur | UAB. Tlemcen | Examineur             |
| M. MIROUD Djamel           | Professeur | USTHB. Alger | Examineur             |

Année Universitaire 2019-2020

*A mes parents,*

*A mes frères et ma sœur,*

*A toute ma famille et tous mes amis.*

# Remerciements

Le présent travail décrit dans ce manuscrit a été réalisé au sein du laboratoire Energétique & Thermique Appliquée (ETAP) de l'université de Tlemcen.

Je tiens à remercier très vivement M. SELADJI Chakib, professeur à l'université de Tlemcen, qui a assuré l'encadrement de cette thèse. Merci de m'avoir orienté et encouragé tout au long de ces années de thèse. Je le remercie également pour ses disponibilités et tout le temps qu'il m'a consacré, ainsi que pour ses conseils qui m'ont été indispensables.

Je souhaite adresser aussi mes sincères remerciements à M. AïT-MOKHTAR Abdelkarim, professeur à l'université de La Rochelle (France), et directeur du laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement (LaSIE), CNRS, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire pendant mes séjours scientifiques, je lui suis très reconnaissant pour son aide et sa grande patience. Sa finesse de jugement et ses qualités humaines et scientifiques exceptionnelles m'ont été un véritable bol d'air pendant la durée de la formation.

J'exprime ma reconnaissance à tous les membres du jury M.SAIM Rachid, M. KORTI Abdel Illah Nabil, professeurs à l'université de Tlemcen, et M. MIROUD Djamel, professeur à l'université d'Alger d'avoir accepté d'examiner ce travail, et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme finale de cette thèse.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes parents pour leur sacrifice et soutien inestimables durant toutes mes études.

Enfin, mes remerciements vont aussi à tous mes amis et mes collègues du laboratoire ETAP, comme je remercie tous ceux qui ont aidés de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

## ملخص

يعد دمج المواد المبتكرة السلبية في أغلفة المباني طريقة فعالة لتقليل استهلاك الطاقة وضمان مستوى عالٍ من الراحة داخل المباني. البوليسترين الموسع هو واحد من أكثر المواد المستخدمة في البناء السكنية والتجارية في الجزائر. في حين أن هذا الأخير يحتوي على سداسي البروم ثنائي الفينيل ، والذي تم اعتباره مؤخرًا ملوثًا عضويًا ثابتًا. من ناحية أخرى ، فإن الدياتوميت يعتبر مادة طبيعية وبيئية وفيرة للغاية في الجزائر ، إذ يتميز بالتوصيل الحراري المنخفض والمسامية العالية.

الهدف من أطروحتنا هذه هو دراسة إمكانية استخدام مادة جديدة لها خاصية التحكم في الرطوبة ، وقابلة لتغيير الحالة الفيزيائية، مكونة من مادة دياتوميت ومواد تغيير الطور وهذا لاستبدال البوليسترين الموسع في العزل الحراري للبنىات. تم تطوير نموذج رياضي ثنائي الأبعاد يعبر عن النقل المقترن للحرارة والرطوبة ، تم التحقق من صحته من خلال مقارنته مع دراسات مرجعية سابقة ، وتم حله رقميًا باستخدام برنامج المحاكات الرقمية COMSOL Multiphysics. تمت دراسة ومقارنة تأثير البوليسترين الموسع ، والدياتوميت، والمادة المكونة من الدياتوميت والمواد القابلة للتغير في الحالة الفيزيائية على مستوى الراحة الداخلية لمبنى ذو جدران متعددة الطبقات. كما تم الأخذ بعين الاعتبار نسب ملء مختلفة من المادة المتحكم في الحرارة والرطوبة، وتموقعها في أجواف الطوب الجزائري وهذا للحصول على أفضل أداء حراري ورطوبي.

أظهرت نتائج الدراسة أن تقلبات الحرارة ونسب الرطوبة المتحصل عليها من المادة المستعملة كانت أقل بكثير مقارنة من استخدام البوليسترين الموسع، كما تبين أن التموضع الأفضل للمادة المستعملة هو الأجوفة الداخلية بنسبة 66 % .أضف إلى ذلك أن إمكانية استخدام هذا الأخير كطبقة عازلة داخل المبنى ، مع الأخذ بعين الاعتبار بيانات الأرصاد الجوية لمختلف المدن من أنحاء العالم قد تم التحقق منه رقميًا. لقد اتضح أن المادة الجديدة لديها القدرة على توفير ما يصل إلى 50 % من الطاقة مقارنة مع البولسترين ، ويمكن أن يكون حلاً من بين الحلول لاستبدال البوليسترين في العزل الحراري للأبنية.

## كلمات مفتاحية

وسط مسامي، انتقال الحرارة والرطوبة المقترن، دياتوميت، المادة المتحكم في الرطوبة والحرارة، الطوب المجوف، COMSOL multiphysics.

## **Abstract**

The integration of innovative passive materials into building envelopes is a relevant way of reducing energy consumption and ensuring a high indoor comfort level. Expanded polystyrene (EPS) is one of the most used materials in the construction of residential and commercial Algerian building. While the latter contains hexabromocyclododecane (HBCD), which it is considered now as persistent organic pollutant (POP). On the other hand, diatomite is a natural, ecological and very abundant material in Algeria, characterized by low thermal conductivity and high porosity.

The aim of our thesis is to study the possibility of using a new phase change humidity control material (PCHCM) based on diatomite material and phase change materials (PCM) as a replacement for the expanded polystyrene (EPS) in hygrothermal insulation of the building construction. A two-dimensional coupled heat and moisture transfer model was developed, validated using benchmark tests of the literature, and solved numerically using COMSOL Multiphysics software. The effect of EPS, diatomite, and PCHCM on the comfort level of the indoor environment of the multi-layer building wall has been studied and compared. Different filling ratios of PCHCM and its locations are considered to reach the best hygrothermal performance.

The inner temperature and relative humidity fluctuations obtained from the study are significantly reduced in comparison with EPS. In addition, the optimal location of PCHCM is given when it is filled with 66% in the internal side of the hollow brick, and the possibility of using this one as an insulating layer inside the envelope taking into consideration the different meteorological data of some cities around the world has been numerically verified. PCHCM composite was found to have the potential to save energy reaching 50% compared to EPS, and could be one of the solutions to replace EPS in thermal insulation of buildings.

**Keywords:** Porous media; Coupled heat and moisture transfer; diatomite; PCHCM; Sintered hollow brick; COMSOL multiphasics.

## Résumé

L'intégration des matériaux passifs innovants dans les enveloppes de bâtiment est un moyen pertinent de réduire la consommation d'énergie et d'assurer un niveau élevé de confort intérieur de l'habitat. Le polystyrène expansé (PSE) est l'un des matériaux le plus utilisé dans le secteur des constructions résidentielles et commerciales en Algérie. Tandis que ce dernier contient le hexabromocyclododecane (HBCD), qu'est considéré comme un matériau persistant organique polluant (POP). En revanche, la Diatomite est une matière naturelle, écologique, et très abondante en Algérie, se caractérise par une faible conductivité thermique et une porosité élevée.

Le but de notre thèse est d'étudier la possibilité d'utiliser un nouveau matériau de contrôle de l'humidité à changement de phase (MCHCP) à base de la diatomite et les matériaux à changement de phase (MCP) en remplacement du polystyrène expansé (PSE) dans l'isolation hygrothermique de la construction. Un modèle bidimensionnel de transfert couplé de chaleur et d'humidité a été développé, validé par le biais de tests benchmark de la littérature, et résolu numériquement à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. L'effet de l'PSE, de la diatomite, et du MCHCP sur le niveau de confort de l'environnement intérieur du bâtiment à paroi multicouches a été étudié et comparé. Différents taux de remplissage du MCHCP et de ses emplacements dans les briques creuses locales sont considérés pour atteindre la meilleure performance hygrothermique.

Les fluctuations de température interne et d'humidité relative obtenues à partir de l'étude sont considérablement réduites par rapport à l'PSE. De plus, l'emplacement optimal du MCHCP dans la brique creuse est atteint lorsqu'il est rempli à 66% du côté interne. La possibilité d'utiliser ce dernier comme plaque isolante à l'intérieur de l'enveloppe prenant en considération les différentes données météorologiques de certaines villes du monde entier a été vérifiée numériquement. Il a été constaté que le MCHCP avait le potentiel d'économiser jusqu'à 50% d'énergie par rapport au PSE, et pourrait constituer l'une des solutions permettant de remplacer le PSE dans l'isolation thermique du bâtiment.

**Mots clefs :** Milieu poreux ; Transfert couplé de chaleur et d'humidité; diatomite; MCHCP ; Brique creuse ; COMSOL Multiphysics.

# Table des matières

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| Remerciements .....         | I    |
| Résumé .....                | V    |
| Table de matières .....     | VI   |
| Listes des figures .....    | X    |
| Listes des tableaux .....   | XIII |
| Nomenclature .....          | XIV  |
| Introduction générale ..... | 1    |

## CHAPITRE I : Transfert hygrothermique dans les matériaux de construction

|   |    |
|---|----|
| Sommaire Chapitre I .....   | 9  |
| Liste des figures Chapitre I .....  | 10 |
| Liste des tableaux Chapitre I.....  | 11 |
| I.1 Introduction .....  | 12 |
| I.2 La consommation énergétique et l'enveloppe du bâtiment .....                  | 13 |
| I.3 Conséquences de l'humidité dans le bâtiment .....                             | 15 |
| I.4 Notion du confort hygrothermique des habitants.....                           | 17 |
| I.5 Problèmes de santé liés à l'humidité .....                                    | 18 |
| I.6 Transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction.....    | 20 |
| I.6.1 Rétention d'humidité .....  | 20 |
| I.6.1.1 Contexte physique.....  | 20 |
| I.6.1.2 Isothermes de sorption .....  | 26 |
| I.6.2 Mécanismes de transport d'humidité.....                                     | 29 |
| I.6.2.1 Transport de vapeur d'eau .....   | 32 |
| I.6.2.2 Transport d'eau liquide .....   | 35 |
| I.6.2.3 Transport de l'humidité totale.....                                       | 37 |
| I.6.2.4 Transport d'humidité dynamique .....                                      | 39 |
| I.6.3 Accumulation de chaleur et transport dans les matériaux poreux humides..... | 40 |
| I.6.3.1 Accumulation de chaleur .....   | 40 |
| I.6.3.2 Conduction thermique.....   | 41 |
| I.6.3.3 Flux de chaleur avec changement de phase .....                            | 42 |

|  |    |
|--|----|
| I.6.4 Principaux modèles physiques du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction ..... | 43 |
| I.6.4.1 Modélisation par homogénéisation .....   | 43 |
| I.6.4.2 Modélisation phénoménologique.....   | 45 |
| I.6.5 Transfert de chaleur et d'humidité aux interfaces dans les bâtiments.....  | 49 |
| I.6.5.1 Interaction entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement .....   | 49 |
| I.6.5.2 Interaction entre deux couches de la paroi.....  | 53 |
| I.7 Conclusion .....   | 55 |
| I.8 Références.....  | 56 |

## **CHAPITRE II : Les matériaux hygroscopiques à changement de phase dans les bâtiments**

|  |    |
|--|----|
| Sommaire Chapitre II.....  | 61 |
| Liste des figures Chapitre II.....   | 62 |
| Liste des tableaux Chapitre II.....  | 63 |
| II.1 Introduction .....  | 64 |
| II.2 Stockage thermique par chaleur latent dans la construction du bâtiment.....                 | 64 |
| II.2.1 Application des MCP à la gestion thermique du bâtiment .....                              | 64 |
| II.2.2 Utilisation des MCP pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure du bâtiment .....  | 67 |
| II.3 Les matériaux de contrôle d'humidité (matériaux hygroscopiques) .....                       | 71 |
| II.4 Les matériaux hygroscopiques à changement de phase (MHCP) .....                             | 73 |
| II.4.1 Les Différentes méthodes d'incorporation des MCP dans les matériaux de construction ..... | 75 |
| II.4.1.1 Techniques de micro-encapsulation .....   | 75 |
| II.4.1.2 Matériaux à changement de phase à forme stabilisée (MCPFS) .....                        | 77 |
| II.4.1.3 Inclusion poreuse.....  | 81 |
| II.4.1.4 Macro-encapsulation .....   | 83 |
| II.4.2 Application du composite (Diatomite /MCP) comme matériau de construction .....            | 86 |
| II.4.2.1 Définition de la Diatomite .....  | 87 |
| II.4.2.2 Caractéristiques physiques et chimiques de la diatomite .....                           | 87 |
| II.4.2.3 Application du composite (Diatomite /MCP) dans le bâtiment .....                        | 89 |
| II.5 Conclusion .....  | 91 |
| II.6 Références .....  | 93 |

## **CHAPITRE III : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique**

|   |     |
|---|-----|
| Sommaire Chapitre III.....  | 100 |
| Liste des figures Chapitre III.....   | 101 |
| Liste des tableaux Chapitre III .....   | 102 |
| III.1 Introduction .....  | 103 |
| III.2 Description du problème physique .....  | 103 |
| III.3 Modélisation mathématique .....   | 106 |
| III.3.1 Hypothèses du modèle .....  | 108 |
| III.3.2 Les équations gouvernantes de transfert couplé de chaleur et d'humidité ..... | 109 |
| III.3.2.1 Transfert d'humidité .....  | 110 |
| III.3.2.2 Transfert de chaleur.....   | 111 |
| III.3.2.3 La méthode de capacité thermique effective .....                            | 112 |
| III.3.2.4 Condition en limites .....  | 113 |
| III.4 Solution numérique .....  | 114 |
| III.4.1 COMSOL Multiphysics .....   | 114 |
| III.4.2 La méthode des éléments finis.....  | 115 |
| III.5 Conclusion.....   | 117 |
| III.6 Références .....  | 118 |



## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1: La construction résidentielle dans le projet de logement social Algérienne. [2] .   | 13 |
| Figure I.2 : Répartition énergétique finale par secteur d'activité. [2] .....   | 14 |
| Figure I.3: Structure de la consommation finale d'énergie par produits. [4] .....   | 14 |
| Figure I.4: Exemples de problèmes causés par l'humidité. [5] .....  | 17 |
| Figure I.5: Les pertes thermiques du corps humaines .....   | 17 |
| Figure I.6: Schéma descriptive du stockage de l'humidité pour un matériau de construction actif par capillarité hygroscopique. [20].....  | 22 |
| Figure I.7: Courbe de sorption lors de l'absorption, la désorption, et balayage. [18].....  | 23 |
| Figure I.8: Vue schématique de la colonne d'eau (à gauche) et des conditions de pression (à droite) dans un capillaire cylindrique [22] .....   | 24 |
| Figure I.9: Microscopie électronique à balayage de béton cellulaire avec un grossissement de 22 fois (à gauche) et de 11 000 fois (à droite). [20] .....  | 25 |
| Figure I.10: Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en humidité dans les pores. [20] .....  | 30 |
| Figure I.11: Transport d'humidité sous forme de la diffusion de vapeur et succion de liquide .....  | 30 |
| Figure I.12 : Transport d'humidité à travers le réseau poreux avec diffusion de vapeur et succion de liquide. [17].....   | 31 |
| Figure I.13 : Schéma illustrant le transport d'humidité dans un mur de bâtiment poreux (Conditions hivernales) .....  | 32 |
| Figure I. 14 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore .....  | 33 |
| Figure I.15: Transport d'humidité dans un système de pores combinant la diffusion de vapeur et le transport de liquide. [27] .....  | 37 |
| Figure I.16 : Enthalpie liée au volume des différents états physiques de l'eau à pression normale en fonction de la température (l'enthalpie de référence est l'enthalpie de l'eau à 0 ° C). [22] .....                                       | 40 |
| Figure I.17 : Homogénéisation par prise de moyenne volumique .....  | 44 |
| Figure I.18 : Microstructure constituée de la répartition périodique de la cellule. [42].....   | 44 |
| Figure I.19 : les différentes sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment.  | 50 |
| Figure I.20 : Corrélation entre la proportion de pluie battante frappant la façade d'un mur d'essai de 4 m de hauteur et la pluie normale et la vitesse du vent perpendiculaire à la façade mesurée à la hauteur standard de 10 m. [57] ..... | 53 |
| Figure I.21 : Types de contact possibles entre deux matériaux [58].....   | 53 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure II.1: Les formes de MCP en construction. [5, 7, 8] .....  | 65  |
| Figure II.2 : Catégorisation de différentes méthodes d'incorporation de MCP dans les matériaux de construction. ....   | 75  |
| Figure II.3: Facteurs influents dans la fabrication de MCPFS. [38] .....   | 78  |
| Figure II.4: Coupe schématique de la configuration de parois et de sols macro-encapsulés en MCP. [38] .....  | 85  |
| Figure II.5: Site de dépôt de Sig (Algérie). [76] .....  | 87  |
| Figure II.6: MEB de diatomite brute (a) et calcinée (b). [75]. ....  | 88  |
| Figure II.7: Contenu d'adsorption et de désorption de diatomite brute et calcinée, [75] .....  | 88  |
| <br>   |     |
| Figure III.1: Vue axonométrique d'un mur typique en briques creuses frittées largement utilisé en Algérie. ....  | 104 |
| Figure III.2: Isothermes de sorption des matériaux constituant les cas étudiés selon [9, 12] .....   | 106 |
| Figure III.3: Profile de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents [2]. ....   | 107 |
| Figure III.4 : Profile d'équilibre de la teneur en eau d'un matériau typique. ....   | 108 |
| Figure III.5: Humidité dans les pores idéalisés [2]: (a) pores dans la région hygroscopique, (b) des pores dans la région capillaire et (c) des pores dans la partie supérieure de la région hygroscopique. .... | 109 |
| Figure III.6 : Définition du V.E.R, sur lequel sont moyennées les propriétés physiques. ....   | 109 |
| Figure III.7: Interface du logiciel COMSOL Multiphysics [15]. ....   | 115 |
| Figure III.8 : Positionnement des nœuds et géométrie pour le cas 2D .....  | 116 |
| <br>   |     |
| Figure.IV.1 : Elément triangulaire pour le maillage des différentes configurations utilisées dans la simulation. ....  | 124 |
| Figure.IV.2 : Test d'indépendance du maillage : variation de la température à la surface intérieur de l'unité de brique pour le cas sans MCP et avec MCP. ....   | 124 |
| Figure IV.3: Mur homogène, HAMSTAD benchmark cas n°02 .....  | 125 |
| Figure IV.4 : La redistribution de la teneur en eau dans une paroi homogène à 100h, 300h, et 1000h. ....   | 126 |
| Figure IV.5: Une structure murale multicouche à isolation intérieure active par capillarité. ....  | 126 |
| Figure IV.6: Résultats de simulation après 60 jours : (a) Profile de l'humidité relative [-] ;(b) Profile de la teneur en humidité [kg/m <sup>3</sup> ]. ....  | 127 |
| Figure IV.7: Coupe bidimensionnelle de la cellule de brique creuse frittée et de mortier remplie de différents matériaux hygroscopiques utilisés dans la simulation .....  | 127 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure IV.8: Variation temporelle de la température intérieure et de l'humidité relative en fonction des conditions extérieures (Temp_ext, Hum_R_ext) sous différents remplissage des matériaux hygroscopiques ..... | 128 |
| Figure IV.9 : Variation temporelle de la quantité d'eau évaporée dans la cavité d'air et la cavité en diatomite.....   | 129 |
| Figure IV.10: Variation temporelle du flux thermique à la surface interne sous différents matériaux hygroscopiques .....   | 129 |
| Figure IV.11: Schéma descriptif de la cellule de brique creuse entourée de mortier avec différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP, de l'extérieur à l'intérieur .....                                  | 130 |
| Figure IV.12: Variation temporelle de la température à la surface interne et de l'humidité relative sous différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP dans des briques creuses pendant 24 heures .....    | 132 |
| Figure IV.13: Une définition schématique du décalage temporel et du facteur de décrémentation pour la température .....  | 134 |
| Figure IV.14: Variation du facteur de décrémentation de la température intérieure et de l'humidité relative en fonction des différents taux de remplissage et emplacements du MCHCP.....                             | 135 |
| Figure IV.15: Variations du décalage temporel de la température interne et de l'humidité relative avec différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP.....  | 136 |
| Figure IV.16: Coupe bidimensionnelle de la cellule de brique creuse frittée entouré par le mortier avec une plaque isolante en MCHCP à la surface intérieur utilisés dans la simulation. ....                        | 137 |
| Figure IV.17: La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à Tlemcen .....  | 138 |
| Figure IV.18: La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à Adrar .....  | 139 |
| Figure IV.19: La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à La Rochelle.....   | 140 |

## Liste des tableaux

|   |     |
|---|-----|
| Tableau I.1 : Consommation finale par produit. [4] .....  | 15  |
| Tableau I.2 : Liste des principaux mécanismes de transport d'humidité existant dans la pratique, leurs causes et leurs potentiels de transport. [20] .....                                      | 29  |
| Tableau I.3 : Supplément d'humidité (en pourcentage) en termes de conductivité thermique de divers matériaux de construction, lié à la teneur en eau en pourcentage en masse. [31].....         | 42  |
| Tableau I.4 : les absorptivités à courtes grandeurs d'ondes et les valeurs de référence de la luminosité pour différentes surfaces de matériaux de construction. [22] .....                     | 51  |
|   |     |
| Tableau II.1 : Les MCP potentiels peuvent être utilisé dans la construction. [1] .....  | 67  |
| Tableau II.2 : Les MCP utilisés dans les bâtiments pour la gestion thermique en intérieur. [1] .....  | 70  |
| Tableau II.3 : Application de matériaux de contrôle d'humidité dans le bâtiment [1] .....   | 73  |
| Tableau II.4 : Diverses microcapsules de MCP commerciales utilisées. [38] .....   | 76  |
| Tableau II.5 : Différents matériaux de support utilisés pour la fabrication de MCPFS. [38] ..   | 77  |
| Tableau II.6 : Agrégats légers utilisés pour incorporer des MCP. [38] .....   | 82  |
| Tableau II.7 : Études expérimentales de macro-capsules de MCP utilisées dans les bâtiments. [38] .....  | 85  |
| Tableau II.8 : Compositions chimiques de la diatomite Algérienne brute et calciné, [77] ...   | 89  |
| Tableau II.9 : Analyse physique chimique de la diatomite naturelle Algérienne, [76] .....   | 89  |
| Tableau II.10 : Comparaison de la température de changement de phase et de la chaleur latente avec celles rapportées pour certains composites des MCP composite dans la littérature [77]. ..... | 91  |
|   |     |
| Tableau III.1 : Propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés. ....   | 105 |

# Nomenclature

| <b>Acronymes</b> |  |     |
|------------------|--|-----|
| PSE              | Polystyrène Expansé  |     |
| HBCD             | Hexabromocyclododecane   |     |
| POP              | Persistant Organique Polluant  |     |
| MCHCP            | Matériau de Contrôle d'Humidité à Changement de Phase                      |     |
| MCP              | Matériaux à Changement de Phase  |     |
| CVC              | Chauffage Ventilation, Climatisation                                       |     |
| MCH              | Matériaux de contrôle d'Humidité   |     |
| MMCP             | Microcapsules de Matériaux à Changement de Phase                           |     |
| PEG              | Polyéthylène Glycol  |     |
| APRUE            | Agence de la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie |     |
| PNEE             | Programme National de l'Efficacité Energétique                             |     |
| CDER             | Centre de Développement des Energies Renouvelables                         |     |
| Tep              | Tonne Equivalent Pétrole   |     |
| M-Tep            | Miga-Tonne Equivalent Pétrole  |     |
| GPL              | Gaz Pétrole Liquéfié   |     |
| ASHARE           | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers  |     |
| PMV              | Predicted Mean Vote  |     |
| PPD              | Predicted Percentage Dissatisfied  |     |
| NF ISO           | Norme Française, Organisation Internationale de Normalisation              |     |
| NF EN            | Norme Française, Norme Européenne  |     |
| HR               | Humidité Relative  | [-] |
| BET              | Brunauer, Emmett et Teller   |     |
| GAB              | Guggenheim-Anderson-de Boer  |     |
| MPSE             | Mousse de Polystyrène Expansé  |     |
| MPSX             | Mousse de Polystyrène Extrudé  |     |
| VER              | Volume Elémentaire Représentatif   |     |
| WUFI             | Wärme und Feuchte Instationär  |     |

|                         |   |      |
|-------------------------|---|------|
| IBP                     | Institut Bauphysik  |      |
| MCPSF                   | Matériaux à Changement de Phase à Forme Stabilisée  |      |
| MHCP                    | Matériaux Hygroscopiques à Changement de Phase  |      |
| SET                     | Stockage D'énergie Thermique  |      |
| LWA                     | Agrégats Légers Artificiels   |      |
| MS                      | Matériau de Support   |      |
| EG                      | Graphite Expansé  |      |
| xGnP                    | Nano-Plaquettes au Graphite Exfoliée  |      |
| CDB                     | Calorimétrie Différentielle à Balayage  |      |
| MEB                     | Microscope Electronique à Balayage  |      |
| PW                      | Mélange de Cire de Paraffine  |      |
| LP                      | Paraffine Liquide   |      |
| PDE                     | Equation à Dérivée Partielle  |      |
| MEF                     | Méthode des éléments finis  |      |
| ATG                     | Analyse Thermogravimétrique   |      |
| SITF                    | Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier   |      |
| HAM                     | Heat, Air and Moisture (chaleur, air et humidité)   |      |
| HAMSTAD                 | Heat, Air and Moisture Standards Development<br>(Élaboration de normes sur la chaleur, l'air et l'humidité) |      |
| T_ext,                  | Température de l'air extérieur  | [°C] |
| HR_ext                  | Humidité relative de l'air extérieur  | [-]  |
| T_int,                  | Température de l'air intérieur  | [°C] |
| HR_int                  | Humidité relative de l'air intérieur  | [-]  |
| RFCHT                   | Réduction du Flux de Chaleur Total  |      |
| <b>Unités physiques</b> |   |      |
| J                       | Joule   |      |
| kJ                      | Kilo Joule  |      |
| °C                      | Degré   |      |
| kg                      | Kilo gramme   |      |
| %                       | Pourcentage   |      |
| L                       | Litre   |      |
| s                       | Second  |      |
| Pa                      | Pascal  |      |
| K                       | Kelvin  |      |

|  |  |                                    |
|--|--|------------------------------------|
| mol  | Mole   |                                    |
| m  | Mètres   |                                    |
| W  | Watt   |                                    |
| <b>Lettres grecques</b>                    |  |                                    |
| $\varphi$                                  | Humidité relative  | [-]                                |
| $\gamma$                                   | La tension superficielle d'eau                                     | [N/m]                              |
| $\theta$                                   | Angle de contact   | [°]                                |
| $\rho$                                     | Densité  | [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| $\partial$                                 | Portion de surface   |                                    |
| $\tau$                                     | Taux d'adsorption d'eau (constant)                                 |                                    |
| $\mu$                                      | Facteur de résistance de la vapeur d'eau                           | [-]                                |
| $\delta_v$                                 | Coefficient de la diffusion de la vapeur d'eau en matériaux poreux | [m <sup>2</sup> /s].               |
| $\delta_p$                                 | Perméabilité de vapeur d'eau                                       | [kg/(Pa m s)]                      |
| $\eta$                                     | Viscosité  | [kg/m s]                           |
| $\lambda$                                  | Conductivité thermique   | [W/(m K)]                          |
| $\lambda_0$                                | Conductivité thermique du matériau de construction sec             | [W/(m K)]                          |
| $\epsilon$                                 | Rapport  | [-]                                |
| $\delta_s$                                 | Coefficient de thermo-diffusion                                    | [-]                                |
| $\lambda_h$                                | Conductivité hydraulique du matériau                               | [kg/(m . s. Pa) ]                  |
| $\sigma$                                   | Constante de Boltzmann   | [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ] |
| $\varepsilon$                              | Emissivité du matériau   | [-]                                |
| $\frac{\partial \omega}{\partial \varphi}$ | Pente de la courbe d'isotherme d'adsorption                        | [-]                                |
| $\omega$                                   | Teneur en humidité   | [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| $\omega_{sat}$                             | Teneur en humidité à la saturation                                 | [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| $\omega_{cr}$                              | Teneur en humidité critique  | [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| $\delta$                                   | Coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air                | [kg/(m . s. Pa)]                   |
| $\xi$                                      | Capacité de stockage d'humidité                                    | [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| $\rho_s$                                   | Densité apparente du matériau de construction sec                  | [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| $\theta_d$                                 | Fraction volumique de la diatomite                                 | [-]                                |
| $\rho_l$                                   | Masse volumique de l'eau pure                                      | [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| $\kappa$                                   | Coefficient d'absorption solaire                                   | [-]                                |
| $\Psi_i$                                   | Fonctions de base  |                                    |

| <b>Lettres Latines</b> |  |                |
|------------------------|--|----------------|
| $HR$                   | Humidité relative  | $[-]$          |
| $t$                    | Temps  | $[s]$          |
| $P_v$                  | Pression de vapeur   | $[Pa]$         |
| $P_{v,sat}$            | Pression de vapeur saturante                                 | $[Pa]$         |
| $T$                    | Température absolue  | $[K]$          |
| $u$                    | Teneur en humidité massique                                  | $[kg/kg]$      |
| $m$                    | Masse de l'échantillon humide                                | $[kg]$         |
| $m_0$                  | Masse de l'échantillon sec                                   | $[kg]$         |
| $V$                    | Volume de l'échantillon                                      | $[m^3]$        |
| $u_{cap}$              | Teneur en humidité massique à la saturation capillaire       | $[kg/kg]$      |
| $P_c$                  | Pression capillaire  | $[Pa]$         |
| $P$                    | Pression   | $[Pa]$         |
| $r$                    | Rayon capillaire   | $[m]$          |
| $R$                    | Constant du gaz parfait                                      | $[J/(K.mol)]$  |
| $M_\omega$             | Masse molaire de l'eau                                       | $[kg/mol]$     |
| $N_{ads}$              | Nombre des molécules supplémentaires adsorbées               | $[-]$          |
| $N_{des}$              | Nombre des molécules déjà adsorbées                          | $[-]$          |
| $N_m$                  | Nombre de molécules en une couche complète                   | $[-]$          |
| $p_1$                  | Probabilité d'une molécule liée qui frappe la surface        | $[-]$          |
| $p_2$                  | Probabilité d'une molécule adsorbée                          | $[-]$          |
| $q_{ad}$               | Quantité d'eau adsorbée                                      | $[kg/m^3]$     |
| $c$                    | Constant   | $[-]$          |
| $A$                    | Constant   | $[-]$          |
| $Q_{cd}$               | Chaleur condensée  | $[kJ]$         |
| $Q_{ad}$               | Chaleur adsorbée de la première couche                       | $[kJ]$         |
| $F$                    | Facteur de correction  | $[-]$          |
| $Q_T$                  | Chaleur adsorbant totale                                     | $[kJ]$         |
| $g_a$                  | Densité du vapeur transporté                                 | $[kg/(m^2 s)]$ |
| $D_a$                  | Coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air stagnant | $[m^2/s]$ .    |
| $v$                    | Teneur en humidité volumique                                 | $[m^3/m^3]$    |
| $P_0$                  | Pression atmosphérique standard                              | $[Pa]$         |
| $R_v$                  | Constant des gaz du vapeur d'eau                             | $[J/(kg K)]$   |

|            |  |                         |
|------------|--|-------------------------|
| $g_{T,v}$  | Densité de vapeur non isotherme                            | [ $kg/(m^2 s)$ ]        |
| $D_{T,v}$  | Coefficient de diffusion de vapeur non isotherme           | [ $kg/(K m s)$ ]        |
| $g_v$      | Densité de flux de la vapeur d'eau                         | [ $kg/(m^2 s)$ ]        |
| $g_l$      | Densité de flux de l'eau liquide                           | [ $kg/(m^2 s)$ ]        |
| $k_p$      | Perméabilité   | [ $m^2$ ]               |
| $g_{s-l}$  | Densité de flux de diffusion en surface.                   | [ $kg/(m^2 s)$ ]        |
| $D_{s,l}$  | Coefficient de diffusion surfacique                        | [ $m^2/s$ ]             |
| $D_\phi$   | Coefficient de conduction liquide                          | [ $kg/m s$ ]            |
| $g_{T,l}$  | Densité de flux d'humidité thermique                       | [ $kg/(m^2 s)$ ]        |
| $D_{T,l}$  | coefficient du transport du liquide non-isotherme          | [ $kg/K m s$ ]          |
| $D_T$      | Diffusivité thermique                                      | [ $kg/K m s$ ]          |
| $D_\omega$ | Diffusivité d'humidité                                     | [ $m^2/s$ ]             |
| $g$        | Densité de flux d'humidité totale                          | [ $kg/(m^2 s)$ ]        |
| $S$        | Terme source d'humidité                                    | [-]                     |
| $H_s$      | Enthalpie d'un matériau de construction sec                | [J]                     |
| $C_p$      | Chaleur spécifique   | [ $J/(kg K)$ ]          |
| $S_h$      | Source de chaleur due à la condensation ou à l'évaporation | [ $J/(s m^3)$ ]         |
| $h_{l,v}$  | Chaleur latente du changement de phase                     | [ $J/kg$ ]              |
| $D_m$      | Coefficient de diffusion total                             | [ $m^2/s$ ]             |
| $L_v$      | Chaleur latente de vaporisation                            | [ $J/kg$ ]              |
| $H$        | Enthalpie totale du matériau                               | [J]                     |
| $S_e$      | Rayonnement à la surface extérieur de la paroi             | [ $W/m^2$ ]             |
| $S_{dir}$  | Rayonnement direct   | [ $W/m^2$ ]             |
| $S_{dif}$  | Rayonnement diffus   | [ $W/m^2$ ]             |
| $\dot{m}$  | Taux de changement de phase                                | [-]                     |
| $S_i$      | Rayonnement à la surface intérieur de la paroi             | [ $W/m^2$ ]             |
| $Q_{conv}$ | Flux convectif thermique                                   | [ $J/(m^2 s)$ ]         |
| $h_c$      | Coefficient de convection de chaleur                       | [ $W/(m^2 K)$ ]         |
| $H_{conv}$ | Flux convectif massique                                    | [ $kg/(m^2 s)$ ]        |
| $h_m$      | Coefficient d'échange massique                             | [ $kg/(m^2 . s . Pa)$ ] |
| $a_p$      | Coefficient d'absorptivité aux précipitations.             | [-]                     |
| $r_s$      | Coefficient de pluie battante par le site spécifique       | [ $s/m$ ]               |
| $v$        | Vitesse de vent  | [ $m/s$ ]               |

|                |              |                |
|----------------|--------------|----------------|
| $S_\omega$     | Terme source | $[kg/(m^3 s)]$ |
| $S_T$          | Terme source | $[W/m^3]$      |
| $u_i$          | Fonctions    |                |
| <b>Indices</b> |              |                |
| $T$            | Température  |                |
| $m$            | Massique     |                |
| $conv$         | Convectif    |                |
| $s$            | sec          |                |
| $i$            | Intérieur    |                |
| $dif$          | Diffusif     |                |
| $dir$          | Direct       |                |
| $e$            | Extérieur    |                |
| $l$            | Liquide      |                |
| $v$            | Vapeur       |                |
| $a$            | Air          |                |
| $ad$           | Adsorbé      |                |
| $cd$           | Condensé     |                |
| $c$            | Capillaire   |                |
| $sat$          | Saturation   |                |
| $d$            | Diatomite    |                |
| $eff$          | Effective    |                |
| $cr$           | Critique     |                |
| $occ$          | Occupé       |                |
| $des$          | Désorbé      |                |
| $surf$         | Surface      |                |

---

# Introduction générale

---

## Introduction générale

La demande en énergie et les problèmes de protection de l'environnement sont deux défis majeurs pour l'humanité et ont toujours préoccupé les chercheurs du monde entier [1, 2]. La consommation d'énergie dans les sociétés humaines augmente rapidement avec l'augmentation rapide du niveau de vie au cours des deux dernières décennies [3-5]. L'énergie provenant des combustibles fossiles est la plus utilisée dans les pays en développement et sa combustion augmente les émissions de gaz à effet de serre, ce qui entraîne des changements climatiques et une pollution de l'environnement [6, 7]. Par conséquent, il est maintenant crucial d'améliorer l'efficacité énergétique en réduisant la consommation d'énergie fossile et en luttant contre le changement climatique.

Dans ce contexte, le secteur de la construction représente environ 45% de la consommation énergétique mondiale totale, et génère 36,1 milliards de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> [8]. La consommation d'énergie dans le bâtiment provient principalement des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) [4, 7, 8]. De nombreuses méthodes ont été introduites pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments, en améliorant l'efficacité des systèmes CVC et en utilisant des matériaux passifs innovants pour contrôler la température et l'humidité intérieures, garantissant ainsi un bon niveau de confort de l'espace intérieur [6, 7, 9].

La température et l'humidité relative de l'air sont des paramètres très importants parmi les paramètres environnementaux ayant une incidence sur la qualité de l'espace intérieur. La fluctuation de la température ambiante due aux alternances jour / nuit et hiver / été conduit à un inconfort thermique dans le cadre de vie [3, 7]. Certains travaux étudient le stockage thermique dans des matériaux tels que les matériaux à changement de phase (MCP) afin de contribuer à la stabilisation de la température intérieure [10]. Les MCP peuvent absorber et libérer une grande quantité d'énergie en modifiant leur phase du solide au liquide, et du liquide à la phase solide à une température constante pendant le processus de changement de phase, respectivement [11, 12]. L'intégration des MCP dans les bâtiments par encapsulation dans des matériaux structurels a été proposée comme meilleure solution pour augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments, améliorer le confort des occupants et réduire la consommation d'énergie [13-15].

L'humidité est également fluctuante, elle est liée aux problèmes de santé humaine et au cadre de vie [16,17]. Un changement excessif d'humidité relative peut affecter la durabilité de la

construction, le stockage des biens et la consommation d'énergie [18,19]. Des études montrent que le maintien d'un taux d'humidité relative à l'intérieur de 30% à 60% est le milieu de vie le plus confortable [20]. Les matériaux de contrôle de l'humidité (MCH) sont des matériaux à structures poreuses, capables d'absorber ou de libérer automatiquement l'humidité, sans source d'alimentation ni équipement mécanique, en raison de leur sensibilité aux variations d'humidité relative et de la température ambiante [18, 20-22]. La recherche sur l'utilisation des MCH a débuté à l'Institut japonais [23], où divers MCH ont été développés, notamment les MCH biomasse [24,25], les MCH inorganiques [18,26] et les MCH organiques [27,28]. Par conséquent, l'utilisation d'un MCH est d'une grande importance pour le développement durable d'un environnement écologique, car il peut ajuster l'humidité intérieure et réduire la demande en énergie [20, 21].

Récemment, plusieurs approches ont été étudiées pour optimiser les performances hygrothermiques de l'enveloppe du bâtiment par le développement des matériaux passives, susceptibles de fournir un pouvoir tampon thermique et humide à l'intérieur de l'enveloppe [29,30]. Certains chercheurs ont tenté de préparer un nouveau matériau hygroscopique endothermique en synthétisant des Microcapsules de MCP (MMCP) et du MCH poreux. Ce dernier a la capacité de contrôler simultanément la température et l'humidité de l'environnement intérieur [4].

Yuan et al. [31] ont proposé le polyéthylène glycol (PEG2000) (polymère organique) avec différentes teneurs en eau en tant que matériau hygroscopique endothermique. Karaman et al. [32], ont utilisé le composite PEG / Diatomite en tant que nouveau MCP de forme stable. Le PEG pourrait être retenu à 50% en masse dans les pores des matrices de diatomite sans fuite du PEG fondu du composite. JL. Shang [33], ont préparé des composites  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ /sepiolite, paraffin/sepiolite, et dodecanol/sepiolite en injectant le MCP dans le sepiolite poreuse. M. Qin et al. [6] ont préparé plusieurs matériaux de contrôle d'humidité à changement de phase (MCHCP) en utilisant des microcapsules en MCP avec  $SiO_2$  comme coque et la vésuvianite, la sépiolite et la zéolite comme matériau hygroscopique. Les résultats indiquent que la composite coque en MCP / vésuvianite présente une meilleure performance hygrothermique que les deux autres MCHCP. Wu et al. [4], ont préparé un composite MMCP/diatomite avec un taux de 12.9% du MCP encapsulé. Chen et al. [3], ont préparé un composite MCHCP avec différents taux massique des MCP encapsulé, utilisant le  $SiO_2$  comme coque et la diatomite comme matériau hygroscopique. Les résultats montrent que la coque  $SiO_2$  peut réduire le degré de super refroidissement des masses fondues de MCP, et

prévenir les fuites de celles-ci. Il n'a pas affecté les propriétés hygroscopiques de la diatomite. Le composite MMCP / diatomite est efficace pour le stockage thermique et le contrôle de l'humidité. Il peut être utilisé comme des plaques isolantes à l'intérieur des bâtiments [3,4].

Dans cette perspective, le présent travail doctoral a pour but d'aborder la question de la substitution du polystyrène expansé (PSE) par la diatomite et de la diatomite optimisée (composite MMCP / diatomite) afin de réduire la consommation énergétique du bâtiment. La diatomite est une roche blanche très poreuse, légère, chimiquement stable et inerte [34]. Il a été largement appliqué de nombreuses manières, telles que la filtration et la purification de l'eau, l'isolation thermique en raison de sa faible conductivité thermique, la fabrication d'antibiotiques, certains sirops pharmaceutiques, et il est qualifié comme matériau écologique respectueux de l'environnement [35, 36]. Par contre, le PSE est un matériau chimique contenant un contaminant appelé hexabromocyclododécane (HBCD). Le HBCD est utilisé comme retardateur de flamme bromé dans le PSE. Sa toxicité et ses effets nocifs sur l'environnement sont actuellement discuté dans la Convention de Stockholm ; et il est-ajouté à la liste des polluants organiques persistants (POP) figurant à l'annexe A du Convention [37]. Pour répondre à cette problématique, le présent manuscrit est organisé autour de quatre chapitres.

Le chapitre I présente un état de l'art sur les enjeux environnementaux liés à la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment, les principaux désordres causés par l'humidité dans le bâtiment. Les mécanismes mis en jeu lors des transferts d'humidité dans les milieux poreux, et les différentes théories de références du transfert de chaleur et d'humidité sont aussi introduites dans ce chapitre. L'interaction entre les enveloppes du bâtiment et l'environnement est également abordée.

Le chapitre II constitue une revue critique de la littérature sur l'application des matériaux à changement de phase (MCP), et les matériaux hygroscopiques de contrôle d'humidité (MCH) respectueux de l'environnement pour la gestion thermique, et le contrôle de l'humidité dans le secteur de bâtiment. Par ailleurs, un état de l'art est élaboré relatif aux connaissances actuelles d'un matériau naturelle écologique appelé "diatomite", caractérisé par une forte hygroscopicité et faible conductivité thermique comme isolant hygrothermique dans le secteur du bâtiment.

Le chapitre III aborde la description détaillée du problème physique, mettant en relief la formulation mathématique du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction poreux.

Le quatrième chapitre (IV), est consacré à l'analyse des résultats des différentes simulations numériques dédiées à l'effet des PSE, de la diatomite et du composite MCHCP sur la performance hygrothermique d'une brique creuse frittée en argile cuite, généralement utilisée dans la construction de bâtiments Algériens. Pour ce faire, trois cas d'études ont été considérés. Le premier est consacré à l'analyse de l'impact du remplissage de diatomite, l'PSE et l'MCHCP sur la performance hygrothermique du mur en briques creuses considéré. Afin d'obtenir des performances optimales, différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP sont comparés et analysés. Le troisième cas est consacré à étudier la possibilité d'utiliser le MCHCP comme plaques isolantes à l'intérieur de l'habitat prenant en considération les différentes données météorologiques.

Enfin, une conclusion générale expose le bilan du travail réalisé dans le cadre de cette thèse, incluant des recommandations et des perspectives à prendre en considération dans les prochains travaux.

**Références**

- [1] J. Li, X. Meng, Y. Gao, W. Mao, T. Luo, L. Zhang, Effect of the insulation materials filling on the thermal performance of sintered hollow bricks. *Case studies in Thermal Engineering*. 11 (2018) 62–70.
- [2] A. Bouchair, Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation, *Building and Environment*. 43 (2008) 1603–1618.
- [3] Z. Chen, D. Su, M. Qin, G. Fang, Preparation and characteristics of composite phase change material (CMCP) with SiO<sub>2</sub> and diatomite as endothermal-hygroscopic material, *Energy and Building*. 86 (2015) 1–6.
- [4] Z. Wu, M. Qin, Z. Chen, Phase change humidity control material and its application in buildings, *Procedia Engineering*. 205 (2017) 1011–1018.
- [5] NP. Sharifi, G.E. Freeman, A.R. Sakulich, Using COMSOL modeling to investigate the efficiency of MCPs at modifying temperature changes in cementitious materials – case study, *Construction and Building Materials*. 101 (2015) 965–974.
- [6] M. Qin, Z. Chen, Synthesis and characteristics of composite phase change humidity control materials, *Energy Procedia*. 139 (2017) 493–498.
- [7] Z. Chen, M. Qin, Synthesis and characterization of composite phase change material (CMCP) with SiO<sub>2</sub> and diatomite as endothermal-hygroscopic material, *Energy Procedia* 78 (2015) 201–206.
- [8] MY. Ferroukhi, R. Djedjig, K. Limam, R. Belarbi, Hygrothermal behavior modeling of the hygroscopic envelopes of buildings: a dynamic co-simulation approach, *Building Simulation*. 9 (5) (2016) 501–512.
- [9] JF. Nicol, MA. Humphreys, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy and Building*. 34 (2002) 563–572.
- [10] SN. Al-Saadi, ZJ. Zhai, Modeling phase change materials embedded in building enclosure: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 21 (2013) 659–673.
- [11] A. Jamekhorshid, SM. Sadrameli, M. Farid, A review of microencapsulation methods of phase change materials (MCPs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31 (2014) 531–542.
- [12] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009) 318–345.
- [13] A. Pasupathy, R. Velraj, RV. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12 (2008) 39–64.
- [14] SD. Zwanzig, Y. Lian, EG. Brehob, Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope, *Energy Conversion and Management*. 69 (2013) 27–40.
- [15] K.O. Lee, M.A. Medina, E. Raith, X. Sun, Assessing the integration of a thin phase change material (MCP) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management, *Applied Energy*. 137 (2015) 699–706.

- [16] H. Xie, G. Gong, Y. Wu, Y. Liu, Y. Wang, Research on the hygroscopicity of a composite hygroscopic material and its influence on indoor thermal and humidity environment, *Applied Science* . 430 (8) (2018).
- [17] M. Qin, A. Aït-Mokhtar, R. Belarbi, Two-dimensional hygrothermal transfer in porous building materials, *Applied Thermal Engineering*. 30 (16) (2010) 2555–2562.
- [18] D.H. Vu, K.S. Wang, B.H. Bac, B.X. Nam, Humidity control materials prepared from diatomite and volcanic ash, *Construction and Building Materials*. 38 (2013) 1066–1072.
- [19] A. Trabelsi, R. Belarbi, P. Turcry, A. Aït-Mokhtar, Water vapour desorption variability of in situ concrete and effects on drying simulations, *Magazine of Concrete Research*. 63 (5) (2011) 333–342.
- [20] B. Zhou, Z. Chen, Experimental study on the hygrothermal performance of zeolite-based humidity control building materials, *International Journal of Heat and Technology*. 34 (3) (2016) 407–414.
- [21] J. Zheng, J. Shi, Q. Ma, X. Dai, Z. Chen, Experimental study on humidity control performance of diatomite-based building materials, *Applied Thermal Engineering*. 114 (2017) 450–456.
- [22] A. Bouguerra, O. Amiri, A. Aït-Mokhtar, M.B. Diop, Water sorptivity and pore structure of wood-cementitious composites, *Magazine of Concrete Research*. 54 (2) (2002) 103–112.
- [23] M. Tanaka, Saito, *The Variance of Humidity in Room According to Wall Materials*, 3rd version, Shukosha Printing Co., Ltd., Fukuoka, 1949, pp. 21–25 Research Report of Architectural Institute of Japan.
- [24] T. Horikawa, Y. Kitakaze, T. Sekida, J.I. Hayashi, M. Katoh, Characteristics and humidity control capacity of activated carbon from bamboo, *Bioresource Technology*. 101 (11) (2010) 3964–3969.
- [25] T. Hasegawa, S. Iwasaki, Y. Shibutani, I. Abe, Preparation of superior humidity-control materials from kenaf, *Journal of Porous Material*. 16 (2) (2009) 129–134.
- [26] JJDC. Díaz, FPA. Rabanal, PJG. Nieto, JD. Hernandez, BR. Soria, JM. Pérez-Bella, Hygrothermal properties of lightweight concrete: experiments and numerical fitting study, *Construction and Building Materials*. 40 (2013) 543–555.
- [27] R.M. Wang, J.F. Wang, X.W. Wang, Y.F. He, Y.F. Zhu, M.L. Jiang, Preparation of acrylate-based copolymer emulsion and its humidity controlling mechanism in interior wall coatings, *Progress in Organic Coatings*. 71 (4) (2011) 369–375.
- [28] F. Liu, B. Jia, B. Chen, Influence of hygroscopic material on indoors environment, *Procedia Eng*. 205 (2017) 3662–3669
- [29] L. Navarro, A. de Gracia, S. Colclough, M. Browne, S.J. Mc-Cormack, P. Griffiths, L.F. Cabeza, Thermal energy storage in building integrated thermal systems: a review. Part 1. Active storage systems, *Renewable Energy*. 88 (2016) 526–547.
- [30] F. Bruno, M. Liu, N.H.Z. Tay, Using solid-liquid phase change materials (MCPs) in thermal energy storage systems, *Advances in Thermal Energy Storage Systems (Methods and Applications)*, Woodhead Publishing Series in Energy, 2015, pp. 201–246.

- [31] Y. Yuan, H. Zhang, N. Zhang, Q. Sun, X. Cao, Effect of water content on the phase transition temperature, latent heat and water uptake of PEG polymers acting as endothermal hygroscopic materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 126 (2) (2016) 699–708.
- [32] S. Karaman, A. Karaipekli, A. Sari, A. Biçer, Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95 (2011) 1647–1653.
- [33] J.L. Shang, Z.F. Zong, H. Zhang, Synthesis and analysis of new humidity-controlling composite materials, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 24 (5) (2017) 594.
- [34] N. Degirmenci, A. Yilmaz, Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars, *Construction and Building Materials*. 23 (2009) 284–288
- [35] H. Meradi, L.H. Atoui, L. Bahloul, K. Labiod, F. Ismail, Characterization of diatomite from Sig region (West Algeria) for industrial application, *Management of Environmental Quality International Journal* . 27 (3) (2016) 281–288.
- [36] B. Hamdi, S. Hamdi, Thermal properties of Algerian diatomite, study of the possibility to its use in the thermal insulation, *Springer Proceeding in Physics*. 155 (2014) 27–32.
- [37] UNEP-POPS-NIP-GUID-InventoryAndSubstitution-HBCD-201703.En, Guidance for Inventory and Substitution. Pdf.
- [38] CE. Hagentoft, AS. Kalagasidis, B. Adl-Zarrabi, 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) (2004) 327–352.
- [39] HM. Künzle, Simultaneous heat and moisture transport in building components. One and two dimensional calculation using simple parameters. Dissertation, university Stuttgart, Germany, (1995) (ISBN 3-8167-4103-7).

# Chapitre I

---

## Transfert hygrothermique dans les matériaux de construction

---

## Sommaire Chapitre I

|  |    |
|--|----|
| Liste des figures Chapitre I .....   | 10 |
| Liste des tableaux Chapitre I.....   | 11 |
| I.1 Introduction .....   | 12 |
| I.2 La consommation énergétique et l'enveloppe du bâtiment .....   | 13 |
| I.3 Conséquences de l'humidité dans le bâtiment .....  | 15 |
| I.4 Notion du confort hygrothermique des habitants.....  | 17 |
| I.5 Problèmes de santé liés à l'humidité .....   | 18 |
| I.6 Transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction.....   | 20 |
| I.6.1 Rétention d'humidité .....   | 20 |
| I.6.1.1 Contexte physique.....   | 20 |
| I.6.1.2 Isothermes de sorption .....   | 26 |
| I.6.2 Mécanismes de transport d'humidité.....  | 29 |
| I.6.2.1 Transport de vapeur d'eau .....  | 32 |
| I.6.2.2 Transport d'eau liquide .....  | 35 |
| I.6.2.3 Transport de l'humidité totale.....  | 37 |
| I.6.2.4 Transport d'humidité dynamique .....   | 39 |
| I.6.3 Accumulation de chaleur et transport dans les matériaux poreux humides.....  | 40 |
| I.6.3.1 Accumulation de chaleur .....  | 40 |
| I.6.3.2 Conduction thermique.....  | 41 |
| I.6.3.3 Flux de chaleur avec changement de phase .....   | 42 |
| I.6.4 Principaux modèles physiques du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction ..... | 43 |
| I.6.4.1 Modélisation par homogénéisation .....   | 43 |
| I.6.4.2 Modélisation phénoménologique .....  | 45 |
| I.6.5 Transfert de chaleur et d'humidité aux interfaces dans les bâtiments .....   | 49 |
| I.6.5.1 Interaction entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement .....   | 49 |
| I.6.5.2 Interaction entre deux couches de la paroi.....  | 53 |
| I.7 Conclusion .....   | 55 |
| I.8 Références.....  | 56 |

## Liste des figures Chapitre I

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1: La construction résidentielle dans le projet de logement social Algérienne. [2] .   | 13 |
| Figure I.2 : Répartition énergétique finale par secteur d'activité. [2] .....   | 14 |
| Figure I.3: Structure de la consommation finale d'énergie par produits. [4] .....   | 14 |
| Figure I.4: Exemples de problèmes causés par l'humidité. [5] .....  | 17 |
| Figure I.5: Les pertes thermiques du corps humaines .....   | 17 |
| Figure I.6: Schéma descriptive du stockage de l'humidité pour un matériau de construction<br>actif par capillarité hygroscopique. [20].....   | 22 |
| Figure I.7: Courbe de sorption lors de l'absorption, la désorption, et balayage. [18].....  | 23 |
| Figure I.8: Vue schématique de la colonne d'eau (à gauche) et des conditions de pression (à<br>droite) dans un capillaire cylindrique [22] .....  | 24 |
| Figure I.9: Microscopie électronique à balayage de béton cellulaire avec un grossissement de<br>22 fois (à gauche) et de 11 000 fois (à droite). [20] .....   | 25 |
| Figure I.10: Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en<br>humidité dans les pores. [20] .....   | 30 |
| Figure I.11: Transport d'humidité sous forme de la diffusion de vapeur et succion de liquide<br>.....   | 30 |
| Figure I.12 : Transport d'humidité à travers le réseau poreux avec diffusion de vapeur et<br>succion de liquide. [17].....  | 31 |
| Figure I.13 : Schéma illustrant le transport d'humidité dans un mur de bâtiment poreux<br>(Conditions hivernales) .....   | 32 |
| Figure I. 14 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore .....  | 33 |
| Figure I.15: Transport d'humidité dans un système de pores combinant la diffusion de vapeur<br>et le transport de liquide. [27] .....   | 37 |
| Figure I.16 : Enthalpie liée au volume des différents états physiques de l'eau à pression normale<br>en fonction de la température (l'enthalpie de référence est l'enthalpie de l'eau à 0 °<br>C). [22] .....                                       | 40 |
| Figure I.17 : Homogénéisation par prise de moyenne volumique .....  | 44 |
| Figure I.18 : Microstructure constituée de la répartition périodique de la cellule. [42].....   | 44 |
| Figure I.19 : Les différentes sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment   | 50 |
| Figure I.20 : Corrélation entre la proportion de pluie battante frappant la façade d'un mur d'essai<br>de 4 m de hauteur et la pluie normale et la vitesse du vent perpendiculaire à la<br>façade mesurée à la hauteur standard de 10 m. [57] ..... | 53 |
| Figure I.21 : Types de contact possibles entre deux matériaux [58].....   | 53 |

## Liste des Tableaux Chapitre I

|   |    |
|---|----|
| Tableau I.1 : Consommation finale par produit. [4] .....  | 15 |
| Tableau I.2 : Liste des principaux mécanismes de transport d'humidité existant dans la pratique, leurs causes et leurs potentiels de transport. [20] .....                              | 29 |
| Tableau I.3 : Supplément d'humidité (en pourcentage) en termes de conductivité thermique de divers matériaux de construction, lié à la teneur en eau en pourcentage en masse. [31]..... | 42 |
| Tableau I.4 : Les absorptivités à courtes grandeurs d'ondes et les valeurs de référence de la luminosité pour différentes surfaces de matériaux de construction. [22] .....             | 51 |

## **I.1 Introduction**

Le transfert hygrothermique dans les matériaux de construction et dans les enveloppes de bâtiment implique des interactions complexes des différents mécanismes de transport de chaleur et d'humidité. Au cours des dernières décennies, ce sujet a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs, impliquant de nombreuses théories et modèles (H. Hens, 1996) [1]. Cependant, certains aspects nécessitent encore des efforts de compréhension du problème de transfert hygrothermique.

La principale difficulté est soulignée par le fait que les matériaux de construction sont des milieux poreux avec une structure complexe. Les pores peuvent contenir de l'humidité (vapeur d'eau, eau absorbante ou capillaire et glace) et de l'air sec. Pendant les saisons hivernales, l'eau de pluie s'infiltré à travers les parois poreuses constituant les murs et le toit des bâtisses provoquant des conditions inconfortables, non hygiéniques, et modifie les charges liées au chauffage et refroidissement. La vapeur d'eau existante dans l'air ambiant peut être aussi absorbée par le matériau de construction poreux en fonction de leur capacité de stockage d'humidité (sorption). Cette dernière dépend des caractéristiques de la structure poreuse, telles que la porosité, la surface spécifique de la matrice solide et la distribution de la taille des pores.

Le transfert de l'humidité et de la chaleur à l'intérieur d'un milieu poreux est un transfert couplé, multiphasique et multi-composant. En effet, le mécanisme de transfert de la chaleur dans les micro-capillaires d'un matériau de construction poreux est favorisé principalement par la conduction moléculaire à travers la structure du corps et par le fluide contenu dans les pores (vapeur, gaz et liquide). L'humidité accumulée par la pluie ou par l'atmosphère est normalement transférée des pores du matériau de construction à l'air environnant par un écoulement insaturé de liquide dans le solide poreux, par le changement de phase liquide-vapeur et par le transfert convectif par diffusion de vapeur de la surface du solide vers son environnement. Par conséquent, la résolution du problème de transfert thermique devrait être accompagnée simultanément par une résolution du transfert d'humidité.

Pour des situations où il existe différents matériaux, les conditions aux limites sont difficiles à définir. De manière générale, les équations de calcul mathématiques sont hautement non linéaires et difficiles à manipuler sans simplifications.

En raison de la complexité et de l'importance de ce phénomène, de nombreux chercheurs travaillaient encore dans ce domaine à ce jour. De nombreux modèles et méthodes ont été développés pour prévoir le transfert de chaleur et d'humidité dans des milieux poreux ou dans

les matériaux de construction. Chacun d'entre eux a son propre but et son échelle. La faisabilité du modèle adopté dépend principalement de l'hypothèse liée à de nombreuses équations auxiliaires phénoménologiques.

Afin de mieux comprendre le phénomène de transfert hygrothermique dans les matériaux de construction poreux, nous présentons dans ce chapitre un état de l'art sur les enjeux environnementaux liés à la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment, ainsi que les principaux désordres causés par l'humidité. Dans ce cadre, une étude critique de la littérature et de nouvelles considérations sur la théorie du transport et les différentes interactions dans les milieux poreux sera déployée.

## **I.2 La consommation énergétique et l'enveloppe du bâtiment**

En Algérie, le gouvernement a beaucoup investi dans le secteur du bâtiment. Chaque année, de nombreux projets résidentiels (le projet de logement social pour un million d'appartements) sont construits. Par conséquent, la consommation d'énergie augmente annuellement.



*Figure I.1: La construction résidentielle dans le projet de logement social Algérienne. [2]*

Ce secteur est devenu le premier consommateur d'énergie en Algérie, il absorbe 41 % de la consommation totale d'énergie finale, selon l'APRUE (Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie [APRUE, 2019] [2] ce taux très élevé de la consommation énergétique interpelle les pouvoirs publics qui ont lancé le programme national de l'efficacité énergétique (PNEE) via l'APRUE afin d'agir sur le secteur de la construction et du bâtiment et réduire l'augmentation de la consommation énergétique.

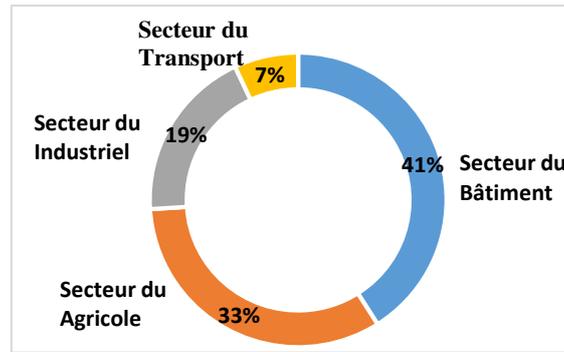


Figure I.2 : Répartition énergétique finale par secteur d'activité [APRUE, 2019]. [2]

Par ailleurs, le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) a indiqué dans la première conférence internationale sur l'efficacité énergétique et l'écoconstruction organisée par une présentation intitulée "mise en application de la réglementation thermique Algérienne du bâtiment" que la forte consommation est due à "l'explosion" du parc immobilier, l'usage de matériaux de construction "très énergivores", l'application des prix bas en matière d'énergie et la non application de la réglementation thermique du bâtiment[3].

La plupart des bâtiments Algérienne anciens et nouveaux sont construits sans prendre en considérations les aspects énergétiques et environnementaux. Cela engendre une augmentation de l'utilisation du système de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) utilisé pour contrôler la température et l'humidité relative de l'environnement intérieur de l'enveloppe du bâtiment, traduisant une augmentation de la consommation d'électricité et du gaz.

Selon le bilan énergétique national de 2017 [4], La structure de la consommation nationale reste dominée par le gaz naturel (37%) suivi par l'électricité (30%) et les produits pétroliers (27%), comme illustré dans la figure suivant :

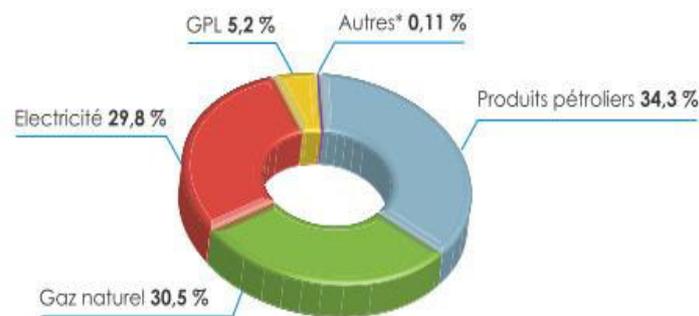


Figure I.3: Structure de la consommation finale d'énergie par produits [Bilan énergétique national 2017]. [4]

\*- Autres : Produits solides, pétrole brut, condensat, GNL, GHF... etc.

Selon ce dernier, La consommation finale est passée de 42,9 M Tep en 2016 à 44,6 M Tep en 2017, reflétant une hausse de 1,8 M Tep, soit (+4,1%), tirée par celle du gaz naturel, de l'électricité et des GPL qui ont plus que compensé la baisse des produits pétroliers. L'évolution de la consommation finale d'énergie par produits entre 2016 et 2017 est détaillée dans le tableau suivant :

| Produit             | 2016 [K Tep] | 2017 [K Tep] | Evolution |      |
|---------------------|--------------|--------------|-----------|------|
|                     |              |              | Quantité  | %    |
| Produits pétroliers | 15527        | 15338        | -188      | -1.2 |
| Gaz naturel         | 12654        | 13655        | 1001      | 7.9  |
| Electricité         | 12476        | 13270        | 794       | 6.4  |
| GPL                 | 2220         | 2335         | 115       | 5.2  |

Tableau I.1 : Consommation finale par produit [Bilan énergétique, 2017]. [4]

L'augmentation de la consommation de gaz naturel par un taux de 7.9 % est expliquée par les besoins croissants des clients de Sonelgaz, notamment ceux du secteur des ménages, et où le nombre totale d'abonnés a atteint 5.3 millions en 2017, soit plus de 345 mille nouveaux clients.

Suite à la hausse de la demande des clients de la haute et basse tension (essentiellement les ménages), dont le nombre totale d'abonnés a dépassé 9.2 millions à fin 2017, contre 8.8 millions à fin de 2016 ou la consommation résidentiel à augmenter par un taux de 5.7%, alors la consommation d'électricité à subir un croissance importante de 6.4%.

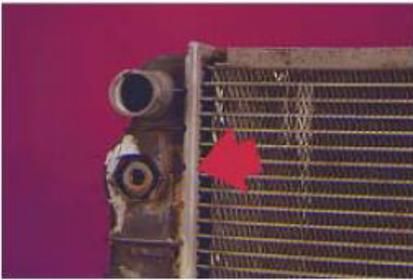
L'évolution de la consommation finale par secteur d'activité a ressorti par une hausse consommation du secteur industriel et bâtiment de 7.6% passant de 9.2 M Tep à 9.9 M Tep, suite à la hausse consommation du sous-secteur des matériaux de construction (+7.5 %).

### I.3 Conséquences de l'humidité dans le bâtiment

Les concepteurs de systèmes de CVC doivent prendre en compte et traiter l'humidité dans presque tous leurs travaux. L'humidité, quelle qu'en soit l'origine, est généralement considérée comme la plus grande menace pour la durabilité et la performance à long terme du parc de logements [5]. La *figure I.4* montre quelques exemples de dommages aux matériaux de construction causés par l'humidité. Le fait de ne pas gérer correctement le transport de chaleur, d'air et d'humidité à travers le mur peut entraîner les problèmes suivants [5] :

- Corrosion électrochimique de composants métalliques tels que les équipements CVC, les conduits, les ossatures structurelles, les barres de renforcement, les ancrages de maçonnerie, etc.

- La détérioration chimique et la dissolution de matériaux tels que le revêtement de gypse, les tuiles de plafond, en particulier les produits en bois sur les murs extérieurs ;
- Décoloration des finitions des bâtiments;
- Changements de volume (gonflement, déformation et rétrécissement) pouvant entraîner une dégradation de l'apparence, une défaillance structurelle, des fissures, etc.
- Détérioration par gel-dégel du béton, de la pierre et de la maçonnerie, en particulier pour les bâtiments situés dans des zones froides si les matériaux de construction contiennent de l'humidité (par exemple, si le béton contient plus de 44% d'humidité en volume de pores, des dommages au bloc de béton peuvent se produire si la température tombe en dessous du point de congélation ;
- L'augmentation de la conductivité thermique du matériau due à l'humidité dans le matériau;
- La croissance de formes biologiques, y compris, les moisissures, les acariens, etc.



(a) Corrosions des aciers



(b) Détérioration du plafond



(c) Apparition de moisissures



(d) Fissurations



(e) Désordres dus au cycle gel/dégel

Figure I.4: Exemples de problèmes causés par l'humidité. (Z. Zhong et J. Braun, 2008) [5]

#### I.4 Notion du confort hygrothermique des habitants

Le confort hygrothermique est peut être désigné l'ensemble des multiples interactions entre l'occupant et son environnement, dont la société américaine ASHARE « American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Wessel 2001» le définit comme l'ensemble des conditions requises pour assurer une satisfaction et un bien être des occupants.

L'évaluation du confort hygrothermique n'est pas une notion simple car la sensation du confort dépend de plusieurs variables de nature différentes (physique, psychologique, physiologique,...).



Figure I.5: Les pertes thermiques du corps humaines.

Pour cela, deux approches principales sont développées pour l'évaluation du confort thermique, l'approche analytique ou statique et l'approche adaptative. [Y. Ferroukhi, 2015] [6].

L'approche analytique est basée sur une étude expérimentale de Fanger (N. Kameni et al, 2013) [7], deux indicateurs sont définis pour évaluer le confort thermique : PMV « Predicted Mean Vote » et PPD « Predicted Percentage Dissatisfied ». Cette approche se focalise sur

l'aspect physique et les échanges thermiques entre l'occupant et son environnement thermique. La norme NF ISO 7730 (J. Koffi, 2009) [8] est basée sur l'approche statique, dans cette approche le confort des occupants est assuré lorsque le paramètre PMV est compris entre 1 et -1.

L'approche adaptative s'intéresse aux mécanismes rétroactifs de l'adaptation de l'occupant dans son environnement (G. Brager et R. De Dear, 1998) [9]. Des limites de températures opératives ont été proposées dans la norme NF EN 15251 en se référant à cette approche.

Afin de mieux évaluer le confort thermique, les deux approches ont été couplées par B. Mouajalled et al, (2008) [10]. Les auteurs proposent une approche systémique qui caractérise le confort thermique à l'aide d'un système microscopique composé de deux sous-systèmes complexes qui assurent une interaction entre le bâtiment et l'occupant N. Santamouris et al., (2007) [11].

## **I.5 Problèmes de santé liés à l'humidité**

Il est bien connu que la température et l'humidité de l'air intérieur sont des facteurs clés qui influent directement sur la sensation thermique du corps humain. En outre, il a été constaté que l'humidité de la peau était une des principales causes d'inconfort dû à une humidité de l'air élevée (J. Toftum et al, 1998). [12]

Pour les êtres humains, les voies respiratoires agissent comme un système de climatisation qui régule le taux d'humidité et la température de l'air inhalé menant aux poumons. Il a été vérifié que le refroidissement respiratoire insuffisant est une cause de gêne thermique locale, et le système respiratoire a des exigences plus strictes en matière d'humidité de l'air que la peau (J. Toftum et al, 1998). [12]

De plus, L. Fang et al. (2000) [13] ont mené des expériences d'exposition du corps humain et découvert que:

- ✓ La température et l'humidité de l'air ont un impact significatif à la fois sur le ressenti immédiat et adaptative du degré de confort intérieur.
- ✓ La diminution de la température et de l'humidité de l'air peut améliorer considérablement la qualité de l'air intérieur et l'acceptabilité de l'air peut être augmentée linéairement avec une diminution de l'enthalpie de l'air.
- ✓ La ventilation nécessaire au confort peut être considérablement réduite lors de la diminution de l'enthalpie de l'air intérieur.

- ✓ Le taux de ventilation peut être diminué de 10 L/s/ personne (prescrit dans la norme ASHRAE existante 62-1999 pour les immeubles de bureaux à 3.5 L/s/personne lorsque l'enthalpie de l'air intérieur diminue de 45 kJ/kg à 23 °C/50% HR et à 20°C/40% RH sans sacrifier la qualité perçue de l'air.

Pour des taux d'humidité élevés, généralement supérieures à 60% (conditions hygrométriques défavorables pour les occupants), les polluants et les contaminants biologiques peuvent être apparaitre ou se développer (A. Baughman et all, 1996) [14]. Les taux d'humidité très faibles peuvent entraîner une augmentation des infections du système respiratoire. En plus, selon l'étude de (G. Green, 1985) [15], des agents biotiques peuvent se développes dans une condition ou l'humidité est faible ce qui provoque l'augmentation de la sensibilité des occupants par rapport à ces agents biologiques. Ainsi, un faible taux d'humidité est également responsable des chocs électrostatiques des vêtements, des tapis,... etc.

Il est connu que les champignons (moisissures, ...etc.) causés par l'humidité peuvent nuire à la santé des occupants, et ce type de problème de qualité de l'air intérieur a retenu l'attention de plus en plus récemment.

Les champignons peuvent causer des risques pour la santé des êtres humains par inhalation ou par contact en raison de réactions allergiques, d'irritations des yeux et des voies respiratoires, d'infection et de toxicité. Pour les personnes sensibles aux moisissures, des symptômes tels qu'une irritation ou une congestion du nez et des sinus, une toux sèche, une respiration sifflante, des éruptions cutanées ou une sensation de brûlure, des yeux larmoyants ou rougis peuvent survenir.

Les problèmes de santé liés à l'exposition aux moisissures peuvent être résumés comme suit:

- Problèmes respiratoires, comme la respiration sifflante, et difficulté à respirer;
- Congestion nasale et des sinus;
- Brûlure et larmolement des yeux;
- Sécher, la toux sèche;
- Gorge irritée;
- Irritation du nez et de la gorge;
- Essoufflement;
- Irritation de la peau;
- Problèmes d'humeur.

## I.6 Transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction

### I.6.1 Rétention d'humidité

La capacité d'un matériau de construction poreux à stocker l'humidité peut être déterminée expérimentalement par des isothermes de sorption et de succion et mathématiquement décrite comme des équations d'état. Ces ensembles des isothermes s'appellent les courbes de rétention d'humidité. Dans la section suivante, la conception du stockage de l'humidité et des phénomènes de sorption dans les matériaux poreux est décrite en détail.

#### I.6.1.1 Contexte physique

Si un matériau ne contient pas d'eau ou uniquement de l'eau liée chimiquement, il est considéré comme matériau sec. Cet état peut être atteint en séchant le matériau à poids constant. Au contact de l'air humide, les matériaux de construction non hygroscopiques restent secs, tandis que les matériaux hygroscopiques captent les molécules d'eau aux surfaces internes de leur système de pores jusqu'à ce qu'elles atteignent la teneur en humidité à l'équilibre avec l'humidité de l'air ambiant. La quantité d'humidité hygroscopique dépend de l'humidité relative de l'air dans les pores  $HR$  ou  $\varphi(\%)$  :

$$HR = \varphi = \frac{\omega}{\omega_{sat}} = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (I.1)$$

Où  $\omega$  est la teneur en vapeur [ $kg/m^3$ ],  $\omega_{sat}$  est la teneur en vapeur à la saturation [ $kg/m^3$ ],  $P_v$  est la pression de vapeur [ $Pa$ ],  $P_{v,sat}$  est la pression de vapeur saturante [ $Pa$ ] est dépendante de la température avec une relation empirique, validé pour  $0 < T < 80$  [ $^{\circ}C$ ] avec une précision de  $\pm 0.15$  % (R. Peuhkuri, 2003) [16] :

$$P_{v,sat} = e^{23.5771 - \frac{4042.9}{T - 37.58}} \quad (I.2)$$

Où  $T$  est la température absolue [ $K$ ], la teneur en humidité peut être donnée en masse  $u$  [ $kg/kg$ ] ou en volume  $\omega$  [ $kg/m^3$ ]

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (I.3)$$

$$\omega = \frac{m - m_0}{V} \quad (I.4)$$

Où  $m$  est la masse de l'échantillon humide [ $kg$ ],  $m_0$  est la masse de l'échantillon sec [ $kg$ ],  $V$  est le volume de l'échantillon [ $m^3$ ].

Le degré de saturation capillaire est également largement utilisé pour évaluer la teneur en humidité des matériaux de construction poreux. Selon LO. Nilsson (2003) [17], le degré de saturation capillaire est le rapport entre sa teneur en humidité réelle et sa teneur en humidité à la saturation capillaire. Est un nombre adimensionnel compris entre 0-1 (0-100 %), et peut être exprimé par :

$$S_{cap} = \frac{u}{u_{cap}} \quad (I.5)$$

Ou  $u$  est la teneur en eau massique de l'échantillon humide [ $kg/kg$ ],  $u_{cap}$  est la teneur en eau massique du même échantillon à la saturation capillaire [ $kg/kg$ ].

Pour une humidité relative très basse, il n'existe qu'une couche unique de molécules d'eau sur les surfaces internes du matériau. La fixation de ces molécules par la liaison d'hydrogène est très forte. Lorsque l'humidité relative est de l'ordre de 20% des couches supplémentaires de molécules d'eau sont créées à la surface avec l'augmentation de l'humidité (CR. Pedersen, 1990) [18], et leur force de liaison va diminuer jusqu'à ce que les molécules d'eau se superposent et fusionnent dans les pores minces et la condensation capillaire commence.

Lorsqu'un matériau a absorbé toute l'humidité qu'il peut, une humidité supplémentaire sera stockée dans les pores et les fissures à l'intérieur de ce dernier par succion capillaire (phénomène de capillarité). Un matériau capillaire actif capte de l'eau liquide jusqu'à atteindre un certain état de saturation appelé saturation en eau libre ou saturation capillaire. Des teneurs en humidité plus élevées, allant jusqu'à la saturation des pores ou à la saturation maximale en eau, ne peuvent être atteintes que par pression ou diffusion de vapeur d'eau sous un gradient de température. Dans le cas des matériaux de construction à action capillaire, la teneur en humidité critique représente la condition d'humidité en dessous de laquelle aucune conduction capillaire ne peut être observée, c'est-à-dire par la dispersion limitée d'une goutte d'eau à la surface du matériau de construction (B. Schwarz et al, 1974) [19].

Selon les conditions ambiantes, l'humidité dans un matériau de construction peut être présente sous forme solide, liquide ou sous forme vapeur, et dans les micropores, elle peut aussi apparaître dans des états physiques qui ne sont pas exactement définissables. Comme il est souvent difficile de déterminer séparément les différents états physiques par des mesures, et puisque le rapport des états individuels change constamment dans des conditions naturelles, il est seulement utile d'examiner leur somme totale. Dans ce qui suit-on appelle cette somme la teneur en humidité totale  $w$  [ $kg/m^3$ ] [20].

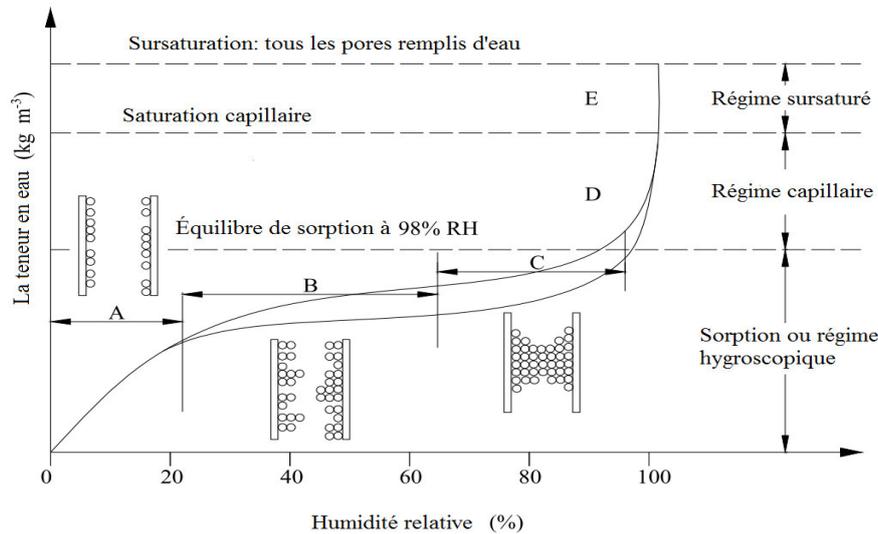


Figure I.6 : Schéma descriptive du stockage de l'humidité pour un matériau de construction actif par capillarité hygroscopique (M. Qin) [20].

A : Molécules adsorbées monocouche.

B : Molécules adsorbées multicouches.

C : Couches interconnectées (condensation capillaire interne).

D : Eau libre dans les pores, succion capillaire.

E : Régime sursaturé.

La figure I.6 montre les trois régimes du stockage de l'humidité : sorption ou régime capillaire (région A-C), régime capillaire (région D), régime sursaturé (région E). Il est très important de reconnaître que la teneur en humidité varie principalement avec l'humidité relative et non avec l'humidité absolue (J. Straube, 2006) [21].

### ✓ Régime de sorption d'humidité (région A-C)

Cette région varie de l'état sec à une humidité d'équilibre d'environ 98% de l'humidité relative, comprend toutes les teneurs en eau résultant de la sorption de vapeur d'eau jusqu'à un état d'équilibre. Dans ce régime, la fonction de rétention d'humidité est décrite par les isothermes de sorption (voir figure I.6).

Il existe une distinction importante entre les isothermes d'absorption et de désorption, appelée effet d'hystérésis, où l'isotherme de désorption donne toujours un équilibre plus élevé du teneur en humidité que l'absorption à une humidité relative donnée. L'effet d'hystérésis n'est pas totalement compris, mais il est généralement admis que la teneur en eau plus élevée à l'équilibre pour la désorption est due à un «effet de bouteille d'encre», où l'humidité est piégée à l'intérieur des pores minces (LO. Nilsson, 2003) [17].

La température a également une influence sur les isothermes de sorption. Un niveau de température plus élevé entraîne une teneur en eau plus faible pour une même humidité relative. Ou bien, l'humidité relative augmente avec l'augmentation de la température si la teneur en humidité est fixée. Cet effet est en accord avec le principe de Chatelier, et le fait que l'absorption d'humidité est un processus exothermique et que, par conséquent, la libération d'humidité est un processus endothermique qui utilise de l'énergie (CR. Pedersen, 1990) [18].

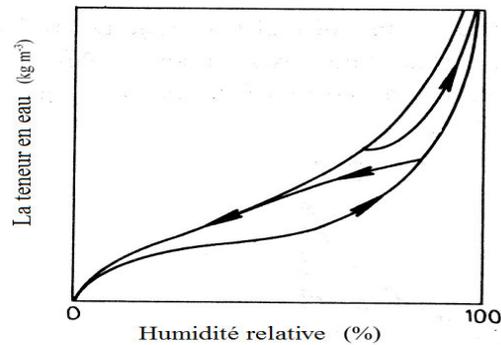


Figure 1.7 : Courbe de sorption lors de l'absorption, la désorption, et balayage.  
(CR. Pedersen, 1990) [18]

La figure 1.7 montre deux courbes limites dans lesquelles se trouvent tous les états possibles à une température donnée. Les courbes de balayage intermédiaires sont suivies lors du passage de l'une à l'autre des courbes limites. Il s'avère que la plupart des états se retrouvent sur quelques courbes de balayage pour des matériaux naturellement acclimatés. Selon la figure 1.7 on voit clairement que la pente de la courbe devient plus raide quand l'humidité relative approche à 100%. À des valeurs d'humidité relative proches de cette limite, il est difficile de déterminer la teneur en humidité exacte.

Les isothermes de sorption sont donc normalement considérées comme des descriptions valides de la rétention d'humidité jusqu'à la teneur maximale en humidité hygroscopique qui, dans la plupart des définitions, correspond à HR=98% (CR. Pedersen, 1990 [18] ; HM. Künzle, 1995 [22] ; R. Peuhkuri, 2003 [16]). À un niveau d'humidité relative plus élevé, les grands pores du matériau sont remplis d'eau. Ces pores peuvent contenir une grande quantité d'eau, mais comme le diamètre des pores est considérable, la courbure du ménisque est relativement petite, de même que la pression de vapeur diminue, selon l'équation de Kelvin. Le résultat est une forte teneur en humidité lorsque l'humidité relative approche de 100% (R. Peuhkuri, 2003) [16].

#### ✓ Régime capillaire (région D)

La région capillaire de l'eau suit la région de l'humidité de sorption et atteint la saturation en eau libre. Lorsqu'un matériau de construction actif par capillarité entre en contact avec de

l'eau liquide, il absorbe l'eau jusqu'à la saturation en eau libre. Lorsqu'il entre en contact avec une autre substance humide super-hygroscopique, il se produit également un échange d'humidité jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Il est supposé dans ce cas (HM. Künzle, 1995) [22] que les plus petits capillaires ont des forces du suction plus importantes et tirent donc l'eau des plus grands capillaires jusqu'à ce que tous les pores soient remplis d'eau dans les deux matériaux. Dans cet état d'équilibre, les teneurs en humidité des deux matériaux de construction reliés par capillarité ne sont pas égales.

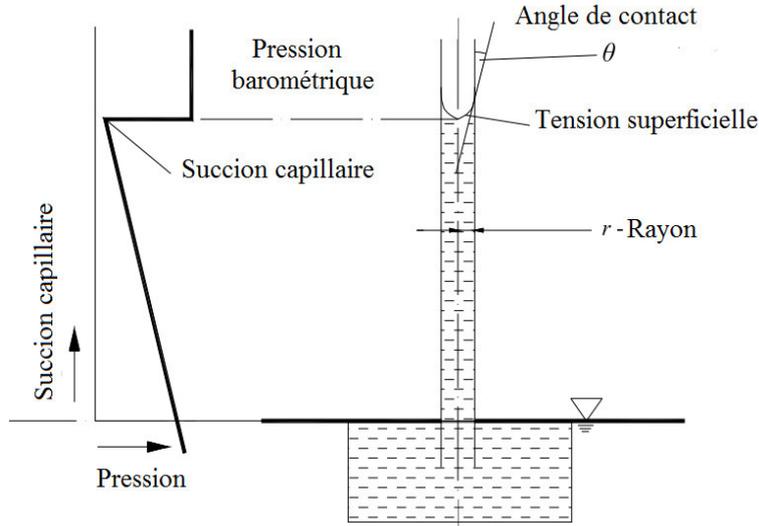


Figure I.8 : Vue schématique de la colonne d'eau (à gauche) et des conditions de pression (à droite) dans un capillaire cylindrique (HM. Künzle, 1995) [22].

La condensation capillaire dépend de la pression capillaire  $P_c$  (Pa) qui est la différence entre la pression totale  $P$  [Pa] et la pression dans le liquide sous un ménisque  $P_l$  (Pa). Elle est également appelée contrainte de suction et peut être déterminée à l'aide d'un modèle capillaire cylindrique, comme indiqué dans la figure I.8, et exprimé comme suit (loi de Laplace):

$$P_c = P - P_l = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (I.6)$$

Où  $\gamma$  est la tension superficielle d'eau [ $N/m$ ],  $r$  est le rayon capillaire [ $m$ ], et  $\theta$  est l'angle de contact [ $^\circ$ ]. La relation entre l'humidité relative de l'air et la pression capillaire dans les pores qui sont soumis à une condensation capillaire est donnée par l'équation de Kelvin :

$$P_c = \frac{RT \rho_w}{M_w} \ln \frac{\omega}{\omega_s} \quad (I.7)$$

Où  $R$  est le constant du gaz parfait [ $J/(K.mol)$ ],  $\rho_w$  est la densité de l'eau [ $kg/m^3$ ],  $M_w$  est la masse molaire de l'eau [ $kg/mol$ ], et  $\omega_s$  est la teneur en vapeur à la saturation [ $kg/m^3$ ]. Actuellement, l'équation de Laplace (I.6) et de Kelvin (I.7) sont aussi importants pour la région

C. Dans les matériaux de construction poreux, cette contrainte de succion peut dépasser la pression atmosphérique sans formation de bulles de vapeur. En raison du fort ordre des molécules d'eau dans les petits capillaires, l'eau y est également capable d'absorber des contraintes de traction (HM. Künzle, 1995) [22].

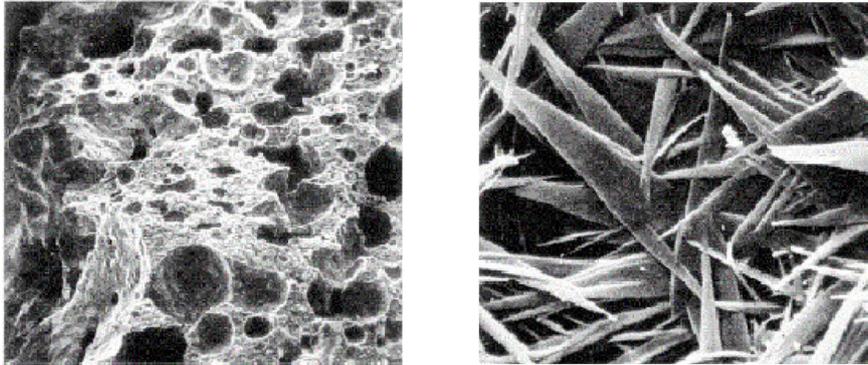


Figure I.9 : Microscopie électronique à balayage de béton cellulaire avec un grossissement de 22 fois (à gauche) et de 11 000 fois (à droite) (M. Qin, 2007) [20].

La figure I.9 montre une vue du béton cellulaire par la microscopie électronique à balayage sous deux grossissements. À faible grossissement, les pores de la structure du matériau de construction semblent être ronds; mais la microstructure apparaît réellement sous la forme d'aiguilles pointues à un grossissement plus élevé. Un modèle capillaire cylindrique apparaît donc comme une approximation très grossière des conditions réelles. Pour cette raison, il est plus pratique de déterminer la contrainte de succion directement et non via un modèle capillaire à partir de la taille des pores.

L'équation (I.7) établit une relation fonctionnelle unique entre la pression capillaire et la teneur en vapeur dans le régime d'eau capillaire, ce qui signifie que la teneur en vapeur peut également être utilisée comme potentiel ou plutôt moteur de transfert d'humidité dans le régime d'eau capillaire dans un cas isotherme.

#### ✓ Régime sursaturé (région E)

Normalement, le régime sursaturé ne peut pas être atteint par succion commune (ou seulement après une très longue période par dissolution de l'air encapsulé interstitiel dans de l'eau). En pratique, ce régime se produit par diffusion du gradient de température et, en laboratoire, par succion sous-pression. Dans ce régime, qui se situe au-dessus de la saturation en eau libre et va jusqu'au le remplissage de toutes les cavités, il n'y a plus d'états d'équilibre. L'humidité relative est toujours de l'ordre de 100% quelle que soit la teneur en humidité.

Dans cette étude, nous ne discutons que des phénomènes de transport d'humidité dans les deux premiers régimes car, dans la pratique, les teneurs en humidité habituelles des composants de construction dans la plupart du temps se trouvent dans ces deux régimes.

### I.6.1.2 Isothermes de sorption

Traditionnellement, l'adsorption est divisée en deux sous-catégories d'adsorption physique (ou d'adsorption de van der Waals) et d'adsorption chimique. L'adsorption physique s'applique à tous les systèmes adsorber-adsorbants à condition que les conditions de la pression et de la température soient adaptées, tandis que l'adsorption chimique ne peut se produire que si le système est capable de créer une liaison chimique. Dans cette recherche, nous ne discutons que de l'adsorption physique.

Au cours des dernières décennies, de nombreuses équations théoriques et semi-empiriques ont été développées pour décrire les isothermes de sorption des matériaux poreux. Dans la section suivante, certains modèles ou théories d'isothermes célèbres et largement utilisés sont discutés.

#### A. Isotherme de Langmuir

Le mécanisme fondamental impliqué dans la sorption à l'équilibre est que le taux de fixation des molécules de vapeur doit équilibrer le taux de détachement des molécules de vapeur du matériau adsorbant. Ce mécanisme a été quantifié pour la première fois par Langmuir (1918) (M. Qin, 2007) [20], et a conduit à sa théorie de base pour la sorption monocouche, et l'isotherme de Langmuir.

$$N_{ads} = \tau \cdot P_v \cdot \partial_{libre} \cdot p_1 \quad (I.8)$$

Ou,  $N_{ads}$  est le nombre des molécules supplémentaires adsorbées,  $\tau$  est le taux d'adsorption (constant),  $P_v$  est la pression de vapeur (Pa),  $\partial_{libre}$  est la portion disponible de la surface,  $p_1$  est la probabilité d'une molécule vraiment liée qui frappe la surface.

$$N_{des} = N_m \cdot \partial_{occ} \cdot p_2 \quad (I.9)$$

Ou,  $N_{des}$  est le nombre des molécules déjà adsorbées qui quittent la surface,  $N_m$  est le nombre de molécules en une couche complète,  $\partial_{occ}$  est la portion de surface occupée,  $p_2$  est la probabilité qu'une molécule adsorbée ait l'énergie nécessaire pour surmonter les forces d'attraction.

A l'équilibre,  $N_{ads} = N_{des}$ , avec  $\partial_{libre} + \partial_{occ} = 1$ , l'équation de Langmuir peut être exprimé comme :

$$\frac{\omega}{\omega_m} = \frac{q_{ad} P_v}{1 + q_{ad} P_v} \quad (I.10)$$

Ou,  $q_{ad} = \frac{\tau p_1}{N_m p_2} \omega_m$  représente la quantité d'eau adsorbée correspondante à une monocouche complète.

Bien que la plupart des données de sorption pratiques puissent être ajustées à cette isotherme à une basse pression de vapeur, de nombreuses isothermes expérimentaux sont plus ou moins sigmoïdes et montrent des écarts remarquables par rapport à l'isotherme de Langmuir. Pour un cas simple l'isotherme de sorption pour une molécule monocouche, l'équation de Langmuir est applicable seulement pour une humidité relative inférieure à 20% (M. Qin, 2007) [20].

### B. L'équation de BET

Dans le modèle de Langmuir, il était supposé que l'adsorption ne pouvait se produire que sur les sites d'adsorption de substrat non occupés. Cette restriction va être maintenant supprimée. Si la couche adsorbée initiale peut agir comme substrat pour une adsorption ultérieure, alors, au lieu que l'isotherme se stabilise à une valeur saturée à des pressions élevées, on peut s'attendre à ce qu'il augmente indéfiniment. L'isotherme le plus largement utilisé pour traiter l'adsorption multicouche a été dérivé de Stephen Brunauer, Paul Emmet et Edward Teller, et appelé isotherme de BET (S. Brunauer et al. 1938) [23].

$$\frac{\omega}{\omega_m} = \frac{c \varphi}{(1-\varphi)(1-\varphi+c \varphi)} \quad (I.11)$$

Ou,  $\omega_m$  représente la quantité d'eau adsorbée correspondante à la première couche [ $kg/m^3$ ],  $c$  est un constant.

$$c = A e^{\left(\frac{Q_{ad} - Q_{cd}}{RT}\right)} \quad (I.12)$$

Dans l'expression,  $Q_{ad}$  est la chaleur adsorbée de la première couche [ $kJ$ ],  $Q_{cd}$  la chaleur condensée [ $kJ$ ],  $A$  est un constant.

L'équation (I.11) est appelée aussi L'équation BET standard. Les principales hypothèses de l'équation étaient :

- Seules les molécules de la couche supérieure peuvent dégager ;
- Le nombre des couches est infinie à  $\varphi = 1$  ;
- Il n'y a pas d'interaction latérale entre les molécules adsorbées.

Si le nombre des couches adsorbées est inférieur à une valeur donnée  $n$ , l'équation BET peut être exprimée comme :

$$\frac{\omega}{\omega_m} = \frac{c \varphi}{(1-\varphi)} \frac{1-(n-1)\varphi^n + n \varphi^{n+1}}{1+(c-1)\varphi - c \varphi^{n+1}} \quad (I.13)$$

Lorsque  $n=1$ , l'équation (I.13) se réduit à l'équation de Langmuir, et quand  $n \rightarrow \infty$ , l'équation (I.13) devenue l'équation standard de BET.

Même aujourd'hui, l'isotherme BET est peut-être l'équation la plus largement utilisée pour l'analyse des données de sorption. L'équation BET permet des ajustements à des données réelles allant généralement jusqu'à une humidité relative d'environ 40%, mais prédit ensuite une sorption supérieure à celle constatée dans la pratique, tout comme l'équation de Langmuir prédit une sorption trop faible.

### C. Le modèle BET modifié

S. Brunauer et al (1969) [24], ont modifiés l'équation standard de BET pour avoir une meilleure cohérence avec les données expérimentales. Leur modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- Le nombre des couches adsorbants pour HR=1 est limité (5 à 6 couches)
- La valeur de  $\frac{\omega}{\omega_m}$  tend vers l'infinie quand l'humidité relative est de l'ordre de 100%.

$$\frac{\omega}{\omega_m} = \frac{c \varphi F}{(1-F \varphi)(1+(c-1) F \varphi)} \quad (I.14)$$

Ou, F est un facteur de correction, qui prend en compte le nombre de couches des molécules successives venant d'être fixées sur la première couche adsorbée, et peut être exprimé comme :

$$F = A e^{\left(\frac{Q_{ad} Q_{cd}}{RT}\right)}, F < 1 \quad (I.15)$$

### D. La théorie de Dent's

Une autre modification du modèle classique BET a été proposée par RW. Dent (1977) [25], qui est applicable pour les matériaux à base de bois (cellulose). La théorie de Dent's peut être exprimé comme :

$$\frac{\omega}{\omega_m} = \frac{k_1 \varphi}{(1-k_2 \varphi)(1-k_2 \varphi + k_1 \varphi)} \quad (I.16)$$

Ou,  $k_1$  est liée aux molécules primaires par rapport au liquide condensé externe en vapeur saturée, et  $k_2$  décrire la relation entre les molécules adsorbés secondaires et l'eau condensé externe.

**E. Le modèle GAB**

Le modèle d'isotherme de sorption de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) (C. Van den Berg, 1984) [26] a été largement utilisé dans de nombreuses secteurs industrielles (à titre d'exemple : L'ingénierie alimentaire, matériaux de constructions, ...ect. En tant qu'extension du modèle BET, l'équation de GAB prend en compte la chaleur adsorbée de toutes les couches de molécules.

$$\frac{\omega}{\omega_m} = \frac{c \varphi f}{(1-f \varphi)(1+(c-1) f \varphi)} \tag{I.17}$$

Dans l'expression :  $c = A e^{(\frac{Q_{ad} Q_{cd}}{RT})}$ , et  $f = A e^{(\frac{Q_{ad} Q_T}{RT})}$  ; ou,  $Q_T$  est la chaleur adsorbant totale de toutes les couches.

**I.6.2 Mécanismes de transport d'humidité**

L'humidité dans un matériau poreux peut être transportée soit sous forme de vapeur d'eau, soit sous forme d'eau liquide, soit sous forme de combinaison de ces deux phases. La phase solide d'humidité, la glace, n'est pas considérée comme phase mobile. Les formes de transport d'humidité communément mentionnées dans la littérature sont présentées dans le *tableau I.2* (M. Qin, 2007) [20], et dépendent de la structure des pores du matériau ainsi que des conditions environnementales. Cependant, en réalité, la répartition des forces motrices n'est pas aussi simple.

|                        | Mécanisme de transport             | Potentiel de transport                                   |
|------------------------|------------------------------------|--|
| Transport de la vapeur | Diffusion du gaz                   | Quantité de vapeur ou pression de vapeur, et Température |
|                        | Diffusion thermique                | Température  |
|                        | Effusion<br>(diffusion du Knudsen) | Pression de vapeur et Température                        |
|                        | Convection                         | Gradient de pression total                               |
| Transport du liquide   | Conduction capillaire              | Pression capillaire                                      |
|                        | Effet Soret                        | Température  |
|                        | Diffusion surfacique               | Humidité relative  |
|                        | Flux hydraulique                   | Gradient de pression totale                              |

*Tableau I.2 : Liste des principaux mécanismes de transport d'humidité existant dans la pratique, leurs causes et leurs potentiels de transport (M. Qin, 2007) [20].*

La *figure I.10* illustre ces différents processus de transport d'humidité au niveau microscopique de la taille des pores pour différents teneurs en humidité du matériau. A faible humidité relative, le flux d'humidité est une diffusion de vapeur due à un gradient de concentration de vapeur (stade 1).

Lorsque l'humidité relative augmente, l'adsorbat au niveau des pores de la paroi s'épaissit, ce qui devrait réduire un peu la surface disponible des pores pour la diffusion de vapeur d'eau (stade 2). Lorsque l'HR augmente, une condensation capillaire se produit dans les pores les plus étroits (stade 3). L'humidité coule maintenant sous forme d'une série de diffusion de vapeur et succion de liquide. Eventuellement, les chemins d'écoulement des liquides se développent pour remplir la partie majeure du système poreux (stade 4) (LO. Nilsson, 2003) [17].

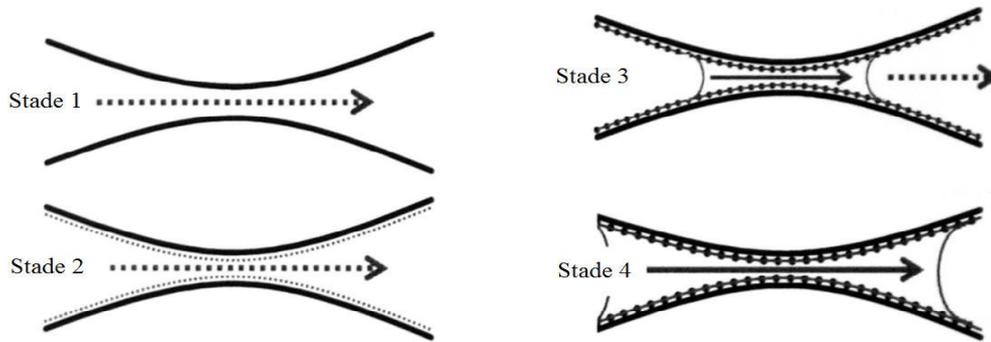


Figure I.10 : Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en humidité dans les pores. [20]

La Figure I.11 montre le principe de la dépendance du transport de l'humidité en combinaison de flux de vapeur et de liquide, dans un pore (LO. Nilsson, 2004) [27].

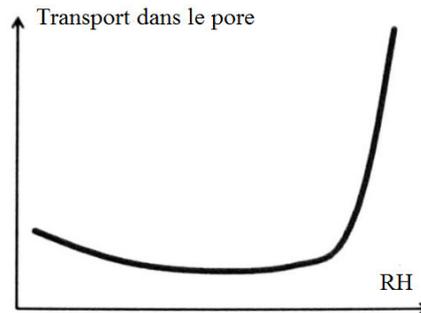


Figure I.11 : Transport d'humidité sous forme de la diffusion de vapeur et succion de liquide.

Le flux est légèrement supérieur à très basse humidité, car l'absorption est plus fine, n'a jamais été vérifié. En réalité, les mesures sont toujours effectuées pour un système de pores avec une combinaison de tailles de pores et cet effet peut alors être masqué.

Dans un système poreux, le flux d'humidité se produira en série et en parallèle, dans des combinaisons complexes (Figure I.12).

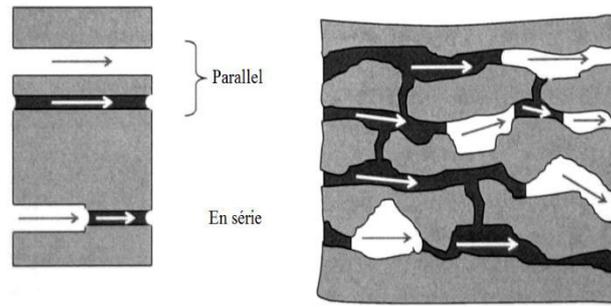


Figure I.12 : Transport d'humidité à travers le réseau poreux avec diffusion de vapeur et succion de liquide (LO. Nilsson, 2003) [17].

La figure I.12 montre l'existence des îlots liquides qu'ils agissent comme des raccourcis pour le transport de la vapeur dans le milieu poreux. Dans le cas non isotherme, un gradient de température à travers un pore engendre une condensation de la vapeur sur le côté chaud d'îlot liquide (côté froid du pore rempli d'air), et s'évapore du côté froid d'îlot liquide (côté chaud du pore qui suit rempli d'air). De cette manière, le gradient de température induit un transport d'humidité dans la direction du gradient de température (également dans la direction du gradient de pression de vapeur), jusqu'à ce qu'il y ait un équilibre du flux capillaire liquide vu la différence de la courbure (JR. Philip and DA. De Vries, 1957) [28].

Dans le système poreux, lorsqu'il existe une couche absorbante d'eau dans les pores des parois, mais pas assez d'eau pour permettre la condensation par capillarité, un transport parallèle de la diffusion de vapeur d'eau et d'un liquide sous forme de diffusion en surface peut avoir lieu.

Théoriquement, pour que la migration de cette humidité adsorbée se produise, la force motrice est le gradient d'humidité relative, mais il est peu probable que ce transport affecte le transport total (JR. Philip and DA. De Vries, 1957) [28]. Plutôt, pour augmenter la teneur en humidité, la température engendre une domination du gradient de potentiel capillaire. Cependant, (M. Krus, 1991) [29], à référence des travaux qui montrent que le transport induit par la diffusion en surface est remarquable pour  $\varphi > 50 \%$ .

L'interaction de la diffusion de vapeur d'eau et du transport des liquides dans les enveloppes des bâtiments peut être expliquée graphiquement dans la figure I.13. Regardant dans les capillaires d'un composante, on trouve qu'en hiver, la température à l'intérieur du bâtiment, et la pression de vapeur sont plus élevée qu'à l'extérieur. Vu que l'humidité est souvent plus élevée à l'extérieur, le gradient d'humidité relative ou la teneur en humidité va dans le sens opposé.

Si l'élément de construction est sec, la diffusion de vapeur dans le capillaire ne se produit que de l'intérieur vers l'extérieur. L'eau absorbée dans les murs reste inamovible en raison des forces

d'adhérence élevées (HM. Künzeli, 1995) [22]. Lorsque l'humidité totale augmente, les pores des parois sont recouverts d'un film d'adsorbat qui est plus épais à l'extérieur qu'à l'intérieur, et cela car l'humidité relative à l'extérieur est plus élevée qu'à l'intérieur.

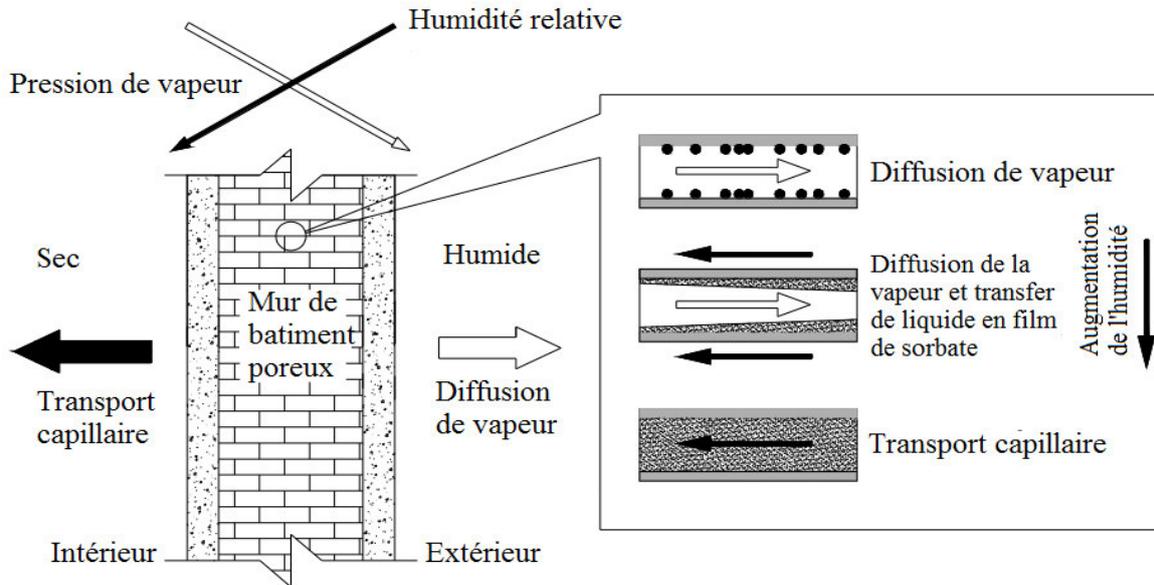


Figure I.13 : Schéma illustrant le transport d'humidité dans un mur de bâtiment poreux (conditions hivernales).

### I.6.2.1 Transport de vapeur d'eau

Le transport de vapeur d'eau dans les matériaux de construction poreux peut être classifié sous trois formes: diffusion de gaz, diffusion de Knudsen, et diffusion thermique. Dans les pores de rayon plus grand que  $10^{-6}$  [m], la diffusion des gaz (diffusion de Fick's) est dominée (CR. Pedersen, 1990) [18]. La diffusion de Knudsen, également appelée effusion, est une diffusion de vapeur d'eau qui se produit dans des capillaires très étroits, où le parcours moyen libre des molécules de vapeur d'eau est supérieur aux dimensions des pores, autour de  $10^{-8}$  [m] (M. Qin, 2007) [20]. La diffusion thermique est basée sur la différence de densité entre l'air sec et les molécules de vapeur, ce qui fait passer la vapeur d'eau du froid au chaud et entraîne donc le transport contre le gradient de température.

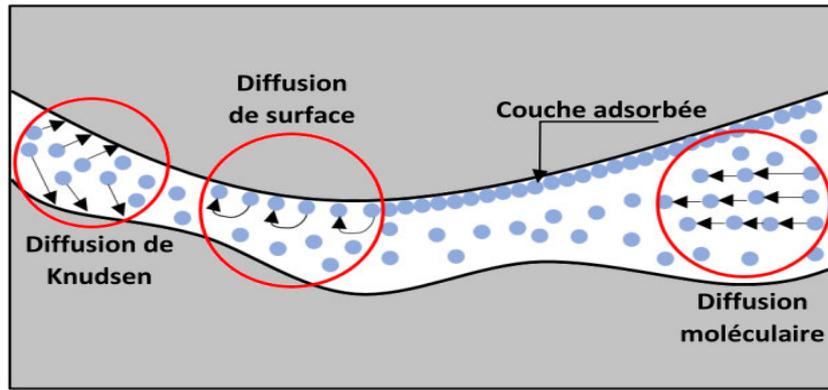


Figure I. 14 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore.

En physique du bâtiment, le transport de vapeur d'eau est généralement considéré comme une diffusion gazeuse dans les pores de tout matériau de construction poreux (H. Hens, 1996 [1]; N. Nilsson, 2003 [17] ; CR. Pedersen, 1990 [18]).

#### ✓ *Transport de vapeur iso-thermique*

La théorie sur le transport de vapeur dans les matériaux poreux est à l'origine basée sur la loi de Fick de diffusion des ions dans l'eau. La loi de Fick est généralement donnée pour un contenu de vapeur  $v$  comme :

$$g_a = -D_a \nabla v \quad (\text{I.18})$$

Ou  $g_a$  est la densité du vapeur transporté dans l'air [ $kg/(m^2 s)$ ],  $D_a$  le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air stagnant [ $m^2/s$ ]. Cette loi simple est adoptée en physique du bâtiment pour décrire la diffusion de la vapeur d'eau dans les matériaux poreux.

Le moteur de transport de la diffusion de la vapeur d'eau selon l'équation I.18 est  $v$ . La pression totale  $P$  [Pa], et la température jouent un rôle dans le transport, voir équation I.19 (M. Qin, 2007) [20]:

$$D_a = \frac{2.306 \cdot 10^{-5} P_0}{R_v T P} \left( \frac{T}{273.15} \right)^{1.81} \quad (\text{I.19})$$

Ou,  $P_0$  est la pression atmosphérique standard [Pa] et  $R_v$  est le constant des gaz du vapeur d'eau [ $J/(kg K)$ ]. Concernant la diffusion de vapeur d'eau à travers un matériau poreux, la densité du flux de vapeur d'eau  $g_v$  [ $kg/(m^2 s)$ ] peut être donnée par :

$$g_v = -\frac{D_a}{\mu} \nabla v \quad (\text{I.20})$$

Ou le facteur de résistance de la vapeur d'eau  $\mu$  [-], qui représente le rapport des coefficients de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air et dans le matériau de construction, est défini comme :

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_v} \quad (I.21)$$

Ou,  $\delta_v$  est le coefficient de la diffusion de la vapeur d'eau en matériaux poreux [ $m^2/s$ ].

La diffusion de vapeur d'eau dans un matériau poreux est donc considérée comme une diffusion dans l'air, mais avec des réductions en raison du système de pores, et est en fonction des paramètres tels que la porosité et la tortuosité. La diffusion de vapeur d'eau à travers certains matériaux isolants fibreux de très faible densité est pratiquement égale à la diffusion dans l'air stagnant. La teneur en vapeur  $v$  et la pression de vapeur d'eau  $P_v$ , ont la relation suivante appliquant la loi de gaz idéal :

$$v = \frac{P_v}{R_v T} \quad (I.22)$$

L'équation I.18 devient, sous les conditions isothermes :

$$g_v = -\delta_p \nabla P_v = -\delta_v \nabla v \quad (I.23)$$

Ou la perméabilité de vapeur d'eau  $\delta_p$  [ $kg/(Pa m s)$ ] est déterminée comme suit :

$$\delta_p = \frac{\delta_v}{R_v T} \quad (I.24)$$

#### ✓ *Transport de vapeur d'eau non isotherme*

Quand un gradient de température est appliqué, il existe (selon le tableau I.2), deux formes de transport qui assurent la migration de vapeur d'eau, i.e. diffusion de gaz et diffusion thermique. Selon la loi de Fourier, la diffusion thermique peut être exprimée comme une densité de vapeur non isotherme  $g_{T,v}$  [ $kg/(m^2 s)$ ] :

$$g_{T,v} = -D_{T,v} \nabla T \quad (I.25)$$

Ou,  $D_{T,v}$  est le coefficient de diffusion de vapeur non isotherme [ $kg/(K m s)$ ]. L'équation de transport non isotherme (équation I.25) donné par JR. Philip and DA. De Vries, 1957 [28] est en général considéré comme l'équation dominante pour le transport de la vapeur d'eau sous un gradient de température, où la première partie de l'équation représente la diffusion de vapeur entraînée par un gradient de pression de vapeur, et la deuxième partie diffusion thermique entraînée par le gradient thermique:

$$g_v = -\delta_p \nabla P_v - D_{T,v} \nabla T \quad (I.26)$$

Habituellement, la pression de vapeur saturante  $P_{v,sat}$  dépend fortement de la température et est considérée comme l'effet principal non isotherme dans la plupart des modèles d'humidité

(CR. Pedersen, 1990) [18]. De plus, en augmentant le gradient de température dans le matériau humide, la perméabilité à la vapeur d'eau augmentera également selon (CR. Pedersen, 1990) [18]. Si seulement la température augmente, sans gradient, la perméabilité à la vapeur d'eau augmentera également à certains égards, en particulier pour les fortes humidités relatives.

### **I.6.2.2 Transport d'eau liquide**

Généralement, le début du transfert liquide est supposé à une teneur en eau critique  $w_{cr}$ , qui est déterminé par l'existence d'une phase liquide continue (R. Peuhkuri, 2003) [16]. Le transfert de vapeur d'eau pure diminue à partir de ce point avec l'augmentation de la teneur en humidité jusqu'à ce que le transfert de la vapeur devienne nul à la saturation.

Le transport de la série vapeur-liquide-vapeur, où les îlots de liquides agissent comme des circuits courts pour le transfert de vapeur, est normalement traité comme un transport de vapeur. Une raison de distinguer entre le transport de vapeur et de liquide est que le transfert des sels solubles sous des gradients thermiques a lieu dans la phase liquide. JR. Philip et DA. De Vries (1957) [28] appelé un tel transfert un transfert liquide quand il n'y avait que le transport de liquide dans les pores saturés (*figure I.10* état 4). Tout qui reste est considéré comme un transfert de vapeur (*figure I.10*, états 1-3). Le transport de vapeur et de liquide est souvent distingué par son taux d'humidité critique  $\omega_{cr}$ .

#### **✓ Transport de liquide iso-thermique**

Utilisant la Loi de Darcy, le transport d'humidité liquide peut être exprimé en tant que densité de flux d'humidité liquide  $g_l$  [kg/m<sup>2</sup>s] avec les gradients de pression de l'eau dans les pores et la viscosité de l'eau :

$$g_l = \frac{-\rho k_p}{\eta} \frac{\partial P_c}{\partial x} \quad (I.27)$$

Où  $k_p$  est la perméabilité [m<sup>2</sup>],  $\eta$  est la viscosité [kg/m s],  $P_c$  est la pression d'eau porale (capillaire) qui peut être calculé utilisant l'équation (I.7).

Pour  $\omega < \omega_{cr}$  l'essentiel du transport d'humidité peut être considéré comme une diffusion de vapeur d'eau. Au-dessus de ce niveau, le transport de liquide existe par succion capillaire. Cependant, comme indiqué plus haut, il existera déjà des transports liquides à des taux d'humidité relativement bas. De plus, il est difficile de déterminer la limite du début du transport du liquide, qui dépend évidemment de la structure des pores des différents matériaux. (JR. Philip and DA. De Vries, 1957) [28] a expliqué l'existence du transfert liquide à des taux d'humidité très bas, transport en série vapeur-liquide-vapeur.

Le transport total d'humidité augmente avec l'augmentation de la teneur en humidité, car la conductivité hydraulique dans les petits pores est supérieure à la perméabilité à la vapeur d'eau (R. Peuhkuri, 2003) [16]. La diffusion en surface implique le transport d'un sorbat, par ex. eau liquide. Lorsque la teneur en humidité dépasse une certaine valeur (c'est-à-dire lorsqu'il y a plus d'humidité sur les surfaces des pores internes que de simples couches multimoléculaires), l'humidité devient mobile (HM. Künzle, 1995) [22].

Les forces de liaison de ces molécules externes ne sont pas aussi fortes que celles liées à la paroi des pores. Ce transport a lieu lorsque le taux d'humidité est inférieur à celui de la saturation capillaire, où les pores capillaires (rayon  $r < 10^{-7} m$ ) commencent à être remplis et le transport de liquide prend le relais (R. Peuhkuri, 2003) [16]. Selon (HM. Künzle, 1995) [22], la diffusion en surface des produits en papier commence à  $\varphi = 30\%$ , et pour le grès à  $\varphi = 60\%$ . La teneur en humidité  $\omega$  est utilisée comme moteur de transfert pour la densité de flux de diffusion en surface.

$$g_{s-l} = -D_{s,l}\nabla\omega \quad (I.28)$$

Où  $D_{s,l}$  est le coefficient de diffusion surfacique [ $m^2/s$ ], si un potentiel continue, comme exemple l'humidité relative, l'équation de diffusion en surface peut également être donnée par l'humidité relative en tant que moteur de transfert  $\varphi$ .

$$g_{s,l} = -D_{\varphi}\nabla\varphi \quad (I.29)$$

Où  $D_{\varphi}$  est le coefficient de conduction liquide [ $kg/m s$ ] pour  $\varphi > 95\%$ .

#### ✓ *Transport de liquide non isotherme*

Lors de l'introduction d'un gradient de température, les mécanismes suivants affectent le transport des liquides:

- 1) La viscosité d'un liquide diminue lorsque la température augmente (JR. Philip and DA. De Vries, 1957) [28]. Le résultat est un transport de liquide croissant pour des températures croissantes. Cependant, cet effet est minimal comparé à l'augmentation de la teneur en eau (M. Qin) [20].
- 2) L'effet de Soret implique un transfert d'eau liquide le long d'un gradient de température (du chaud au froid). L'écoulement liquide dû à un gradient de température, appelé effet de Soret, peut être exprimé par :  $g_{T,l} [kg/m^2 s]$  (AV. Luikov, 1966) [30].

$$g_{T,l} = -D_{T,l}\nabla T \quad (I.30)$$

Où  $D_{T,l}$  est le coefficient du transport du liquide non-isotherme [ $kg/K m s$ ]. (AV. Luikov, 1966) [30] exploité avec un coefficient de Soret .i.e. le rapport de diffusivité thermique  $D_T$  et la diffusivité de l'humidité  $D_\omega$ . La diffusion superficielle peut également être considérée comme un transport non isotherme, car l'humidité relative est fonction de la température. L'équation bien connue de l'écoulement de liquide dans des conditions non isothermes selon (JR. Philip and DA. De Vries, 1957) [28] est :

$$g_l = -D_{T,l}\nabla T - D_{\omega,l}\nabla\omega \quad (I.31)$$

### I.6.2.3 Transport de l'humidité totale

Le transport de la vapeur d'eau pure à une humidité relative très basse, ou le transport de liquide dans un milieu saturé, n'existent que dans des conditions très limitées. Dans la plupart des cas, différentes combinaisons de ces formes de transport existent. Dans ce travail, un tel transport est appelé transport d'humidité totale. Pour un système poreux, la dépendance à l'humidité du flux total d'humidité devrait être vue comme la *figure I.15*, avec une séparation en diffusion de vapeur et en transport de liquide selon l'équation (I.32).

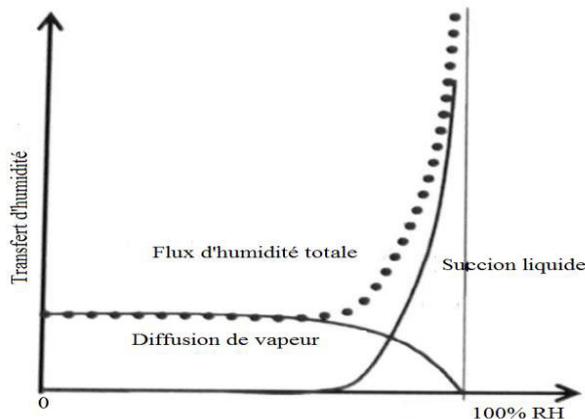


Figure I.15: Transport d'humidité dans un système de pores combinant la diffusion de vapeur et le transport de liquide (LO. Nilsson, 2004) [27].

Dans cette section, la mise en point est sur les phénomènes de transport total dans des conditions non isothermes.

#### ✓ Les moteurs potentiels de transfert

Selon la thermodynamique, le nombre de forces motrices est égal aux flux impliqués. Par conséquent, pour le transport couplé de chaleur et d'humidité, seules deux forces sont considérées comme nécessaires pour un modèle, lorsque le flux d'air est négligé, et la distinction entre le transport d'humidité par vapeur et liquide n'est pas considérée. Le coefficient de transport d'humidité est différent pour chaque force motrice. Bien que divers forces motrices

existent, comme indiqué dans (H. Hens, 1996) [1], le débat reste ouvert sur les potentiels à utiliser pour modéliser le transfert de chaleur et d'humidité. Ici, selon H. Hens (1996) [1], il a été proposé que les seuls moteurs "légaux" soient les potentiels continus sur les frontières des matériaux, i.e. la température, l'humidité relative, la pression capillaire, la pression de vapeur, et la teneur en vapeur  $v$ .

✓ ***Transport d'humidité total non isotherme***

Lorsqu'un transfert de température est introduit, le transfert non isotherme est plus compliqué, comme cela a déjà été discuté dans les sections précédentes. Cependant, il existe des façons simplifiées de présenter mathématiquement ce transport d'humidité non isotherme.

Basé sur les équations de transport non isothermes (équation I.26 and I.32) donnée par (JR. Philip and DA. De Vries, 1957) [28]: La densité de flux d'humidité totale  $g$  [ $kg/m^2s$ ] à travers un matériau de construction poreux dans une région hygroscopique peut être exprimée en termes de la pression de vapeur d'eau  $P_v$  et la température  $T$  comme dans l'équation (I.32) :

$$g = g_v + g_T = -\delta_p \nabla P_v - D_T \nabla T \quad (I.32)$$

Ou  $D_T$  est le coefficient de diffusion de l'humidité thermique [ $kg/(K m s)$ ], Cette équation a été utilisée, parmi d'autres  $\delta_p$  est supposé inclure un transfert de liquide pour les fortes humidités relatives (M. Qin) [20]. Non seulement le gradient de température lui-même mais le gradient de teneur en humidité subséquent dans des conditions non isothermes peuvent également induire un transport de l'humidité dans la même direction ou dans la direction opposée au gradient de pression de vapeur. Le flux d'humidité totale  $g$  peut donc aussi être donné sous forme de la pression de vapeur d'eau  $P_v$  et la teneur en humidité  $\omega$ :

$$g = g_v + g_l = -\delta_p \nabla P_v - D_{\omega,l} \nabla \omega \quad (I.33)$$

Ou,  $D_{\omega,l}$  est le coefficient de diffusion liquide [ $m^2/s$ ]. Si un potentiel continu sur les limites du matériau est préféré, ex. dans les travaux de (HM. Künzle, 1995) [22], le gradient d'humidité relative peut être utilisé à la place du gradient de la teneur en humidité. Dans l'équation (I.34),  $g_l$  est le transport entraîné par un gradient de l'humidité relative.

$$g = g_v + g_l = -\delta_p \nabla P_v - D_\varphi \nabla \varphi \quad (I.34)$$

Ou,  $\delta_p$  est supposé inclure le transfert de vapeur pure, tandis que  $D_\varphi$  représente le transport de liquide (transport capillaire et diffusion superficielle).

Enfin, le flux total d'humidité  $g$  peut aussi être donné en tant que la somme de la pression de vapeur d'eau  $g_v$  et la succion capillaire  $g_l$  comme l'équation I.35, (CR. Pedersen, 1990) [18]:

$$g = g_v + g_l = -\delta_p \nabla P_v - K P_c \nabla (\ln P_c) \quad (I.35)$$

Ou,  $\delta_p$  est en fonction du RH et peut donc non seulement signifier la diffusion de vapeur pure.

La potentielle pression capillaire  $g_l$  donne le transport liquide. Toutes ces équations peuvent traiter au moins une partie des processus de transport impliqués, mais il est évident que cela dépend de la structure des pores du matériau, processus de transport actifs sous le gradient de température. (R. Peuhkuri, 2003) [16]. En conséquence, certains modèles conviendront mieux à certains matériaux qu'à d'autres.

#### I.6.2.4 Transport d'humidité dynamique

Pour le transport dynamique de l'humidité, l'équation qui gouverne la conservation de la masse dans une unité de volume peut être exprimée comme suit:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\nabla g + S \quad (I.36)$$

Ou,  $\nabla g$  est la divergence du flux d'humidité, S est le terme source d'humidité [-], et t est le temps. Le transport dynamique de la vapeur d'eau peut être décrit par l'équation I.37 (on combinant l'équation I.23 et I.36, négligeant le terme source d'humidité pour un cas unidimensionnel) :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) \quad (I.37)$$

La connexion entre la variable d'état  $w$  et la force motrice  $\frac{\partial P_v}{\partial x}$  dans l'équation I.37 est définie par la capacité d'humidité du matériau (M. Qin) [20]. Dans la condition isotherme, la force motrice dans équation I.37 peut également être exprimée en teneur en humidité  $\omega$  :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \quad (I.38)$$

Ou,  $D_\omega$  est le coefficient de diffusion d'humidité [ $m^2/s$ ].

Pour le cas non-isotherme, il est difficile de trouver un paramètre unique régissant le transport dynamique de l'humidité. Nous discuterons en détail le transfert dynamique couplé de chaleur et d'humidité dans les sections suivantes.

### I.6.3 Accumulation de chaleur et transport dans les matériaux poreux humides

#### I.6.3.1 Accumulation de chaleur

La chaleur contenue dans les matériaux dans des conditions isobares est appelée l'enthalpie. Dans une gamme de température de (-20 °C\_40 °C) qui est préoccupant dans la physique du bâtiment, il existe une relation approximativement linéaire entre l'enthalpie d'un matériau et sa température. L'enthalpie d'un matériau de construction sec, liée à l'enthalpie à 0 ° C, est donc décrite par l'équation suivante:

$$H_s = \rho C_p T \quad (I.39)$$

Ou,  $\rho$  est la densité du matériau [ $kg/m^3$ ], et  $C_p$  est la chaleur spécifique [ $J/(kg K)$ ]. Dans le cas de la plupart des matériaux de construction, il faut ajouter à cette enthalpie l'enthalpie de l'eau contenue dans le matériau. Cependant, l'enthalpie de l'eau dépend des états physiques existants, comme mentionné ci-dessus, difficiles à définir avec précision dans les micropores.

La *figure I.16* montre l'évolution de l'enthalpie liée au volume de la glace, de l'eau liquide et de la vapeur saturée en fonction de la température. À des températures inférieures à 0 ° C, l'enthalpie de l'eau se situe dans la zone ombragée. La détermination exacte de l'enthalpie d'un mélange de phases n'est possible que lorsque la distribution du rayon des pores ou la fonction de stockage de l'humidité du matériau de construction est connue (HM. Künzle, 1995) [22].

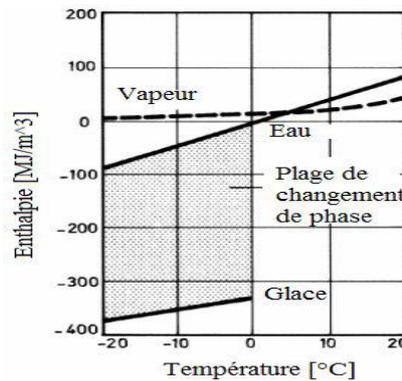


Figure I.16 : Enthalpie liée au volume des différents états physiques de l'eau à pression normale en fonction de la température (l'enthalpie de référence est l'enthalpie de l'eau à 0 ° C) (HM. Künzle, 1995) [22].

La ligne pointillée décrit l'enthalpie de la vapeur d'eau dans l'espace des pores libres dans des conditions saturées, en tenant compte des effets de chaleur latente pendant le changement de phase pour maintenir l'état de saturation. Cependant, cela exclut tout transport de cette vapeur d'eau.

La variation de l'enthalpie de vapeur saturante avec la température, qui constitue une mesure de la capacité thermique de l'humidité des pores, est mineure par rapport à la modification correspondante de l'enthalpie de l'eau liquide et de la glace dans la plage des températures indiquée. Elle est donc ignorée.

Bien que le changement d'enthalpie lié à la température de la vapeur d'eau saturée soit négligeable en raison de sa faible densité, il joue un rôle majeur dans le changement de phase de l'eau en glace (zone ombragée). Ainsi, l'équation suivante peut être utilisée pour déterminer l'enthalpie de l'eau dans le matériau de construction:

$$H_s = \left[ (\omega - \omega_e) c_\omega + \omega_e c_e - h_e \frac{d\omega_e}{dt} \right] t \quad (I.40)$$

Où, la teneur de la glace dans le matériau de construction  $\omega_e$  est déterminée à l'aide de la fonction de stockage de l'humidité et de la relation entre le potentiel de limite de congélation et la température.

### I.6.3.2 Conduction thermique

La conduction thermique dans les matériaux de construction humides ne décrit que l'effet de l'eau localisée sur le transfert de chaleur. Le transfert de chaleur dû à l'évaporation et à la condensation sera traité dans la section suivante. La dépendance de la conductivité thermique sur la teneur en humidité est décrite dans les travaux de (J. Cammerer et al, 1985) [31] pour divers matériaux de construction.

Comme les mesures standard incluent également l'effet de la diffusion de vapeur d'eau, les résultats des mesures effectuées dans l'appareil à plaque chauffante protégée pour des matériaux diffusibles, tels que la laine minérale, ne peuvent être utilisés qu'avec prudence. Selon (HM. Künzle, 1986) [32] la conductivité thermique dépendante de l'humidité  $\lambda(\omega)$  des matériaux de construction minéraux est donné par :

$$\lambda(\omega) = \lambda_0 (1 + b \cdot \omega / \rho_s) \quad (I.41)$$

Ou,  $\lambda_0$  est la conductivité thermique du matériau de construction sec  $[W/(m K)]$ ,  $\rho_s$  est la densité apparente du matériau de construction sec  $[kg/m^3]$ . Le supplément b est un rapport en pourcentage indique l'augmentation de la conductivité thermique par rapport la masse d'humidité. Sa valeur est déterminée par le type de matériau de construction, mais dans le cas de matériaux hygroscopiques, il est en grande partie indépendant de leur densité apparente. Le *tableau I.3* répertorie un certain nombre de ces suppléments pour divers matériaux de construction.

Bien que la glace ait une conductivité thermique quatre fois supérieure à celle de l'eau, il n'est généralement pas possible de différencier la conductivité thermique au-dessus et au-dessous du point de congélation, car il n'existe aucune valeur de mesure correspondante pour la plupart des matériaux de construction. Comme il est examiné dans les travaux de (O. Krischer, 1978) [33], le contenu indique que, dans les différentes eaux, les différences de conductivité thermique au-dessus et au-dessous de 0 [° C] sont moins importantes que prévu compte tenu de la différence de conductivité entre la glace et l'eau.

| Matériaux de construction            | Densité apparente [kg/m <sup>3</sup> ] | Conductivité thermique [W/(m K)] | Supplément d'humidité [%/M, -M] |
|--------------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------|
| Béton cellulaire                     | 400-800                                | 0.09-0.19                        | 4                               |
| brique de silice de chaux            | 1800                                   | 0.7                              | 8                               |
| béton ponce, béton d'argile expansé  | 1400-1800                              | 0.5-1.0                          | 4                               |
| béton léger avec supplément d'PSE    | 300-900                                | 0.07-0.28                        | 3                               |
| Béton normale                        | 2300                                   | 1.3-1.5                          | 8                               |
| Bois                                 | 400-700                                | 0.08-0.15                        | 1.5                             |
| Mousse de polystyrène expansé (MPSE) | 15-30                                  | 0.04                             | 0.05*)                          |
| Mousse de polystyrène extrudé (MPSX) | 28-40                                  | 0.03                             | 0.1*)                           |
| Mousse de polyuréthane               | 40-80                                  | 0.03                             | 0.4* <sup>1</sup> )             |

*Tableau I.3 : Supplément d'humidité (en pourcentage) en termes de conductivité thermique de divers matériaux de construction, lié à la teneur en eau en pourcentage en masse, selon (J. Cammerer et al, 1985) [31].*

### **I.6.3.3 Flux de chaleur avec changement de phase**

Le changement de phase à l'intérieur des matériaux de construction a un effet important sur le transfert de chaleur, en particulier lorsque les matériaux de construction sont exposés à une charge d'humidité élevée sous un gradient de température. Les travaux d'HM. Künzle (1995) [22] montrent que le flux de chaleur peut être doublé en raison de la diffusion de vapeur à travers la couche isolante dans certaines conditions de forte humidité. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces flux d'enthalpie dans une équation distincte. Normalement, l'interaction

---

<sup>1</sup> Les valeurs ne sont valables que jusqu'à une teneur en eau d'environ 100% en masse. En cas d'isolation en mousse organique, il n'y a pas de relation linéaire entre la conductivité thermique et la teneur en eau.

de la diffusion de vapeur et du changement de phase peut être exprimée sous la forme d'un terme source dans l'équation du bilan thermique:

$$S_h = h_{l,v} \nabla g_v \quad (\text{I.42})$$

Ou,  $S_h$  est une source de chaleur ou un dissipateur thermique due à la condensation ou à l'évaporation [ $J/(s m^3)$ ],  $h_{l,v}$  est la chaleur latente du changement de phase [ $J/kg$ ],  $g_v$  est la densité de flux de la diffusion de la vapeur d'eau [ $kg/(s m^2)$ ].

La chaleur latente du changement de phase consiste en l'enthalpie spécifique d'évaporation de l'eau pure ( $h_{l,v} = 2500 [kJ/kg]$ ), et l'enthalpie de sorption dépendante du matériau.

#### **I.6.4 Principaux modèles physiques du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction**

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études et méthodes de calcul permettant de prévoir le transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction poreux ont été développées. H. Hens (1996) [1] a procédé à une revue critique ; et une liste exhaustive d'études et de méthodes de calcul permettant de quantifier le transport couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction a été répertoriée dans ses rapports.

Le choix des moteurs de transferts considérés et les hypothèses adoptées varie entre chaque modèle de transfert et selon l'approche considérée dans la modélisation. Pour cela on peut distinguer deux approches essentielles dans la modélisation du transfert couplé de chaleur et d'humidité : une approche par homogénéisation et changement d'échelle microscopique-macroscopique et une approche phénoménologique macroscopique.

##### **I.6.4.1 Modélisation par homogénéisation**

Vue la morphologie structurale hétérogène des matériaux de construction qui sont considérés comme des milieux poreux rend la description des phénomènes physiques très complexe, et surtout si toutes les hétérogénéités sont considérées. Alors, l'approche de la modélisation par homogénéisation est entreprise afin de s'affranchir de cette difficulté, cette dernière permet de représenter les milieux poreux fortement hétérogènes à l'échelle microscopique par un milieu représentatif à une grande échelle homogène continu ayant le même comportement en moyenne.

En effet, la modélisation par homogénéisation permet l'obtention d'un comportement physique macroscopique des milieux poreux prend en considération une description microscopique des phénomènes physiques mises en jeu.

Il existe plusieurs méthodes d'homogénéisation qui peuvent être regroupées dans trois types de méthodes :

- Homogénéisation par pris de moyenne (S. Whitaker, 1977, 1986) [34, 35], (E. Samson et al, 1999) [36], ou les phénomènes physiques sont modélisés à l'échelle du pore et par la suite un volume élémentaire représentatif (VER) est considéré, pour avoir un milieu fictif équivalent (*figure I.17*) en exprimant une moyenne du champ de variables macroscopiques dans un domaine spatial représentative.

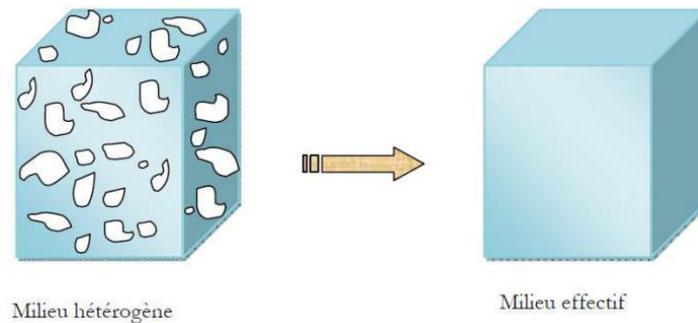


Figure I.17 : Homogénéisation par prise de moyenne volumique (Y. Ferroukhi, 2015) [6]

La méthode de VER est la méthode la plus fréquente dans le domaine du transfert hygrothermique ou plutôt dans le domaine des écoulements et transferts en milieux poreux.

- Homogénéisation périodique (E. Sanchez-Palencia, 1985) [38], (C. Moyne and M. Murad, 2006) [39], et (T. Lemaire et al, 2007) [40], cette dernière consiste à supposer que la microscopique du domaine macroscopique est assimilée à une répétition périodique d'une cellule élémentaire définie comme une cellule de base (*figure I.18*).

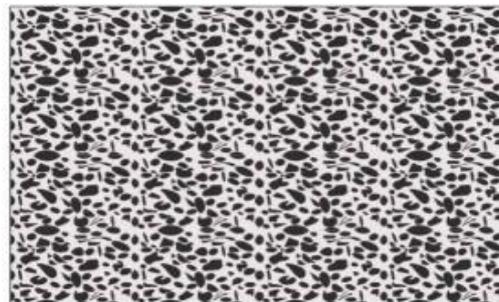


Figure I.18 : Microstructure constituée de la répartition périodique de la cellule (W. Mchirgui, 2012) [42]

Cette approche est relativement moins utilisée dans le domaine du transfert hygrothermique. Peut des travaux ont été réalisée dans ce sens, on trouve le transfert hydrique dans un milieu à double porosité par (J. Lewandowska and J. Laurent, 2001) [41] , transfert hydrique dans les matériaux cimentaire insaturés par (W. Mchirgui, 2012) [42] , transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité par (F. Bennai, 2017) [43] pour but de comprendre l'influence des paramètres géométrique des éco-matériaux d'enveloppe tels que le béton de chanvre, sur le mécanismes de transferts hygrothermique.

- On peut trouver d'autre approche d'homogénéisation appliquée pour des milieux à microstructure aléatoire ou désordonnées utilisant des méthodes statistiques, développé par (S. Maghous et al, 2007) [44], (J. Snahuja et al, 2007) [45], et (Q. Zhu et al, 2009) [46].

Dans ce travail de thèse, la modélisation par homogénéisation ne sera pas abordée. Un autre type d'approche a été choisi basé sur phénologie du problème physique utilisant le principe de conservation d'énergie et de masse.

#### **I.6.4.2 Modélisation phénoménologique**

Généralement, la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments est à la base d'une approche phénoménologique ou le milieu poreux est considéré comme un milieu homogène, cette supposition permet d'établir les équations de transferts hygrothermiques à partir des principale fondamentale de la thermodynamique (JF. Daïan, 2013) [47].

Les bilans énergétique et massique sont exprimés à l'aide de moteurs de transfert mesurables (Température, teneur en eau, pression de vapeur....) et des coefficients liés explicitement aux propriétés macroscopiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique, perméabilité à la vapeur d'eau,...) déterminés expérimentalement.[Y. Ferroukhi 2015] [6].

##### **A. Modèle de Luikov (1966)**

Le modèle d'AV. Luikov [30] met en évidence le phénomène de la thermo-diffusion, la diffusion de l'eau sous deux formes liquide et vapeur est considéré dépendante des gradients de teneur en eau massique, de la température et de la pression totale. L'humidité peut se déplacer sous forme vapeur sous l'action d'un gradient de concentration en vapeur, l'eau liquide peut se déplacer par un gradient de capillarité :

$$\begin{cases} g_v = -D_v \rho_s \nabla u - D_{v,T} \rho_s \nabla T \\ g_l = -D_l \rho_s \nabla u - D_{l,T} \rho_s \nabla T \end{cases} \quad (I.43)$$

Avec :

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

$g_l$  [ $kg/m^2 s$ ] Est la densité de flux massique de l'eau liquide

$D_v$  et  $D_l$  [ $m^2/s$ ] Coefficients de diffusion isotherme de l'eau liquide et de vapeur d'eau

$D_{v,T}$  et  $D_{l,T}$  [ $m^2/s$ ] Coefficients de diffusion non isotherme de l'eau liquide et de vapeur d'eau

$\rho_s$  [ $kg/m^3$ ] Masse volumique du matériau

$u$  [ $kg/kg$ ] Teneur en eau massique

$T$  [ $K$ ] Température

Un paramètre supplémentaire est appaître dans ce modèle, le taux de changement de phase  $\dot{m}$  définit par :

$$\dot{m} = \epsilon \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} \quad (I.44)$$

$\epsilon$  Représente le rapport entre le flux de vapeur d'eau et le flux massique total, si  $\epsilon = 1$ , le transfert d'humidité se manifeste sous forme de vapeur, et si  $\epsilon = 0$ , il se déroule sous forme liquide.

Le système d'équations aux dérivées partielles du modèle de AV. Luikov est ainsi donné par :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div} (D_m (\text{grad } u + \delta_s \text{ grad } T)) \\ \rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (D_T \text{ grad } T) + L_v \epsilon \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (I.45)$$

Ou,

$L_v$  [ $J/kg$ ] Chaleur latente de vaporisation

$D_m = D_v + D_l$  [ $m^2/s$ ] Coefficient de diffusion total

$\delta_s = \frac{D_{v,T} + D_{l,T}}{D_v + D_l}$  [-] Coefficient de thermo-diffusion

$C_p$  [ $J/kg K$ ] La capacité thermique du matériau

## B. Modèle de Philip et De Vries (1957)

Ce modèle est plus classique, JR. Philip et DA. De Vries, 1957 [28] ont développé une théorie qui décrit le transfert hygrothermique comme étant fonction de la teneur en eau volumique et de la température. Ils ont considéré que le transfert de chaleur est décrit uniquement par conduction pure et un transfert lié au changement de phase. L'advection

thermique liée aux gradients de pression de vapeur et de pression totale est non considérée. Le transport de la vapeur d'eau est un processus diffusionnel régi par la loi de Fick. Utilisant la loi Darcienne pour exprimer le flux en phase liquide :

$$\begin{cases} g_v = -\rho_l (D_{v,e} \nabla v - D_{v,T} \nabla T) \\ g_l = -\rho_l (D_{l,e} \nabla v - D_{l,T} \nabla T - \lambda_h) \end{cases} \quad (I.46)$$

Avec,

$D_{v,e}$  et  $D_{l,e}$  [ $m^2/s$ ] Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide ;

$D_{v,T}$  et  $D_{l,T}$  [ $m^2/s.K$ ] Coefficient de diffusion non-isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide ;

$\lambda_h$  [ $m/s$ ] Conductivité hydraulique du matériau.

$\rho_l$  [ $kg/m^3$ ] Masse volumique de l'eau ;

$v$  [ $m^3/m^3$ ] Teneur en eau.

Le système d'équation décrivant les bilans massique et énergétique est représenté dans l'équation :

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = \text{div} (D_v (\text{grad } v + \text{div}(D_T \text{grad } T) + \text{grad } \lambda_h) \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{grad } T) + L_v \text{div} (D_{v,e} \text{grad } v) \end{cases} \quad (I.47)$$

Avec :

$D_v$  [ $m^2/s$ ] Coefficient de diffusion d'humidité isotherme ;

$D_T$  [ $m^2/s.K$ ] Coefficient de diffusion d'humidité non-isotherme ;

$L_v$  [ $J/kg$ ] Chaleur latente de vaporisation ;

$C$  [ $J/kg.K$ ] La capacité thermique du matériau ;

$\lambda$  [ $W/m.K$ ] La conductivité thermique.

### C. Modèle de Pedersen (1992)

CR. Pedersen, 1992 [48] a décomposé le transfert hydrique en deux équations de transport liquide et vapeur, ou il choisit la pression de la vapeur comme moteur du transport pour la vapeur et la pression capillaire pour la phase liquide, dans le but d'assurer une continuité du transfert capillaire pour les composants de parois multicouches. Le bilan massique a été exprimé comme suit :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \text{div} (\delta_p \text{grad } P_v - \lambda_h P_c \text{grad}(\ln P_c)) \quad (I.48)$$

Ou :

$v$  [ $m^3/m^3$ ] La teneur en eau volumique ;

$\delta_p$  [kg/(m . s . Pa) ] La perméabilité à la vapeur d'eau ;

$\lambda_h$  [kg/(m . s . Pa) ] La conductivité hydraulique ;

$P_v$  [Pa] Pression de vapeur ;

$P_c$  [Pa] Pression de succion capillaire.

#### D. Modèle de Künzle (1995)

HM. Künzle, 1995 [22] a considéré la température et l'humidité relative comme moteur de transferts hygrothermique, le transfert de la phase vapeur est assuré par l'effet d'un gradient de pression de vapeur, et le transfert de la phase liquide est assuré par les forces capillaires entre fluides et ainsi entre la phase fluide et solide. Le système des équations différentielles de ce modèle sont écrites comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{div} (D_\varphi \text{grad } \varphi + \delta_p \text{grad} (\varphi \cdot P_{v,sat})) \\ \frac{\partial H}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{grad } T) + L_v \text{div} (\delta_p \text{grad} (\varphi \cdot P_{v,sat})) \end{cases} \quad (I.49)$$

Ou,

$H$  [J] Enthalpie totale du matériau ;

$\varphi$  [-] Humidité relative ;

$P_{v,sat}$  [Pa] Pression de vapeur saturante ;

$\frac{\partial \omega}{\partial \varphi}$  [-] Pente de la courbe d'isotherme d'adsorption ;

$D_\varphi$  [kg/(m . s) ] Coefficient de conduction liquide ;

La pression de la vapeur saturante présente dans les deux équations différentielles est dépendante de la température, elle est considérée comme un terme de couplage entre les évolutions de la température et de l'humidité dans les matériaux poreux de construction.

Ce modèle est utilisé dans le logiciel WUFI (Wärme und Feuchte Instationär), appartient à Fraunhofer Institut Bauphysik (IBP), il représente l'un des outils commerciaux les plus utilisés dans la modélisation 1D et 2D des transferts couplés de chaleur et d'humidité. Il a reconnu plusieurs usages dans les travaux de recherches existant dans la littérature parmi eux ceux d'Y. Ait Ouméziane [49], SH. Ryu [50] et al, M. Barclay et al [51], et d'H. Othmen [52]. En plus ce dernier, a été intégré dans le logiciel COMSOL Multiphasics. Ce logiciel est un environnement interactif destiné à la modélisation et la simulation des problématiques physiques dans tous les domaines de l'ingénierie, de la production, et de la recherche scientifique.

### **I.6.5 Transfert de chaleur et d'humidité aux interfaces dans les bâtiments**

L'accumulation d'humidité dans les composants du bâtiment peut conduire à une mauvaise performances thermiques de l'enveloppe, à la corrosion des métaux et à la détérioration de la structure. En plus des dommages causés à la construction, la migration de l'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment a un effet important sur l'humidité de l'air intérieur et les charges de climatisation, en particulier les charges de refroidissement latentes. En outre, des taux d'humidité ambiants élevés entraîneront une croissance microbienne, qui peut affecter gravement la santé humaine et être une cause d'allergie et de symptômes respiratoires.

Les problèmes d'humidité dans les bâtiments résultent d'un transfert simultané de chaleur et d'humidité dans les enveloppes des bâtiments et l'air intérieur. De nombreux modèles mathématiques pour le transfert d'humidité dans les bâtiments ont été suggérés pour prédire l'effet du transfert d'humidité sur l'humidité de l'air intérieur et la consommation d'énergie du bâtiment (M. Qin, 2007) [20].

Il en va de même pour la modélisation thermique de bâtiments entiers où il existe plusieurs codes informatiques validés. Cependant, peu de modèles existants prennent en compte les interactions hygrothermiques entre l'enveloppe du bâtiment et l'air intérieur. Afin de mieux comprendre l'interaction hygrothermique entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement, une revue de la littérature est présentée dans cette section.

#### **I.6.5.1 Interaction entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement**

L'échange de chaleur et d'humidité entre un élément du bâtiment et son environnement peut être décrit au moyen de conditions aux limites à l'interface entre la paroi et l'air (intérieur ou extérieur), et à l'interface entre deux couches successives de matériaux différents d'une paroi multicouches.

Les deux faces d'une paroi de bâtiment sont exposées à deux environnements différents, un environnement climatique extérieur et l'ambiance habitable intérieure.

A l'interface extérieur, la paroi est soumise à des variations temporaires de température, d'humidités relatives, à un rayonnement de grande et courte longueur d'onde, à une convection forcée due au vent ainsi à l'effet de la pluie. Pour l'ambiance intérieure, la paroi est exposée aussi à la variation temporaire de température, d'humidité relative, au rayonnement de grande longueur d'onde ainsi qu'à la convection naturelle ou forcée tout dépend de la stratégie de

ventilation adoptée. La figure I.19 résume les différentes sollicitations extérieures et intérieures aux interfaces de la paroi.

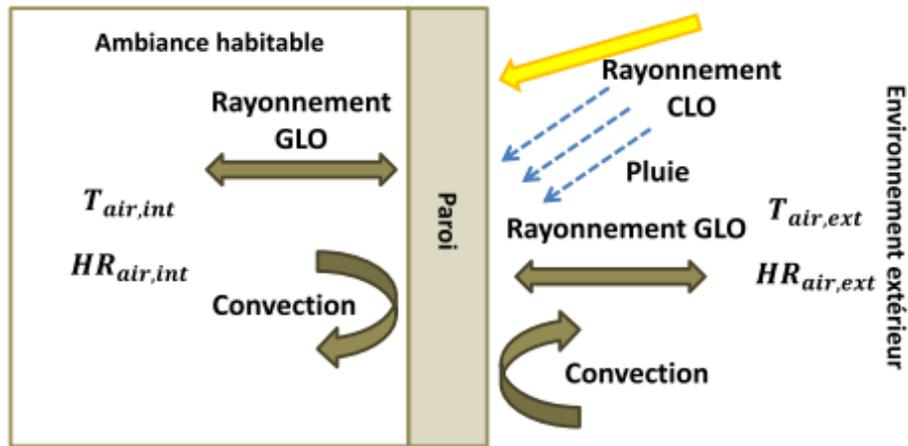


Figure I.19 : les différentes sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment.

### A. Rayonnement

Pour le cas d'un échange thermique radiatif on distingue deux types de rayonnement, un rayonnement de courtes longueurs d'onde (rayonnement solaire), et un rayonnement de grandes longueurs d'onde. Le rayonnement à la surface extérieure de la paroi ( $S_e [W/m^2]$ ) est exprimé comme suit (H. Janssen et al, 2007) [53].

$$S_e = \kappa (S_{dir} + S_{dif}) + \sigma \varepsilon [F_{sol}(T_{sol}^4 - T_e^4) + F_{ciel}(T_{ciel}^4 - T_e^4)] \quad (I.50)$$

Ou,  $S_{dir} [W/m^2]$  et  $S_{dif} [W/m^2]$  sont le rayonnement direct et diffus, respectivement ; obtenus à partir des données météo. Un appareil de mesure de la trajectoire des rayons solaire (R. Kittler, 1981) [54] est utilisé pour projeter le rayonnement direct sur la surface de la construction. La température à la surface du sol ( $T_{sol}[K]$ ) est prise égale à celle de l'air extérieur ( $T_e[K]$ ) (H. Janssen, 2002/ et al) [55]. Pour le calcul de la température du ciel ( $T_{ciel}[K]$ ), plusieurs modèles ont été proposés qui donnent généralement des résultats similaires (H. Janssen, 2002) [55]. Pour notre cas on 'a utilisé le modèle suivant [A.I.N. Korti, 2016] [56] :

$$T_{ciel} = 0.0552 (T_e)^{1.5} \quad (I.51)$$

Avec :

F [-] le facteur de forme,

$\kappa$  [-] le coefficient d'absorption solaire,

$\varepsilon$  [-] L'émissivité du matériau,

$\sigma [W/m^2 K^4]$  La constante de Boltzmann

Le rayonnement au niveau de la surface intérieur  $S_i [W/m^2]$  est dû aux échanges de rayonnement de grandes longueurs d'onde entre la surface intérieur de la paroi de température

( $T_{si}$  [K]) et les autres murs de la pièce de température ( $T_{mur}$  [K]), il est déterminé selon l'équation 1.23

$$S_i = \frac{\sigma (T_{si}^4 - T_{mur}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{surf}}{\varepsilon_{surf} \cdot S_{surf}} + \frac{1}{S_{surf} F_{surf-mur}} + \frac{1 - \varepsilon_{mur}}{\varepsilon_{mur} \cdot S_{mur}}} \quad (I.52)$$

| Matériaux de construction   | absorptivité des ondes courtes [-] | valeur de référence de la luminosité [%] |
|---|------------------------------------|--|
| Tuile de toit brun rouge  | 0.6                                | 20                                       |
|   | 0.8                                | 10                                       |
| Toiture bitumineuse   | 0.9                                | 10                                       |
| Plâtre, blanc (vieilli)   | 0.4                                | 60                                       |
| Brique de clinker rouge foncé   | 0.7                                | 15                                       |
| Brique de silice de chaux Sèche Humide                                  | 0.45                               | 55                                       |
|   | 0.6                                | 40                                       |
| Grès de Schilf Sèche Humide   | 0.7                                | 30                                       |
|   | 0.85                               | 15                                       |
| Grès rouge-principal  | 0.75                               | 19                                       |
| Grès patiné   | 0.9                                | 10                                       |
| bois (épicéa)<br>non traité<br>patiné (gris argenté)<br>peint en marron | 0.4                                | 50                                       |
|   | 0.7                                | 20                                       |
|   | 0.8                                | 10                                       |

Tableau I.4 : les absorptivités à courtes grandeurs d'ondes et les valeurs de référence de la luminosité pour différentes surfaces de matériaux de construction, (HM. Kunzel, 1995) [22].

## B. Convection

La convection dans la physique de bâtiment est composée en deux types, convection thermique et convection massique due à l'échange de la chaleur et la vapeur d'eau entre la surface de la paroi et l'air (extérieur ou intérieur), respectivement. Ces échanges sont exprimés par des coefficients d'échange convectif de chaleur  $h_c$  [ $W/(m^2 K)$ ] et de masse  $h_m$  [ $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ] comme suit :

$$Q_{conv} = h_c (T_{air} - T_{surf}) \quad (I.53)$$

$$H_{conv} = h_m (P_{v,air} - P_{v,surf}) \quad (I.54)$$

Ou :

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

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

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

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

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

### C. Pluie

Le calcul de la pluie ou de l'infiltration de pluie pour une surface de composant de bâtiment est très difficile à déterminé comparant avec la radiation solaire. Pour cette raison, cette dernière est rarement utilisée dans la modélisation des conditions aux limites extérieures. (HM. Künzle, 1995) [22], a exprimé l'infiltration de la pluie ( $g_{l,pluie\ infiltrée}$  [ $kg/(m^2 s)$ ]) pour le cas où la pluie ou la charge de pluie sur la surface d'un composant du bâtiment est connue par un flux d'eau liquide comme suit (Y. Ferroukhi, 2015) [6]:

$$g_{l,pluie\ infiltrée} = a_p \cdot g_{l,pluie} \quad (I.55)$$

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

(HM. Künzle, 1995) [22] a aussi offert une possibilité d'estimation de l'infiltration de pluie générée sur la base des données météorologiques pour la pluie normale, la vitesse du vent et la direction du vent. Comme il est illustré dans la *figure I.20* une relation linéaire raisonnable entre la vitesse de vent verticale, multiplié par la normale de pluie, mesurée sur un site non influencé par les bâtiments, et la charge en pluie battante d'une partie du mur :

$$g_{l,pluie\ infiltrée} = r_s \cdot v \cdot g_{l,pluie} \quad (I.56)$$

Avec  $r_s$  [ $s/m$ ] est le coefficient de pluie battante par le site spécifique, et  $v$  est la vitesse de vent verticale au mur [ $m/s$ ].

Les points de mesure représentent les valeurs horaires enregistrées de manière continue sur une période de 4 ans. La ligne droite a été déterminée par régression linéaire.

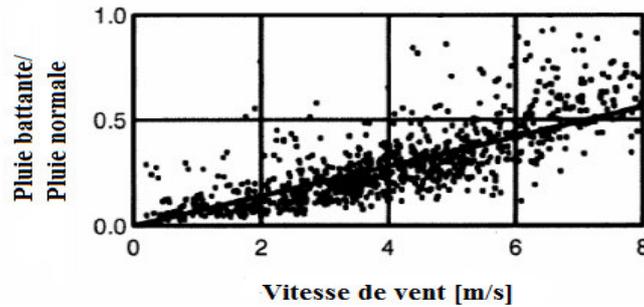


Figure I.20 : Corrélation entre la proportion de pluie battante frappant la façade d'un mur d'essai de 4 m de hauteur et la pluie normale et la vitesse du vent perpendiculaire à la façade mesurée à la hauteur standard de 10 m. (RE. Lacy et al, 1962) [57]

### I.6.5.2 Interaction entre deux couches de la paroi

Les parois de bâtiment sont généralement constituées de plusieurs couches de matériaux possédant des propriétés hygrothermiques différentes. Les conditions aux limites aux niveaux des interfaces entre deux couches successives sont définies selon la nature du contact entre les deux couches. Trois types de contact entre deux couches d'une paroi (figure I.21) ont été proposés par (VP. De Freitas et al, 1996) [58] dans leur étude: contact naturel, contact hydraulique ou une lame d'air entre les deux couches.

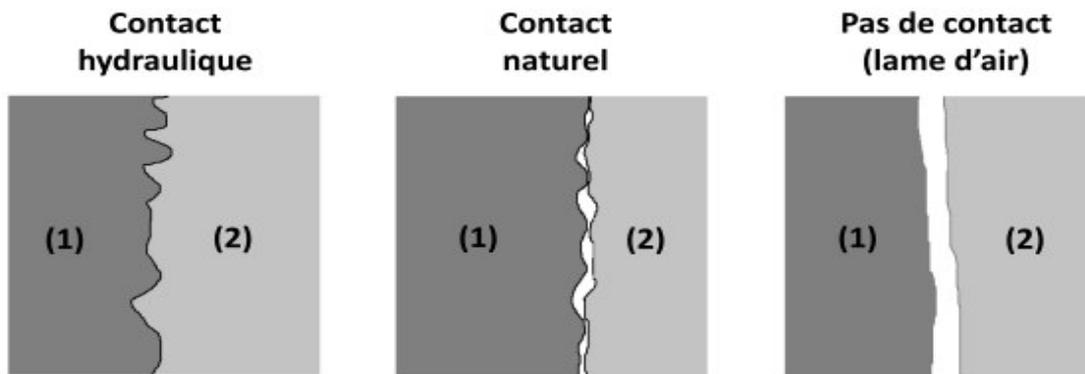


Figure I.21 : Types de contact possibles entre deux matériaux (VP. De Freitas et al, 1996) [58]

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

$$T_1^{interface} = T_2^{interface}$$

$$P_{v,1}^{interface} = P_{v,2}^{interface}$$

Concernant le contact naturel ou les deux matériaux sont considérés en contact sans interpénétration. Dans ce cas la conservation du flux thermique à l'interface est maintenue. En

revanche, pour le transfert hydrique, le flux à l'interface est exprimé en fonction d'une résistance hydrique ( $R_{hydrique} [(m^2 s)/kg]$ ). La densité du flux hydrique à l'interface  $g_{interface} [kg/(m^2 s)]$  est exprimée par l'équation I.57 (Y. Ferroukhi, 2015) [6]

$$g_{interface} = \frac{-HR_1^{interface} - HR_2^{interface}}{R_{hydrique}} \quad (I.57)$$

Quand une lame d'air est supposée entre les deux matériaux, la continuité n'est plus assurée ni pour le transfert thermique ni hydrique, le flux hydrique est exprimé selon l'équation I.57 décrite ci-dessus, et une résistance thermique  $R_{thermique} [(m^2 K)/W]$  est imposée lors de l'écriture de la densité du flux thermique à l'interface ( $Q_{interface} [W/m^2]$ ) 'équation I.58).

$$Q_{interface} = \frac{-T_1^{interface} - T_2^{interface}}{R_{thermique}} \quad (I.58)$$

Lors de la modélisation des transferts hygrothermiques dans les parois multicouches de bâtiment, l'hypothèse de la continuité hydraulique est souvent adoptée (M. Qin et al, 2009) [59], (Y. Aït Ouméziane, 2013) [49], et (Y. Ferroukhi , 2015) [6]. Cependant, cette hypothèse n'est pas valable lors de l'utilisation de la teneur en eau comme moteur de transfert hydrique (F. Tariku et al, 2010a) [60], et (R. Prommas, 2011) [61]. En effet la teneur en eau est une variable qui dépend fortement de la nature du matériau et sa structure poreuse, ainsi au niveau de l'interface entre deux matériaux, ayant une microstructure différente, une discontinuité du flux hydrique est observée. Pour s'affranchir de cette problématique, le transfert hydrique est décrit en utilisant des variables d'état qui ne sont pas tributaires à la microstructure du matériau comme la pression de vapeur d'eau et la pression capillaire ou encore l'humidité relative .

## **I.7 Conclusion**

Au terme de ce chapitre, nous pouvons conclure que le secteur du bâtiment est confronté par des enjeux économiques et environnementaux liés au problème de transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction. Une bonne compréhension du comportement hygrothermique de ces derniers permet de mieux prédire les risques causés par la chaleur et l'humidité en termes de dégradation de la qualité de l'air des ambiances habitables, ainsi que la détérioration structurelle de l'enveloppe.

L'étude réalisée dans ce chapitre a permis de dresser une analyse documentaire exhaustive de la théorie du transport de la chaleur et de l'humidité dans les matériaux poreux de construction, et des interactions hygrothermiques entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement. Différents modèles et théories ont été discutés en détail.

L'utilisation des matériaux passive innovant à faible impact environnementale et à moindre cout, appelé les matériaux hygroscopiques à changement de phase dans le domaine de la construction seront abordé dans le chapitre suivant. Ces derniers sont considérés comme des solutions envisageables pour éviter les inconvénients causés par la chaleur et l'humidité dans l'enveloppe du bâtiment.

## I.8 Référence

- [1] H. Hens, Final report, volume 1: Task 1: Modelling, IEA Annex 24 Hamtie, 1996.
- [2] <http://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie>
- [3] <https://www.cder.dz/>,
- [4] Bilan énergétique national, 2017, <http://www.energy.gov.dz>
- [5] Z. Zhong, J. Braun. Combined heat and moisture transport modeling for residential buildings. U.S. National Institute of Standards and Technology HL 2008-3 Project Award No: 60NANB4D1091, 2008.
- [6] MY. Ferroukhi, Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité. Thèse de doctorat en génie civil, université de La Rochelle. NNT: 2015LAROS027, 2015.
- [7] N. Kameni, R. Tchinda, N. Djongyang. Field Study of Thermal Comfort in Naturally Ventilated Classrooms of Cameroon. Universal Journal of Environmental Research and Technology, 2013, 3, 555–570
- [8] J. Koffi. Annalise multicritere des strategies de ventilation en maisons individuelles. thèse en génie civil. université de La Rochelle, 2009.
- [9] G. Brager, R. De Dear, Thermal adaptation in the built environment: a literature review. Energy and Building. 1998, 27, 1025-1038.
- [10] B. Moujalled, R. Cantin, G. Guarracino, Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings. Energy and Building. 2008, 40, 2215–2223.
- [11] M. Santamouris, K. Pavlou, A. Synnefa, K. Niachou, D. Kolokotsa. Recent progress on passive cooling techniques. Energy and Building, 2007, 39, 859–866.
- [12] J. Toftum, A. Jorgensen, P. Fanger, Upper Limits for Indoor Air Humidity to Avoid Uncomfortably Humid Skin. Energy and Building, 1998, 28, 1–13.
- [13] L. Fang, G. Clausen, P. Fanger, Temperature and Humidity: Important Factors for Perception of Air Quality and for Ventilation Requirements, 2000, ASHRAE Transaction. 106.
- [14] A. Baughman, E. Arens, Indoor Humidity and Human Health-Part I: Literature Review of Health Effects of Humidity-Influenced Indoor Pollutants. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, 1996.
- [15] G. Green, Indoor relative humidity in winter and the related absenteeism. ASHRAE Transaction. 91, 1985.
- [16] R. Peuhkuri, Moisture dynamics in building envelopes, PhD thesis, Technical University of Denmark, 2003.
- [17] LO. Nilsson, Moisture mechanics in building materials and building components, PhD course, Lund Institute of Technology, Sweden, 2003.
- [18] CR. Pedersen, Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions, Ph.D. Thesis (Report no.214), Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1990.

- [19] B. Schwarz, H. Kunzel, the critical moisture content of building materials. *Gesundheits-Ingenieur*, 1974, 95 H. 9, S., pp. 241-246.
- [20] M. Qin, Etude des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les parois des bâtiments, thèse en génie civil, université de La Rochelle. 2007.
- [21] J. Straube, Moisture and materials, *Building Science Digest*, 2006, 138.
- [22] H.M. Kunzel, One and two-dimensional calculation of the simultaneous heat and moisture transport in building components, using simple parameters, PhD thesis, Fraunhofer Institute for Building Physics, 1995.
- [23] S. Brunauer, P.H. Emmett, E. Teller, Adsorption of gases in multimolecular layers, *Journal of American Chemical Society.*, 1938, Vol. 60, pp. 309.
- [24] S. Berunauer, J. Skalny. E.E. Bodor, Adsorption on nonporous solids, *J. Coll, Int. Sci.*, 1969, Vol. 30, n°4.
- [25] R.W. Dent, A multilayer theory for gas sorption. I. Sorption of a single gas. *Textile Research Journal*, 1977, 47, pp. 145.
- [26] C. Van den Berg, In *Engineering and Foods*, Vol. 1, (B.M. McKenna, ed). Elsevier Applied Science Publishers, 1984, New York.
- [27] L.O. Nilsson, Moisture Transport in cementitious materials – Theory and some experimental results. Knud Hojgaard Conference on Advanced Cement-Based Materials - Research and Teaching, 2004, Technical University of Denmark.
- [28] J.R. Philip, D.A. De Vries, Moisture movement in porous materials under temperature gradient, *Trans. Am. Geophysical Union*, 1957, Vol 39, no. 5.
- [29] M. Krus, K. Kiebl, Is the diffusion resistance of building materials really moisture-dependent? *IBP-Mitteilung*, 1991, 18 Nr. 208.
- [30] A.V. Luikov, Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, 1966, Pergamon Press.
- [31] J. Cammerer, J. Achtziger, Effect of the moisture content on the thermal conductivity of building materials and insulation products. *Kurzberichte aus der Bauforschung, Bericht*. 1985, Nr 115, S. 491-494.
- [32] H. Kunzel, Does the volume-related or the mass-related moisture content determine the thermal conductivity of building materials, *Bauphysik* 8, 1986, H. 2, S. pp. 33-39.
- [33] O. Krischer, W. Kast, The scientific principles of drying technology. Dritte Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1978.
- [34] S. Whitaker, Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media : A theory of drying. 1977, Elsevier 13, 119–203.
- [35] S. Whitaker, Flow in porous media ii : The governing equations for immiscible, two-phase flow. *Transport in Porous Media*, 1986, 1, 105–125.
- [36] E. Samson, J. Marchand, J.J. Beaudoin, (1999). Describing ion diffusion mechanisms in cement based materials using the homogenization technique. *Cement and Concrete Research*. 1999, 29, 1341–1345.
- [37] K. Abahri, Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction, thèse de doctorat de l'université de La Rochelle, 2012.

- [38] E. Sanchez-Palencia, Einstein-like approximation for homogenization with small concentration. I-elliptic problems. *Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications*, 1985, 9, 1243–1254.
- [39] C. Moyne, M. Murad, A two-scale model for coupled electro-chemo-mechanical phenomena and onsager's reciprocity relations in expansive clays : I homogenization analysis. *Transport in Porous Media*, 2006, 62, 333–380.
- [40] T. Lemaire, C. Moyne, D. Stemmelen, Modelling of electro-osmosis in clayey materials including pH effects. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2007, 32, 441–452.
- [41] J. Lewandowska, J. Laurent, Homogenization modelling and parametric study of moisture transfer in an unsaturated heterogeneous porous medium. *Transport in Porous Media*, 2001, 45, 321–345.
- [42] W. Mchirgui, Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique - Application aux matériaux cimentaires, thèse de doctorat en génie civil, université de La Rochelle, 2012.
- [43] F. Bennai, Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé, thèse de doctorat en génie civil, université de La Rochelle, 2017.
- [44] S. Maghous, Z. Saada, L. Dormieux, J. Canou, J.C. Dupla, A model for in situ grouting with account for particle filtration. *Computers and Geotechnics*, 2007, 34, 164–174.
- [45] J. Sanahuja, L. Dormieux, G. Chanvillard, Modelling elasticity of a hydrating cement paste. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37, 1427–1439.
- [46] Q. Zhu, D. Kondo, J. Shao, Homogenization-based analysis of anisotropic damage in brittle materials with unilateral effect and interactions between microcracks. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2009, 33, 749–772.
- [47] J.F. Daïan, Équilibre et transferts en milieux poreux, Première partie. Université Joseph Fourier, 2013, pp. 642.
- [48] C.R. Pedersen, Prediction of moisture transfer in building constructions. *Building and Environment*, 1992, 3, pp. 387–397.
- [49] Y. Ait Oumeziane, Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre, Thèse de doctorat, INSA DE Rennes, 2013.
- [50] S.H. Ryu, H.J. Moon, J.T. Kim, Evaluation of the influence of hygric properties of wallpapers on mould growth rates using hygrothermal simulation, *Energy and Buildings*. 98 (2015) 113–118.
- [51] M. Barclay, N. Holcroft, A.D. Shea, Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp–lime buildings, *Building and Environment*. 80 (2014) 204–212.
- [52] I. Othmen, Étude des matériaux d'isolation compatibles avec la pierre de tuffeau : application à la réhabilitation du bâti ancien et/ou historique, thèse de doctorat, université de Nante, 2015.

- [53] H. Janssen, B. Blocken, J. Carmeliet, Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *Heat and Mass Transfer*, 2007a, 50, 1128–1140.
- [54] R. Kittler, A Universal Calculation Method for Simple Predetermination of Natural Radiation on Building Surfaces and Solar Collectors. *Building and Environment*, 1981, 16, 177–182.
- [55] H. Janssen, The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, thèse en génie civil. Katholieke Universiteit Leuven, 2002.
- [56] A.I.N. Korti, Numerical heat flux simulations on double-pass solar collector with PCM spheres media, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 24 (2) (2016) 13.
- [57] R.E. Lacy, H.C. Shelland, An index of driving rain. *The Meteorological Magazine* H, 1962, 91, S., pp. 177-184.
- [58] V.P. De Freitas, V. Abrantes, P. Crausse, Moisture migration in building walls—Analysis of the interface phenomena. *Building and Environment*, 1996, 31, 99–108.
- [59] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, L.O. Nilsson, Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. *Construction and Building Materials*, 2009a, 967–975.
- [60] F. Tariku, K. Kumaran, P. Pazio, Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010a, 53, 3035–3044.
- [61] R. Prommas, Theoretical and experimental study of heat and mass transfer mechanism during convective drying of multi-layered porous packed bed. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, 38, 900–905.

# Chapitre II

---

## Les matériaux hygroscopiques à changement de phase dans les bâtiments

---

Sommaire Chapitre II

|  |    |
|--|----|
| Liste des figures Chapitre II .....  | 62 |
| Liste des tableaux Chapitre II.....  | 63 |
| II.1 Introduction .....  | 64 |
| II.2 Stockage thermique par chaleur latent dans la construction du bâtiment.....                 | 64 |
| II.2.1 Application des MCP à la gestion thermique du bâtiment .....                              | 64 |
| II.2.2 Utilisation des MCP pour la gestion thermique de l’ambiance intérieure du bâtiment .....  | 67 |
| II.3 Les matériaux de contrôle d’humidité (matériaux hygroscopiques) .....                       | 71 |
| II.4 Les matériaux hygroscopiques à changement de phase (MHCP) .....                             | 73 |
| II.4.1 Les Différentes méthodes d’incorporation des MCP dans les matériaux de construction ..... | 75 |
| II.4.1.1 Techniques de micro-encapsulation .....   | 75 |
| II.4.1.2 Matériaux à changement de phase à forme stabilisée (MCPFS) .....                        | 77 |
| II.4.1.3 Inclusion poreuse .....   | 81 |
| II.4.1.4 Macro-encapsulation .....   | 83 |
| II.4.2 Application du composite (Diatomite /MCP) comme matériau de construction                  | 86 |
| II.4.2.1 Définition de la Diatomite .....  | 87 |
| II.4.2.2 Caractéristiques physiques et chimiques de la diatomite .....                           | 87 |
| II.4.2.3 Application du composite (Diatomite /MCP) dans le bâtiment .....                        | 89 |
| II.5 Conclusion .....  | 91 |
| II.6 Références.....   | 93 |

## Liste des figures Chapitre II

|  |    |
|--|----|
| Figure II.1: Les formes de MCP en construction. [5, 7, 8] .....  | 65 |
| Figure II.2 : Catégorisation de différentes méthodes d'incorporation de MCP dans les matériaux de construction. .... | 75 |
| Figure II.3: Facteurs influents dans la fabrication de MCPFS. [38] .....   | 78 |
| Figure II.4: Coupe schématique de la configuration de parois et de sols macro-encapsulés en MCP. [38] .....          | 85 |
| Figure II.5: Site de dépôt de Sig (Algérie). [76] .....  | 87 |
| Figure II.6: MEB de diatomite brute (a) et calcinée (b). [75]. ....  | 88 |
| Figure II.7: Contenu d'adsorption et de désorption de diatomite brute et calcinée, [75] .....                        | 88 |

## Liste des Tableaux Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| Tableau II.1 : Les MCP potentiels peuvent être utilisés dans la construction. [1] .....   | 67 |
| Tableau II.2 : Les MCP utilisés dans les bâtiments pour la gestion thermique en intérieur. [1] .....  | 70 |
| Tableau II.3 : Application de matériaux de contrôle d'humidité dans le bâtiment [1] .....   | 73 |
| Tableau II.4 : Diverses microcapsules de MCP commerciales utilisées. [38] .....   | 76 |
| Tableau II.5 : Différents matériaux de support utilisés pour la fabrication de MCPFS. [38] ..   | 77 |
| Tableau II.6 : Agrégats légers utilisés pour incorporer des MCP. [38] .....   | 82 |
| Tableau II.7 : Études expérimentales de macro-capsules de MCP utilisées dans les bâtiments. [38] .....  | 85 |
| Tableau II.8 : Compositions chimiques de la diatomite Algérienne brute et calcinée, [77] ...  | 89 |
| Tableau II.9 : Analyse physique chimique de la diatomite naturelle Algérienne, [76] .....   | 89 |
| Tableau II.10 : Comparaison de la température de changement de phase et de la chaleur latente avec celles rapportées pour certains composites des MCP composite dans la littérature [77]. ..... | 91 |

## **II.1 Introduction**

Dans le présent chapitre, une revue critique de la littérature sur l'application des matériaux à changement de phase (MCP), et les matériaux hygroscopiques de contrôle d'humidité respectueux de l'environnement pour la gestion thermique, et le contrôle de l'humidité dans le secteur de bâtiment sera présentée.

Sur la base des études rapportées dans cette revue, nous tentons de fournir au lecteur un résumé des résultats et des conclusions de l'utilisation de ces matériaux. Nous avons indiqués que l'incorporation des MCP dans les matériaux de construction poreux a un effet remarquable sur l'amélioration de la capacité de ces derniers à contrôler la température et l'humidité de l'environnement intérieur. Nous attirons aussi l'attention sur la possibilité d'utiliser un matériau naturelle écologique appelé "Diatomite", caractérisé par une forte hygroscopicité et faible conductivité thermique comme isolant hygrothermique dans le secteur du bâtiment.

## **II.2 Stockage thermique par chaleur latente dans la construction du bâtiment**

L'application des matériaux de stockage thermique par la chaleur latente nommer matériau à changement de phase (MCP) dans le bâtiment est devenue un point chaud de la recherche en matière d'économie d'énergie. L'énergie thermique est stockée sous forme de chaleur sensible et latente dans le MCP, la majeure partie étant constituée de chaleur latente en raison de la grande capacité de stockage de chaleur latente. Le stockage par chaleur latente est l'absorption ou le dégagement de chaleur lorsque le MCP passe de l'état solide à l'état liquide ou de liquide à gaz ou inversement à une température plus ou moins constante. Le MCP peut réduire la charge de système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) et la fluctuation de la température intérieure, augmenter le degré de confort, être peu utilisé en été et en hiver ou même ne pas utiliser l'énergie consommée pendant les saisons intermédiaires par les installations de chauffage ou de refroidissement (Z. Rao, 2012) [1].

### **II.2.1 Application des MCP à la gestion thermique du bâtiment**

Depuis la première fois mentionnée dans les années 1940, les études sur la MCP ont fait l'objet d'une attention soutenue, en particulier après la fin des années 1970 et le début des années 1980 en raison de la crise énergétique. À ce jour, de nombreuses études ont été consacrées au développement des MCP, notamment la géométrie, les configurations, la modélisation mathématique, la préparation et la caractérisation, les techniques d'amélioration, le transfert de chaleur et ainsi que certaines applications [2, 3-6].

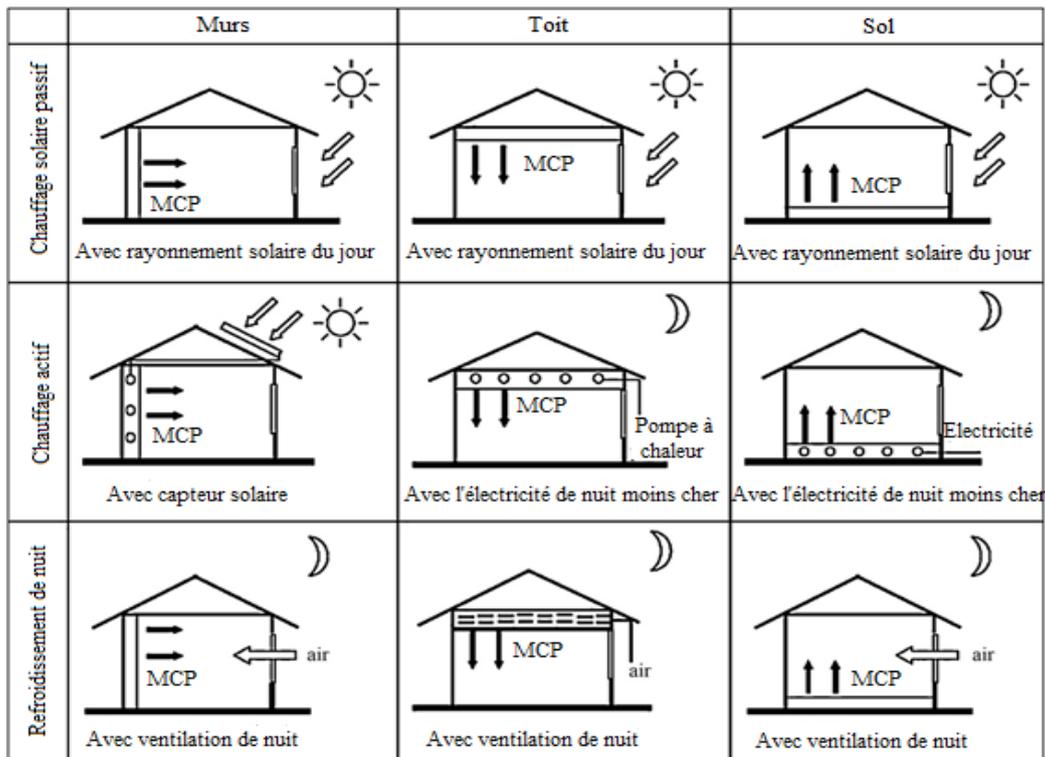


Figure II.1: Les formes de MCP en construction. [5, 7, 8]

La plupart des études ont démontré que les performances de stockage thermique des MCP ont des effets positifs sur la gestion thermique des bâtiments. Les MCP sont pris en compte pour la gestion thermique dans les bâtiments depuis 1980 en mettant en œuvre les MCP dans les panneaux de gypse, le plâtre, le béton ou d'autres matériaux de revêtement mural [2, 3]. Certaines applications du MCP dans le bâtiment sont illustrées dans la *figure II.1*. La structure et les matériaux du bâtiment, le type de porte et de fenêtre, la climatisation, le réfrigérateur et l'ordinateur à la maison sont étroitement liés à la consommation d'énergie et améliorent ainsi le développement d'applications des MCP dans le bâtiment.

Il existe de nombreux MCP disponibles dans n'importe quelle plage de température requise, qui appartiennent aux trois catégories suivantes: organique, inorganique, membranes réfléchissantes métallisées. Premièrement, un MCP approprié pour la gestion thermique du bâtiment nécessite qu'il soit dans une plage de température de fusion appropriée. Autrement dit, seuls les MCP dont la transition de phase est proche de la température de confort humain (20 °C) peuvent être utilisés [3]. La plage de températures de fusion des MCP recommandée pour un bâtiment est généralement comprise entre 20 et 32 °C. Les différents MCP possibles avec point de fusion et la chaleur latente dans la plage de températures de fonctionnement souhaitée sont résumés dans le *tableau II.1* de la littérature (Z. Rao et al, 2012) [1].

Les autres principaux critères de sélection du MCP pour la gestion thermique en intérieur sont : (i) disponibles en grandes quantités à faible coût, (ii) chaleur latente élevée, chaleur spécifique élevée et conductivité thermique élevée, (iii) faibles variations de volume pendant la transition de phase (iv) peu ou pas de sous-refroidissement pendant la congélation, (v) stabilité, non toxique, non inflammable et non explosif, (vi) le bâtiment entourant les conditions climatiques locales telles que le rayonnement solaire et les fluctuations de température jour et nuit.

Une fois que les MCP ont été sélectionnés pour être appliqués dans le bâtiment pour la gestion thermique intérieure, un autre aspect important est l'incorporation de MCP et le matériau de construction ou le structure de bâtiment. Généralement, l'incorporation directe, l'immersion et l'encapsulation sont considérées comme les méthodes les plus prometteuses d'incorporation de MCP.

| <b>MCP's</b>   | <b>Point de fusion (°C)</b> | <b>Chaleur latent (kJ/kg)</b> |
|--|-----------------------------|-------------------------------|
| Propyl palmitate   | 16–19                       | 186                           |
| Acetic acid  | 16.7                        | 184                           |
| Capric/lauric acid   | 17–21                       | 143                           |
| Dodecanol  | 17.5–23.3                   | 188.8                         |
| Butyl stearate/butyl palmitate                               | 18–22                       | 140                           |
| Butyl stearate   | 18–23                       | 140                           |
| Potassium fluoride tetrahydrate                              | 18.5–19                     | 231                           |
| Capric/lauric acid   | 19.1–20.4                   | 147                           |
| Capric/lauric acid   | 19.1                        | 132                           |
| Paraffin C <sub>13</sub> –C <sub>24</sub>                    | 20–24                       | 152–189                       |
| Polyethylene glycol 600                                      | 20–25                       | 146                           |
| Iron bromide hexahydrate                                     | 21.0                        | 105                           |
| Dimethylsabacate   | 21                          | 120                           |
| Capric/myrstic   | 21.4                        | 152                           |
| Polyglycol E 600   | 22                          | 127.2                         |
| Capric/palmitate   | 22.1                        | 153                           |
| Tech. grade octadecane                                       | 22.5–26.2                   | 205.1                         |
| RT20/montmorillonite   | 23                          | 79.25                         |
| Salt hydrate from climator                                   | 23/24                       | 148/216                       |
| Peg1000/Peg600   | 23–26                       | 150.5                         |
| Myristic acid, acetic acid octylester                        | 24                          | 147.7                         |
| Manganese nitrate hexahydrate                                | 25.8                        | 125.9                         |
| Calcium chloride hexahydrate, magnesium chloride hexahydrate | 25                          | 127                           |
|  | 25                          | 95                            |

|  |       |       |
|--|-------|-------|
| Calcium chloride, magnesium chloride hexahydrate |       |       |
| 1-Dodecanol                                      | 26    | 200   |
| d-Lactic acid RT25                               | 26    | 184   |
| RT30   | 26.6  | 232.0 |
| Capric-stearate                                  | 26.8  | 160   |
| Calcium chloride, sodium chloride                | 26.8  | 188   |
| Potassium chloride, water                        |       |       |
| Vinyl stearate                                   | 27–29 | 122   |
| Organic MCP/silicon dioxide                      | 27–30 | 77    |
| Calcium chloride hexahydrate                     | 29.7  | 171   |
| Gallium–gallium antimony eutectic                | 29.8  | –     |

Tableau II.1 : Les MCP potentiels peuvent être utilisé dans la construction.  
(Z. Rao et al, 2012). [1]

## II.2.2 Utilisation des MCP pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure du Bâtiment

Les MCP sont utilisé pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure du bâtiment notamment dans les panneaux muraux, les portes et les volets, les blocs de construction, les planchers et les panneaux de plafond, même les toits. T. Otaka et K. Nagata [9, 10] ont proposé un bâtiment à toit vert utilisant un sol léger comme matériau de stockage de chaleur. Le système peut également être considéré comme une structure externe permettant de contrôler la température intérieure. I. Kar et al [11] ont analysé des fenêtres thermiquement effectives dotées des rideaux mobiles remplie de MCP.

Un grand nombre de recherches et d'applications de MCP utilisées dans les bâtiments ont confirmé que le stockage de chaleur latente à l'intérieur est une solution économe en énergie et respectueuse de l'environnement. Z. Rao et al, 2012 [1] ont présentés une revue critique sur l'application des MCP pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure de bâtiment, y compris le toit, le plafond, système de chauffage par le sol et sous-sol, les panneaux muraux, les portes et les volets. Toutes ces applications avec les principaux résultats obtenus sont résumées dans le *tableau II.2*.

| Fonction      | Paramètre thermique  | Dimension [m] :<br>L*I*H                        | conclusion principale  |
|---------------|--|---|--|
| Panneau mural | $T_f = 29 \text{ °C}$  | 30% MCP dans le Panneau mural                   | La température de surface et la température de l'air dans la pièce ont diminué de 3,5 et 2,5 ° C, respectivement   |
| Toit          | $T_f = 26-28 \text{ °C}$                                     | Chambre :<br>1.22*1.22*2.44<br>MCP : 2*1*0.0254 | Janvier: maintenu constamment à 27 ° C, juillet: environ 4 ° C plus haut que la chambre sans MCP   |
| Plafond       | $T_f = 25 \text{ °C}$  | -   | La charge thermique maximale a été réduite de 9,4% par rapport aux panneaux de plafond en laine de roche conventionnels  |
| Plafond       | $T_f = 18 \text{ °C}$  | Panneau : 3*2                                   | Nécessite un débit de fluide beaucoup plus lent, peut absorber de l'énergie à un point de consigne   |
| Sol           | -  | -   | La fluctuation de la température était évidemment plus basse, la température ambiante était de 1 à 2 ° C plus élevée que celle d'une chambre ordinaire.              |
| Sol           | $H_f = \sim 120 \text{ [kJ/kg]}$                             | Cabine (3*2*2)                                  | Environ 2 ° C plus haut que la chambre sans MCP dans le sol, la plage d'oscillation de la température a évidemment été minimisée.                                    |
| Sol           | $T_f : 17 - 22 \text{ °C}$                                   | Fenêtre<br>(1.6 * 1.5)<br>(1*0.5*0.3)           | 89% de la charge de refroidissement journalière pourrait être stockée dans un système avec un lit plié de 30 mm d'épaisseur du MCP granulaire                        |
| Sol           | $T_f : 15 - 30 \text{ °C}$                                   | Expérimental :<br>(3*2*2)                       | $H_f$ et $h$ doivent être supérieurs à 120 kJ / kg et à 0,5 W / (m K), l'épaisseur ne doit pas dépasser 20 mm  |
| Sol           | $T_f : 20-22 \text{ °C}$<br>$H_f : \sim 172 \text{ [kJ/kg]}$ | Simulation<br>(5*5*3)<br>0.5*0.22*0.09          | Le froid stocké dans le MCP est de 732,6 kJ avec la masse de MCP de 3,6 kg   |
| Panneau mural | $T_f = 13.6 / 23.5 \text{ °C}$                               | 3.1 × 3.1 × 2.5                                 | La température de l'air dans la chambre avec MCP diminue jusqu'à 4,2 ° C   |
| Sol           | $H_f = \sim 150 \text{ [kJ/kg]}$                             | -   | L'énergie libérée a augmenté de 41,1% et de 37,9% pendant le chauffage et le refroidissement, respectivement.  |
| Sous-Sol      | $T_f : 18.4-23.5 \text{ °C}$                                 | 0.575 × 0.453 ×<br>0.463                        | Le nouveau MCPFS est un matériau prospectif pour le stockage de l'énergie thermique dans les systèmes de chauffage au sol électrique.                                |
| Sous-Sol      | $T_f : \sim 28 \text{ °C}$                                   | Dalles de béton<br>(0.5 × 0.5 × 0.095)          | A montré une fluctuation beaucoup plus basse de la température de surface et maintenu une température de surface acceptable toute la journée en ne chauffant que 8 h |

|                           |  |  |   |
|---------------------------|--|--|---|
| Sous-Sol                  | -  | La Chambre<br>(3.04 × 2.77 × 2.4)<br>Fenêtre<br>(1.08 × 1.08)                  | Réduction de la consommation d'énergie de chauffage d'une manière significative (30% ou plus)   |
| Sous-Sol                  | $T_f = 23.5 / 24.9 \text{ °C}$<br>$H_f = \sim 41.9 \text{ [kJ/kg]}$          | Canal :<br>0.14 × 0.14 × 0.9<br>MCP :<br>0.14 × 0.14 × 0.3                     | Avec une réduction de la charge de ventilation de 62,8%, 42,8 à 46,2% dans différentes villes du Japon.   |
| Sous-Sol                  | $T_f = 23 \text{ °C}$<br>$H_f = \sim 110 \text{ [J/g]}$                      | Boîte<br>1.13 × 0.725 × 0.69   | Réduction des températures maximales dans le sol jusqu'à $16 \pm 2\%$ et augmentation des températures minimales jusqu'à $7 \pm 3\%$              |
| Sous-Sol                  | $H_f = 107 \pm 11 / 103 \pm 13 \text{ [J/g]}$                                | Tuile :<br>0.66 × 0.66 × 0.052   | Stabilisation de la température ambiante et diminution de la consommation d'énergie requise pour le conditionnement thermique.                    |
| Panneau mural             | $H_f = \sim 62-138 \text{ [kJ/kg]}$  | Chambre<br>(3 × 2 × 1)   | Absorber l'énergie solaire pour réduire les variations de température en hiver, la couche de MCP ne doit pas être plus épaisse que 2 cm           |
| Sous-Sol<br>Panneau mural | $T_f = 28 \text{ °C}$<br>$H_f = \sim 60 \text{ [kJ/kg]}$                     | Fenêtre<br>(1.6 × 1.5)<br>L'épaisseur est fixée à 0,03                         | Le taux d'économie d'énergie de la saison de chauffage pourrait atteindre 10% et 17%.   |
| Panneau mural             | $T_f = 19 - 24 \text{ °C}$   | Deux types de chambres ont été faites  | Réduction de la plage de fluctuation de la température intérieure et du flux de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur en été                    |
| Panneau mural             | Été :<br>$T_f = 24 - 28 \text{ °C}$<br>Hiver :<br>$T_f = 18 - 20 \text{ °C}$ | Chambre :<br>4.3 × 2.97 × 2.75<br>Fenêtre :<br>(0.73 × 1.5)<br>Porte : 0.8 × 2 | Détourné de 40% de la charge maximale en hiver et réduit la charge de refroidissement de 25% en été   |
| Panneau mural             | $T_f = 18 - 24 \text{ °C}$   | Chambre :<br>4.3 × 3 × 2.8<br>Fenêtre :<br>(1.5 × 1.5)<br>Porte : 1 × 2        | La température moyenne était inférieure de 1 à 2 ° C à celle d'une pièce ordinaire et le flux de chaleur a été réduit de 4,6 W / m <sup>2</sup> . |
| Panneau mural             | $T_f = 21 - 25 \text{ °C}$<br>$H_f = \sim 148 \text{ [J/g]}$                 | 0.92 × 0.92 × 0.025  | L'efficacité était remarquable avec une réduction de l'amplitude de la température intérieure d'environ 20 ° C.                                   |
| Panneau mural             | $T_f = 22 \text{ °C}$  | Optimisé la valeur de l'épaisseur du panneau mural en MCP                      | La valeur optimale du MCP variait entre 9 mm et 15 mm.  |
| Panneau mural             | $T_f = 22 \text{ °C}$  | 3.1 × 3.1 × 2.5  | Cela a entraîné une diminution des fluctuations d'environ 3,5 ° C pour les murs est et ouest et de 2,8 ° C pour le mur nord.                      |
| Panneau mural             | $T_f = 20.4 / 19.1 \text{ °C}$   | Chambre :<br>(5 × 3.3 × 2.8)<br>Fenêtre :<br>(1.5 × 1.5)                       | Réduisez les fluctuations de l'air intérieur et réduisez le transfert de chaleur vers l'air extérieur tout en maintenant la chaleur.              |

|                           |  |  |   |
|---------------------------|--|--|---|
| Panneau mural             | $T_f = 25.5 - 27^\circ\text{C}$                            | L x W<br>(4.43 x 2.95),<br>Surface 52 m <sup>2</sup>                     | Une réduction de la température maximale pouvant aller jusqu'à 4 [K] pourrait être constatée.                                       |
| Panneau mural             | $T_f = 26^\circ\text{C}$<br>$H_f = \sim 110$ [J/g]         | Chambre :<br>2 x 2 x 2<br>Fenêtres :<br>(2,1.7 x 0.6)<br>(4,0.751 x 0.4) | Inertie thermique améliorée et températures intérieures plus basses avec les MCP.   |
| Panneau mural             | -  | (1.83 x 1.83 x 1.22)   | La charge de refroidissement a été réduite d'environ 8,6% et 10,8% lorsque 10% et 20% de MCP ont été utilisés                       |
| Panneau mural             | $T_f = 26/28^\circ\text{C}$<br>$H_f = \sim 179$ [J/g]      | Chambre<br>(2.4 x 2.4 x 2.4)<br>Briques<br>(0.29 x 0.14 x 0.075)         | Réduisez les pics de température jusqu'à 1 ° C et adoucissez les fluctuations quotidiennes  |
| Panneau mural             | $T_f = 21.7^\circ\text{C}$                                 | Chambre<br>(3.1 x 3.1 x 2.5)   | Une économie d'énergie annuelle de 2,9% du système de climatisation a été réalisée  |
| Panneau mural<br>Sous-Sol | $T_f = 23^\circ\text{C}$<br>$H_f = \sim 160$ [J/g]         | La superficie totale de la MCPFS plaques:296,4 m <sup>2</sup>            | Plus de 11% de réduction des coûts d'électricité et plus de 20% de la charge maximale sont réduites.                                |
| Panneau mural             | $T_f = 23.5/13.6^\circ\text{C}$<br>$H_f = \sim 107.5/72.4$ | Chambre<br>(3.55 x 5.2 x 2.7)  | Les panneaux muraux MCP améliorent le confort thermique des occupants.  |
| Panneau mural             | $T_f = 29^\circ\text{C}$<br>$H_f = \sim 187.49$ [J/g]      | (1.8 x 6 x 0.04)   | Augmentation de 6 à 12 ° C des plantes et de la température de l'air intérieur et de 4 à 5 ° C pour la température pendant la nuit. |
| Plafond                   | $T_f = 21^\circ\text{C}$                                   | (3.9 x 3.3 x 2.7)  | Économisez environ 47% d'énergie en heure normale et de pointe et 12% de la consommation totale d'énergie en hiver à Beijing        |
| Plaques de plâtre         | $T_f = 23^\circ\text{C}$<br>$H_f = \sim 79.25$ [J/g]       | 0.07 x 0.07 x 0.07   | Les plaques de plâtre avaient la capacité de réduire la variation de la température intérieure de la salle d'essai.                 |
| Plaques de plâtre         | -  | 2.82 x 2.22 x 2.24   | Température ambiante maximale réduite d'environ 4 ° C et réduction significative de la charge de chauffage                          |
| Mur trombe                | $T_f = 25-30^\circ\text{C}$                                | Panneau<br>0.8 x 1.8 x 0.05  | L'épaisseur optimale du panneau (50 mm) par simulation, l'efficacité d'absorption était de 79%.                                     |
| Obturateur                | $T_f = 49^\circ\text{C}$                                   | 1 x 1 x 1  | La capacité de stockage de chaleur de la cellule augmente jusqu'à 4 pendant 4 à 5 h. Elle était utilisée pendant la nuit.           |

Tableau II.2 : Les MCP utilisés dans les bâtiments pour la gestion thermique en intérieur

Z. Rao et al, 2012 [1]

On peut voir que peu importe la simulation et l'expérimentation, les résultats sont tous bien avec l'effet attendu. Les styles et structures architecturaux étant complexes.

### **II.3 Les matériaux de contrôle d'humidité (matériaux hygroscopiques)**

En plus de l'analyse précédente, dans certaines villes côtières, de nombreux bâtiments souffrent d'humidité croissante, due à la présence d'un taux d'humidité élevé à l'intérieur. Ceci est fortement négatif pour la construction et le mobilier d'intérieur, sans parler du bâtiment construit en bois. L'humidité élevée dans l'air intérieur est un problème bien connu dans les nouveaux bâtiments, ce qui entraînera la formation de moisissure (comme cité dans le chapitre 1) et une augmentation des coûts de chauffage [12]. Les résultats ont montré que l'humidité moyenne pendant la nuit était de 55 à 70% pour toute l'année et était confortable pour les habitants dans les pièces en bois rond, les maisons en bois, 38 à 78% dans certaines pièces des bâtiments en béton armé, et 57–72%, lorsque certains climatiseurs étaient utilisés [13].

Quoi qu'il en soit, le contrôle de l'humidité relative afin d'éviter une teneur en eau trop élevée ou trop basse dans la construction est un aspect essentiel du maintien de la qualité de l'air intérieur, de la performance énergétique et de la durabilité de l'enveloppe du bâtiment [14]. De nombreux chercheurs consacrés au développement de matériaux de contrôle de l'humidité, tels que le MCP pour la gestion thermique.

L'humidité intérieure peut être contrôlée par la maison elle-même avec peu ou pas de climatisation, car la température peut être contrôlée avec des MCP. Les résultats ont montré qu'il serait possible de réduire la consommation d'énergie en intérieur pour le chauffage et le refroidissement jusqu'à 5% et 30%, respectivement, lors de l'application de matériaux hygroscopiques avec des systèmes CVC bien contrôlés [15].

Les matériaux qui peuvent contrôler l'humidité sont nommés matériaux de contrôle d'humidité, qui ont été utilisés dans des applications telles que les matériaux de murs intérieurs, les matériaux de murs de placards et matériaux de sous-sols [16]. Les matériaux de contrôle de l'humidité (MCH) sont des matériaux poreux capables d'absorber ou de libérer automatiquement l'humidité, sans source d'alimentation ni équipement mécanique, en raison de leur sensibilité aux variations d'humidité relative et de la température ambiante [17].

Lorsque l'humidité fluctue énormément, les matériaux à humidité contrôlée peuvent absorber et désorber l'humidité ou rester mouillés sous l'action de l'humidité. Jusqu'à présent, une grande quantité de matériaux à humidité contrôlée peut être utilisée pour ajuster l'humidité relative [18,19]. ZF. Yan et al, [20] ont décrit et testé un nouveau matériau de construction lorsque l'humidité relative de l'air est de 11,3%, 32,8%, 57,6%, 75,3%, 97,3% et, à partir de ces essais, les isothermes de sorption des matériaux de construction peuvent être utilisés pour

caractériser la performance tampon d'humidité d'un matériau. Le *tableau II.3* résume les applications des matériaux de contrôle d'humidité dans les bâtiments, ainsi que leurs principales conclusions, de la littérature Z. Rao et al, 2012 [1].

| Matériau                                 | Méthode de préparation   | Conclusions principales  |
|--|--|--|
| Silice-n<br>Méso-structuré               | Synthétisé à l'aide de silice sublimée et de tensioactif alkylammonium quaternaire.        | La teneur maximale en eau adsorbée est comprise entre 40 et 90%.   |
| Sepiolite                                | Traité thermiquement à l'air dans une plage de température de 110 à 500 ° C                | Utile comme régulateur d'humidité dans des environnements où l'humidité relative est généralement très élevée (80–90%)                           |
| Fibres d'acide polyacrylique             | Discuté de la relation entre les valeurs-B <sup>1</sup> et la teneur en humidité           | Teneur en humidité d'environ 40% en poids lorsque la valeur B = 0 / °C à 15,0 g / V  |
| Fibres d'acide polyacrylique             | Discuté de la relation entre les valeurs-B et l'isotherme sorption / désorption d'humidité | Les produits en fibres ayant la valeur-B souhaitée peuvent être conçus à partir de la sorption et de la désorption de l'humidité.                |
| Sepiolite et charbon activé              | Mélangé avec de la sépiolite et du charbon actif   | Adsorbant avec de meilleures propriétés de contrôle de l'humidité dans la plage d'humidité relative moyenne et élevée (89–39%)                   |
| Kaolinite                                | Préparé par lixiviation sélective et combustion.   | L'eau absorbée a fortement augmenté à une humidité relative comprise entre 50 et 75%   |
| AlOOH–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | Préparé par précipitation d'une solution de chlorure d'aluminium                           | A montré une forte augmentation de l'adsorption de vapeur d'eau dans la plage d'humidité relative de 55 à 90%.                                   |
| Ciment, gel polymère                     | Mélangé avec une solution saline, telle qu'une solution de CaCl <sub>2</sub> ou de Li      | Les taux d'absorption et de désorption du panneau hygroscopique sont de 10 à 13 fois supérieures à ceux du bloc de béton conventionnel.          |
| Zeolite                                  | La conversion est réalisée dans des conditions de vapeur d'eau inférieures à la saturation | La nouvelle méthode de synthèse des zéolithes pourrait être appliquée de manière générale  |
| Sepiolite                                | Mélangé avec du phosphate, de l'alumine et de la fibrine comme additifs.                   | Peut adsorber ou désorber 1,2 g / g d'eau à 25 ° C   |
| Gel de silice poreux                     | De verre d'eau en présence de poly (acide acrylique)                                       | La quantité d'eau d'adsorption à l'équilibre était de 0,7 g par gramme de silice.  |
| Céramique poreuse                        | Mélange de cendres volcaniques, de cendres volcaniques altérées et de déchets de verre.    | Le volume d'eau absorbée de GA: 255 g / m <sup>^2</sup> ; GM: 55 g / m <sup>^2</sup>   |
| Zeolitic tuff                            | Broyé et mis en réaction avec 50% en masse de ciment Portland ordinaire.                   | Le volume des pores faisait la quantité d'adsorption et de désorption de vapeur d'eau.   |
| Carbure de silicium, lait écrémé congelé | Simuler par différence infinie   | Le temps de séchage était 33,1% plus court que celui d'une lyophilisation à micro-ondes ordinaire dans des conditions de fonctionnement typiques |

<sup>1</sup> La valeur-B a été définie comme fonction du contrôle de l'humidité ambiante.

|  |   |  |
|--|---|--|
| Composite poreux   | Composé de zéolite, diatomite, sépiolite, dioxyde de nano-titane                                      | La quantité de teneur en eau adsorbée était de 5–6%  |
| Gel de silice, chlorure de calcium   | Comparaison du gel de silice, du chlorure de calcium et du déshydratant composite.                    | Le composite a montré une capacité hygroscopique supérieure et une augmentation remarquable de l'élimination de l'humidité   |
| Résine polymère, matériau inorganique                                      | Un composite mélangé de résine polymère et de matériau inorganique                                    | Le composite a montré un temps hygroscopique plus court et pouvait conserver une humidité relative constante (43%)   |
| Bois de cèdre du Japon   | Mélangé avec du bois de grain plat de cèdre et des matériaux de mur en céramique poreuse.             | Changer le taux de variation de la température sur une période a fortement affecté la valeur de $C_b^2$ .  |
| Allophane, gel de silice et gibbsite                                       | Échantillon de plaque préparé par le mélange de gibbsite et d'argile.                                 | Le mélange était approprié pour les matériaux de mur intérieur et a montré une performance supérieure  |
| Charbon de bois  | Préparé en carbonisant le kénaf (chanvre du Deccan) à 400–1000 °C                                     | Les capacités de contrôle de l'humidité étaient beaucoup plus grandes que celles du charbon de bois commun.  |
| Charbons actifs (en bambou)  | Préparé par activation chimique avec $K_2CO_3$ ou par activation physique avec $CO_2$                 | La capacité de contrôle de l'humidité la plus élevée a été préparée à 873 K avec un taux d'imprégnation de 1,0.  |
| Carboxyméthylcellulose, sépiolite, copolymère acide acrylique / acrylamide | Mélanger l'ensemble des composants à la température ambiante.   | Maintient une humidité relative comprise entre 57 et 60,5% à 25 °C; la quantité d'adsorption d'humidité à l'équilibre est de 78,6%; pour $NO_2$ et $SO_2$ , 227 mg g <sup>-1</sup> et 288 mg g <sup>-1</sup> |
| Emulsion de copolymère à base d'acrylate                                   | Préparé par polymérisation en émulsion à l'aide de monomères principaux et de monomères fonctionnels. | A montré une grande capacité d'absorption d'eau (27.4%)  |

*Tableau II.3 : Application de matériaux de contrôle d'humidité dans le bâtiment.*

Z. Rao et al, 2012 [1]

Selon le tableau ci-dessus, on constate que l'utilisation des matériaux de contrôle d'humidité est d'une grande importance pour le développement durable et de l'environnement écologique, car il peut ajuster l'humidité intérieure et réduire la demande en énergie.

#### **II.4 Les matériaux hygroscopiques à changement de phase (MHCP)**

Récemment, plusieurs approches ont été étudiées afin d'optimiser les performances hygrothermiques de l'enveloppe du bâtiment par le développement des matériaux passifs, susceptible de fournir un milieu de vie hygrothermique confortable. Certains chercheurs ont tenté de préparer un nouveau matériau hygroscopique endothermique par l'incorporation de

<sup>2</sup> La valeur  $C_b$  a été définie comme étant le rapport entre l'amplitude d'humidité dans la boîte en acier garnie de matériau et celle dans la boîte en acier vide.

MCP dans les matériaux de construction poreux. Ce dernier a une capacité de contrôler la température et l'humidité de l'environnement intérieur.

L'incorporation de MCP dans les matériaux de construction tels que le béton et le gypse augmente considérablement leur masse thermique, ce qui contribue à la régulation de la température intérieure des bâtiments. En conséquence, la conservation de l'énergie dans les bâtiments par stockage d'énergie thermique (SET) devient plus réalisable [21, 22, 23].

Les MCP peuvent non seulement avoir un impact sur l'efficacité énergétique des éléments de construction, mais ils peuvent également améliorer certaines caractéristiques mécaniques et de durabilité des matériaux de construction. Par exemple, des chercheurs ont exploré l'amélioration des variations de température et du dégagement de chaleur dans des éléments en béton (par exemple, masse de béton) au cours du processus d'hydratation du ciment, de la résistance à la fissuration et du retrait thermique du béton en présence de MCP [24-26]. Réduire le stress thermique et les dommages dus aux cycles de gel / dégel ou aux gradients de température (c.-à-d. contraintes de curling) dans les chaussées en béton incorporant du MCP a également été étudié [27-30].

Cependant, l'incorporation de MCP dans des matériaux de construction tels que le béton est associée à des inconvénients qu'il convient d'atténuer. Par exemple, une éventuelle fuite de MCP à l'état liquide a été une préoccupation [31-34]. L'interférence des MCP avec l'hydratation du ciment et les effets néfastes sur les propriétés mécaniques du béton sont les conséquences des fuites de MCP. Les chercheurs ont donc introduit diverses méthodes pour une incorporation plus sûre du MCP dans les matériaux de construction afin de prévenir les fuites de MCP à l'état fondu. Comme le montre la *figure II.2*, ces méthodes proposées peuvent généralement être classées en quatre groupes: micro-encapsulation, matériaux à changement de phase à forme stabilisée (MCPFS), inclusions d'agrégats poreux et macro-encapsulation. D'une manière générale, l'application spécifique du MCP et son influence sur les caractéristiques du matériau hôte dissemblable sont des considérations clés pour la sélection de la méthode la plus appropriée. La *figure II.2* décrit également les principales caractéristiques associées à chaque méthode d'incorporation.

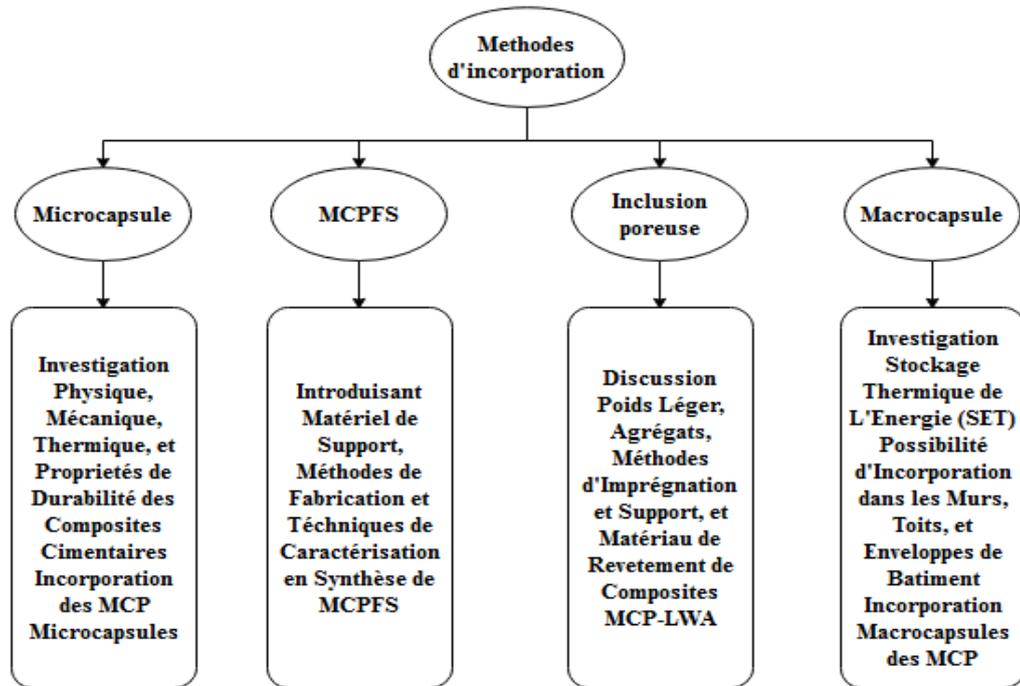


Figure II.2: Catégorisation de différentes méthodes d'incorporation de MCP dans les matériaux de construction.

## II.4.1 Les Différentes méthodes d'incorporation des MCP dans les matériaux de construction

### II.4.1.1 Techniques de micro-encapsulation

La micro-encapsulation a été largement utilisée comme méthode efficace pour incorporer des MCP dans des matériaux de construction. Comme elle peut être un protecteur contre les fuites des MCP au cours de leur fusion, elle peut améliorer la conductivité thermique des MCP avec une performance plus efficace dans les cycles de fusion / congélation. Les différentes méthodes de micro-encapsulation MCP peuvent être classées en trois groupes de base, à savoir les méthodes physiques, physico-chimiques et chimiques [35,36].

Plusieurs microcapsules MCP commerciales ont récemment été produites pour des applications dans l'industrie du bâtiment. Le *tableau II.4* résume les différentes microcapsules de MCP commerciales utilisées dans les matériaux de construction. On peut observer que les microcapsules de MCP ont été principalement utilisées dans les composites à base de ciment, et plusieurs études ont été menées pour caractériser les composites à base de ciment intégrés à la MCP. En général, les microcapsules de MCP sont utilisées directement dans le processus de mélange du béton, principalement en remplacement partiel du sable. Une étude récente a rapporté l'application de microcapsules de MCP à la production d'agrégats légers artificiels (LWA) par palettisation [37].

L'incorporation de microcapsules de MCP dans des composites à base de ciment pourrait avoir des effets sur les propriétés thermiques et mécaniques, telles que la conductivité thermique, la capacité thermique spécifique et la résistance à la compression. La rupture des microcapsules pourrait affecter les performances du MCP dans les composites à base de ciment. Par conséquent, la caractérisation appropriée du béton incorporant des microcapsules de MCP revêt une grande importance. A. Marani et al (2019) [38], ont présenté un état de l'art sur les caractéristiques physique, mécanique, thermique, et la durabilité de cette méthode.

| Matériau de base  | MCP                | Matériau de base                 | MCP                |
|-------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| Mortier           | Micronal DS 5008   | Béton                            | Micronal, Microtek |
| Béton             | Micronal DS 5001   | Béton                            | Microtek MMCP 24   |
| Mortier           | Micronal DS 5001   | Béton                            | Microtek MMCP 24   |
| Mortier           | Micronal DS 5001   | Béton                            | Microtek MMCP 24   |
| Béton             | Micronal DS 5001   | Béton                            | Microtek MMCP 28   |
| Béton             | Micronal DS 5001   | Géopolymère                      | Microtek MMCP 28   |
| Plâtre            | Micronal DS 5001   | Béton                            | Microtek MMCP 28   |
| Béton/ LWA        | Micronal DS5040X   | Mortier                          | Inertek            |
| Béton             | Micronal DS5040X   | Gypse                            | Micronal           |
| Béton             | Micronal DS5040X   | Panneau sandwich en polyuréthane | Micronal           |
| Bois et plastique | Micronal, Microtek | Mortier                          | Devan Mikrathermic |

*Tableau II.4 : Diverses microcapsules de MCP commerciales utilisées.*  
(A. Marani et al 2019) [38]

Parmi les méthodes déployées pour intégrer les MCP dans les matériaux de construction, les microcapsules ont été les plus populaires. Les chercheurs ont proposé un large éventail d'applications potentielles des matériaux de construction incorporés au MCP. Les enduits et les mortiers étaient la principale application des microcapsules de MCP dans les matériaux de construction vue leur capacité de stocké l'énergie thermique.

M. Lachheb et al. [39] et Y. Kusama et al. [40] ont rapporté que le plâtre/MCP pour les murs de bâtiments contribue de manière significative au confort thermique intérieur et à la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments en raison de son potentiel de stockage d'énergie thermique (SET). De plus, diverses études sur l'influence des inclusions de MCP sur le comportement mécanique, la durabilité et le comportement à la fissure du béton structurel ont été effectuées. Récemment, l'application de MCP pour réduire l'évolution de la température dans le béton à un âge précoce a été évaluée. Par exemple, BA. Young et al. [41] ont rapporté que l'inclusion de MCP dans les chaussées en béton pourrait réduire l'élévation de température induite par l'hydratation du ciment.

### II.4.1.2 Matériaux à changement de phase à forme stabilisée (MCPFS)

Considérant le risque de fuite de MCP dans son état fondu et ses interférences avec le milieu environnant, plusieurs chercheurs ont proposé une nouvelle forme appelée MCP à forme stabilisée (MCPFS). La stabilisation des MCP à l'état fondu est réalisée à l'aide d'un matériau de support (MS). La stabilisation de forme des MCP, telle que la micro-encapsulation, empêche non seulement les fuites du MCP, mais améliore également la conductivité thermique du composite à changement de phase, et améliore son comportement thermique dans les cycles de fusion / congélation. Le choix du MS et de la technique de fabrication des MCPFS sont des facteurs cruciaux affectant les caractéristiques thermiques. Divers matériaux ont été utilisés en tant que MS dans la fabrication de MCPFS, comme indiqué dans le *tableau II.5* de la littérature [38].

Généralement, trois méthodes principales sont utilisées pour la fabrication de MCPFS, notamment les méthodes d'absorption directe, d'imprégnation sous vide et de sol-gel (solution-gélification). L'ajout de MS pourrait entraîner une altération des propriétés thermo-physiques des MCP. Par conséquent, la caractérisation des composites MCPFS fabriqués est cruciale. De plus, il est nécessaire d'évaluer expérimentalement les effets des MCPFS sur les propriétés thermiques et mécaniques du matériau de construction hôte. La *figure II.3* présente un résumé de la catégorisation des facteurs influents dans la fabrication des modèles MCPFS.

| MCP                                | Matériau de support           | Méthode de combinaison           |
|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| CA-PA                              | xGnP                          | Absorption directe               |
| n-Heptadecane                      | xGnP                          | Absorption directe               |
| n-Hexadecane, n-octadecane         | xGnP and Na-MMT               | Méthode d'imprégnation sous vide |
| PEG                                | Graphite expansé (GE)         | Absorption directe               |
| Paraffin                           | Graphite expansé (GE)         | Absorption directe               |
| n-Octadecane                       | Graphite expansé (GE)         | Absorption directe               |
| Hexadecane                         | xGnP                          | Méthode d'imprégnation sous vide |
| Bio-based MCP                      | Fumée de silice et xGnP       | Méthode d'imprégnation sous vide |
| Hexadecane, octadecane             | Fumée de silice               | Méthode d'imprégnation sous vide |
| PEG                                | SiO <sub>2</sub>              | Sol-gel                          |
| PEG                                | Diatomite et Graphite expansé | Méthode d'imprégnation sous vide |
| Paraffin RT21                      | Nano-silica                   | Absorption directe               |
| Octadecane                         | xGnP                          | Méthode d'imprégnation sous vide |
| Acide stéarique                    | Fumée de silice               | Méthode d'imprégnation sous vide |
| Paraffin RT21                      | Diatomite                     | Absorption directe               |
| CA, PEG, dodecanol, et heptadecane | Bentonite                     | Méthode d'imprégnation sous vide |

Tableau II.5 : Différents matériaux de support utilisés pour la fabrication de MCPFS. [38]

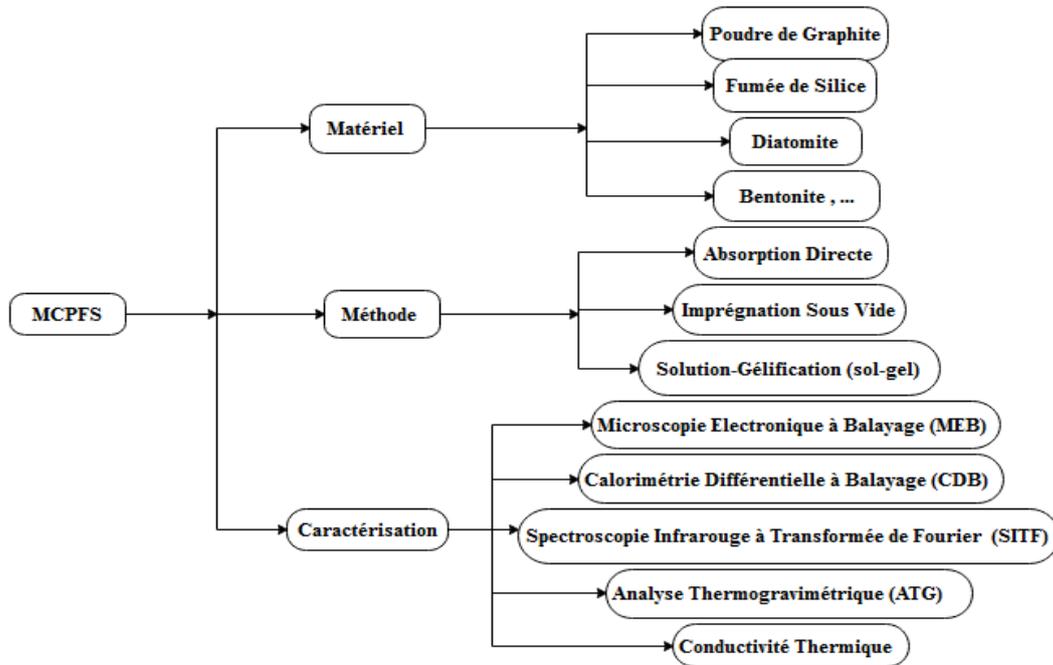


Figure II.3: Facteurs influents dans la fabrication de MCPFS. [38]

### A. Matériau de support

Les matériaux les plus appropriés pour la fabrication de MCPFS sont ceux ayant une structure poreuse avec les propriétés thermiques souhaitées telles qu'une conductivité thermique élevée. Un grand nombre de différents supports, notamment de la poudre de graphite, de la fumée de silice, de la bentonite, de la diatomite et du kaolin, ont été proposés ces dernières années.

Cependant, la poudre de graphite et les fumées de silice ont été plus largement utilisés en raison de leur plus grande capacité d'absorption et de leur meilleure applicabilité à l'intégration dans les composites à base de ciment. Comme indiqué dans le *tableau II.5*, le graphite est l'un des matériaux les plus utilisés pour la fabrication de composites MCPFS, principalement sous la forme de graphite expansé (EG) et de nano-plaquettes au graphite exfolié (xGnP), qui présente une structure poreuse à haute conductivité thermique. La capacité d'absorption élevée d'EG et de xGnP facilite l'incorporation à grand volume de MCP, ce qui permet d'atteindre 90% en masse de composite [38]. Par exemple, Z. Zhang et al. [42] et S. Kim et al. [43] ont utilisé des composites n-octadécane / EG et hexadécane / xGnP dans la fabrication de mortiers à base de ciment pour le stockage d'énergie thermique, respectivement.

Selon leurs résultats, ces mortiers incorporés à la MCPFS ont une capacité considérable en termes de réduction des variations de température intérieure dans les bâtiments, ainsi que de

décalage temporel pour atteindre la température intérieure maximale, qui sont des facteurs clés pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments [42,43]. Les MCPFS fabriqués au moyen de poudre de graphite ont également été utilisés dans le mortier de gypse ou les panneaux muraux. De même, le potentiel important de tels composites MCP dans la régulation de la température intérieure des bâtiments a été observé [38]. Alors que la fumée de silice était traditionnellement utilisée comme micro-filtre et addition pouzzolanique dans les composites à base de ciment, sa structure poreuse a fait un matériau approprié pour l'imprégnation des MCP. Par exemple, SG. Jeong et al. [44] et Y. Kang et al. [45] ont utilisé la fumée de silice comme MS pour la fabrication de composites MCPFS. T. Xu et al. [46] ont également présenté un bloc de béton en MCPFS composite PEG / SiO<sub>2</sub>. Leurs résultats indiquent que la fumée de silice est un SM compatible pour l'incorporation de MCP en termes de maintien de la capacité de stockage de chaleur, de stabilité thermique et chimique.

De plus, des composites MCP de fumée de silice peuvent être ajoutés aux matériaux de construction tels que le mortier et le béton pour améliorer leurs caractéristiques thermiques [38]. Dans une approche différente, B. Ma et al. [47] ont utilisé le tétra-décane en tant que MCP, ainsi que le carbone et la silice en tant que matériel de support pour la synthèse de MCPFS dans les applications de chaussées routières. Selon leurs résultats, le composite MCPFS en silice indiquait une meilleure capacité thermique latente par rapport à celle fabriquée en carbone.

En général, l'addition de MCPFS au mortier de ciment peut diminuer considérablement sa résistance à la compression, comme indiqué dans [48, 42, 46, 49]. Cette réduction est attribuée au fait que les MCPFS n'offrent pas de résistance mécanique, en particulier dans le cas de l'utilisation de poudre de graphite comme matériau de support [46,49].

Cependant, l'effet de l'ajout de MCPFS sur la conductivité thermique du matériau hôte dépend fortement des caractéristiques du MCPFS utilisé, notamment la conductivité thermique du MCP et du SM, le rapport de la masse d'incorporation du MCP au MS, la structure de porosité du MCPFS et du mortier, et le rapport de masse de MCPFS au mortier. Par exemple, Z. Zhang et al. [42] ont utilisé un composite n-octadécane / EG avec un pourcentage massique de MCP de 90% dans la fabrication de différents spécimens de mortier en ciment dans lesquels le pourcentage massique de MCPFS par rapport au mortier était de 0, 0,5, 1,2, 1,7 et 2,5%. Leurs résultats indiquent que la conductivité thermique a diminué avec l'augmentation du pourcentage massique de MCPFS par rapport au mortier en raison de la porosité induite dans le mortier.

En revanche, S. Kim et al. [43] ont rapporté que l'incorporation de composites hexadécane / xGnP au mortier de ciment augmentait la conductivité thermique du mortier en ciment. Selon leurs résultats, le pourcentage d'hexadécane imprégné était de 48,8%. Par conséquent, ces résultats différents stipulent que des enquêtes plus approfondies sont nécessaires pour parvenir à des conclusions concluantes concernant l'influence des MCPFS avec différents types de MCP et de MS sur les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction. Néanmoins, l'impact bénéfique de leur ajout sur la fourniture d'une capacité de stockage d'énergie thermique en matériaux de construction est bien documenté [42–44].

## **B. Applications potentielles des MCPFS**

Les MCPFS ont été principalement utilisés à des fins de stockage d'énergie thermique plutôt que de fonctionnalité structurelle. Plusieurs chercheurs ont appliqué différents composites MCPFS dans des éléments de construction non structurels, tels que des murs et des enveloppes de bâtiments, à la fois en laboratoire et à l'échelle réelle, afin de réguler les variations de température intérieure et de réduire la consommation d'énergie [43,50-52]. Par exemple, M. Sayyar et al. [52] ont utilisé un type de MCPFS fabriqué à partir de MCP eutectique d'acides gras et de nanofeuilles de graphite dans la construction d'une paroi en gypse à trois couches de panneaux sandwich. Leur expérience de performance thermique a révélé que l'utilisation d'un tel MCPFS dans le mur composite pourrait réduire la plage de variation de la température intérieure allant de (13–32 ° C) à (18,5–26,5 ° C).

L'application potentielle de la MCPFS au béton structurel a également été explorée dans des études récentes. HW. Min et al. [49] ont étudié les propriétés thermiques et mécaniques de béton incorporant des MCPFS. Leurs résultats indiquent que l'ajout de MCPFS a réduit la résistance à la compression et le module d'élasticité du béton tout en augmentant sa capacité calorifique spécifique. Néanmoins, ils ont souligné la nécessité de poursuivre les recherches sur les performances structurelles, thermiques et économes en énergie de ces composites à base de ciment.

Les MCPFS ont également stimulé les applications bénéfiques dans les matériaux de chaussées et la construction [53,54]. Dans une étude expérimentale, J. Ren et al. [55] ont proposé un type de MSPSD avec une chaleur latente et une température de fusion souhaitables dans les mélanges d'asphalte. De plus, B. Ma et al. [47] ont présenté un composite MCPFS fabriqué avec du Teradecane en tant que MCP à incorporer dans les chaussées routières, qui

présentait une température de transition de phase et une enthalpie de 5,8 ° C et de 178 J / g, respectivement.

### II.4.1.3 Inclusion poreuse

Une autre méthode intéressante et applicable d'incorporation de MCP dans le béton consiste à absorber des MCP liquides dans des agrégats légers et poreux (lightweight aggregates (LWAs)). Cette technique est similaire à la méthode de stabilisation de la forme, avec quelques différences notées. Par exemple, les MCPFS devraient être ajoutées au mélange de béton en remplacement partiel des granulats fins [49,56]. En outre, le matériau de support (MS) utilisé pour préparer le MCP-LWA est généralement différent des MCPFS.

Dans la fabrication des MCPFS, les matériaux en poudre tels que la poudre de graphite ou la fumée de silice sont généralement utilisés en tant que MS, bien que les agrégats poreux avec une plus grande taille et une plus grande résistance mécanique soient des MS plus prometteurs pour le béton MCP-LWA. Divers facteurs importants influent sur les performances du béton MCP-LWA et doivent être soigneusement pris en compte dans les proportions du mélange. Ceux-ci comprennent: le type de LWA et sa capacité d'absorption, la méthode d'imprégnation, le revêtement et les matériaux de support, ainsi que la caractérisation et les tests de performance [57,58].

Les chercheurs ont proposé divers agrégats poreux en tant qu'hôte MCP, différentes méthodes d'imprégnation et divers matériaux de revêtement et supports. Le *tableau II.6* récapitule les études ayant utilisé le LWA poreux comme conteneur de MCP dans le béton, et ses principales caractéristiques pertinentes, de la littérature [38].

| MCP               | Agrégats                       | Absorption max               | Méthode                           | Matériau de revêtement           | Matériau de support                 |
|-------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Alcool laurylique | Argile expansée                | 49.1 wt%                     | Imprégnation sous vide            | Pâte de ciment époxy ou modifiée | -                                   |
|                   | Argile expansée                | 70 wt%                       |                                   | Une résine époxy                 | Poudre de graphite, fumée de silice |
|                   | Perlite expansée               | -                            |                                   | -                                | -                                   |
|                   | Argile expansée                | 70 wt%                       |                                   | Une résine époxy                 | Poudre de graphite, fumée de silice |
|                   | Bloc de béton concassé recyclé | 25 wt%                       |                                   | -                                | -                                   |
| Paraffine         | Perlite expansée               | 50% (vacuum)<br>35% (direct) | Imprégnation sous vide et directe | Revêtement de silicium           | -                                   |

|   |  |  |                           |  |  |
|---|--|--|---------------------------|--|--|
|   | Vermiculite<br>expansée  | 37.5 wt%                                   |                           | -  | -  |
|   | Schiste expansé  | 23.7 wt%                                   | Imprégnation<br>sous vide | -  | -  |
| Paraffine,<br>PEG400,<br>PEG600,<br>PT4                                 | Argile expansée<br>et pierre ponce<br>grecque                  | 10–35<br>wt%                               | Imprégnation<br>directe   | -  | -  |
|   | Perlite expansée<br>hydrophobe                                 | 50 wt%                                     | Imprégnation<br>sous vide | -  | -  |
|   | Argile expansée<br>(Leca S)                                    | 26.36<br>wt%                               |                           | -  | -  |
|   | Argile, liège<br>expansé, perlite,<br>vermiculite<br>expansée  | Divers<br>entre 25<br>et 27,5%<br>en poids | Imprégnation<br>directe   | Polyuréthane, Weber<br>Dry Lastic, émulsion<br>bitumineuse   | -  |
| Paraffine   | Argile expansée  | 95% Pds                                    |                           | Émulsion de<br>caoutchouc,<br>membrane<br>imperméable, résine<br>de polyester  | Fibres de carbone et<br>spray au graphite. |
| Paraffine,<br>acide<br>laurique,<br>acide<br>myristique                 | Argile expansée  | 50, 100,<br>150, 200<br>wt%                | Imprégnation<br>sous vide | Pâte de ciment,<br>émulsion acrylique de<br>styrène, solution de<br>résine de<br>polyuréthane et<br>composite pâte de<br>ciment / émulsion | -  |
| n-<br>Octadecane  | Vermiculite<br>expansée,<br>Perlite expansée                   | 80.65<br>wt%,<br>59.35<br>wt%              |                           | -  | -  |
| Acide<br>caprique,<br>acide<br>palmitique,<br>dodécanol,<br>heptadécane | Ponce /gypse   | 31 à 34<br>wt%                             |                           | -  | -  |
|   | La pierre ponce,<br>la perlite,<br>schiste/ argile,<br>ardoise | 10.6 à<br>21.1<br>vol%                     | Imprégnation<br>directe   | -  | -  |
| Paraffine   | Schiste expansé  | 30 wt%                                     |                           | -  | -  |
|   | Hydrophile et<br>perlite expansée<br>hydrophobe                | 35 wt%,<br>50 wt%                          | Imprégnation<br>sous vide | -  | -  |

Tableau II.6 : Agrégats légers utilisés pour incorporer des MCP. [38]

### **A. Matériaux de support et de revêtement**

Les chercheurs ont proposé d'ajouter des matériaux de support pour limiter les fuites de MCP fondu et améliorer les caractéristiques thermiques et mécaniques du MCP-LWA. Par exemple, SA. Memon et al. [59] ont utilisé une combinaison de résine époxy, de poudre de graphite, et de fumée de silice pour améliorer les caractéristiques mécaniques et thermiques du MCP-LWA. En conséquence, la conductivité thermique a été considérablement améliorée et la résistance à la compression du béton MCP-LWA a augmenté. D'autres revêtements et résines, tels que la pâte de ciment, le revêtement de silicium et l'émulsion bitumineuse ont été utilisés pour sceller le MCP-LWA [60, 61]. Certains des matériaux de revêtement utilisés ont entraîné des problèmes techniques tels que des agrégats collés ou le développement d'une couche de revêtement très mince et faible [61].

Pour développer un béton structural MCP-LWA présentant les caractéristiques mécaniques, thermiques et de stockage de chaleur recherchées, plus d'études sur différents matériaux de revêtement et de support et leurs effets sur les performances thermiques et mécaniques du MCP-LWA, ainsi que des méthodes pratiques de préparation de tels composites MCP-LWA sont nécessaires dans les travaux de recherche futurs.

### **B. Applications potentielles**

En raison de ses résultats positifs, l'intégration de MCP dans des agrégats poreux a amené de nombreux chercheurs à étudier divers aspects de cette technique d'inclusion. Y. Farnam et al. [58] ont évalué l'application de MCP incorporés aux LWA pour réduire l'accumulation de glace et de neige sur les chaussées en béton. En conséquence, la chaleur dégagée pendant la transition de phase de tels composites MCP pourrait faire fondre la glace et la neige à la surface des chaussées [58, 62]. Une autre étude [28] a exploré les effets de tels composites MCP-LWA sur les performances de congélation et décongélation du béton, suggérant que les matériaux cimentaires MCP-LWA sont prometteurs pour améliorer le comportement des chaussées en béton lors des cycles de congélation-décongélation.

#### **II.4.1.4 Macro-encapsulation**

Comme indiqué précédemment, l'un des principaux objectifs de l'intégration des MCP dans les matériaux de construction est de fournir des systèmes de stockage d'énergie thermique via la capacité de chaleur latente des MCP. En conséquence, les MCP ont été incorporés à divers matériaux de construction, tels que le béton et le gypse, et à différents éléments de construction, tels que les murs et les toits. Pour atténuer les effets néfastes du MCP sur les propriétés

mécaniques, les chercheurs ont proposé diverses techniques pour empêcher le contact direct entre le MCP et les matériaux de construction hôtes.

La macro-encapsulation est une méthode efficace pour incorporer des MCP dans les composants de bâtiment, en particulier les murs et les toits préfabriqués. Dans cette méthode, le MCP n'est pas mélangé avec le matériau de base (béton, gypse, etc.). Par conséquent, les caractéristiques mécaniques du matériau de base ne sont pas gênées. Cependant, le stockage d'énergie thermique fourni par les MCP pourrait améliorer les performances thermiques de ces composants de bâtiment. Il convient de noter que, dans certaines références, la macro-encapsulation des MCP peut être attribuée à d'autres techniques. Par exemple, l'imprégnation MCP dans le LWA est parfois appelée macro-encapsulation [59, 60, 63].

De plus, d'autres types de MCP, tels que des microcapsules de MCP ou des MCPFS, pourraient être utilisés pour préparer des membres de MCP macro-encapsulés [51, 64]. Dans des travaux expérimentaux récents, les chercheurs ont utilisé des procédures expérimentales et empiriques à échelle réduite pour évaluer la réponse thermique des composants de bâtiment intégrés au MCP [65, 66]. En outre, plusieurs investigations numériques ont été menées pour évaluer l'effet de l'inclusion de MCP dans les composants de bâtiment et sur la consommation énergétique des bâtiments [67, 68].

#### **A. Macro-encapsulation du MCP à travers des murs et des enveloppes**

Étant donné que les murs et les enveloppes des bâtiments sont généralement en contact direct avec les conditions limites extérieures et exposés au rayonnement solaire, ils sont des candidats potentiels pour l'intégration de MCP. Ainsi, plusieurs études de recherche ont évalué les effets des MCP sur la performance thermique de tels éléments de bâtiment [69, 70]. Une méthode applicable de macro-encapsulation MCP pour une application dans les murs de bâtiment consiste à utiliser des conteneurs de MCP en forme de panneau. Pour une meilleure performance thermique dans les cycles de charge / décharge, il est important que ces conteneurs aient une conductivité thermique élevée. Par conséquent, les conteneurs en métal conviennent à la macro-encapsulation de MCP. Par exemple, X. Shi et al. [71] ont utilisé des conteneurs en acier pour la macro encapsulation de MCP dans des murs de panneaux sandwich en béton. Leurs résultats indiquent que l'intégration d'une couche de MCP dans les murs d'une salle pourrait réduire de manière significative la température maximale intérieure et augmenter la température minimale intérieure. Ainsi, les variations de température intérieure ont été considérablement atténuées

[71]. La figure II.4 indique le schéma de certaines configurations de mur et de toit macro-encapsulées utilisées dans des études antérieures dans la littérature.

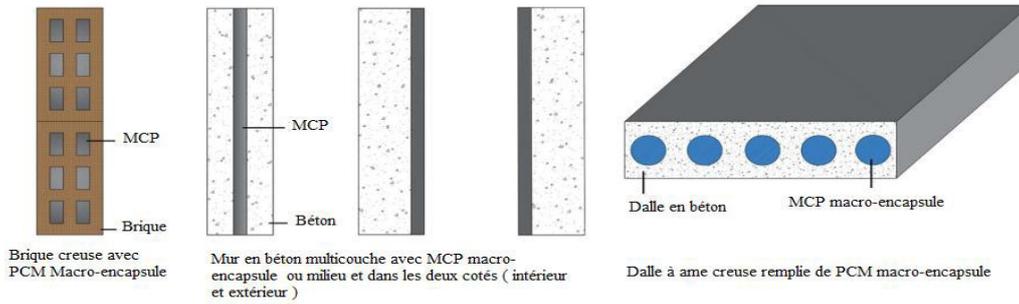


Figure II.4: Coupe schématique de la configuration de parois et de sols macro-encapsulés en MCP. [38]

| Configuration expérimental                          | Inclusion MCP   | Procédure de test   | But et résultats   |
|---|---|---|--|
| Modèle de petite maison                             | Macro-encapsulé   | Condition climatique réelle   | Validation de simulations numériques   |
| Cellule de test cubique                             | Une couche MCP inclus dans des murs multicouches                    | Dispositif d'essai expérimental dans des conditions environnementales réelles | Performances thermiques du MCP intégré dans des murs multicouches.                           |
| Test des cabanes                                    | Système de chauffage sous plancher de MCP et panneaux muraux de MCP | Condition climatique réelle   | Evaluation du transfert de la charge maximale, performance énergétique et économies de coûts |
| Échantillons de panneaux de béton et salles d'essai | Macro-capsules MCP innovantes utilisant des billes d'acier creuses  | Chambre environnementale auto-conçue  | Evaluation de la performance thermique à l'aide des fluctuations de température intérieure   |
| Mur en brique                                       | MCP Macro-encapsule   | Chambre climatique  | Réduire les fluctuations de températures   |
| Murs de panneaux sandwich en béton                  | Couche de MCP multicouche   | Simulateur de température   | Évaluations de performance thermique   |
| Dalle de béton dans les cellules d'essai            | Tube de MCP macro-encapsulé   | Condition climatique réelle   | Évaluations de performance thermique   |

Tableau II.7: Études expérimentales de macro-capsules de MCP utilisées dans les bâtiments. [38]

En générale, les performances des macro-capsules MCP intégrées dépendent fortement de plusieurs facteurs, tels que l'emplacement de la macro-capsule MCP (surface interne ou externe ou dans la partie centrale de la paroi), les conditions microclimatiques de la région (température ambiante, rayonnement solaire, etc.), la configuration de l'élément de construction (mur en béton, mur en briques de maçonnerie), les propriétés thermiques du matériau de construction et du MCP, etc. Les chercheurs ont évalué la performance de tels éléments de construction

incorporant du MCP dans des conditions climatiques réelles ou en utilisant des enceintes climatiques [66, 71]. Le *tableau II.7* présente différentes configurations expérimentales utilisées dans certaines études récentes.

## **B. Macro-encapsulation du MCP dans les toits de bâtiments**

Les toits en béton, tels que les dalles alvéolées, conviennent particulièrement à l'intégration de macro-capsules de MCP. Dans cette technique, les MCP sont macro-encapsulés sous forme de tubes, de cylindres, de billes et de sphères. Par exemple, L. Navarro et al. [72] ont examiné les performances thermiques de macro-capsules de MCP dans une dalle de béton à noyau creux actif. Il a été conclu que la dalle de béton en MCP proposée pourrait exécuter le processus de charge / décharge de MCP au cours de près de 70% des journées d'été et d'hiver. Cependant, l'utilisation d'un système de contrôle permettrait d'optimiser le processus de charge / décharge [72]. L. Royon et al. [73] ont utilisé un composite MCP-polymère pour remplir la cavité de dalles alvéolées afin de fournir une capacité de stockage d'énergie thermique. Leurs résultats indiquent que l'incorporation de MCP régulerait la température intérieure et qu'un tel système de plancher pourrait fonctionner comme conditionneur thermique passif pendant les journées chaudes [73]. La *figure II.4* illustre le schéma d'une dalle à noyau creux remplie de MCP.

Dans une approche différente, Y. Farnam et al. [58] ont utilisé un type d'huile de paraffine macro-encapsulée dans des tuyaux en métal pour être incorporée dans des dalles de chaussée en béton. Leurs résultats ont démontré la possibilité pratique d'utiliser des MCP pour faire fondre la glace et la neige sur des chaussées en béton grâce à la chaleur récupérée pendant le processus de changement de phase du MCP [58]. Cependant, les conditions de température ambiante et la température de fusion / congélation du MCP peuvent être des critères déterminants pour l'efficacité de la technique de macro-encapsulation par rapport à l'utilisation de composites MCP-LWA [58, 62].

### **II.4.2 Application du composite (Diatomite /MCP) comme matériau de construction**

En raison de la diversité des types de MCP, diverses applications dans l'industrie de la construction ont été explorées ces dernières années. De plus, le problème potentiel de fuite des MCP au cours des cycles de fusion / congélation a entraîné différentes méthodes d'incorporation, comme discuté précédemment de manière critique. Par conséquent, il est essentiel de choisir une méthode d'incorporation appropriée pour atteindre les objectifs spécifiques du MCP dans le matériau de construction hôte.

De plus, l'effet de l'ajout de MCP sur le matériau hôte s'articule autour de la technique d'incorporation. Par exemple, la résistance à la compression du béton incorporant des composites MCP-LWA pourrait être réduite ou augmentée selon que des matériaux de support et de revêtement sont utilisés ou non [29, 58, 60, 62, 63]. De même, l'amélioration de la conductivité thermique et le stockage de la chaleur latente des composites MCPFS dépendent du matériau de support et du procédé d'imprégnation [47, 48, 51, 54]. Dans ces dernières années, la Diatomite comme un matériau de support hygroscopique est devenue un matériau clé dans la majorité des travaux de recherche dans le secteur du bâtiment.

#### **II.4.2.1 Définition de la Diatomite**

La diatomite est une roche sédimentaire siliceuse abondante dans le monde entier, en Algérie les réserves géologiques sont estimées à 6 500 000 [T] au Sig (ville de Mascara) [74]. Il fait aujourd'hui l'objet d'une attention particulière en raison de ses propriétés de combinaison uniques (telles que la forte porosité (80% à 90%), la haute perméabilité, légèreté, la petite taille de particule, la grande surface spécifique, la faible conductivité thermique, l'inertie chimique et les pores micro-cellulaires bien développés) [75, 76].



*Figure II.5 : Site de dépôt de Sig (Algérie). [76]*

La diatomite est largement utilisée dans les domaines du génie chimique, du pétrole, des matériaux de construction, des aliments, de la protection de l'environnement, etc. De plus, la diatomite peut être l'une des matières premières des Matériaux de contrôle d'humidité [75, 77].

#### **II.4.2.2 Caractéristiques physiques et chimiques de la diatomite**

La *figure II.6* montre des micrographies de diatomites brutes et calcinées prises au microscope électronique à balayage (MEB) par J. Zheng et al, (2017) [75].

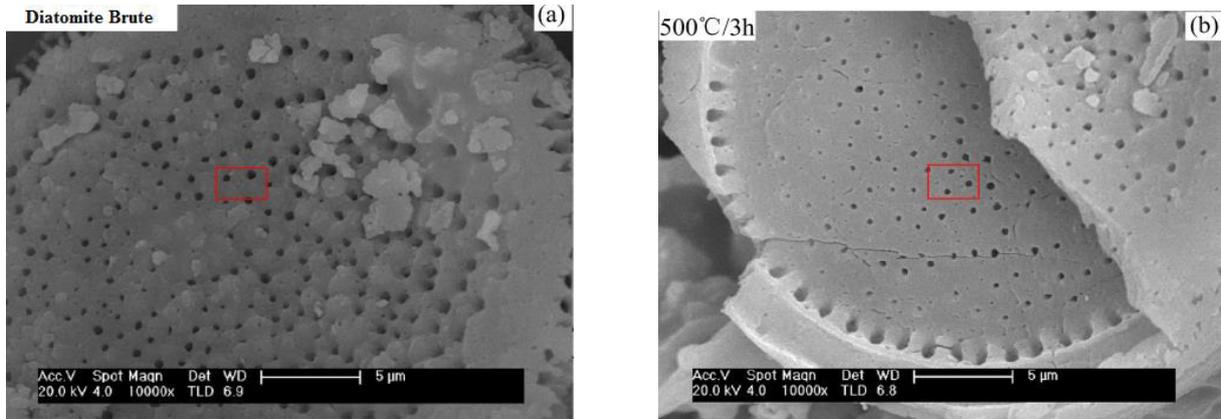


Figure II.6 : MEB de diatomite brute (a) et calcinée (b). J. Zheng et al, (2017) [75].

Comme le montre la *figure II.6 (a)*, la diatomite brute présente une structure en plaque ronde avec une taille et une distribution des pores uniformes. Elle se trouve sur la *figure II.6 (b)*, la morphologie des micropores de la diatomite se modifie après une calcination à 500 ° C pendant 3 h. Les pores deviennent plus petits et le nombre de petits pores augmente. Le diamètre minimal des pores peut atteindre environ 50 nm. De plus, des fissures se trouvent à la surface de la diatomite. La diatomite présentant des pores petits et denses après calcination peut améliorer les performances de contrôle de l'humidité de la diatomite.

Une comparaison des performances d'adsorption et de désorption entre diatomite brute et diatomite calcinée selon l'étude de J. Zheng et al, (2017) sont montrés dans la *figure II. 7*

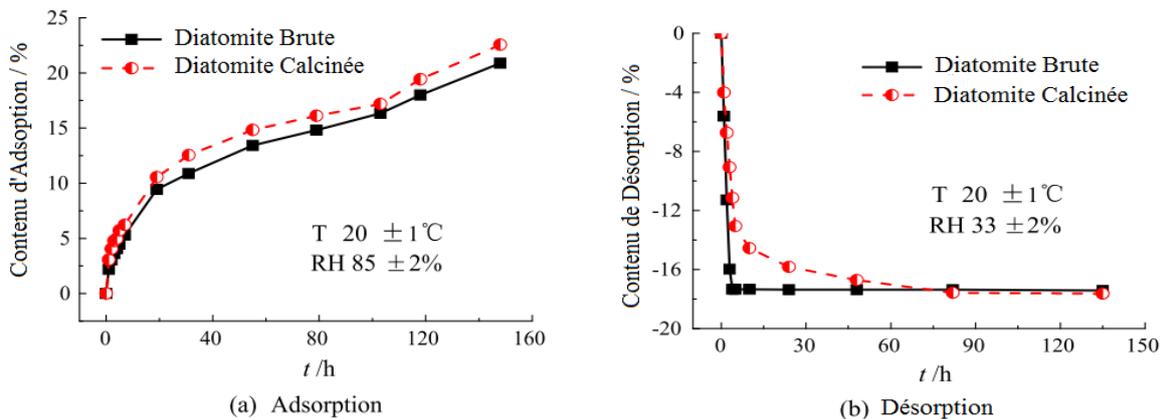


Figure II.7: Contenu d'adsorption et de désorption de diatomite brute et calcinée, [75]

Il est évident que la teneur en adsorption de la diatomite calcinée est supérieure à celle de la diatomite brute, ce qui montre que la diatomite calcinée a une capacité supérieure à réguler et à contrôler l'humidité relative à l'intérieur des bâtiments. Cette capacité est attribuée au fait que les petits pores denses peuvent fournir des forces capillaires plus élevées. Pendant ce temps, la diatomite calcinée présente une vitesse plus lente pour libérer l'excès d'humidité, car les petits pores denses favorisent la rétention d'eau. La vitesse de désorption lente et uniforme peut créer

un environnement intérieur plus confortable pour les habitants. Par conséquent, la calcination peut améliorer les performances d'adsorption et de désorption de diatomite. S. Benayache et al, (2018) [77] ont montré que la composition chimique de la diatomite Algérienne révèle que la silice ( $SiO_2$ ), l'oxyde de calcium ( $CaO$ ) et le corindon ( $Al_2O_3$ ) sont les principaux composants, tandis que la diatomite calcinée à une température de  $1100\text{ }^\circ C$  pendant 02 heures présente une teneur en silice plus élevée comme indiqué dans le *tableau II.8*.

| Constituent           | $SiO_2$ | $CaO$ | $MgO$ | $Al_2O_3$ | $MnO$ | $TiO_2$ | $K_2O$ | $Fe_2O_3$ | L.O.I |
|-----------------------|---------|-------|-------|-----------|-------|---------|--------|-----------|-------|
| Diatomite brut (%)    | 60.71   | 16.25 | 0.40  | 7.90      | 0.04  | 0.25    | 1.05   | 1.17      | 14.65 |
| Diatomite calciné (%) | 73.14   | 15.72 | 0.36  | 8.08      | 0.04  | 0.16    | 1.37   | 1.45      | -     |

*Tableau II.8: Compositions chimiques de la diatomite Algérienne brute et calciné, [77]*

B. Hamdi et al, (2013) [76] à étudié la possibilité d'utiliser la diatomite Algérienne comme un matériau d'isolation thermique, les résultats de leur étude à montrer que le produit naturel est essentiellement composé de silice avec  $CaO$  comme impureté principale (19%) qui contamine la surface de cette matière première (*tableau II.8*). L'analyse physique chimique de ce dernier à indiquer que la diatomite à une porosité très élevée, peut atteindre 72% (*tableau II.9*).

|                   |         |       |                   |                |        |           |         |
|-------------------|---------|-------|-------------------|----------------|--------|-----------|---------|
| Diatomite calciné | $SiO_2$ | $CaO$ | $MgO$             | $Al_2O_3$      | $K_2O$ | $Fe_2O_3$ | $Na_2O$ |
| W (%)             | 73.86   | 18.89 | 1.85              | 1.81           | 0.77   | 1.48      | 1.16    |
| Caractérisation   | Couleur | PH    | $S_{N_2} (m^2/g)$ | $V_p (cm^3/g)$ | Pt (%) |           |         |
| ND                | Blanche | 7.9   | 21.0              | 1.18           | 72.17  |           |         |

*Tableau II.9 : Analyse physique chimique de la diatomite naturelle Algérienne, [76]*

Les deux compositions de la diatomite Algérienne montre que la nature des constituants chimiques de cette dernière est les mêmes, mais le pourcentage de chaque élément varie, cette variation est justifié par la situation géographique de gisement. Le pourcentage de ces constituants varie d'une région à l'autre comme il varie d'un pays à un autre.

#### **II.4.2.3 Application du composite (Diatomite /MCP) dans le bâtiment**

Diatomite connue comme matériau respectueux de l'environnement, dans ces dernières années, plusieurs recherches ont été entamées pour étudier la possibilité de l'utiliser dans l'isolation hygrothermique dans l'habitats, et vue les caractéristiques physiques et chimiques de cette dernière comme on a montré précédemment, cette matière naturelle a été utilisée comme un matériau de support de stabilisation des MCP. S. Benayache et al, (2018) [77] et B. Xu et al (2014) [78], ont préparé un composite de paraffine / diatomite / nanotubes de carbone

à parois multiples avec des valeurs de température de fusion et de chaleur latente de 27,12 ° C et de 89,40 J / g, respectivement. A. Sari et al. (2012) [79] ont rapporté que les esters d'acides gras peuvent être absorbés avec succès par les pores de diatomite sans fuite d'esters d'acides gras au cours du processus de changement solide-liquide.

En outre, le composite polyéthylène glycol (PEG) / diatomite avec une température de fusion de 27,70 ° C et chaleur latente de 87,09 J / g ont été préparés. Un composite de paraffine / diatomite calciné sous forme de MCP de forme stable, présentant une température de fusion de 33,04 ° C et une chaleur latente de 89,54 J / g, a été préparé selon le procédé d'adsorption. S. Karaman et al. (2011) [80], ont décrit le composite PEG / diatomite en tant que nouveau MCP de forme stable. Le PEG pourrait être retenu à 50% en masse dans les pores des matrices de diatomite sans fuite du PEG fondu du composite.

Z. Wu et al. (2018) [81], ont préparé un composite MMCP / diatomite avec un ratio de 12,9% de la MCP encapsulé. M. Qin et al. (2017) [82] ont préparé plusieurs MCHCP en utilisant des microcapsules en MCP avec SiO<sub>2</sub> comme coque et la vésuvianite, la sépiolite et la zéolite comme matériau hygroscopique. Les résultats indiquent que le composite MMCP (SiO<sub>2</sub>-MCP) / vésuvianite présente une meilleure performance hygrothermique que les deux autres MCHCP. S. Benayache et al, (2018) [77] ont étudié l'imprégnation de la diatomite algérienne brute et calcinée avec un mélange de cire de paraffine (PW) et de paraffine liquide (LP) afin d'obtenir des MCP composites ayant une température de fusion inférieure à 30 ° C , et une chaleur latente appropriée. Les MCP composites à base de paraffine, et de la diatomite calcinée présentent une température de fusion de 28,44 ° C, et une chaleur latente d'environ 56,40 J / g.

Z. Chen et al. (2015) [83] ont préparé un MCHCP avec différents ratios massiques d'encapsulation de MCP, en utilisant SiO<sub>2</sub> comme coque et la diatomite comme matériau hygroscopique. Les résultats montrent que la coquille SiO<sub>2</sub> peut réduire le degré de super refroidissement des masses fondues de MCP et prévenir les fuites de ces dernières. Cela n'affectait pas les propriétés hygroscopiques de la diatomite.

Le *tableau II.10* présente une petite comparaison de la température de changement de phase et de la chaleur latente de certains composites à base de MCP et diatomite rapporté dans la littérature.

| <b>Composites MCP</b>                              | <b>Température de changement de phase °C</b> | <b>Chaleur latent [J/g]</b> |
|--|--|-----------------------------|
| SiO <sub>2</sub> -MCP/Diatomite (12.9 % de MCP)    | 27   | 19                          |
| mélange d'alcanes/SiO <sub>2</sub>                 | 27.4   | 81.6                        |
| Mélange de paraffine /Diatomite Algérienne brute   | 28.78  | 41.26                       |
| Mélange de paraffine /Diatomite Algérienne calciné | 28.39  | 56.4                        |
| Paraffine/DP                                       | 41.11  | 70.51                       |
| Acide gras binaire / diatomite                     | 16.74  | 66.81                       |
| Polyéthylène glycol (PEG)/diatomite                | 27.7   | 87.09                       |
| Paraffine /diatomite                               | 36.55  | 53.15                       |
| Paraffine-SiO <sub>2</sub> / Diatomite             | 56.5   | 45.5                        |

*Tableau II.10 : Comparaison de la température de changement de phase et de la chaleur latente avec celles rapportées pour certains composites des MCP composite dans la littérature [77].*

En raison de la fiabilité hygrothermique et de la performance de stockage de l'énergie thermique après le cyclage thermique, le composite MMCP / diatomite est efficace en stockage thermique et ajustement de l'humidité. Il peut être utilisé dans les panneaux muraux intérieurs des bâtiments.

## **II.5 Conclusion**

La gestion thermique idéale et le contrôle de l'humidité du climat intérieur sont primordiales non seulement pour répondre aux exigences du confort thermique humain, mais également pour économiser l'énergie. Au cours des dernières décennies, le stockage de la chaleur latente et les matériaux pour le contrôle de l'humidité dans le climat intérieur ont été largement étudiés et développés.

De récentes études intégrant les MCP dans les matériaux de construction, ont tenté d'explorer les avantages d'une telle pratique et atténuer les inconvénients associés. Nous citerons en particulier, le risque de fuite de MCP ayant des effets néfastes sur les propriétés mécaniques, thermiques, et de durabilité des composites. Ces études ont abouti à des solutions d'incorporation des MCP éliminant ces désagréments.

Enfin, les études sur la possibilité d'utiliser la diatomite, et le composite (diatomite/MCP) comme matériaux isolant dans le secteur de bâtiment, en plus d'être respectueux de l'environnement, montrent une forte capacité hygrothermique, ce qui favorise des conditions de confort optimales.

En conclusion, la diatomite, matériau isolant dans la construction, peut largement substituer le polystyrène expansé (PSE), sera l'objet du chapitre suivant.

## **II.6 Références**

- [1] Z. Rao, S. Wang, Z. Zhang. Energy saving latent heat storage and environmental friendly humidity-controlled materials for indoor climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) 3136–3145
- [2] N. Zhu, ZJ. Ma, SW. Wang. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review. *Energy Conversion and Management*, 2009; 50(12):3169–81.
- [3] AM. Khudhair, MM. Farid. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 2004; 45(2):263–75.
- [4] VV. Tyagi, D. Buddhi. PCM thermal storage in buildings: a state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007; 11(6):1146–66.
- [5] X. Wang, YP. Zhang, W. Xiao, RL. Zeng, QL. Zhang, HF. Di. Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. *Chinese Science Bulletin*, 2009; 54(6):920–8.
- [6] R. Baetens, BP. Jelle, A. Gustavsen. Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review. *Energy and Buildings* 2010; 42(9):1361–8.
- [7] I. Marco. Phase change materials and innovation products—Brianza Plastica. Beijing, China: Seminar; 2005.
- [8] YP. Zhang, GB. Zhou, KP. Lin, QL. Zhang, HF. Di. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook. *Building and Environments*, 2007; 42(6):2197–209.
- [9] T. Otaka. Study of a green roof building air-conditioning system with thermal energy storage units using light weight soil—performances of thermal energy storage units. *Proceedings of the international conference on power engineering, 2009 (ICOPE-09)* 2009; 1:299–303.
- [10] T. Otaka, K. Nagata. Performances of thermal energy storage unit using light weight soil for a green roof building air-conditioning system. In: *Proceedings of the 3rd Asian conference on refrigeration and air-conditioning vols. I and II*. 2006. p. 753–6.
- [11] I. KAR, JR. Henriquez. Thermally effective windows with moving phase change material curtains. *Applied Thermal Engineering* 2001; 21(18):1909–23.
- [12] T. Bednar, J. Dreyer, M. Teibinger. The influence of construction material moisture on the indoor humidity and surface conditions. *Research in Building Physics and Building Engineering*, 2006:549–52.
- [13] F. Maki, T. Aoki. Changes of indoor humidity in various living spaces. *Mokuzai Gakkaishi*, 2006; 52(1):37–43
- [14] N. Subramanyam, MP. Maiya, SS. Murthy. Application of desiccant wheel to control humidity in air-conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 2004; 24(17–18):2777–88.
- [15] K. Nagaya, T. Senbongi, Y. Li, J. Zheng, I. Murakami. High energy efficiency desiccant assisted automobile air-conditioner and its temperature and humidity control system. *Applied Thermal Engineering*, 2006; 26(14–15):1545–51.

- [16] T. Morooka, Y. Homma, M. Norimoto. Criterion for estimating humidity control capacity of materials in a room. *Journal of Wood Science*, 2007; 53(3):192–8.
- [17] Y. Ding, JP Meng, JS. Liang, GS. Li, XH. Liang. Preparation and their property of porous mineral Eco-materials for ambient humidity self-controlling. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004; 33:114–8.
- [18] T. Hasegawa, S. Iwasaki, Y. Shibutani, I. Abe. Preparation of superior humidity-control materials from kenaf. *Journal of Porous Materials*, 2009; 16(2):129–34.
- [19] T. Horikawa, Y. Kitakaze, T. Sekida, J. Hayashi, M. Katoh. Characteristics and humidity control capacity of activated carbon from bamboo. *Bio- resource Technology*, 2010; 101(11):3964–9.
- [20] Yan ZF, Shang JL, Mal BQ, Huang PZ. Experimental study of moisture buffering effect of a new building material. In: *Proceedings of the 5th international symposium on heating, ventilating and air conditioning, vols I and II*, 2007. p. 453–6.
- [21] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*. 23 (3) (2003) 251–283.
- [22] D. Zhou, C.-Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy* 92 (2012) 593–605.
- [23] A. Sharma, V.V. Tyagi, C. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2) (2009) 318–345.
- [24] F. Fernandes, S. Manari, M. Aguayo, K. Santos, T. Oey, Z. Wei, G. Falzone, N. Neithalath, G. Sant. On the feasibility of using phase change materials (PCMs) to mitigate thermal cracking in cementitious materials, *Cement and Concrete Composites*. 51 (2014) 14–26.
- [25] B. Šavija, E. Schlangen, Use of phase change materials (PCMs) to mitigate early age thermal cracking in concrete: theoretical considerations, *Construction and Building Materials*. 126 (2016) 332–344.
- [26] YR. Kim, BS. Khil, S.-J. Jang, W.-C. Choi, H.-D. Yun, Effect of barium-based phase change material (PCM) to control the heat of hydration on the mechanical properties of mass concrete, *Thermochimica Acta* 613 (2015) 100– 107.
- [27] NP. Sharifi, K.C. Mahboub, Application of a PCM-rich concrete overlay to control thermal induced curling stresses in concrete pavements, *Construction and Building Materials*. 183 (2018) 502–512.
- [28] HS. Esmaeeli, Y. Farnam, JE. Haddock, PD. Zavattieri, WJ. Weiss, Numerical analysis of the freeze-thaw performance of cementitious composites that contain phase change material (PCM), *Materials and Design*. 145 (2018) 74–87.
- [29] AR. Sakulich, DP. Bentz, Increasing the service life of bridge decks by incorporating phase-change materials to reduce freeze-thaw cycles, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 24 (8) (2011) 1034–1042.
- [30] S. Pilehvar, A.M. Szczotok, J.F. Rodríguez, L. Valentini, M. Lanzón, R. Pamies, A.-L. Kjøniksen, Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro- encapsulated phase change materials, *Construction and Building Materials*. 200 (2019) 94– 103.

- [31] M. Hunger, A.G. Entrop, I. Mandilaras, H. Brouwers, M. Founti, The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials, *Cement and Concrete Composites*. 31 (10) (2009) 731–743.
- [32] H. Cui, W. Tang, Q. Qin, F. Xing, W. Liao, H. Wen, Development of structural-functional integrated energy storage concrete with innovative macro-encapsulated PCM by hollow steel ball, *Applied Energy* 185 (2017) 107–118.
- [33] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, J.-J. Roux, A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (1) (2011) 379–391.
- [34] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Building*. 59 (2013) 82–103.
- [35] A. Jamekhorshid, S. Sadrameli, M. Farid, A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31 (2014) 531–542.
- [36] L. Sánchez-Silva, J.F. Rodríguez, A. Romero, A.M. Borreguero, M. Carmona, P. Sánchez, Microencapsulation of PCMs with a styrene-methyl methacrylate copolymer shell by suspension-like polymerisation, *Chemical Engineering. J.* 157 (1) (2010) 216–222.
- [37] E.Y. Tuncel, B.Y. Pekmezci, A sustainable cold bonded lightweight PCM aggregate production: Its effects on concrete properties, *Construction and Building Materials*. 181 (2018) 199–216
- [38] A. Marani, Moncef L. Nehd. Integrating phase change materials in construction materials: Critical review. *Construction and Building Materials*, 217 (2019) 36–49.
- [39] M. Lachheb, Z. Younsi, H. Naji, M. Karkri, S.B. Nasrallah, Thermal behavior of a hybrid PCM/plaster: a numerical and experimental investigation, *Applied Thermal Engineering*. 111 (2017) 49–59.
- [40] Y. Kusama, Y. Ishidoya, Thermal effects of a novel phase change material (PCM) plaster under different insulation and heating scenarios, *Energy and Building*. 141 (2017) 226–237.
- [41] B.A. Young, G. Falzone, Z. She, A.M. Thiele, Z. Wei, N. Neithalath, G. Sant, L. Pilon, Early-age temperature evolutions in concrete pavements containing microencapsulated phase change materials, *Construction and Building Materials*. 147 (2017) 466–477.
- [42] Z. Zhang, G. Shi, S. Wang, X. Fang, X. Liu, Thermal energy storage cement mortar containing n-octadecane/expanded graphite composite phase change material, *Renewable Energy* 50 (2013) 670–675.
- [43] S. Kim, S.J. Chang, O. Chung, S.-G. Jeong, Thermal characteristics of mortar containing hexadecane/xGnP MCPFS and energy storage behaviors of envelopes integrated with enhanced heat storage composites for energy efficient buildings, *Energy and Building*. 70 (2014) 472–479.
- [44] S.-G. Jeong, J. Jeon, J. Cha, J. Kim, S. Kim, Preparation and evaluation of thermal enhanced silica fume by incorporating organic PCM, for application to concrete, *Energy and Building*. 62 (2013) 190–195.

- [45] Y. Kang, S.-G. Jeong, S. Wi, S. Kim, Energy efficient Bio-based PCM with silica fume composites to apply in concrete for energy saving in buildings, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 143 (2015) 430–434.
- [46] T. Xu, Q. Chen, Z. Zhang, X. Gao, G. Huang, Investigation on the properties of a new type of concrete blocks incorporated with PEG/SiO<sub>2</sub> composite phase change material, *Building and Environments*. 104 (2016) 172–177.
- [47] B. Ma, S. Adhikari, Y. Chang, J. Ren, J. Liu, Z. You, Preparation of composite shape-stabilized phase change materials for highway pavements, *Construction and Building Materials*. 42 (2013) 114–121
- [48] X. Wang, H. Yu, L. Li, M. Zhao, Experimental assessment on a kind of composite wall incorporated with shape-stabilized phase change materials (SSPCMs). *Energy and Buildings* 128 (2016) 567–574
- [49] HW. Min, S. Kim, H.S. Kim, Investigation on thermal and mechanical characteristics of concrete mixed with shape stabilized phase change material for mix design, *Construction and Building Materials*. 149 (2017) 749–762.
- [50] K. Biswas, J. Lu, P. Soroushian, S. Shrestha, Combined experimental and numerical evaluation of a prototype nano-PCM enhanced wallboard, *Applied Energy* 131 (2014) 517–529.
- [51] Y. Cai, G. Sun, M. Liu, J. Zhang, Q. Wang, Q. Wei, Fabrication and characterization of capric–lauric–palmitic acid/electrospun SiO<sub>2</sub> nanofibers composite as form-stable phase change material for thermal energy storage/ retrieval, *Sol. Energy* 118 (2015) 87–95.
- [52] M. Sayyar, R.R. Weerasiri, P. Soroushian, J. Lu, Experimental and numerical study of shape-stable phase-change nanocomposite toward energy-efficient building constructions, *Energy and Building*. 75 (2014) 249–255.
- [53] B. Ma, X.-Y. Zhou, J. Liu, Z. You, K. Wei, X.-F. Huang, Determination of specific heat capacity on composite shape-stabilized phase change materials and asphalt mixtures by heat exchange system, *Materials* 9 (5) (2016) 389.
- [54] W. Si, X.-Y. Zhou, B. Ma, N. Li, J.-P. Ren, Y.-J. Chang, The mechanism of different thermoregulation types of composite shape-stabilized phase change materials used in asphalt pavement, *Construction and Building Materials*. 98 (2015) 547–558.
- [55] J. Ren, B. Ma, W. Si, X. Zhou, C. Li, Preparation and analysis of composite phase change material used in asphalt mixture by sol–gel method, *Construction and Building Materials*. 71 (2014) 53–62.
- [56] X. Li, J.G. Sanjayan, J.L. Wilson, Fabrication and stability of form-stable diatomite/paraffin phase change material composites, *Energy and Building*. 76 (2014) 284–294.
- [57] A.R. Sakulich, D.P. Bentz, Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine lightweight aggregate, *Construction and Building Materials*. 35 (2012) 483–490.
- [58] Y. Farnam, H.S. Esmaeeli, P.D. Zavattieri, J. Haddock, J. Weiss, Incorporating phase change materials in concrete pavement to melt snow and ice, *Cement and Concrete Composites*. 84 (2017) 134–145.

- [59] S.A. Memon, H. Cui, T.Y. Lo, Q. Li, Development of structural–functional integrated concrete with macro-encapsulated PCM for thermal energy storage, *Applied Energy* 150 (2015) 245–257.
- [60] H. Cui, S.A. Memon, R. Liu, Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete, *Energy and Building*. 96 (2015) 162–174.
- [61] G. Kastiukas, X. Zhou, J. Castro-Gomes, Development and optimisation of phase change material-impregnated lightweight aggregates for geopolymer composites made from aluminosilicate rich mud and milled glass powder, *Construction and Building Materials*. 110 (2016) 201–210.
- [62] Y. Farnam, M. Krafcik, L. Liston, T. Washington, K. Erk, B. Tao, J. Weiss, Evaluating the use of phase change materials in concrete pavement to melt ice and snow, *Journal of Materials In Civil Engineering* . 28 (4) (2015) 04015161.
- [63] S. A. Memon, H. Cui, H. Zhang, F. Xing, Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete, *Applied Energy* 139 (2015) 43–55.
- [64] H. B. Kim, M. Mae, Y. Choi, Application of shape-stabilized phase-change material sheets as thermal energy storage to reduce heating load in Japanese climate, *Building and Environments*. 125 (2017) 1–14.
- [65] B. A. Young, G. Falzone, Z. Wei, G. Sant, L. Pilon, Reduced-scale experiments to evaluate performance of composite building envelopes containing phase change materials, *Construction Building Material*. 162 (2018) 584–595.
- [66] A. Marani, M. Madhkan, An innovative apparatus for simulating daily temperature for investigating thermal performance of wallboards incorporating PCMs, *Energy and Building*. 167 (2018) 1–7.
- [67] U. Stritih, V. Tyagi, R. Stropnik, H. Paksoy, F. Haghghat, M.M. Joybari, Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings, *Sustainable Cities and Society*. 41 (2018) 286–295.
- [68] Y. Han, J.E. Taylor, Simulating the Inter-Building Effect on energy consumption from embedding phase change materials in building envelopes, *Sustainable Cities and Society*. 27 (2016) 287–295.
- [69] A. Castell, M.M. Farid, Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness in cooling building envelopes passively, *Energy and Building*. 81 (2014) 59–71.
- [70] A. Bastani, F. Haghghat, J. Kozinski, Designing building envelope with PCM wallboards: design tool development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .31 (2014) 554–562.
- [71] X. Shi, S.A. Memon, W. Tang, H. Cui, F. Xing, Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels, *Energy and Building*. 71 (2014) 80–87.
- [72] L. Navarro, A. de Gracia, A. Castell, S. Álvarez, L.F. Cabeza, PCM incorporation in a concrete core slab as a thermal storage and supply system: proof of concept, *Energy and Building*. 103 (2015) 70–82.

- [73] L. Royon, L. Karim, A. Bontemps, Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings, *Energy and Building*. 82 (2014) 385–390.
- [74] H. Meradi, L.H. Atout, A. Balaska, La valorisation des ressources naturelles: cas de la diatomite de la region DE SIG, 3ème conférence internationale sur le soudage, le CND et l'Industrie des matériaux et alliages (IC-WNDT-MI'12) Oran du 26 -28 Nov2012.
- [75] J. Zheng, J. Shi, Q. Ma, X. Dai, Z. Chen, Experimental study on humidity control performance of diatomite-based building materials, *Applied Thermal Engineering* 114 (2017) 450–456
- [76] B. Hamdi and S. Hamdi, Thermal Properties of Algerian Diatomite, Study of the Possibility to Its Use in the Thermal Insulation, International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2013), Proceedings, Antalya, Turkey, 9-12 October 2013.
- [77] S. Benayache, S. Alleg, A. Mebrek, J. J. Suñol, Thermal and microstructural properties of paraffin/diatomite composite, *Vacuum* 157 (2018) 136–144.
- [78] B. Xu, Z. Li, Paraffin/diatomite/multi-wall carbon nanotubes composite phase change material tailor-made for thermal energy storage cement based composites, *Energy* 72 (2014) 371–380.
- [79] A. Sari, A. Karaipekli, Fatty acid esters-based composite phase change materials for thermal energy storage in building, *Applied Thermal Engineering* . 37 (2012) 208–216.
- [80] S. Karaman, A. Karaipekli, A. Sari, A. Biçer, Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011) 1647–1653.
- [81] Z. Wu, M. Qin, Z. Chen, Phase change humidity control material and its application in buildings, *Procedia Engineering*. 205 (2017) 1011–1018.
- [82] M. Qin, Z. Chen, Synthesis and characteristics of composite phase change humidity control materials, *Energy Procedia* 139 (2017) 493–498.
- [83] Z. Chen, D. Su, M. Qin, G. Fang, Preparation and characteristics of composite phase change material (CPCM) with SiO<sub>2</sub> and diatomite as endothermal-hygroscopic material, *Energy and Building*. 86 (2015) 1–6.

# Chapitre 03

---

Positionnement du problème  
physique et modélisation  
mathématique

---

## Sommaire Chapitre III

|   |     |
|---|-----|
| Liste des figures Chapitre III.....   | 101 |
| Liste des tableaux Chapitre III .....   | 102 |
| III.1 Introduction .....  | 103 |
| III.2 Description du problème physique .....  | 103 |
| III.3 Modélisation mathématique .....   | 106 |
| III.3.1 Hypothèses du modèle .....  | 108 |
| III.3.2 Les équations gouvernantes de transfert couplé de chaleur et d'humidité ..... | 109 |
| III.3.2.1 Transfert d'humidité .....  | 110 |
| III.3.2.2 Transfert de chaleur.....   | 111 |
| III.3.2.3 La méthode de capacité thermique effective .....                            | 112 |
| III.3.2.4 Condition en limites .....  | 113 |
| III.4 Solution numérique .....  | 114 |
| III.4.1 COMSOL Multiphysics .....   | 114 |
| III.4.2 La méthode des éléments finis.....  | 115 |
| III.5 Conclusion.....   | 117 |
| III.6 Références .....  | 118 |

## Liste des figures Chapitre III

|   |     |
|---|-----|
| Figure III.1: Vue axonométrique d'un mur typique en briques creuses frittées largement utilisé en Algérie.....  | 104 |
| Figure III.2: Isothermes de sorption des matériaux constituant les cas étudiés selon [9, 12]  | 106 |
| Figure III.3: Profile de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents [2].....   | 107 |
| Figure III.4 : Profile d'équilibre de la teneur en eau d'un matériau typique.....   | 108 |
| Figure III.5: Humidité dans les pores idéalisés [2]: (a) pores dans la région hygroscopique, (b) des pores dans la région capillaire et (c) des pores dans la partie supérieure de la région hygroscopique..... | 109 |
| Figure III.6 : Définition du V.E.R, sur lequel sont moyennées les propriétés physiques.....   | 109 |
| Figure III.7: Interface du logiciel COMSOL Multiphysics [15].....   | 115 |
| Figure III.8 : Positionnement des nœuds et géométrie pour le cas 2D .....   | 116 |

## Liste des Tableaux Chapitre III

Tableau III.1 : Propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés..... 105

### **III.1 Introduction**

Les enveloppes de construction sont constamment exposées aux sollicitations dynamiques venant de l'extérieur. Les variations de la température, de l'humidité et de la pression atmosphérique ont un impact majeur sur l'état physique et les performances des composants du bâtiment. Ils représentent des facteurs déterminants de la durabilité globale de l'enveloppe la construction.

Afin d'assurer une bonne conception, toutes les méthodes de prévision du comportement hygrothermique des composants du bâtiment doivent être prises en considération. Le résultat final devrait assurer un bon confort pour les habitants. Dans cette optique, plusieurs approches seront discutées au cours de ce chapitre.

### **III.2 Description du problème physique**

Cette étude de recherche s'articule sur la possibilité d'utiliser le composite diatomite/MCP (MCHCP) comme matériau isolant hygrothermique pour les bâtiments résidentiels et commerciaux Algérienne d'une côté, et comme une solution rentable écologique pour substituer le polystyrène expansé (PSE) de l'autre côté. Le PSE est largement utiliser dans l'isolation thermique dans la construction des bâtiments Algérienne. Ce dernier est une matière chimique contenant un contaminant appelé hexabromocyclododécane (HBCD). Le HBCD est utilisé comme retardateur de flamme bromé dans le PSE utilisé dans la construction. À cet effet, le PSE a été classé avec les matériaux Polluant Organique Persistant (POP), dans l'annexe A de la convention de Stockholm. L'Algérie fait partie des pays qui ont signés cette convention, et à l'horizon de 2020, notre pays doit trouver une solution pour le substitue.

Pour répondre à ce problème, L'effet de la diatomite et de la diatomite améliorée par les MCP (MCHCP) sur la performance hygrothermique des briques creuses largement utiliser dans la construction des bâtiments Algérienne sera étudié et analysé numériquement. Le choix de cette matière résulte de la synthèse des travaux regroupés dans le chapitre II. L'Algérie est un pays riche de cette matière naturelle écologique, mais les travaux sur la possibilité de l'utiliser dans le secteur de construction sont très limités soit sur le plan numérique soit sur le plan expérimental (un sujet d'actualité).

Pour améliorer le mode de construction en Algérie, les matériaux d'isolation pourraient être soit inclus dans les cavités des murs en briques creuses frittées, soit utiliser comme plaque

latérale à l'intérieur des habitats, ce qui pourrait bien empêcher le transfert d'humidité et de chaleur.

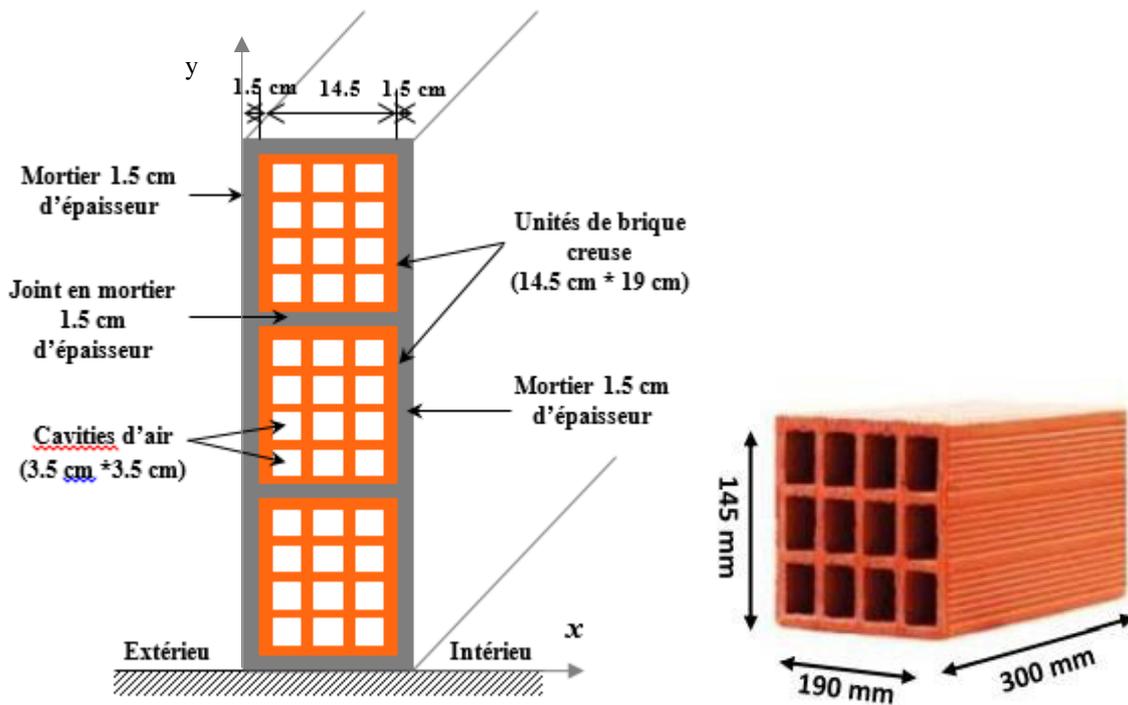


Figure III.1 : Vue axonométrique d'un mur typique en briques creuses frittées largement utilisé en Algérie.

Le modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité présenté dans le chapitre III, et le logiciel COMSOL multiphysics ont été utilisés pour étudier l'impact de différents matériaux hygroscopiques sur la performance hygrothermique d'un mur extérieur typique d'un bâtiment résidentiel en Algérie (figure III.1). Le mur extérieur est constitué de:

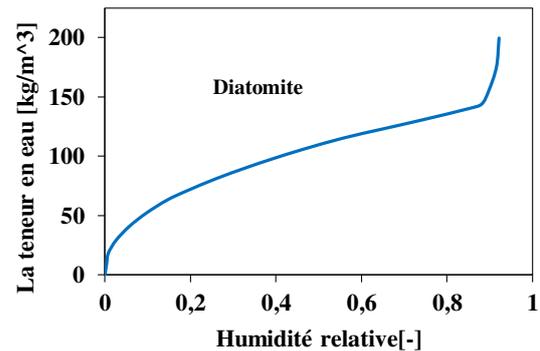
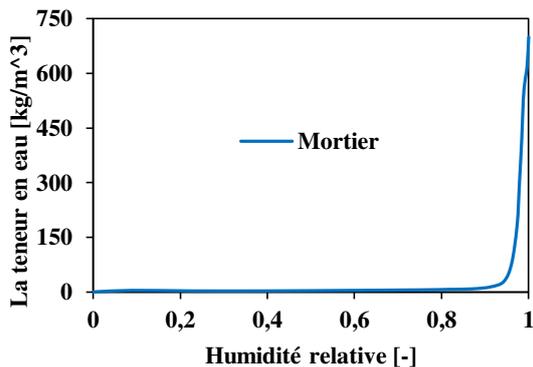
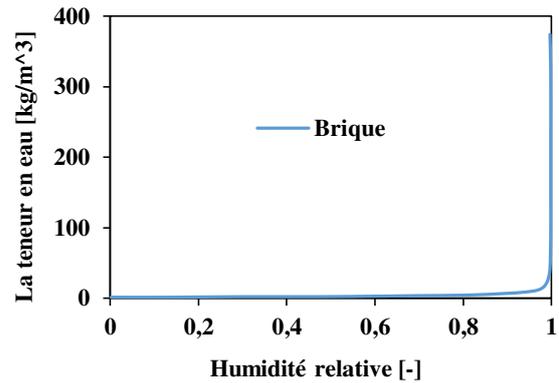
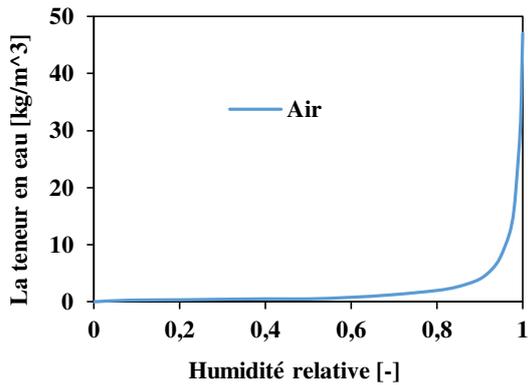
- Briques creuses frittées de grande taille de 12 cavités d'airs égaux (BB12CE) avec un poids de 5 à 6 kg.
- Ses dimensions sont : 30 cm de longueur, 19 cm de largeur et 14,5 cm d'épaisseur.
- Les cavités d'air ont une section parallépipédique de  $(3.5 * 3.5 \text{ cm}^2)$
- Un mortier à base de ciment avec un taux de 1/3 ciment / sable est utilisé dans les deux joints et sur les deux côtés (surfaces intérieure et extérieure) du mur d'une épaisseur de 1,5 cm.
- Le PSE, la diatomite et le MCHCP sont remplis dans les cavités de briques en tant que matériaux isolants afin de comparer leurs effets sur les performances hygrothermiques des briques creuses frittées.

Les propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés dans la résolution numérique sont données dans le tableau III.1, et illustré dans la figure III.2.

| Propriétés                    |         | $\rho_s$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | cp<br>[J/kg K] | $\lambda$<br>[W/m K] | $\delta \times 10^{-10}$<br>[kg/m s Pa] | Temp de fusion<br>[°C] | La chaleur latent<br>[kJ/kg] |
|-------------------------------|---------|----------------------------------|----------------|----------------------|---|------------------------|------------------------------|
| Diatomite<br>[10,11]          |         | 666.7                            | 1436           | 0.7                  | 0.295                                   | -                      | -                            |
| Air<br>[12]                   |         | 1.23                             | 1006.43        | 0.026                | 5.62                                    | -                      | -                            |
| Brique<br>[12]                |         | 1600                             | 840            | 0.682                | 0.26                                    | -                      | -                            |
| Mortier<br>[12]               |         | 230                              | 920            | 0.6                  | 0.0385                                  | -                      | -                            |
| PE<br>[13]                    |         | 20                               | 1500           | 0.04                 | 0.0187                                  | -                      | -                            |
| MCP<br>(100%) [14]            | Liquide | 775                              | 2660           | 0.149                | -                                       | 28.1                   | 145.9                        |
|                               | Solide  | 814                              | 2140           | 0.35                 |   |                        |                              |
| MCHCP<br>(12.9 % MCP)<br>[14] | Liquide | 680.67                           | 1615.8         | 0.62                 | 5                                       | 27.0                   | 19                           |
|                               | Solide  | 685.7                            | 1543.8         | 0.65                 |   |                        |                              |

Tableau III.1: Propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés.

Comme indiqué dans le tableau III.1, le rapport d'encapsulation du MCP a un effet important sur la quantité d'énergie libérée ou absorbée lors du changement de MCP et de MCHCP.



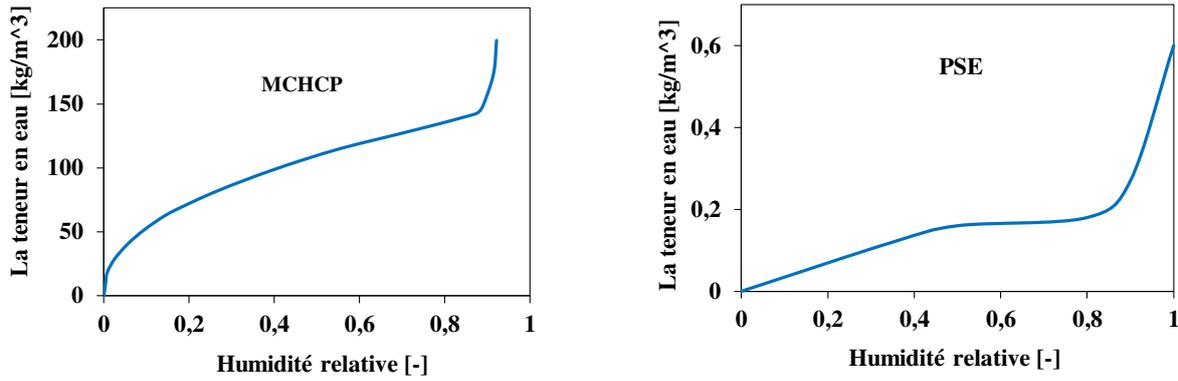


Figure III.2: Isothermes de sorption des matériaux constituant utilisés dans la simulation numérique selon [10, 13].

En raison de la symétrie de la géométrie et des conditions aux limites dans la direction longitudinale du mur (direction Z), le problème est traité en deux dimensions. La surface extérieure des briques entourés par le mortier utilisé dans la simulation est exposé à des conditions climatiques dépendantes du temps (température ( $T_{ext}(t)$ ), humidité relative ( $\varphi_{ext}(t)$ ), rayonnement solaire avec une absorptivité  $\varepsilon = 0,87$ , convection forcé  $h_{a,ext}$ , coefficient de transfert massique extérieur  $\beta_{s,ext} = 1.838200 e^{-7}$ .

Les variables extérieurs associés dépendantes du temps (température de l'air, humidité relative de l'air, rayonnement solaire) prises en compte dans cette étude sont extraites de données météorologiques typiques de la région considérée [15].

Sur la surface intérieure des briques, l'humidité relative de l'air, la température, le coefficient de convection libre sont considéré fixe,  $\varphi_{int} = 50 \%$ ,  $T_{int} = 25 [^{\circ}C]$ ,  $h_{int} = 3.25 [W/m^2K]$ , coefficient de transfert massique intérieur  $\beta_{s,int} = 5.8823e^{-8}$ , respectivement. Ces paramètres sont choisis comme des conditions de vie confortables. Au début, la température et l'humidité relative sont respectivement  $T_{ini} = 25 [^{\circ}C]$ ,  $\varphi_{ini} = 50 \%$ . Une condition d'isolation adiabatique en dessous et au-dessus de la cellule en brique est considérée.

### III.3 Modélisation mathématique

Plusieurs travaux de recherches ont été menés ces dernières décennies ou la majorité d'entre eux sont basé sur des approches de modélisation phénoménologiques inspirées des travaux de (AV. Luikov, 1966) [1]. Un modèle dynamique a été développé par F. Tariku et al (2010) [2] pour résoudre le problème de transfert de la chaleur, de l'air et de l'humidité existant entre l'enveloppe et la chambre.

Un modèle basé sur une concentration de vapeur d'eau et de température a été fondé par M. Qin et al (2010) [3], un accord important avec les résultats expérimentaux a été trouvé. Afin de fournir des données valides au modèle de transfert de chaleur et d'humidité, TZ. Desta et al (2011) [4] ont testé le transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité d'un habitat. K. Abahri et al (2011) [5] ont proposé un modèle unidimensionnel permettant d'évaluer le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans des matériaux de construction poreux, ce qui a permis de simplifier le problème mathématique initial en une équation du quatrième ordre facilement à résoudre. Un modèle dynamique couplé de transfert de chaleur et d'humidité avec condensation dans un tissu poreux avec une faible température a été résolue par DH. Xu et al (2013) [6]. Les bilans énergétique et massique sont exprimés à l'aide de moteurs de transfert mesurables (Température, teneur en eau, pression de vapeur...etc) et des coefficients liés explicitement aux propriétés macroscopiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique, perméabilité à la vapeur d'eau,...) déterminés expérimentalement.

Dans ce qui va suivre, un modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité basée sur le travail d'HM. Künzle (1995) [7], est établi pour décrire le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouches. Un logiciel de simulation numérique appelé COMSOL Multiphysics basé sur la méthode des éléments finis a été exploité pour résoudre les équations différentielles de transfert. Nous considérons la température et l'humidité relative comme des moteurs potentiels régissant le transfert de chaleur et d'humidité, assurant la continuité des variables à l'interface entre les couches. L'humidité relative est un paramètre continue permettant de qualifier la qualité des ambiances habitables, par contre la teneur en humidité est un variable d'état dépend de la nature microstructurale du matériau, ce qui engendre des problèmes de discontinuité comme illustré à la *figure III.3*

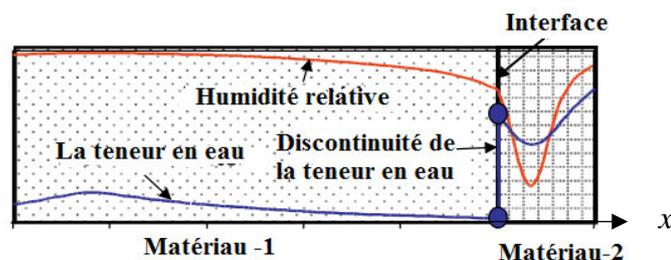


Figure III.3: Profil de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents [2].

### III.3.1 Hypothèses du modèle

La plupart des matériaux de construction sont poreux et composés de matrices solides et des pores. Dans les pores, l'humidité peut exister dans l'un des trois états thermodynamiques de la matière, gaz (vapeur), liquide et solide (glace). Les principaux mécanismes de transfert d'humidité peuvent être par diffusion de vapeur, succion capillaire ou par la combinaison des deux, en fonction de la teneur en humidité du matériau.

Les matériaux ont une courbe caractéristique unique de la teneur en humidité d'équilibre qui couvre les régions hygroscopiques et capillaires de l'eau. Ces régions sont communément appelées courbes d'isotherme de sorption et de rétention d'eau, respectivement, pour lesquelles une courbe caractéristique typique de la teneur en eau à l'équilibre est représentée dans la *figure III.4*.

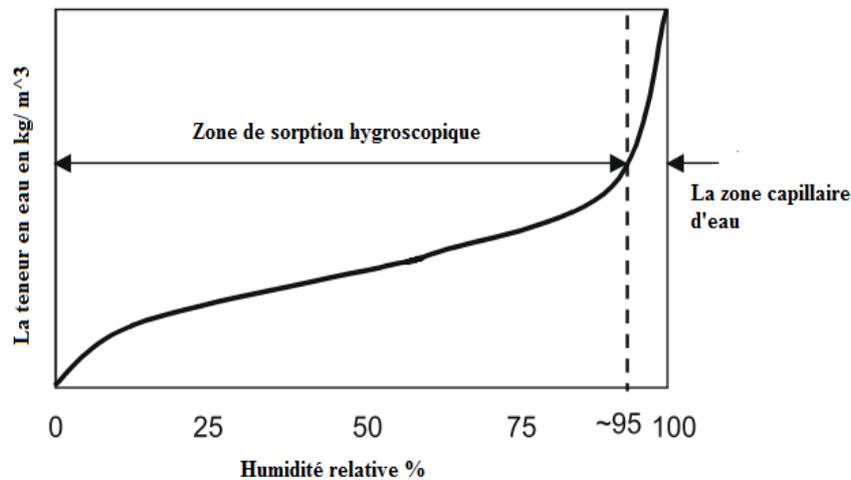


Figure III.4 : Profil d'équilibre de la teneur en eau d'un matériau typique.

Dans la région hygroscopique, les pores sont principalement remplis de vapeur d'eau (*figure III. 5 (a)*) et, par conséquent, le transport de l'humidité se fait principalement par diffusion de vapeur. Le transport d'eau liquide est possible dans le cas où les pores sont remplis d'eau liquide (*figure III. 5 (b)*). Ce mécanisme de flux est très actif dans la région capillaire, où l'humidité relative est supérieure à 95%. Le transport de vapeur et de liquide peut coexister à l'extrémité supérieure de la région hygroscopique, comme illustré sur la *figure III.5 (c)*. Dans cette région, la diffusion de vapeur et la succion capillaire sont actives respectivement dans les grands et les petits pores. La vapeur diffuse dans les pores ouverts et se condense sur le ménisque capillaire, tandis qu'à l'autre extrémité du ménisque, l'eau s'évapore dans l'espace des pores ouverts qui suit. Cela implique que le chemin de diffusion est réduit, entraînant une augmentation du taux d'humidité.

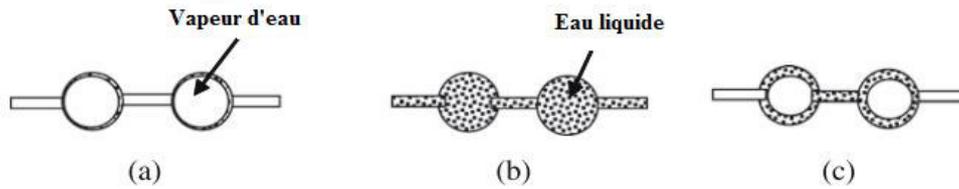


Figure III.5 : Humidité dans les pores idéalisés [2]: (a) pores dans la région hygroscopique, (b) des pores dans la région capillaire et (c) des pores dans la partie supérieure de la région hygroscopique.

Sur la base de l'étude d'HM. Künzle [7], les hypothèses suivantes sont considérées:

- Chaque matériau est considéré comme un milieu poreux homogène ;
- L'équilibre thermodynamique local est vérifié (au niveau du pore);
- La phase liquide est constituée uniquement d'eau pure (les paramètres thermophysiques retenus sont ceux de l'eau pure) ;
- L'air sec et la vapeur d'eau sont des gaz parfaits et incompressibles ;
- Les effets de la réaction chimique, de l'hystérésis, de la déformation, et de la gravité ne sont pas pris en compte.

### III.3.2 Les équations gouvernantes de transfert couplé de chaleur et d'humidité

La forme générale des équations qui décrivent les processus de transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux est donnée par un système de deux équations aux dérivées partielles macroscopique, déterminé par l'homogénéisation en imposant l'équilibre de masse et d'énergie dans un élément de volume d'un milieu poreux appelé Volume élémentaire représentatif (V.E.R). Ce volume doit être suffisamment grand pour contenir toutes les données moyennes des grandeurs microscopiques correspondantes, et en même temps petites devant les variations à l'échelle macroscopique (voir figure III.6) [5].

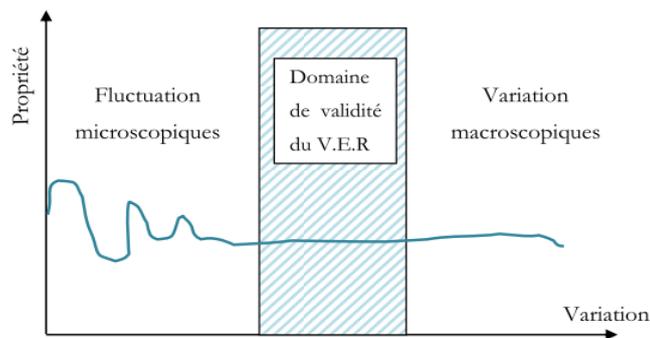


Figure III.6 : Définition du V.E.R, sur lequel sont moyennées les propriétés physiques

### III.3.2.1 Transfert d'humidité

L'équation de conservation de masse est donnée par la relation suivant :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\nabla[g_v + g_l] + S_\omega \quad (\text{III.1})$$

Où,  $\omega$  est la teneur en humidité [ $kg/m^3$ ];  $t$  est le temps [ $s$ ];  $g_v$  est la densité de flux de vapeur [ $kg/(m^2s)$ ];  $g_l$  est la densité de flux liquide [ $kg/(m^2s)$ ],  $S_\omega$  [ $kg/(m^3 s)$ ] est un terme source.

Comme cité précédemment, la teneur en humidité est un variable discontinue, alors l'équation de conservation de masse est transformée en utilisant l'humidité relative et la température comme moteurs de transfert hygrothermique ou les équations constitutives sont décrites par la loi de Fick pour la diffusion de vapeur et la loi de Darcy pour le mouvement d'eau liquide, l'humidité relative est définie par la relation :

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v,s}(T)} \quad (\text{III.2})$$

Où,  $P_v$  désigne la pression partielle de vapeur d'eau [ $Pa$ ];  $P_{v,s}(T)$  désigne la pression de vapeur saturante qui dépend de la température. La teneur en eau,  $\omega$  [ $kg/m^3$ ] peut être exprimée en fonction de l'humidité relative,  $\varphi$  [-]. La pression partielle de vapeur d'eau saturée dans l'air a la forme :

$$P_{v,s}(T) = e^{23.5771 - \frac{4042.9}{T-37.58}} \quad (\text{III.3})$$

La densité de flux de vapeur a la forme :

$$g_v = D_m \nabla m + D_T \nabla T \approx D_m \nabla m = -\delta \nabla P_v \quad (\text{III.4})$$

Où,  $D_m$  [ $kg/(m s)$ ] est le coefficient de diffusion lié à la masse,  $m$  [-] est la fraction massique de vapeur d'eau liée à la masse totale du mélange vapeur / air;  $D_T$  [ $kg/(m s K)$ ] est le coefficient de la thermo-diffusion;  $\delta$  [ $kg/(m.s.Pa)$ ] est le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air. La contribution  $D_T \nabla T$  qui représente l'effet de Soret est généralement négligeable et la fraction massique de vapeur d'eau liée à la masse totale du mélange vapeur-air peut être remplacée par la pression partielle de vapeur d'eau. Le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air a la forme :

$$\delta = \frac{2.306 \cdot 10^{-5}}{R_v T} \left( \frac{T}{273.15} \right)^{1.81} \quad (\text{III.5})$$

Où,  $R_v = 461.5 [J/(kg K)]$ , De plus, dans le cas de petits capillaires, le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau,  $\mu$ , doit être introduit et la densité de flux de vapeur se présente sous la forme :

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} \nabla P_v = -\delta_p \nabla P_v \quad (III.6)$$

Où,  $\delta_p [kg/(m.s.Pa)]$  perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de construction ; à l'aide de l'équation III.2, la densité de flux de vapeur peut être écrite sous la forme :

$$g_v = -\delta_p \nabla P_v = -\delta_p P_{v,s}(T) \nabla \varphi - \delta_p \varphi \frac{dP_{v,s}(T)}{dT} \nabla T \quad (III.7)$$

La conduction liquide est décrite par la densité du flux liquide (loi de Darcy)  $[kg/(m^2.s)]$  sous la forme :

$$g_l = -D_\omega(\omega) \nabla \omega = -D_\omega \xi \nabla \varphi \quad (III.8)$$

$$\xi = \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \quad (III.9)$$

Où,  $D_\omega$  Coefficient de diffusion d'humidité  $[m^2/s]$ ;  $\xi$  capacité de stockage d'humidité  $[kg/m^3]$ .

Substitution de l'équation III.7 et l'équation III.8, l'équation d'équilibre devient :

$$\frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left[ \left( D_\omega \xi + \delta_p P_{v,s}(T) \right) \nabla \varphi + \delta_p \varphi \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \nabla T \right] + S_\omega \quad (III.10)$$

### III.3.2.2 Transfert de chaleur

Selon la loi de conservation de l'énergie, de changement d'enthalpie dans un élément contrôlé est égal au flux d'énergie (conduction thermique et enthalpie provoquée par un transfert d'eau liquide et un transfert de vapeur) dans l'élément contrôlé. L'équation de conservation d'énergie peut être exprimée comme suit :

$$(\rho cp)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla q + S_T \quad (III.11)$$

$$(\rho cp)_{eff} = \rho_s \left( c_s + \frac{1}{\rho_s} c_e \omega \right) \quad (III.12)$$

$$q = \left[ \lambda_{eff} \nabla T + L_v \delta_p \nabla (P_{sat} \varphi) \right] =$$

$$\left[ \left( \lambda_{eff} + L_v \delta_p \varphi \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \right) \nabla T + L_v \delta_p P_{v,s}(T) \nabla \varphi \right] \quad (III.13)$$

D'où l'équation générale de transfert de chaleur est :

$$\rho_s \left( c_s + \frac{1}{\rho_s} c_e \omega \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[ \left( \lambda_{eff} + h_v \delta_p \varphi \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \right) \nabla T + L_v \delta_p P_{v,s}(T) \nabla \varphi \right] + S_T \quad (\text{III.14})$$

Où,  $\rho_s$  est la densité apparente du matériau de construction sec en  $[kg/m^3]$  ;  $c_s$  capacité thermique spécifique du matériau de construction sec en  $[J/(kg.K)]$ ;  $c_e$  capacité thermique spécifique de l'eau  $[J/(kg.K)]$  ;  $\omega$  la teneur en eau en  $[kg/m^3]$  ;  $T$  température en  $[K]$  ;  $\lambda_{eff}$  conductivité thermique effective du matériau de construction en  $[W/(m.K)]$ ;  $L_v$  enthalpie d'évaporation de l'eau en  $[J/kg]$  ;  $\delta_p$  perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de construction en  $[kg/(m.s.Pa)]$ ;  $\varphi$  Humidité relative (adimensionnel) ;  $P_{v,s}$  pression de saturation de la vapeur d'eau en  $[Pa]$  ;  $S_T$   $[W/m^3]$  est un terme source.

Alors, la forme générale des équations d'équilibre de masse et d'énergie pour le transfert couplé de chaleur et d'humidité est donnée par :

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left[ \left( D_\omega \xi + \delta_p P_{v,s}(T) \right) \nabla \varphi + \delta_p \varphi \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \nabla T \right] \quad (\text{III.15})$$

$$\rho_s \left( c_s + \frac{1}{\rho_s} c_e \omega \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[ \left( \lambda_{eff} + L_v \delta_p \varphi \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \right) \nabla T + L_v \delta_p P_{v,s}(T) \nabla \varphi \right] \quad (\text{III.16})$$

### III.3.2.3 La méthode de capacité thermique effective

Le MCHCP a été modélisé à l'aide du modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité présenté ci-dessus. Le MCP a été incorporé à la porosité de la diatomite. La fraction volumique de la diatomite a été définie comme étant  $\theta_d$  et la fraction volumique de MCP était donc égale à  $(1 - \theta_d)$ . Par conséquent, les propriétés thermiques effectives de composite diatomite/MCP sont calculées par la relation suivant :

$$(\rho cp)_{eff} = \rho_d Cp_d \theta_d + \rho_{MCP} Cp_{MCP} (1 - \theta_d) \quad (\text{III.17})$$

Le MCP a été modélisé en utilisant la méthode de capacité thermique effective, avec cette méthode, il est également possible de décrire le changement de phase non isotherme dans le MCP. La capacité thermique effective du matériau ( $Cp_{MCP} [J/(kg.K)]$ ) est directement proportionnelle à l'énergie stockée et libérée lors du changement de phase et à la chaleur spécifique. Cependant, il est inversement proportionnel à la largeur de la plage de températures de fusion ou de solidification. Pendant le changement de phase, la capacité thermique effective du MCP est :

$$Cp_{Pcm} \begin{cases} Cp_s \text{ if } T_m < T \\ \left(\frac{Cp_s + Cp_l}{2} + \frac{L \cdot hv}{\nabla T}\right) \text{ if } T_m \leq T \leq (T_m + 1) \\ Cp_l \text{ if } T > (T_m + 1) \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Où, l'indice d correspond à la diatomite ;  $Cp_l$  [J/(kg.K)] est la capacité thermique spécifique du MCP sous forme liquide ; et  $Cp_s$  [J/(kg.K)] est la capacité thermique spécifique du MCP sous forme solide ;  $T_m$  [K] est la température de fusion (température de changement de phase).

### III.3.2.4 Conditions aux limites

En négligeant les effets de l'absorption de la pluie, le flux d'humidité à travers la surface extérieure et intérieure, respectivement, du mur extérieur est donnée par :

$$\begin{aligned} & \left( D_w \xi + \delta_p P_{v,s}(T) \right) \nabla \varphi + \delta_p \varphi \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \nabla T = \\ & \beta_{s,ext} \left( \phi_{a,ext} P_{v,s}(T_{a,ext}) - \varphi_{s,ext} P_{v,s}(T_{s,ext}) \right) \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

$$\begin{aligned} & \left( D_w \xi + \delta_p P_{v,s}(T) \right) \nabla \varphi + \delta_p \nabla \varphi \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \nabla = \\ & \beta_{s,int} \left( \phi_{a,int} P_{v,s}(T_{a,int}) - \varphi_{s,int} P_{v,s}(T_{s,int}) \right) \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

Où,  $\beta_{s,ext}$  et  $\beta_{s,int}$  [s/m] sont les coefficients de transfert de vapeur sur les surfaces externe et interne du mur.  $T_{a,ext}$ ,  $T_{a,int}$ ,  $T_{s,ext}$ ,  $T_{s,int}$  [K] ; sont les températures de l'air à l'extérieur et à l'intérieur, et les températures de surface externe et interne du mur, respectivement.  $\phi_{a,ext}$ ,  $\phi_{a,int}$ ,  $\varphi_{s,ext}$ ,  $\varphi_{s,int}$  [-], sont les humidités relative de l'air à l'extérieur et à l'intérieur, les humidités relative de surface externe et interne du mur, respectivement.

Le flux de chaleur sur la surface extérieure, et intérieure, respectivement, sont données par l'équation III.21 et III.22. Dans ces équations, la convection de la chaleur et le rayonnement sont pris en compte:

$$\begin{aligned} & k_{eff} \nabla T + L_v \delta_p P_{v,s}(T) \nabla \varphi = h_{a,ext} (T_{a,ext} - T_{s,ext}) + \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_{a,ext}^4) \\ & + \beta_{a,ext} L_v \left( \phi_{a,ext} P_{v,s}(T_{a,ext}) - \varphi_{s,ext} P_{v,s}(T_{s,ext}) \right) \end{aligned} \quad (\text{III.21})$$

$$k_{eff} \nabla T + L_v \delta_p P_{v,s}(T) \nabla \varphi = h_{a,int} (T_{a,int} - T_{s,int}) + \beta_{a,int} L_v (\phi_{a,int} P_{v,s}(T_{a,int}) - \varphi_{s,int} P_{v,s}(T_{s,int})) \quad (III.22)$$

Où,  $\varepsilon$  est l'émissivité des ondes longues et l'absorptivité du matériau ;  $\sigma$  est le constant de Stefan-Boltzman en  $[W/(m^2 \cdot K^4)]$ ;  $T_\infty$  [K] est la température de ciel.  $h_{a,ext}$ , and  $h_{a,int}$  sont les coefficients de transfert convective extérieur et intérieur de l'air. Les coefficients de transfert de chaleur par convection pour le vent, l'air intérieur et la température du ciel se trouve dans la réf. [8] comme:

$$h_{a,int} = 2.8 + 3v_a \quad (III.23)$$

$$h_{a,ext} = 2.8 + 3v_{vent} \quad (III.24)$$

$$T_\infty = 0.0552 (T_{a,ext})^{1.5} \quad (III.25)$$

Où,  $v_a$  est la vitesse moyenne de l'air intérieur, elle est pris égale à  $0,15 [m/s]$ , selon la norme ASHRAE, comme vitesse de ventilation confortable [9];  $v_{vent}$  est la vitesse de vent, elle est en fonction du temps  $v_{vent}(t) [m/s]$ ; t est le temps [s].

### III.4 Solution numérique

#### III.4.1 COMSOL Multiphysics

Pour obtenir le profil de température et d'humidité relative à travers une paroi multicouches, les équations gouvernantes couplées et non linéaires doivent être résolu simultanément. Un outil de calcul basé sur la méthode des éléments finis, COMSOL Multiphysics [16], qui est facile à utiliser et flexible, a été utilisé pour résoudre les équations gouvernantes.

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation multi-physiques dispose d'une interface d'utilisateur graphique pour créer une géométrie de domaine informatique, d'un générateur de maillage automatisé et contrôlé par l'utilisateur, ainsi que d'une fonction de post-traitement intégrée pour le traçage, l'interpolation et l'intégration des résultats de simulation.

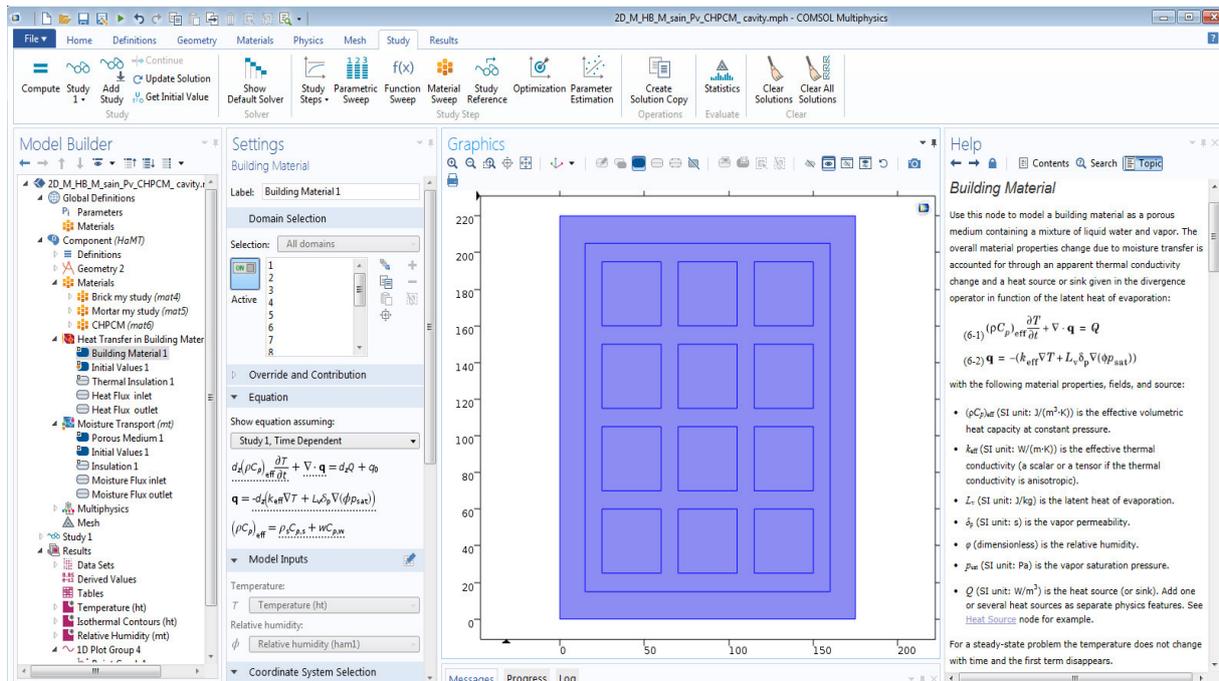


Figure III.7 : Interface du logiciel COMSOL Multiphysics [16].

L'outil de calcul COMSOL Multiphysics dispose d'une bibliothèque de modèles prédéfinis pour résoudre des problèmes d'ingénierie connus tels que la diffusion par convection, la dynamique des fluides, le transfert de chaleur et d'autres problèmes. Il prévoit également l'application de techniques de modélisation à base des équations différentiels, appelées 'Modes PDE', pour résoudre les problèmes que les modules standard ne peuvent éventuellement pas résoudre. À l'aide de cette technique numérique, le développeur formule les PDE qui régissent les phénomènes physiques et les résout à l'aide du solveur intégré. Un autre avantage de ce dernier est l'ouverture de leur système sur d'autres logiciels de conception et de programmation à titre d'exemple : SolidWorks, Auto CAD, Matlab, Etc.

### III.4.2 La méthode des éléments finis:

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique puissante qui permet de trouver des solutions approximatives aux problèmes de valeurs limites (valeurs aux bords). L'utilité de cette méthode a été reconnue pour la première fois au début des années 1940 par Richard Courant, un mathématicien germano-américain.

COMSOL Multiphysics est capable de résoudre les problèmes physiques spatio-temporels exprimés en termes d'équations aux dérivées partielles (PDE). Pour la grande majorité des géométries et des problèmes, ces PDE ne peuvent pas être résolus avec des méthodes analytiques. Pour cela, une approximation des équations peut être construite par la

discrétisation en élément finie (triangulaire, rectangulaire, ...etc.) utilisant la méthode Galerkin de formulation faible [16].

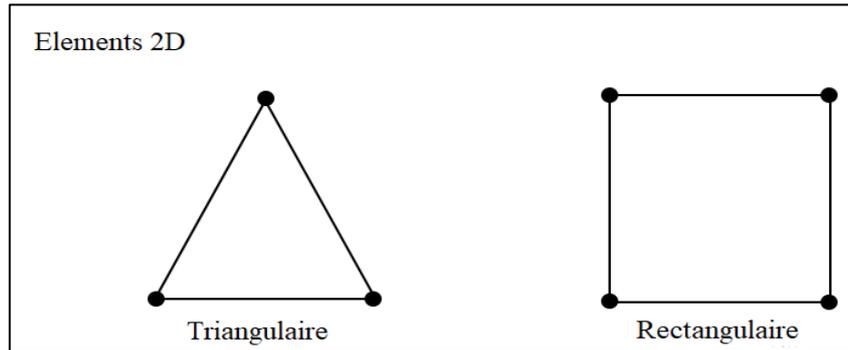


Figure III.8 : Positionnement des nœuds et géométrie pour le cas 2D

Ces méthodes de discrétisation rapprochent les PDE avec des équations de modèle numérique, qui peuvent être résolues en utilisant des méthodes numériques. La solution des équations du modèle numérique est, à son tour, une approximation de la solution réelle aux PDE.

Prenons l'exemple d'une fonction  $u$  qui peut être la variable dépendante dans une PDE (pour notre cas on a la température  $T$  [K] et l'humidité relative  $\varphi$  [-]). La fonction  $u$  peut être approximée par une fonction  $u_h$  en utilisant des combinaisons linéaires de fonctions de base selon les expressions suivantes:

$$u \approx u_h \quad (\text{III.26})$$

$$u_h = \sum_i u_i \Psi_i \quad (\text{III.27})$$

Ici,  $\Psi_i$  désigne les fonctions de base, et  $u_i$  désigne les coefficients des fonctions qui se rapprochent  $u$  avec  $u_h$ .

- **Critère de convergence en COMSOL Multiphysics**

La méthode des éléments finis donne une solution approximative aux équations du modèle mathématique. La différence entre la solution des équations numériques et la solution exacte des équations du modèle mathématique est l'erreur :

$$e = u - u_h \quad (\text{III.28})$$

Le critère de convergence en COMSOL peut être attribué par la fixation de la tolérance relative. Ce dernier est la quantité maximale d'erreur que nous, en tant qu'utilisateur, êtes prêt à autoriser dans notre solution. Les processus itératifs au sein de la séquence de solveurs continueront à itérer sur la tentative de solution jusqu'à ce que l'approximation d'erreur calculée tombe en dessous de la tolérance relative prédéfinie [16].

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, une modélisation mathématique phénoménologique issue du travail d'HM. Kunzel [7] du transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction a été présenté en détail. Ce modèle est largement utilisé considérant la température et l'humidité relative comme des moteurs potentiels du transfert hygrothermique, pour assurer la continuité du transfert entre les couches des matériaux.

Enfin, tenant compte des différents matériaux de construction, l'étude numérique sera consacrée à l'analyser des différents cas pouvant se présenter lors de la construction des bâtisses.

### **III.6 References**

- [1] AV. Luikov, Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, 1966, Pergamon Press.
- [2] F. Tariku, K. Kumaran, P. Fazio, Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53 (2010) 3035–3044.
- [3] M. Qin, A. Aït-Mokhtar, R. Belarbi, Two-dimensional hygrothermal transfer in porous building materials, *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010) 2555-2562.
- [4] TZ. Desta, J. Langmans, S. Roels, et al, Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes, *Building and Environment*, 46 (2011) 1038-1046.
- [5] K. Abahri, R. Belarbi, A. Trabelsi, Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials, *Building and Environment*, 46 (2011) pp1354-1360.
- [6] DH. Xu, MB. Ge, HL. Zhang, Numerical solution of a dynamic model of heat and moisture transfer in porous fabric under low temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61(2013) pp149-157.
- [7] HM. Künzeli, Simultaneous heat and moisture transport in building components. One and two dimensional calculation using simple parameters. Dissertation, university Stuttgart, Germany, (1995) (ISBN 3-8167-4103-7).
- [8] AIN. Korti, Numerical heat flux simulations on double-pass solar collector with PCM spheres media, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 24 (2) (2016) 13.
- [9] R.J. De-Dear, E. Arens, Z. Hui, Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments, *Int. J. Biometeorol.* 40 (1997) 141–156
- [10] J. Zheng, J. Shi, Q. Ma, X. Dai, Z. Chen, Experimental study on humidity control performance of diatomite-based building materials, *Applied Thermal Engineering*. 114 (2017) 450–456.
- [11] F. Liu, B. Jia, B. Chen, Influence of hygroscopic material on indoors environment, *Procedia Engineering*. 205 (2017) 3662–3669.
- [12] A. Bouchair, Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation, *Building and Environment*. 43 (2008) 1603–1618.
- [13] Fraunhofer WUFI Light 6.2.1 free version, Germany: Fraunhofer IBP, Available from: <https://wufi.de/en/webshop/>.
- [14] Z. Wu, M. Qin, Z. Chen, Phase change humidity control material and its application in buildings, *Procedia Engineering*. 205 (2017) 1011–1018.
- [15] <https://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle/60531/aout/2017/tlemcenzenata.html>.
- [16] A.G. FEMLAB, Comsol 33 Multiphysics FEM Software Package, (2007).

# Chapitre 04

---

## Résultats et discussions, Études de Cas

---



## Liste des figures Chapitre IV

|  |     |
|--|-----|
| Figure.IV.1 : Elément triangulaire pour le maillage des différentes configurations utilisées dans la simulation.....   | 124 |
| Figure.IV.2 : Test d'indépendance du maillage : variation de la température à la surface intérieure de l'unité de brique pour le cas sans MCP et avec MCP.....   | 124 |
| Figure IV.3: Mur homogène, HAMSTAD benchmark cas n°02 .....  | 125 |
| Figure IV.4 : La redistribution de la teneur en eau dans une paroi homogène à 100h, 300h, et 1000h.....  | 126 |
| Figure IV.5: Une structure murale multicouche à isolation intérieure active par capillarité.   | 126 |
| Figure IV.6: Résultats de simulation après 60 jours : (a) Profile de l'humidité relative [-] ;(b) Profile de la teneur en humidité [kg/m <sup>3</sup> ]. .....   | 127 |
| Figure IV.7: Coupe bidimensionnelle de la cellule de brique creuse frittée et de mortier remplie de différents matériaux hygroscopiques utilisés dans la simulation .....  | 127 |
| Figure IV.8: Variation temporelle de la température intérieure et de l'humidité relative en fonction des conditions extérieures (Temp_ext, Hum_R_ext) sous différents remplissage des matériaux hygroscopiques ..... | 128 |
| Figure IV.9 : Variation temporelle de la quantité d'eau évaporée dans la cavité d'air et la cavité en diatomite.....   | 129 |
| Figure IV.10: Variation temporelle du flux thermique à la surface interne sous différents matériaux hygroscopiques .....   | 129 |
| Figure IV.11: Schéma descriptif de la cellule de brique creuse entourée de mortier avec différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP, de l'extérieur à l'intérieur .....                                  | 130 |
| Figure IV.12: Variation temporelle de la température à la surface interne et de l'humidité relative sous différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP dans des briques creuses pendant 24 heures .....    | 132 |
| Figure IV.13: Une définition schématique du décalage temporel et du facteur de décrémentation pour la température .....  | 134 |
| FigureIV.14:Variation du facteur de décrémentation de la température intérieure et de l'humidité relative en fonction des différents taux de remplissage et emplacements du MCHCP.....                               | 135 |
| Figure IV.15: Variations du décalage temporel de la température interne et de l'humidité relative avec différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP.....  | 136 |

Figure IV.16: Coupe bidimensionnelle de la cellule de brique creuse frittée entouré par le mortier avec une plaque isolante en MCHCP à la surface intérieur utilisés dans la simulation. .... 137

Figure IV.17: La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à Tlemcen ..... 138

Figure IV.18: La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à Adrar ..... 139

Figure IV.19: La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à La Rochelle..... 140

## IV.1 Introduction

La section suivante est consacrée à l'analyse des résultats de nos simulations exécutées à l'aide du logiciel COMSOL. Le travail concernera trois cas :

- Le premier cas est consacré à l'analyse de l'impact du remplissage de la diatomite, l'PSE et l'MCHCP sur la performance hygrothermique d'un mur en briques creuses considéré.
- Afin d'obtenir des performances optimales, différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP sont comparés et analysés dans le deuxième cas.
- Le troisième cas est consacré à l'étude de la possibilité d'utiliser le MCHCP comme plaque isolante à l'intérieur de l'habitat.

## IV.2 Résultats et discussion

Comme cité précédemment le code commercial de simulation numérique COMSOL Multiphysics est utilisé pour résoudre numériquement le système des équations couplées de chaleur et d'humidité. La méthode de capacité thermique effective a été adoptée pour la modélisation du processus de changement de phase pour le MCHCP. Ce logiciel déterminera automatiquement la méthode d'analyse numérique d'approximation de solutions d'équations différentielles la plus appropriée en fonction des interfaces physiques utilisées. Pour notre cas on a un problème de diffusion et de convection, alors la formule de différenciation en arrière (Backward Differentiation Formula, BDF) est la méthode par défaut pour la modélisation par élément finis, cette dernière est une méthode implicite. Les méthodes implicites sont généralement plus stables et plus rapides que les méthodes explicites. Les critères de convergence (tolérance relative) est fixé à  $10^{-11}$ , pour les équations couplées de transfert hygrothermique.

### IV.2.1 Test de maillage

Avant d'exploiter le modèle numérique, une étude sur l'indépendance du maillage sans et avec MCP est effectuée. Trois grilles de maillage ont été testées pour le cas sans MCP qui correspondent à un nombre total de 698, 10500, 21330 élément de forme triangulaire ; et deux grilles de maillage pour le cas avec MCP qui correspondent à un nombre total de 758, et 10500 éléments de forme triangulaire. La température à la surface intérieure de l'unité de brique est choisie à titre de comparaison.

On a constaté que les écarts obtenus pour les trois grilles étudiées pour le cas sans MCP, et les deux grilles pour le cas avec MCP sont relativement faibles ou plutôt négligeables.

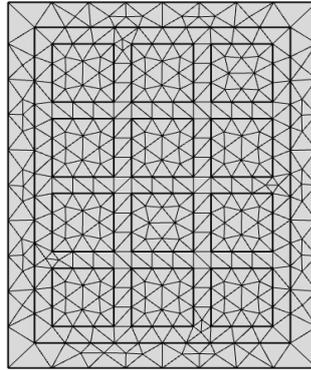


Figure.IV.1 : Élément triangulaire pour le maillage des différentes configurations utilisées dans la simulation

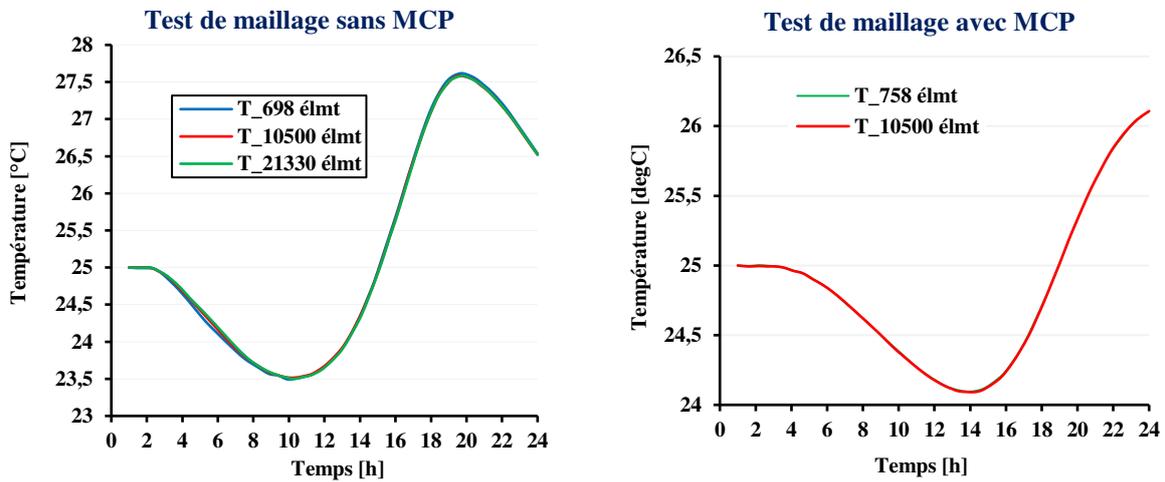


Figure.IV.2 : Test d'indépendance du maillage : variation de la température à la surface intérieure de l'unité de brique pour le cas sans MCP et avec MCP.

Alors, nous avons adopté pour notre simulation la grille 698 élément pour le cas sans MCP, et la grille 758 élément pour le cas avec MCP. Le pas de temps adopté est  $\Delta t = 100$  s pour toutes les configurations.

#### IV.2.2 Validation numérique

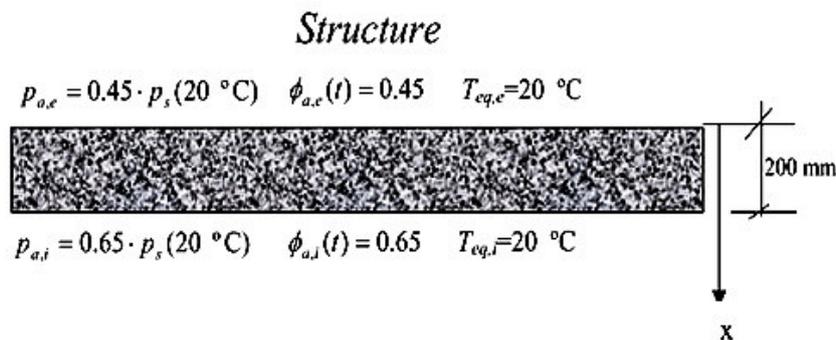
La validation du modèle de prédiction des transferts hygrothermiques passe nécessairement par des tests comparatifs, en particulier avec ceux du projet HAMSTAD. Le modèle de transfert de chaleur et d'humidité décrit précédemment a été validé à travers deux tests benchmark parmi les cinq tests du projet Européen HAMSTAD (Hagentoft, 2004) [1]. Ce projet, initié par l'union Européen, a permis le développement d'une plateforme d'évaluation de la modélisation

computationnel du mécanisme de transport de la chaleur, de l'humidité et de l'air (HAM) en physique du bâtiment.

Les résultats de cette partie du projet contiennent une définition du modèle de simulation mathématique du transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité appelé HAM (Heat, Air and Moisture) et les cinq tests benchmark. Ces tests benchmarks pourraient être utilisés comme références pour l'évaluation des logiciels existants et nouveaux. Plus de détail sur les différents matériaux utilisés et les propriétés liés au ces derniers dans ce projet est mentionné dans le manuscrit de CE. Hagentoft [1].

#### IV.2.2.1 Vérification analytique ; HAMSTAD benchmark cas n°02

Ce test benchmark cas n°2 correspond à l'étude test effectuée dans le cadre du projet HAMSTAD. Il s'agit d'une solution analytique de redistribution monodimensionnelle de l'humidité dans les conditions isothermes dans une paroi homogène d'épaisseur de 0.2 m (*Figure IV.3*). La couche est initialement en équilibre d'humidité avec l'air ambiant, qui présente une humidité relative constante. Le mouvement de l'humidité est causé par un changement soudain mais différent de l'humidité relative dans les environs. La structure est parfaitement étanche. Le cas peut être résolu de manière analytique. La simulation dure 1000 h, avec un pas de temps de 1 h.



*Figure IV.3 : Mur homogène, HAMSTAD benchmark cas n°02*

La comparaison montre une bonne concordance entre la simulation numérique et la solution analytique comme le montre la *figure IV.4*. Une étude comparative de R. Allem, (2018) [2], entre ce modèle de transfert hygrothermique utilisé dans notre étude et un autre model qui utilise la pression capillaire, la pression de vapeur, et la température comme moteur de transfert, avec le test benchmark a montré un bon accord entre eux.

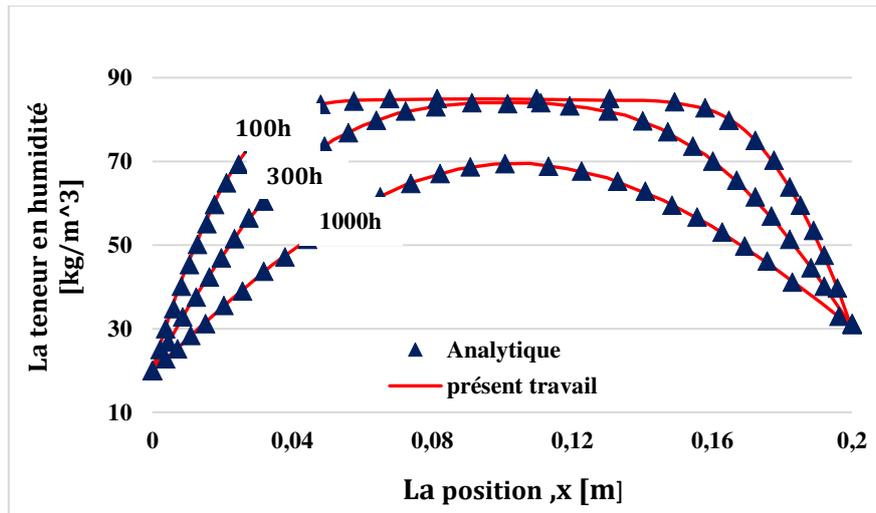


Figure IV.4 : La redistribution de la teneur en eau dans une paroi homogène à 100h, 300h, et 1000h.

#### IV.2.2.2 HAMSTAD benchmark cas n°05: Isolant intérieur actif par capillarité

La cinquième étude a été initiée par l'université technique de Dersde (Allemande). Le test porte sur la redistribution de l'humidité à l'intérieur d'un mur multicouche à isolation intérieure active par capillarité (figure IV.5). Le mur est composé de trois couches de l'extérieur à l'intérieur : brique (365 mm), mortier (15 mm) et matériau isolant (40 mm).

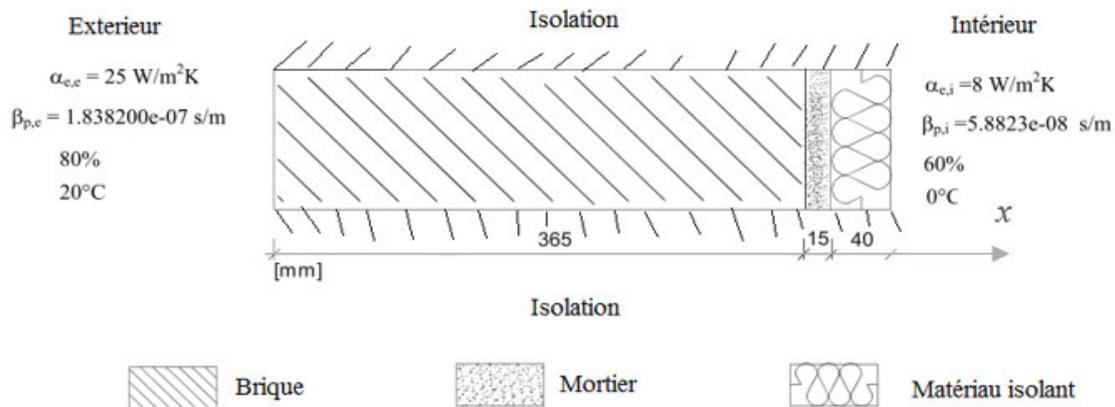


Figure IV.5: Une structure murale multicouche à isolation intérieure active par capillarité.

La structure est hermétique. La température initiale et la teneur en humidité sont considérés constants sur tout le mur  $T_{ini} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_{ini} = 60\%$ . Au temps zéro, il y a un changement soudain de température et de pression de vapeur à l'intérieur et à l'extérieur. Le temps de simulation est de 60 jours, avec un pas de temps de 1h.

Comme résultats de simulation utilisant le model couplé de transfert hygrothermique, la redistribution de l'humidité et la teneur en eau à travers le mur multicouche sont illustrés dans

la figure IV.6, et comparés avec les valeurs de test benchmark au dernier pas de temps (60 jours). Les solutions numériques montrent un bon accord pour toutes les positions, et sur la figure IV.6.b, une discontinuité est remarquée vue que chaque matériau a sa propre courbe de sorption d'humidité.

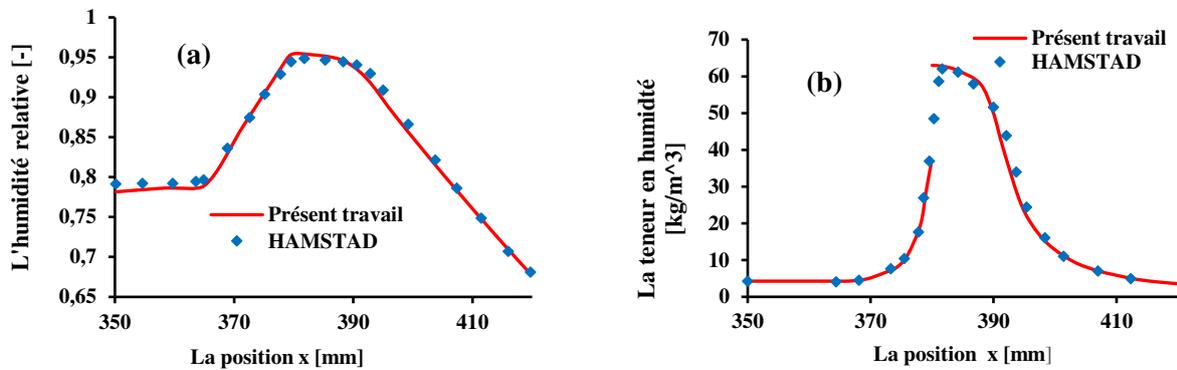


Figure IV.6 : Résultats de Simulation après 60 jours: (a) Profil de l'humidité relative [-]; (b) Profil de la teneur en humidité  $[\text{kg/m}^3]$ .

### IV.2.3 Etudes de cas

#### IV.2.3.1 Cas 01 : Effet des différents matériaux hygroscopiques sur le comportement hygrothermique des briques creuses.

Afin d'améliorer les performances hygrothermiques du mur de briques creuses, l'influence du remplissage de la diatomite, du MCHCP et du PSE dans les cavités des briques creuses frittées sur le transfert de chaleur et d'humidité a été comparé et analysé (figure IV.7). Les variables extérieures associées dépendantes du temps (température de l'air, humidité relative de l'air, rayonnement solaire) prises en compte dans cette étude sont extraites de données météorologiques typiques de la région de Tlemcen dans le nord-ouest de l'Algérie (la journée la plus chaude du 07 août 2017 a été choisie) [3].

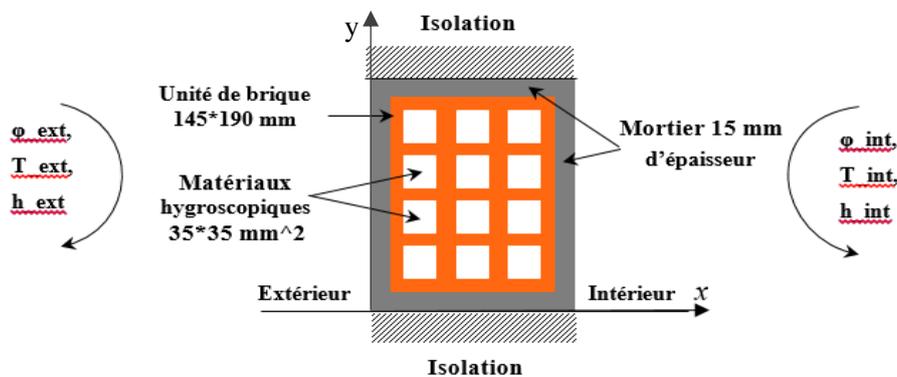


Figure IV.7: Coupe bidimensionnelle de la cellule de brique creuse frittée et de mortier remplie de différents matériaux hygroscopiques utilisés dans la simulation.

Les résultats de simulation sont montrés dans la figure IV.8, où les variations temporelles de la température et de l'humidité relative à la surface intérieure des unités de briques entourées de mortier et remplies par différents matériaux hygroscopiques sont illustrées.

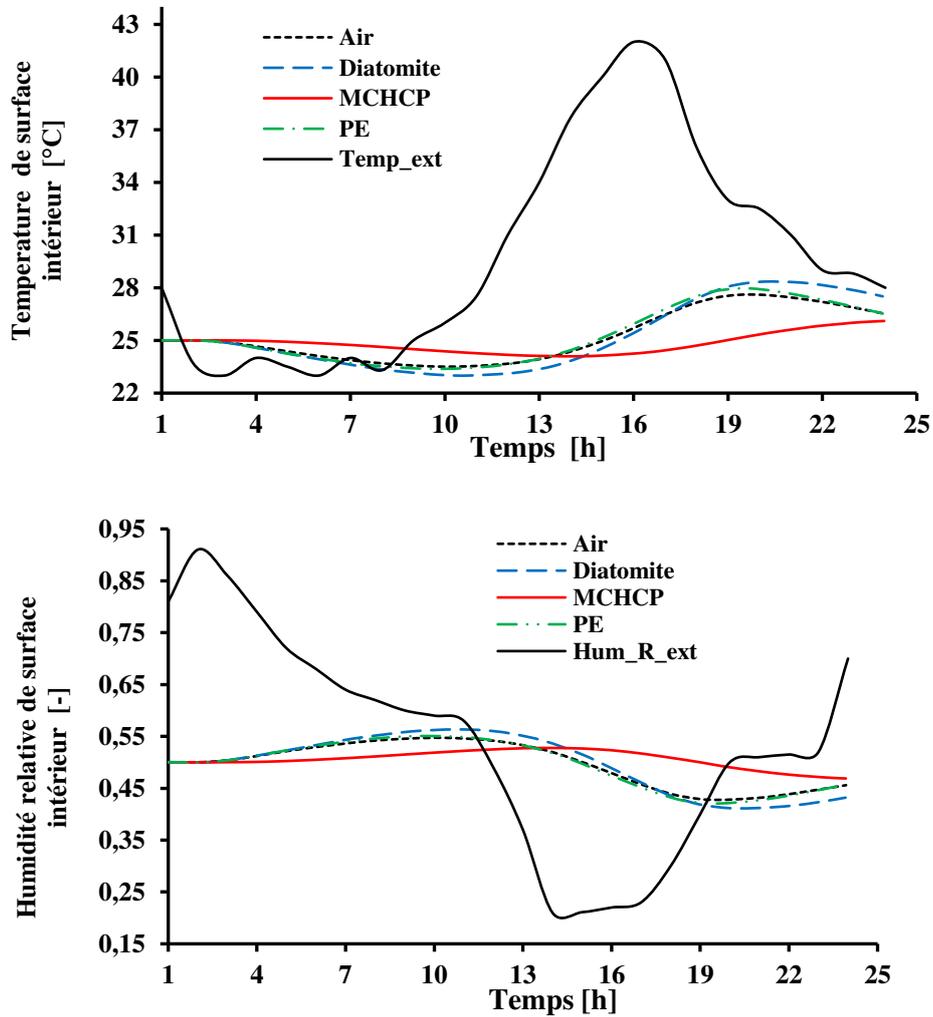


Figure IV.8 : Variation temporelle de la température intérieure et de l'humidité relative en fonction des conditions extérieures ( $Temp\_ext$ ,  $Hum\_R\_ext$ ) sous différents remplissage des matériaux hygroscopiques.

Comme le montre la figure IV.8, il existe une différence évidente entre les fluctuations de la température et l'humidité relative entre l'extérieure et l'intérieure sous différents matériaux hygroscopiques. On voit clairement que l'air et le PSE peuvent réduire la température de la surface intérieure et l'humidité relative mieux que la diatomite. Dans le cas du PSE, cela s'explique par la conductivité thermique de la diatomite étant supérieure à celle de PSE. Par contre, dans le cas de l'air, cette différence peut être attribuée à la différence de quantité d'eau évaporée dans les cavités pour chaque matériau isolant. L'eau dans l'air a un temps donné s'évapore plus facilement que dans un matériau hygroscopique (la chaleur latente de

vaporisation a une relation inverse avec le taux d'humidité [4]), ce qui engendre une quantité de vapeur plus importante (voir figure IV. 9), et met en jeu une quantité de chaleur d'évaporation plus importante.

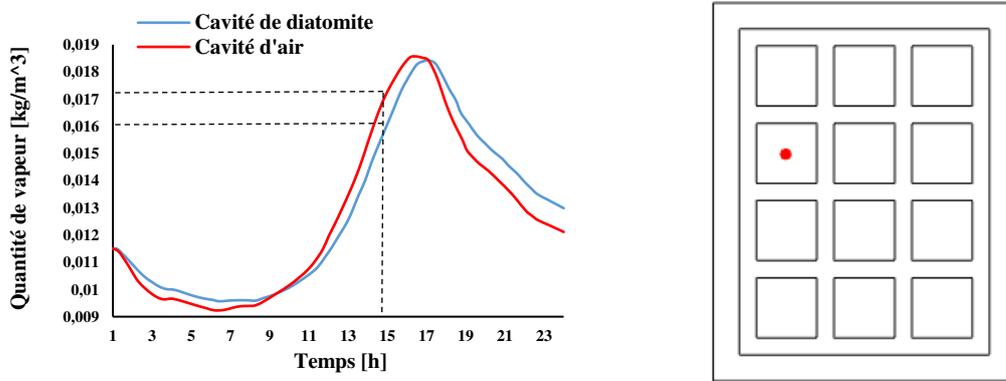


Figure IV.9 : Variation temporelle de la quantité d'eau évaporée dans la cavité d'air et la cavité en diatomite.

Par conséquent, elle provoque un refroidissement de l'air. Ce dernier entraîne une meilleure atténuation de la température à la surface intérieure de brique avec des cavités d'air (figure IV.8). D'autre part le remplissage de MCHCP dans les cavités de briques donne la plus faible fluctuation de température et d'humidité relative par rapport à d'autres matériaux, à cause du changement de phase du MCP de l'état solide à l'état liquide, ce dernier absorbe une grande quantité d'énergie.

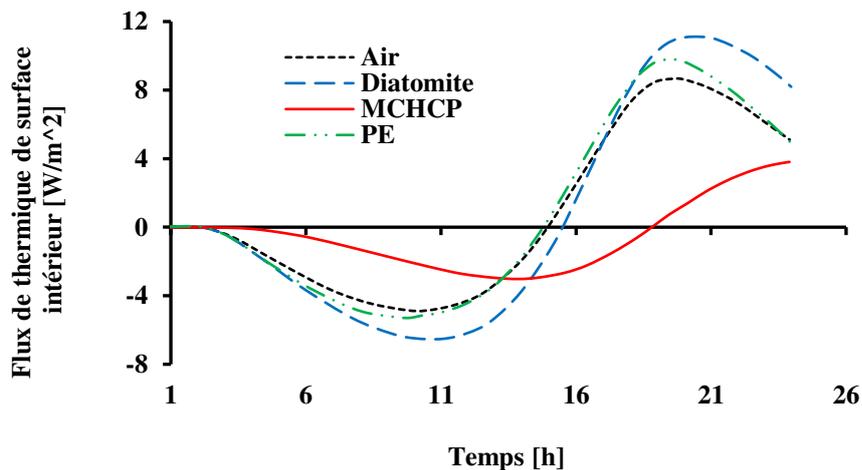


Figure IV.10 : Variation temporelle du flux thermique à la surface interne sous différents matériaux hygroscopiques.

La réduction du flux de chaleur total (RFCHT) obtenue par la relation IV.1 est de 50% en 24 heures par rapport au PSE de 11,62. % comme indiqué à la figure IV.10.

$$RFCHT (\%) = \frac{\text{Flux de chaleur sans isolation} - \text{Flux de chaleur avec isolation}}{\text{Flux de chaleur sans isolation}} * 100 \quad (IV.1)$$

La différence des fluctuations peut s'expliquer par le fait que le MCHCP contient du MCP. Ce dernier est en mesure d'absorber une grande quantité d'énergie et nécessite plus de temps pour passer de l'état solide à l'état liquide. Ce fait entraîne une diminution de la température de la surface interne. En outre, il contient de la diatomite; qui peut absorber la vapeur d'eau en raison de sa grande porosité, entraînant une diminution de l'humidité relative de la surface intérieure.

#### IV.2.3.2 Cas 02 : effet des différents taux de remplissage et d'emplacement du MCHCP sur le comportement de brique creuse

D'après les résultats du premier cas, l'amélioration de la performance hygrothermique des briques creuses est obtenue en remplissant le composite MMCP / diatomite (MCHCP) dans les cavités d'air des briques. L'effet de différents taux de remplissage de MCHCP et de son emplacement dans des briques creuses frittées sont étudiés et analysés afin d'obtenir la meilleure isolation (*figure IV.11*). Toutes les configurations sont soumises aux mêmes conditions initiales et en limites que le *cas n°01* (voir *figure IV.7*).

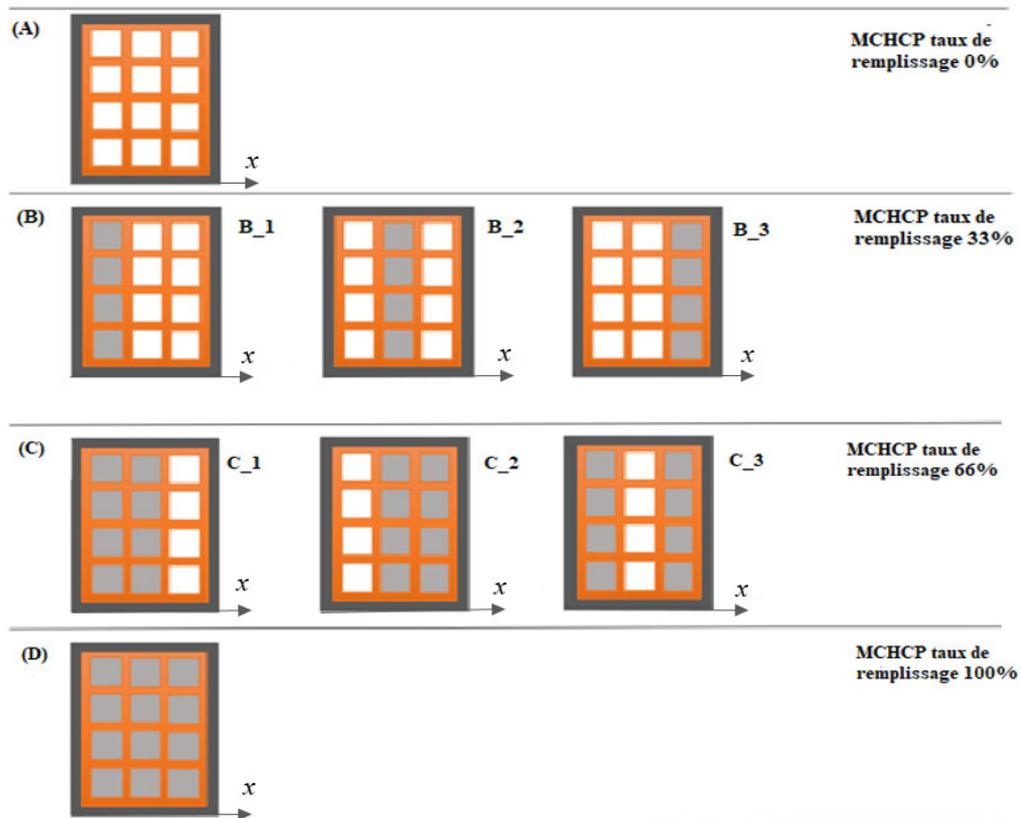
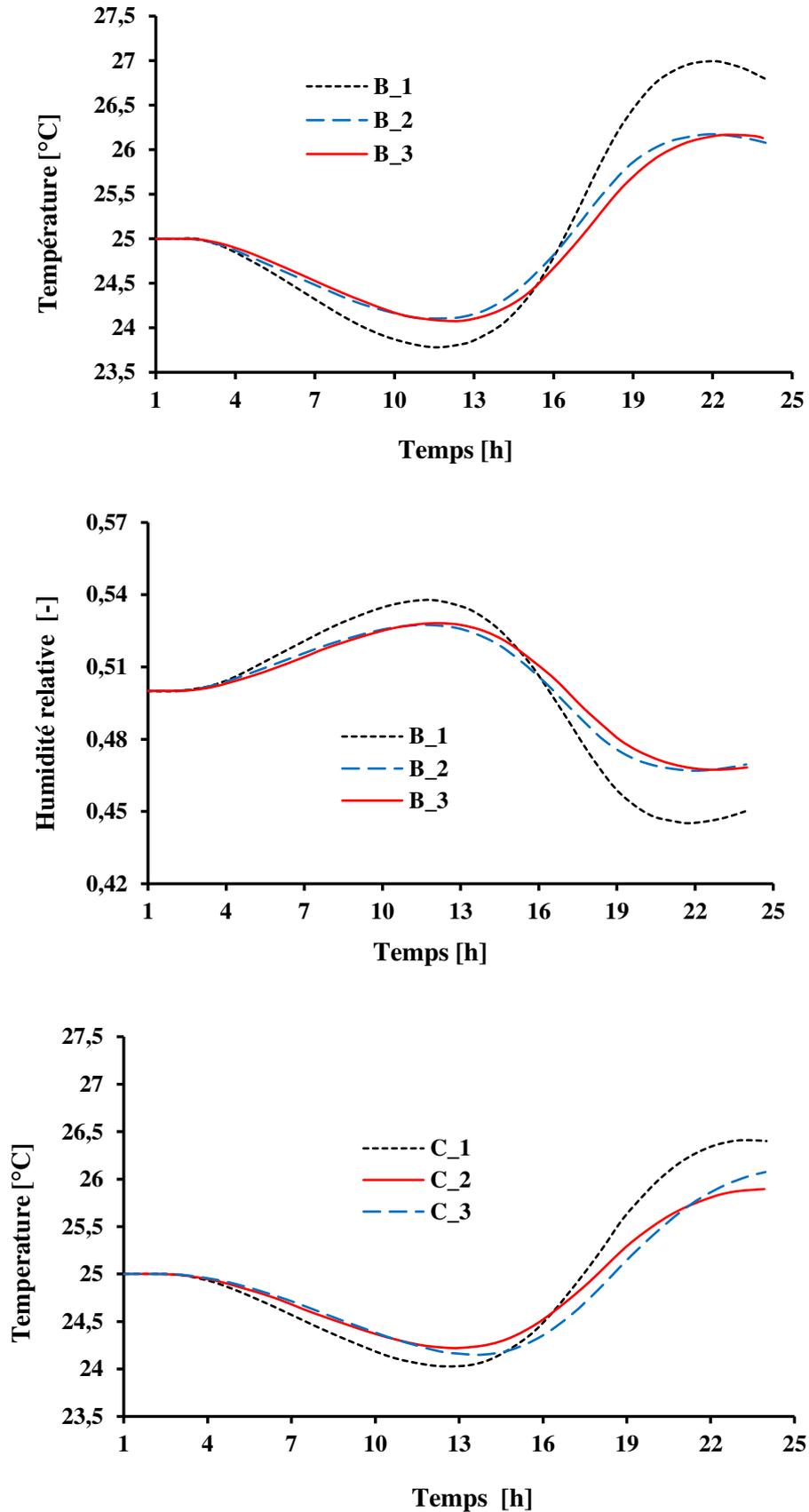


Figure IV.11 : Schéma descriptif de la cellule de brique creuse entourée de mortier avec différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP, de l'extérieur à l'intérieur.

La variation de la température de surface interne et de l'humidité relative sous différents taux de remplissage MCHCP, ainsi que leurs emplacements, sont représentés à la *figure IV.12*.



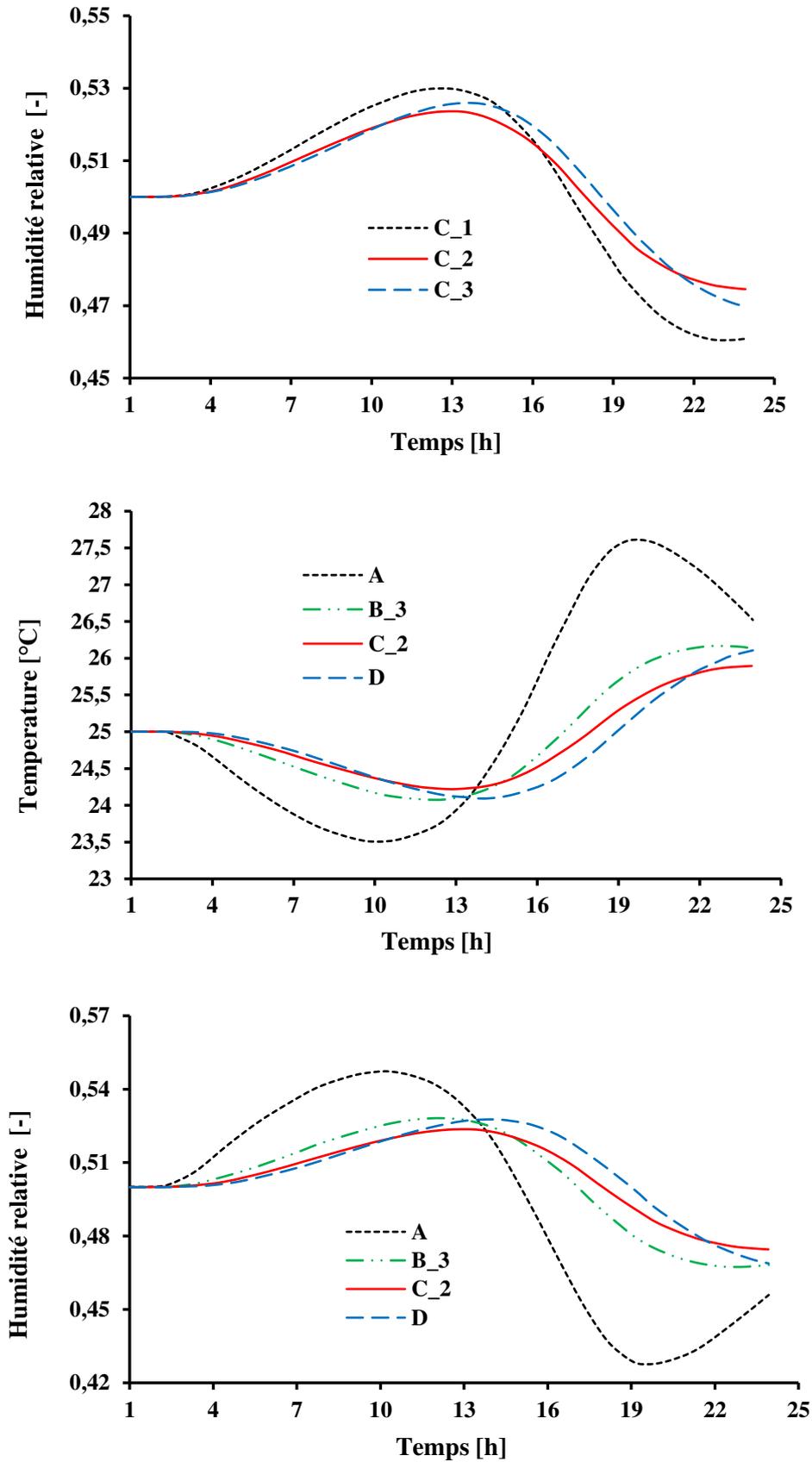


Figure IV.12 : Variation temporelle de la température à la surface interne et de l'humidité relative sous différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP dans des briques creuses pendant 24 heures.

Comme il est montré dans la *figure IV.12*, avec le même taux de remplissage du MCHCP de 33% (*figure IV.11*), le MCHCP rempli dans les cavités internes à la température et l'humidité relative la plus basse (voir cas (B\_3)), tandis que le MCHCP rempli au centre, et dans les cavités d'air internes, simultanément, présentent la température et l'humidité relative la plus basse (voir configuration C\_2) avec un taux de remplissage de (66%).

Par ailleurs, avec l'augmentation des taux de remplissage MCHCP de cas (A) à (C), les fluctuations de température et d'humidité relative diminuent progressivement, mais lorsque le taux de remplissage atteint la valeur maximale (voir cas (D)), on observe une augmentation des fluctuations de la température de la surface interne et de l'humidité relative ; ce dernier est expliqué par le fait que MCHCP absorbe beaucoup plus l'humidité ce qui entraîne un transfert de la vapeur de l'extérieur à l'intérieur ; par contre l'air est moins absorbant ce qui favorise une résistivité pour la vapeur d'eau.

#### **Décalage temporel et facteur de décrémentation :**

Le décalage temporel et le facteur de décrémentation sont des caractéristiques requises pour déterminer les capacités de stockage de chaleur et d'humidité de n'importe quel matériau. Comme mentionné dans les travaux d'H. Asan [5], en raison des changements périodiques de la température extérieure au cours de la période d'un jour, les profils de température sont variables au cours de la journée.

Le temps nécessaire pour que la vague de chaleur se propage de la surface externe à la surface interne est appelé "décalage temporel", et la réduction de la température cyclique (amplitude) sur la surface interne par rapport à la surface externe est appelée "facteur de décrémentation". La même définition peut être utilisée pour définir le décalage temporel et le facteur de décrémentation de l'humidité relative. Une définition schématique du décalage temporel et du facteur de décrémentation pour la température est présentée à la *figure IV.13*.

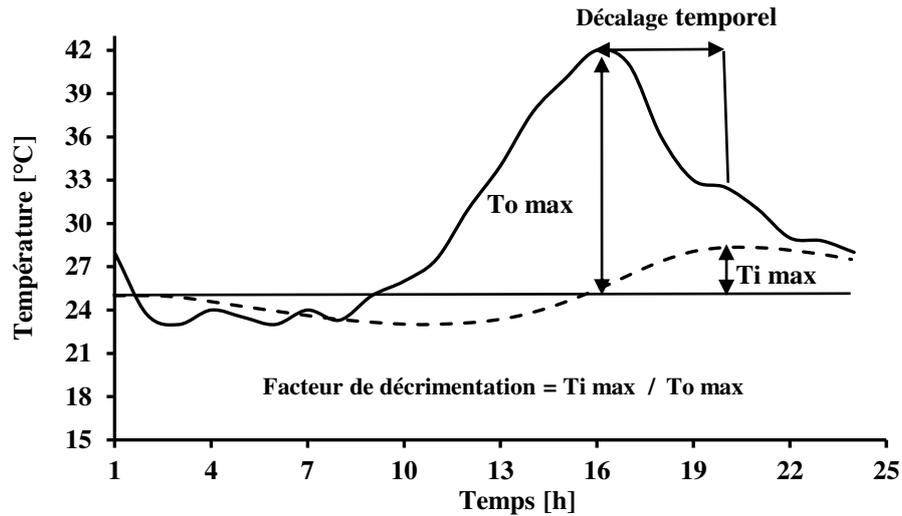


Figure IV.13 : Une définition schématique du décalage temporel et du facteur de décrement pour la température.

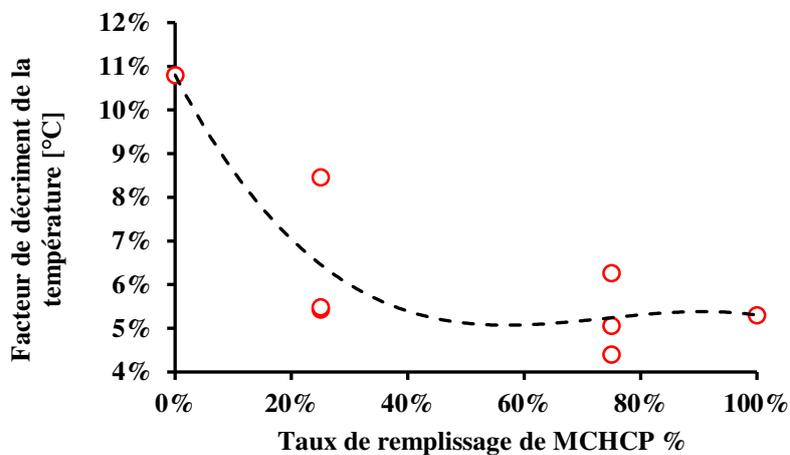
Dans cette étude, le décalage temporel est décrit comme suit:

$$\text{Délaiage temporel} = \begin{cases} t_{T_i}^{max} > t_{T_o}^{max} \Rightarrow t_{T_i}^{max} - t_{T_o}^{max} \\ t_{T_i}^{max} < t_{T_o}^{max} \Rightarrow t_{T_i}^{max} - t_{T_o}^{max} + P \\ t_{T_i}^{max} = t_{T_o}^{max} \Rightarrow P \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Où,  $t_{T_o}^{max}$  [h] et  $t_{T_i}^{max}$  [h] représente le temps en heures où les températures de surface et d'humidité relative à l'extérieur et à l'intérieur sont maximales, respectivement, et P (24 h) est la période de la vague. Le facteur de décrement est décrit comme suit :

$$\text{Facteur de décrement} = \frac{y_i^{max} - y_i^{min}}{y_o^{max} - y_o^{min}} \quad (\text{IV.3})$$

Où,  $y_o^{max}$ ,  $y_i^{max}$ ,  $y_o^{min}$  and  $y_i^{min}$  représente la température de surface extérieure et intérieure et l'humidité relative à leurs valeur maximum et minimum, respectivement.



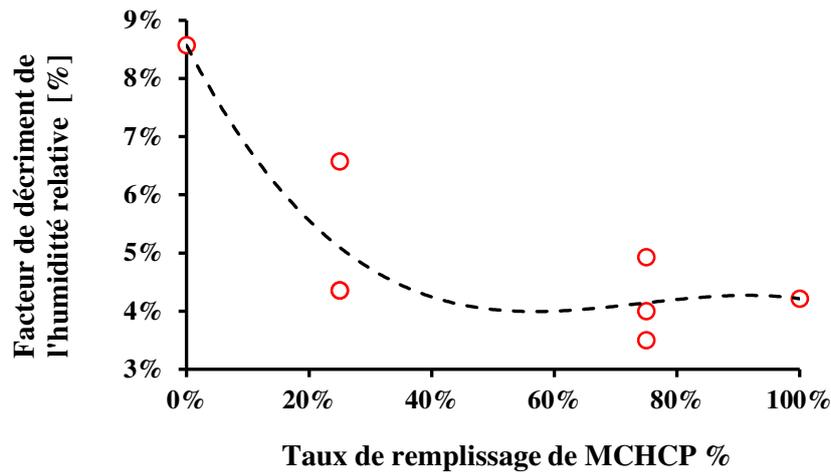
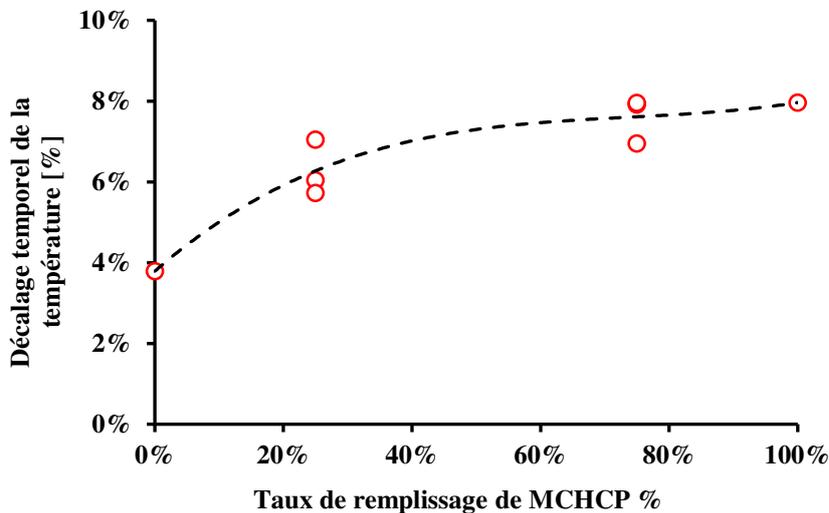


Figure IV.14: Variation du facteur de décrémentation de la température intérieure et de l'humidité relative en fonction des différents taux de remplissage et emplacements du MCHCP.

La figure IV.14 montre la variation du facteur de décrémentation de la température de la surface interne et de l'humidité relative avec différents taux de remplissage et emplacements du MCHCP. On peut constater qu'il existe une relation inverse entre le facteur de décrémentation et les taux de remplissage MCHCP. De plus, nous observons une grande différence de facteur de décrémentation pour le même taux de remplissage dû aux emplacements de MCHCP. Ce résultat signifie que les tendances de la température intérieure et de l'humidité relative se stabilisent pour atteindre un niveau élevé de confort à l'intérieur.



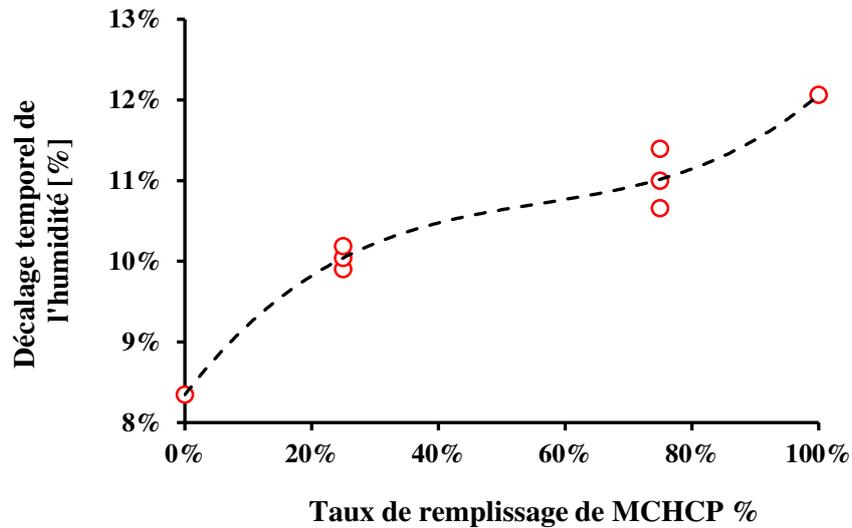


Figure IV.15 : Variations du décalage temporel de la température interne et de l'humidité relative avec différents taux de remplissage et emplacements de MCHCP.

Les variations du décalage temporel de la température de la surface interne et de l'humidité relative en fonction de différents taux de remplissage et de l'emplacement du MCHCP sont illustrées à la *figure IV.15*. Comme indiqué, il existe une relation directe entre le décalage temporel et les taux de remplissage de MCHCP. Une grande différence de décalage temporel de la température interne du même taux de remplissage est remarquée en raison des emplacements de MCHCP.

#### IV.2.3.3 Cas 03 : Effet des plaques isolantes de MCHCP sur l'environnement intérieur.

Après avoir l'effet remarquable du MCHCP sur l'amélioration de performance de la brique creuse. Cette partie est consacrée à étudier l'effet de ce dernier comme plaque isolante par des simulations numériques sur l'environnement intérieur (*figure IV.16*). Trois villes du monde entier, y compris Tlemcen (Algérie), Adrar (Algérie), La Rochelle (France) ont été sélectionnés comme conditions météorologiques aux limites pour l'analyse [3]. La 1<sup>ère</sup> semaine (du 01 à 07) du mois d'Aout en 2017 a été choisie comme date de calcul numérique.

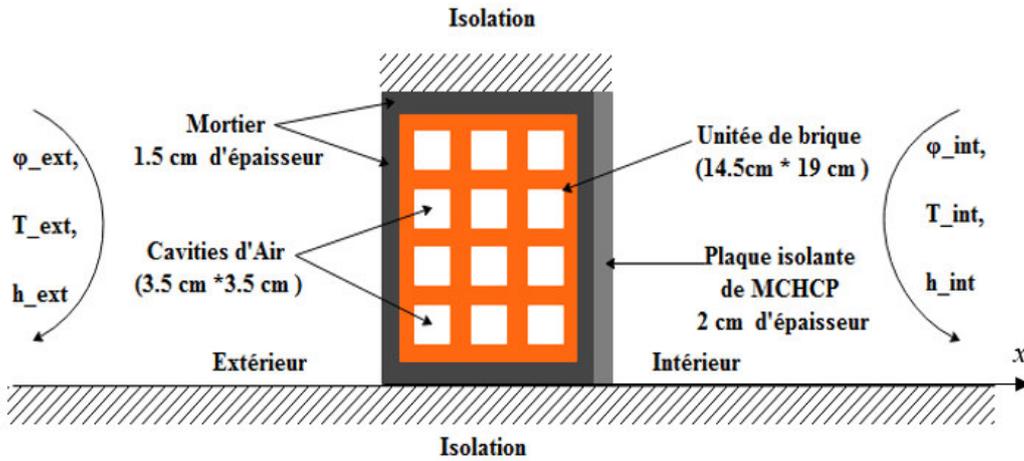
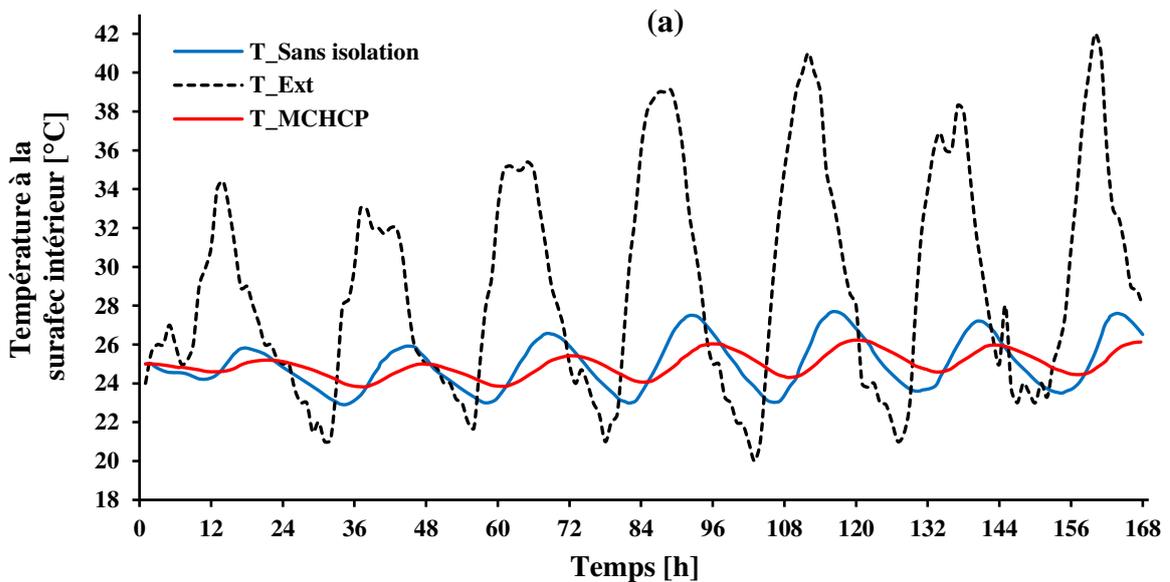


Figure IV.16 : Coupe bidimensionnelle de la cellule de brique creuse frittée entouré par le mortier avec une plaque isolante en MCHCP à la surface intérieur utilisés dans la simulation.

### A. Tlemcen en Algérie

Tlemcen en Algérie possède un climat méditerranéen, chaud et tempéré [6] ; selon la classification de Köppen et Geiger [7], le climat y est classé Csa, l'hiver se caractérise par des précipitations importantes arrive à 484 mm annuellement qu'en été. La température moyenne en été est supérieure à 30 °C. L'humidité relative et la température atteignent leur valeur max au mois d'Aout.



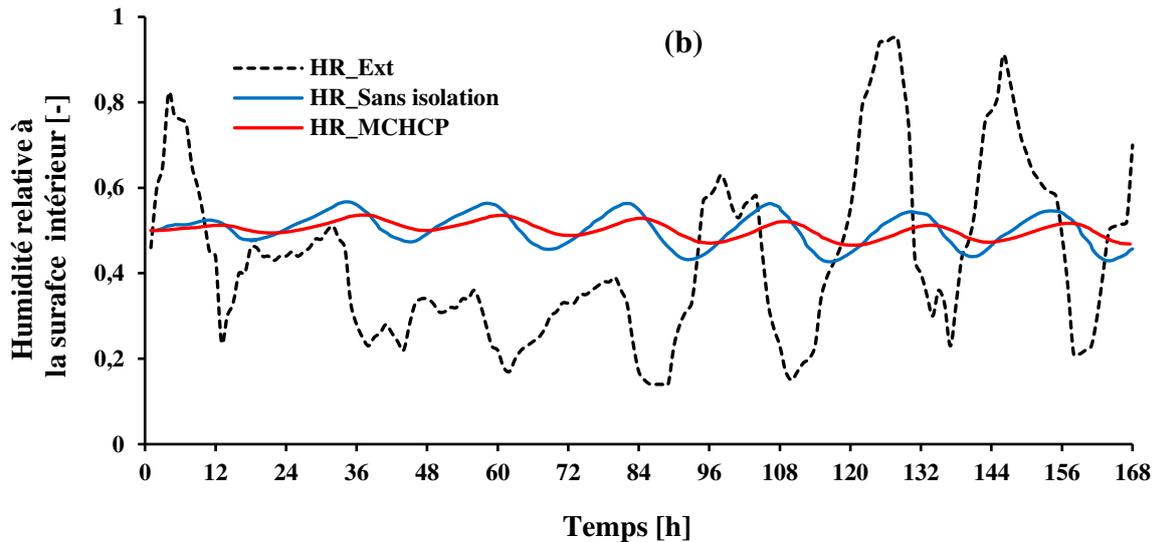


Figure IV.17 : La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à Tlemcen.

Comme il est présenté sur la *figure IV.17.a*, de la 1<sup>ère</sup> semaine du mois d'Aout 2017 (du 01 à 07 Aout) la température extérieure varie entre 20 [°C] et 41 [°C] pendant 24 heures (nuit et journée, respectivement), ou la température moyenne est de 28 [°C] supérieur à la température de fusion du MCHCP. On peut voir que la température intérieure pendant la nuit pour le cas sans isolation a tendance à être inférieur à celle isolé par une couche de MCHCP. Il démontre que les composants MCP de la couche MCHCP peuvent réduire la charge de refroidissement maximale en absorbant la chaleur lorsque la température de surface de la couche de MCHCP est supérieure au point de fusion (27 °C) pendant la journée ; et libérer la chaleur pendant la nuit.

La *figure IV.17.b* montre les profils d'humidité relative intérieure simulés pour le climat de Tlemcen durant la 1<sup>ère</sup> semaine du mois d'Aout. L'humidité relative extérieure de la région de Tlemcen varie entre 14% et 95 %, avec une moyenne de 39%. On peut voir que la déshumidification n'est pas nécessaire pour tous les 07 jours. L'humidité relative à la surface intérieure avec isolation est stable à celle sans isolation, cela signifie que le MCHCP peut modérer la fluctuation de l'humidité intérieure.

## B. Adrar en Algérie

Adrar en Algérie possède un climat désertique chaud et sec en été [6]. Selon la classification de Köppen et Geiger [7], le climat est classé BWh. La précipitation est moins importante arrive à 16 mm annuellement, et la Température en été excède les 46 [°C] pendant la journée.

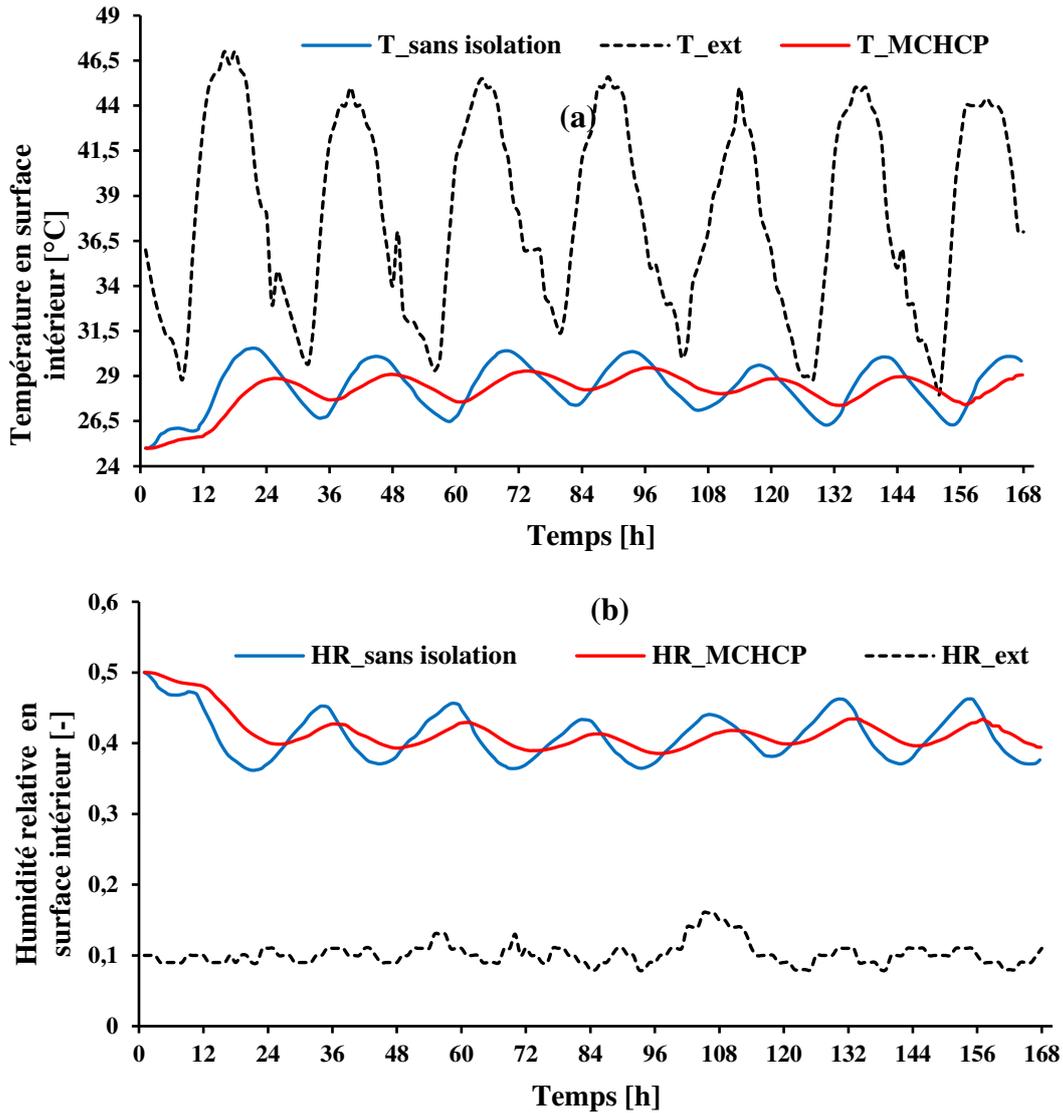


Figure IV.18 : La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à Adrar.

La température extérieure au site d'Arar durant la 1<sup>ère</sup> semaine d'Aout est très chaude varie entre 28 et 47 [°C], avec une moyenne de 38 [°C]. Selon la *figure IV.18. (a)*, on peut voir que la performance du MCHCP est largement remarquable par rapport le cas de Tlemcen. La différence de la température entre le jour et la nuit à Adrar est très importante durant tous les 07 jours, avec des températures qui dépassent toujours le point de fusion considérée (>27 °C), ce qui implique que le MCP a une meilleure performance dans ce climat.

La *figure IV.18. (b)* montre les profils d'humidité relative intérieure simulés pour le climat d'Adrar durant la 1<sup>ère</sup> semaine du mois d'Aout. L'humidité relative est très faible durant tous les 07 jours, elle ne dépasse pas 15 %, ce qui favorise une déshumidification inverse (de l'intérieur vers l'extérieur). On peut voir que l'isolation avec un MCHCP peut réduire la

déshumidification vers l'extérieur, et en même temps stabilise l'humidité relative à la surface intérieure.

### C. La Rochelle en France

La Rochelle en France possède un climat océanique chaud et tempéré [5], Selon la classification de Köppen et Geiger [7], le climat est classé Cfb. La précipitation est très importante arrive à 762 mm annuellement, et la Température ne dépasse pas les 34 [°C] en période d'été.

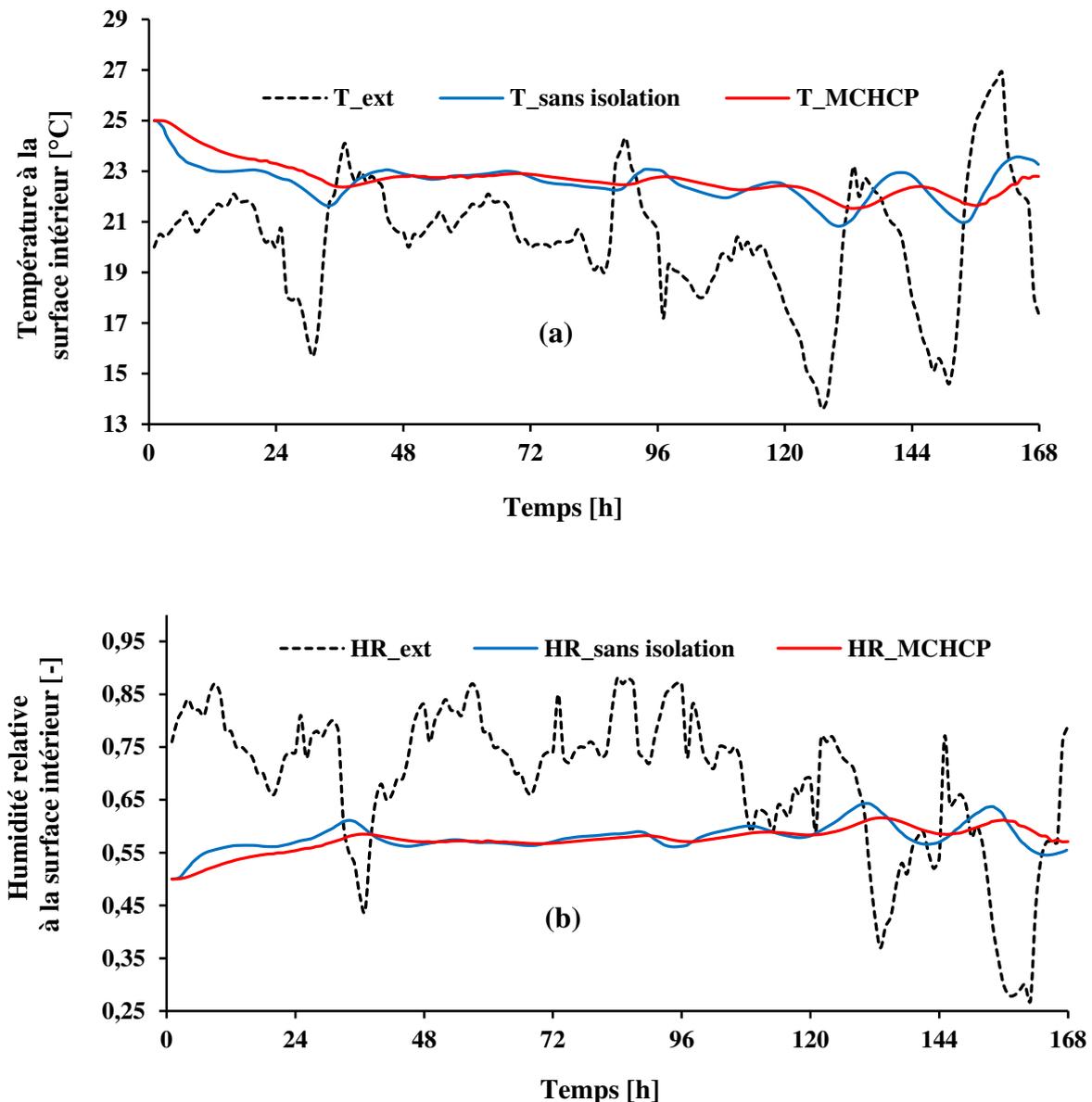


Figure IV.19 : La variation de la température à la surface interne (a), et de l'humidité relative (b) (1 -7 Aout 2017) à La Rochelle.

La température extérieure à La Rochelle durant la 1<sup>ère</sup> semaine du mois d'Aout (*figure IV.19. (a)*) varie entre 14 et 27 [°C], avec une moyenne de 20.6 [°C]. On peut voir que la température intérieure pendant le jour et la nuit pour le cas sans isolation a tendance à être inférieure à celle isolé par une couche de MCHCP. Le MCHCP a un effet très limité vu que la température n'excède pas la valeur de fusion (27 [°C]).

La *figure IV.19. (b)* montre les profils d'humidité relative intérieure simulés pour le climat de La Rochelle durant la 1<sup>ère</sup> semaine du mois d'Aout. L'humidité relative est très importante pendant les 07 jours varie entre 27 et 87 %, avec une moyenne de 73%.

La *figure IV.19. (b)* indique que la déshumidification n'est pas nécessaire pendant les 07 jours car l'humidité relative est inférieure à 65% pour les deux cas sans isolation et avec isolation. Une grande amplitude de différence d'humidité relative extérieure à La Rochelle est favorable pour le processus régulier d'adsorption et de désorption du MCHCP. En Plus, pendant le processus de refroidissement, l'enthalpie à l'intérieur peut être réduite par le décremant de la valeur d'humidité relative intérieure qui contribue à la réduction de l'énergie nécessaire au refroidissement du bâtiment.

### IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons tenté de mettre en évidence l'importance de l'utilisation de la diatomite et la diatomite optimisé par des MCP (MCHCP) comme matériau passive innovant dans l'isolation hygrothermique des bâtiments en Algérie, et aussi comme un solution écologique qui peut substituer l'PSE dans la construction Algérienne.

En premier lieu, l'influence du remplissage de la diatomite, du MCHCP et de l'PSE dans les cavités des briques creuses frittées sur le transfert de chaleur et d'humidité a été comparé et analysé, les résultats montrent que le MCHCP a une grande capacité à réduire les fluctuations de la température intérieure et de l'humidité relative, et peut réduire 50% de flux de chaleur total par rapport l'PSE.

En vue d'optimiser la performance des briques creuses, le deuxième cas est consacré à l'analyse de l'effet du taux de remplissage et l'emplacement du MCHCP sur le comportement de la brique creuse afin d'obtenir la meilleur isolation. La comparaison entre les différentes configurations a montré que la configuration C\_2 se caractérise par un meilleur comportement. Dans ce cas précis, le MCHCP est rempli dans le centre et dans les cavités d'air internes, simultanément, avec un taux de remplissage de 66%. L'augmentation du taux de remplissage en MCHCP, favorise une diminution du facteur de décrémentation et une augmentation du décalage temporel pour une température et une l'humidité relative donnée de la surface interne. Pour le même taux de remplissage, due à l'emplacement du MCHCP, une différence de facteur de décrémentation et de décalage temporel est observée.

Le troisième cas a été consacré à l'analyse de l'effet du MCHCP comme plaque isolante sur l'environnement intérieur, prenant en considération différentes villes du monde avec des données météorologiques différentes. Les résultats de simulations ont montrés que le MCHCP a un effet très important sur les fluctuations de la température et de l'humidité relative. Ce dernier peut modérer la température et l'humidité interne, et il peut réduire l'énergie nécessaire pour la déshumidification. Le choix de MCP incorporé dans la diatomite doit être sélectionné selon les données météorologiques (point de la fusion) pour avoir une meilleure performance du MCHCP.

#### IV.4 Références

- [1] C.E. Hagentoft, A.S. Kalagasidis, B. Adl-Zarrabi, Assessment method of numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building components: benchmarks for one-dimensional cases, *J. Therm. Envelope Build. Sci.* 27(4) (2004) 327–352.
- [2] RYM.Allem, The heat and moisture effect on the structures, PHD theses, Mansoura University (Egypt), 2018.
- [3] <https://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle/60531/aout/2017/temcencenata.html>.
- [4] M. Hadjiski, N. Deliiski, N. Tumbarkova, Mathematical Description of the Latent Heat of Water Vaporization in Capillary Porous Materials, *Information Technologies and Control*.01 (2019), DOI: 10.7546/itc-2019-0001
- [5] H. Asan, Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials, *Building and Environment*. 41 (2006) 615–620.
- [6] <https://fr.climate-data.org>
- [7] M. C. Peel, B. L. Finlayson, T. A. McMahon, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrology and earth system sciences*, 11 (2007) 1633-1644.

---

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

La gestion thermique idéale et le contrôle de l'humidité du climat intérieur sont considérables, non seulement pour répondre aux exigences du confort thermique humain, mais également pour l'économie d'énergie. Au cours des dernières décennies, le stockage de la chaleur latente appelé matériaux à changement de phase (MCP) et les matériaux respectueux de l'environnement pour le contrôle de l'humidité (MCH) dans le climat intérieur ont été largement étudiés et développés.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est l'étude de l'application de la diatomite et la diatomite améliorée par les MCP (MCHCP) en tant que méthode passive permettant de réduire la consommation d'énergie, et de substituer le polystyrène expansé (PSE) qui est largement utilisé comme isolant thermique dans le secteur de bâtiment.

Dans cette perspective, un modèle de transfert de chaleur et d'humidité avec changement de phase pour analyser la performance hygrothermique d'un mur multicouche typique, isolé par des MCHCP prenant en considération différentes configurations et données climatiques a été développé et implémenté dans le logiciel COMSOL. L'utilisation de ce modèle nous a permis d'analyser l'effet du MCHCP sur la consommation de l'énergie dans l'environnement intérieur du bâtiment.

Pour atteindre notre objectif, une validation numérique du modèle de transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction avec des tests de validation (benchmarks) de la littérature a été effectuée. Les résultats obtenus ont montré une bonne concordance avec les résultats analytiques et numériques de ces tests de références.

L'influence de remplissage de la diatomite, du MCHCP et de l'PSE dans les cavités des briques creuses frittées entourés par le mortier sur le transfert de chaleur et d'humidité a été comparée et analysée. Les résultats montrent que le MCHCP a une grande capacité à réduire les fluctuations de la température intérieure et de l'humidité relative, et peut réduire 50% de flux de chaleur total par rapport l'PSE.

Par ailleurs, l'effet du taux de remplissage et l'emplacement du MCHCP sur le comportement de brique creuse afin d'obtenir la meilleur isolation a été étudié et analysé. La comparaison entre les différentes configurations a montré que la configuration C\_2 présente un meilleur comportement dans lequel le MCHCP occupe le centre et les cavités d'air internes, simultanément, avec un taux de remplissage de 66%. L'augmentation du taux de remplissage

en MCHCP, favorise une diminution du facteur de décrémentation et une augmentation du décalage temporel pour une température et une l'humidité relative donnée de la surface interne. Pour le même taux de remplissage, due à l'emplacement du MCHCP, une différence de facteur de décrémentation et de décalage temporel est observée.

Enfin, l'utilisation du MCHCP comme plaque isolante à l'intérieur des habitats, prenant en considération différentes données météorologiques de certaines villes du monde a montré que le MCHCP a un effet très important sur les fluctuations de la température et de l'humidité relative. Ce dernier peut modérer la température et l'humidité interne, et il peut réduire l'énergie nécessaire pour la déshumidification. Le choix du MCP incorporé dans la diatomite doit être sélectionné selon les données météorologiques de la région considérée (point de la fusion) pour avoir une meilleure performance du MCHCP.

Au terme de ce travail, nous pouvons conclure, sur la base des résultats observés que le matériau proposé (MCHCP) pourrait être un matériau à haute économie d'énergie, et pourrait constituer l'une des solutions permettant de remplacer le PSE dans l'isolation thermique du bâtiment.

Comme perspectives, ce travail doit être compléter par :

- Une vérification expérimentale pour valider les résultats numériques.
- Le pourcentage du MCP incorporé dans la diatomite doit être accompagné par une étude mécanique (durabilité du MCHCP) afin de prendre en considération les autres paramètres thermophysiques.

---

# Annexe

---

## Publication international:

Youssef Fraine, Chakib Seladji, Abdelkarim Ait-Mokhtar ; Effect of microencapsulation phase change material and diatomite composite filling on hygrothermal performance of sintered hollow bricks ; *Building and Environment* 154 (2019) 145-154.

## Communication national:

Fraine Youssef, Seladji Chakib; La Diatomite Algérienne un Matériau d'Isolation Hygrothermique Ecologique pour l'Habitat; Congrès National sur les Energies et Matériaux (CNEM), Naâma, 17-18 Décembre 2018.



# Effect of microencapsulation phase change material and diatomite composite filling on hygrothermal performance of sintered hollow bricks



Youssef Fraine<sup>a,\*</sup>, Chakib Seladji<sup>a</sup>, Abdelkarim Aït-Mokhtar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratory of Energy and Thermal Applied (ETAP), University of Tlemcen, B. P 230, Tlemcen, 13000, Algeria

<sup>b</sup> LaSIE UMR 7356, University of La Rochelle-CNRS, Avenue M. Crépeau, 17042, La Rochelle, France

## ARTICLE INFO

### Keywords:

Coupled heat and moisture transfer  
Sintered hollow brick  
MPCM/diatomite  
Porous media

## ABSTRACT

The aim of the present study is to investigate the use of a new phase change humidity control material (PCHCM) as a replacement for the expanded polystyrene (EPS) in hygrothermal insulation of the building construction. PCHCM is prepared by incorporating microencapsulation phase change material (MPCM) and diatomite, it is filled in a sintered hollow bricks typically used in the construction of Algerian buildings, considering different configurations, in order to get optimum insulation. A two dimensional coupled heat and moisture transfer model has been developed and solved numerically using a finite element method to study, and compare the effect of EPS, diatomite, and PCHCM on the comfort level of the building indoor environment. Different filling ratios of PCHCM and its locations are considered to reach the best hygrothermal performance. The inner temperature and relative humidity fluctuations obtained from the study are significantly reduced in comparison with EPS. In addition, the optimal location of PCHCM is given when it is filled with 66% in the internal side of the hollow brick. MPCM/diatomite composite was found to have the potential to save energy reaching 50% compared to EPS and can be used as a hygrothermal insulation material in building construction.

## 1. Introduction

Energy demand and environmental protection issues are two major challenges faced by mankind and have always been a preoccupation of the researchers all over the world [1,2]. Energy use in human societies increases quickly with the fast increase in living standards during the last two decades [3,4,5]. Energy from fossil fuels is the most commonly used in developing countries, and burning them increase greenhouse gas emissions, which leads to climate change and environmental pollution [6,7]. Therefore, it is crucial now to improve energy efficiency by reducing fossil energy consumption and tackle climate change. Related to this, building sector accounts for about 45% percent of the world's total energy consumption and responsible for 36.1 billion tons of CO<sub>2</sub> emissions. Energy consumption in the building comes mainly from heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems [4,7,8]. Many methods were introduced to reduce building energy consumption, through improving the efficiency of HVAC systems, and using innovative passive materials to control the indoor temperature and humidity, ensuring a good comfort level of the indoor space [6,7,9].

Temperature and relative air humidity are very important among environmental parameters affecting the quality of the indoor space. Fluctuation of ambient temperature due to the day/night and winter/

summer alternations lead to a thermal dis-comfortable in the living environment [3,7]. Some works study thermal storage in materials as PCM's to contribute to the stabilization of indoor temperature [10]. PCM's can absorb and release a large amount of energy by changing their phase from solid to liquid, and from liquid to solid at a constant temperature during the phase change process, respectively [11,12]. Integration of PCM's in building by encapsulation in structural materials has been proposed as the best method of increasing the energy efficiency of buildings, improving occupant comfort, and decreasing energy consumption [13–15].

Humidity is also fluctuant and it is related to human health problems and living environment [16,17]. An excessive change in relative humidity can affect construction durability, the storage of goods, and energy consumption [18,19]. Research studies show that maintained indoor relative humidity in the range of 30%–60% is the most comfortable living environment [20]. Humidity control materials (HCM) are a porous material that can absorb or release moisture automatically without any power source or mechanical equipment due to its sensitivity to the variations of ambient relative humidity, and ambient temperature [18,20–22]. Research dealing with the use of HCM has initially started in Japanese Institute [23]. Various HCMs were developed, including biomass HCM [24,25], inorganic HCM [18,26], and organic HCM [27,41]. Consequently, the use of an HCM is of great

\* Corresponding author.

E-mail address: [yousseuf.fraine@mail.univ-tlemcen.dz](mailto:yousseuf.fraine@mail.univ-tlemcen.dz) (Y. Fraine).

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.036>

Received 30 November 2018; Received in revised form 24 February 2019; Accepted 25 February 2019

Available online 02 March 2019

0360-1323/ © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

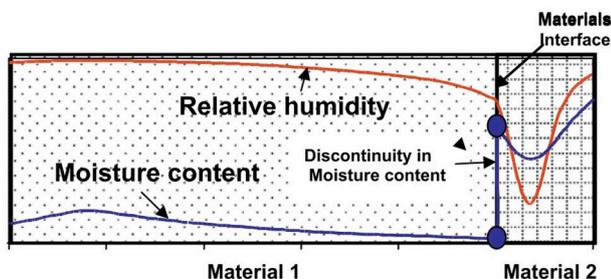


Fig. 1. Example of relative humidity and moisture content profiles at the interface of two dissimilar materials [36].

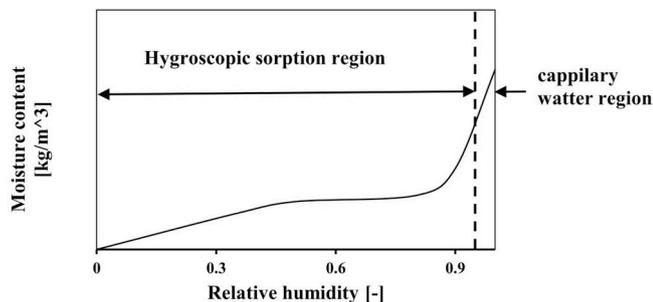


Fig. 2. Sorption isotherm of a typical material.

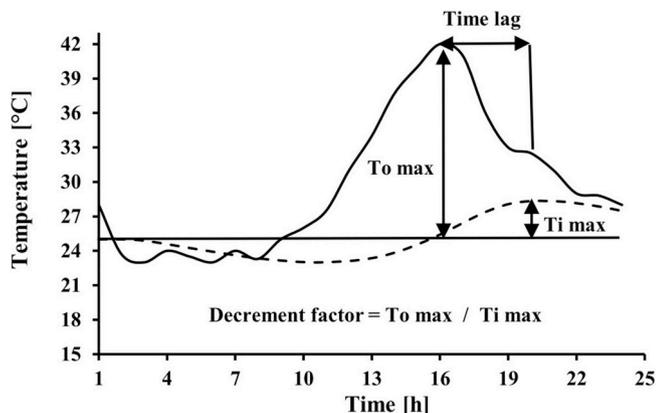


Fig. 3. A schematic definition of time lag and decrement factor for temperature.

importance to the sustainable development of ecological environment, it can adjust indoor humidity, and reduce energy demand [20,21].

Recently, several approaches have been investigated in order to optimize the hygrothermal performance of building envelope in order to develop a passive material, which could provide indoor thermal, and humid buffering capacity [28,29]. Some researchers have attempted to prepare a novel endothermal-hygroscopic material by synthesizing MPCM and porous HCM. It has the ability to control temperature and humidity of the indoor environment [4]. Yuan et al. [30], proposed the Polyethylene glycol (PEG2000) organic polymer with different water contents as endothermal-hygroscopic material. Karaman et al. [31], reported on the PEG/diatomite composite as a novel form-stable PCM's. The PEG could be retained by 50% mass into pores of the diatomite matrices without the leakage of melted PEG from the composite. Shang [32], prepared the  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ /sepiolite, paraffin/sepiolite, and dodecanol/sepiolite composites by injecting the PCM's in-to porous sepiolite. Qin et al. [6], prepared several PCHCMs using PCM microcapsules with  $SiO_2$  as a shell, and the vesuvianite, sepiolite, and zeolite as a hygroscopic material. Results indicate that the CPCM/vesuvianite composite has a better hygrothermal performance than the other two PCHCMs. Wu et al. [4], prepared MPCM/diatomite composite with 12.9% ratio of the encapsulation PCM. Chen et al. [3], prepared a

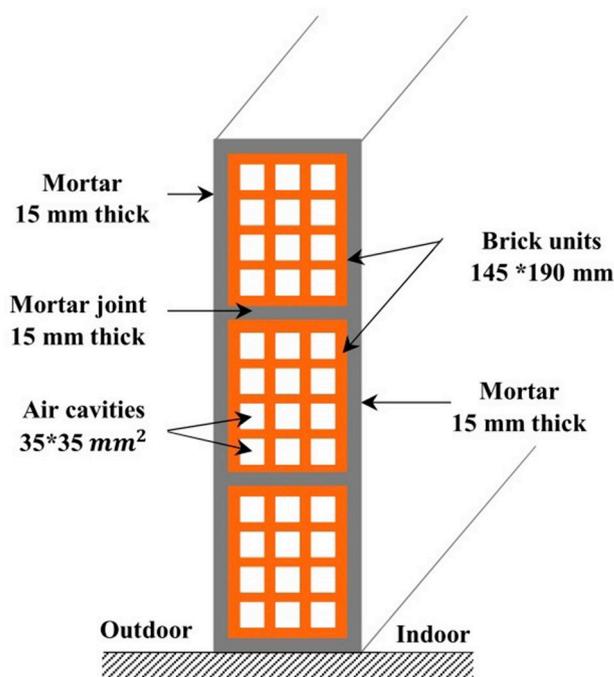


Fig. 4. Axonometric view of a typical sintered hollow bricks wall commonly used in Algeria.

PCHCM with different encapsulation mass ratios of PCM, using  $SiO_2$  as a shell and diatomite as a hygroscopic material. Results show that the shell  $SiO_2$  can reduce the super-cooling degree of PCM melts, and prevent the leakage of the PCM's. It did not affect the hygroscopic properties of the diatomite. The MPCM/diatomite composite is efficient in thermal storage and moisture adjusting. It can be used in interior wallboard of buildings [3,4].

The current paper addresses the question of substituting the EPS by using diatomite, and the optimized diatomite (MPCM/diatomite composite) in order to reduce the building energy consumption. Diatomite is highly porous, light in weight and chemically stable, and inert [46]. It has been extensively applied in many ways such as water filtration and purification, thermal insulation due to its low thermal conductivity, manufacture of antibiotics, some pharmaceutical syrups, and it is qualified as an ecological material [34,35]. While the EPS is a chemical material containing a contaminant named Hexabromocyclododecane (HBCD). The HBCD used as a brominated flame retardant in the EPS. Its toxicity and harm to the environment are currently discussed in the Stockholm Convention, and it is added to the list of Persistent Organic Pollutant (POP) in Annex A [33].

To answer this issue, a coupled heat and moisture transfer model for the building envelope is developed and benchmarked against one of the fifth HAMSTAD tests [40], and a two dimensional numerical simulations are realized using finite element method and an explicit scheme, to study the effect of EPS, diatomite, and MPCM/diatomite composite on hygrothermal performance of a fired clay sintered hollow bricks typically used in construction of Algerian buildings. The improvement of the hollow brick insulation performance is achieved by filling MPCM/diatomite composite according to different configurations, and comparing the influence of filling ratios, and locations on hygrothermal performance. The climate conditions considered are those in the northwest zone in Algeria (South-Mediterranean climate) [43].

## 2. Mathematical models

### 2.1. Coupled heat and moisture transfer equations

In the present model, we consider the temperature and the relative

humidity as driving potentials governing the heat and moisture transfer, providing the continuity of variables at the interface between the layers. The moisture content is discontinuous as illustrated in Fig. 1.

Each material has a unique equilibrium moisture content characteristic curve (sorption isotherm) that identify the moisture mechanisms transfer in pores. The moisture mechanism transfer can be by vapor diffusion in the hygroscopic region as illustrated in Fig. 2 and can be by capillary suction in the capillary water region, where the relative humidity is over 95%.

Based on the study of HM Kunzel [37], the following assumptions are considered:

- The material is considered homogeneous and non-deformable.
- The thermal equilibrium between all phases is assumed.
- The dry air and the water vapor are ideal gas and non-compressible.
- Chemical reactions and the hysteresis effect are not considered.
- The effect of gravity on the fluid flow is not taken into account.

The general form of the governing equations describing heat and moisture transfer processes in porous materials are given by a system of two partial differential equations derived by imposing the equilibrium balance of mass and energy within an infinitesimal element of volume [37]:

$$\rho_s \left( c_s + \frac{1}{\rho_s} c_w w \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[ \left( \lambda + h_v \delta_p \varphi \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \nabla T + h_v \delta_p P_{sat} \nabla \varphi \right] \quad (1)$$

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left[ \delta_p \nabla \varphi \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \nabla T + (D_w \xi + \delta_p P_{sat}) \nabla \varphi \right] \quad (2)$$

Where,  $\rho_s$  is the bulk density of the dry building material in  $[kg/m^3]$ ;  $c_s$  the specific heat capacity of dry building material in  $[J/(kg. K)]$ ;  $c_w$  the specific heat capacity of water in  $[J/(kg. K)]$ ;  $w$  Water content in  $[kg/m^3]$ ;  $T$  temperature in  $[K]$ ;  $\lambda$  thermal conductivity in  $[W/(m. K)]$ ;  $h_v$  evaporation enthalpy of water in  $[J/kg]$ ;  $\delta_p$  water vapor permeability of the building material in  $[kg/(m. s. Pa)]$ ;  $\varphi$  Relative humidity;  $P_{sat}$  Water vapor saturation pressure in  $[Pa]$ ;  $\xi$  Moisture storage capacity in  $[kg/m^3]$ ;  $D_w$  Moisture diffusion coefficient  $[m^2/s]$ .

The MPCM/diatomite composite was modeled using the coupled heat and moisture transfer model presented above. The PCM was incorporated into the porosity of the diatomite. The volume fraction of diatomite was defined as  $\theta_d$ , and thus the volume fraction of PCM was equal to  $(1 - \theta_d)$ .

Therefore, the effective thermal properties of the media assuming a parallel configuration are:

$$(\rho cp)_{eff} = \rho_d cp_d \theta_d + \rho_{pcm} cp_{pcm} (1 - \theta_d) \quad (3)$$

The PCM was modeled using modified specific heat capacity:

$$cp_{pcm} \begin{cases} P_s & \text{if } T_m < T \\ \left( \frac{cp_s + cp_l}{2} + \frac{L - hv}{\Delta T} \right) & \text{if } T_m \leq T \leq (T_m + 1) \\ cp_l & \text{if } T > (T_m + 1) \end{cases} \quad (4)$$

Where, the subscript d stands for diatomite,  $cp_l [J/(kg. K)]$  is the specific heat capacity of PCM in liquid form, and  $cp_s [J/(kg. K)]$  is the specific heat capacity of PCM in solid form.

The Moisture boundary conditions for exterior and interior surfaces of the building wall are taken by Eqs. (5) and (6), respectively:

$$\delta_p \nabla \varphi \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \nabla T + (D_w \xi + \delta_p P_{sat}) \nabla \varphi = \beta_{ext} (\phi_{ext} P_{sat}(T_{ext}) - \varphi P_{sat}(T)) \quad (5)$$

$$\delta_p \nabla \varphi \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \nabla T + (D_w \xi + \delta_p P_{sat}) \nabla \varphi = \beta_{int} (\phi_{int} P_{sat}(T_{int}) - \varphi P_{sat}(T)) \quad (6)$$

Where,  $\beta_{ext}$  and  $\beta_{int} [s/m]$  are the vapor transfer coefficient at the wall

surfaces,  $P_{sat}(T)$  Water vapor saturation pressure as a function of temperature in  $\varphi$  Relative humidity,  $\phi_{int}$  and  $\phi_{ext}$  are the relative humidity in the interior and exterior of the wall, respectively.

While Eqs. (7) and (8) give the heat flow boundary conditions at the exterior and the interior surfaces of the building wall. In these equations both heat convection and radiation are taken into accounts:

On the outside of the wall:

$$k_{eff} \nabla T + h_v \delta_p P_{sat} \nabla \varphi = h_{ext} (T_{ext} - T) + \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_{ext}^4) + \beta_{ext} h_v (\phi_{ext} P_{sat}(T_{ext}) - \varphi P_{sat}(T)) \quad (7)$$

On the inside of the wall:

$$k_{eff} \nabla T + h_v \delta_p P_{sat} \nabla \varphi = h_{int} (T_{int} - T) + \beta_{int} h_v (\phi_{int} P_{sat}(T_{int}) - \varphi P_{sat}(T)) \quad (8)$$

Where  $\varepsilon$  is the long wave emissivity and absorptivity of the material,  $\sigma$  the Stefan-Boltzman constant in  $[W/(m^2. K^4)]$ ,  $T_{\infty}$  the sky temperature  $h_{ext}$ , and  $h_{int}$  are exterior and interior heat transfer coefficients for air wind, respectively.

The convective heat transfer coefficient for air wind, interior air, and the sky temperature can be found in Ref. [38] as:

$$h_{int} = 2.8 + 3v_a \quad (9)$$

$$h_{ext} = 2.8 + 3v_{wind} \quad (10)$$

$$T_{\infty} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad (11)$$

Where  $v_a$  is the average interior air, it is taken equal to  $0.15 [m/s]$ , according to ASHRAE standards as comfortable ventilation velocity [39], and  $v_{wind}$  is the wind velocity, taken as function of time:  $v_{wind}(t) [m/s]$ .

## 2.2. Time lag and decrement factor

Time lag and decrement factor are required characteristics to determine heat and moisture storage capabilities of any material. As mentioned in the work of Asan [45], due to the periodic changes of outside temperature during the 1-day period, temperature profiles are variables during the day. The time it takes for the heat wave to propagate from the outer surface to the inner surface is named “time lag”, and the reduction in the cyclical temperature (amplitude) on the inside surface compared to the outside surface is known as “decrement factor”. The same definition can be used to define time lag and decrement factor of relative humidity. A schematic definition of time lag and decrement factor for temperature are shown in Fig. 3.

In this study, the time lag is described as follows:

$$Time \ lag = \begin{cases} t_{T_o}^{max} > t_{T_i}^{max} \Rightarrow t_{T_o}^{max} - t_{T_i}^{max} \\ t_{T_o}^{max} < t_{T_i}^{max} \Rightarrow t_{T_o}^{max} - t_{T_i}^{max} + P \\ t_{T_o}^{max} = t_{T_i}^{max} \Rightarrow P \end{cases} \quad (12)$$

Where  $t_{T_o}^{max} [h]$  and  $t_{T_i}^{max} [h]$  represent the time in hours when outside and inside surface temperatures and relative humidity are at their maximums, respectively and P (24 h) is the period of the wave. The decrement factor is described as follows:

$$Decrement \ factor = \frac{y_o^{max} - y_o^{min}}{y_i^{max} - y_i^{min}} \quad (13)$$

Where  $y_o^{max}$ ,  $y_i^{max}$ ,  $y_o^{min}$  and  $y_i^{min}$  represent the outside and the inside surface temperature and relative humidity at their maximums, and minimums, respectively.

**Table 1**  
Hygrothermal properties of used materials.

| Properties                           | Diatomite [21,41] | Air [2] | Brick [2] | Mortar [2] | EPS [44] | PCM (100%) [4] |       | PCHCM (12.9%PCM) [4] |        |
|--------------------------------------|-------------------|---------|-----------|------------|----------|----------------|-------|----------------------|--------|
|                                      |                   |         |           |            |          | liquid         | Solid | liquid               | Solid  |
| $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]        | 666.7             | 1.23    | 1600      | 230        | 20       | 775            | 814   | 680.67               | 685.7  |
| cp [J/kg K]                          | 1436              | 1006.43 | 840       | 920        | 1500     | 2660           | 2140  | 1615.8               | 1543.8 |
| $\lambda$ [W/m K]                    | 0.7               | 0.026   | 0.682     | 0.6        | 0.04     | 0.149          | 0.35  | 0.62                 | 0.65   |
| $\delta \times 10^{-10}$ [kg/m s Pa] | 0.295             | 5.62    | 0.26      | 0.0385     | 0.0187   | –              | –     | 5                    | –      |
| Melting Temp [°C]                    | –                 | –       | –         | –          | –        | 28.1           | –     | 27.0                 | –      |
| Latent heat [kJ/kg]                  | –                 | –       | –         | –          | –        | 145.9          | –     | 19                   | –      |

### 3. Description of the physical model

To improve the construction mode in Algeria, the insulation materials could be included in the cavities of a sintered hollow bricks wall, which may well suppress the moisture and heat transfer. The coupled heat and moisture transfer model presented is used to investigate the impact of different hygroscopic materials on the hygrothermal performance of a typical exterior wall of the residential building in Algeria.

The configuration of the typical sintered hollow bricks wall commonly used in the construction of the residential building in Algeria is presented in Fig. 4. The exterior wall is built of:

- A sintered hollow bricks of a big size with 12 equal air cavities (BB12CE), and a weight of 5–6 kg. Its dimensions are 30 cm in length, 19 cm in width and 14.5 cm in thickness. The air cavities have a parallelepiped section ( $3.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$ ).
- A cement based mortar with a ratio of 1/3 cement to sand is used in both joint, and in the two sides (interior and exterior surfaces) of the wall with a thickness of 1.5 cm.
- EPS, diatomite, and PCHCM are filled in bricks cavities as insulation materials in order to compare its effect on the hygrothermal performance of the sintered hollow bricks.

The hygrothermal properties of used materials are listed in Table 1 and shown in Fig. 5.

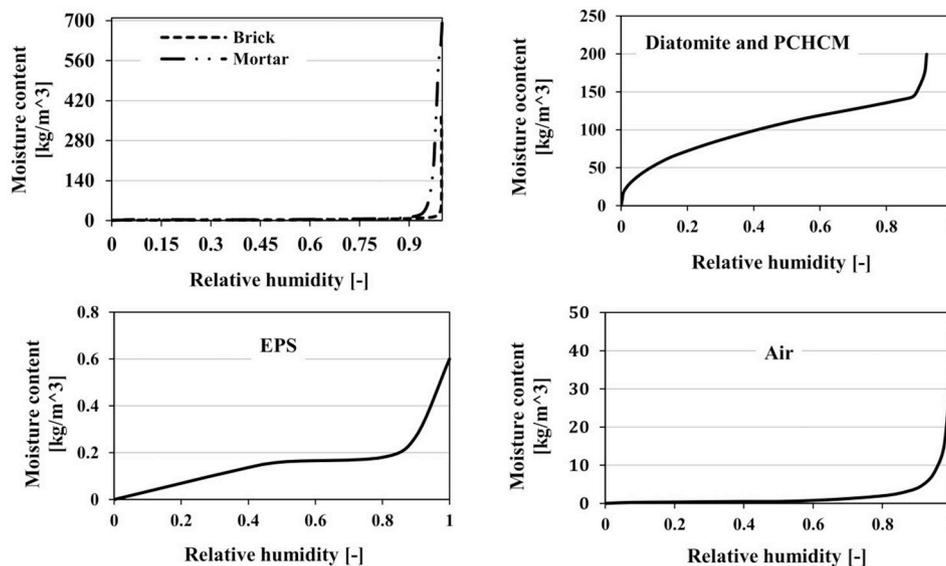


Fig. 5. Sorption isotherms of the materials constituting the studied cases according to Refs. [21,44].

As shown in Table 1, the PCM encapsulation ratio has a great effect on the amount of energy released or absorbed during the change of the PCM and PCHCM. In addition, the lack of heat absorption process of diatomite contributes to the worst heat storage capacity of PCHCM.

Due to the symmetry of the geometry and boundary conditions in the longitudinal direction of the wall (Z direction), the problem is addressed in two dimension. The outdoor surface of the wall is simultaneously subjected to a time-dependent temperature ( $T_{ext}(t)$ ), relative humidity ( $\varphi_{ext}(t)$ ), solar radiation with absorptivity  $\varepsilon = 0.87$  [2], and forced convection  $h_{ext} = 2.8 + 3v_{wind}$  [38]. The related outdoor time-dependent variables (air temperature, air relative humidity, solar radiation) considered in this study (Fig. 6) are taken from typical meteorological daily data of Tlemcen region in the northwest of Algeria (the hottest day in 07 August 2017) [43].

On the indoor surface of the wall, an imposed relative humidity  $\varphi_{int} = 50\%$ , and free convection boundary condition  $h_{int} = 3.25 [W/m^2K]$ , with the temperature of the air contacts  $T_{int} = 25 [°C]$  are chosen as the comfortable living environment condition. At the beginning, the temperature and relative humidity are respectively at  $T_{ini} = 25 [°C]$  and  $\varphi_{ini} = 50\%$ .

### 4. Results and discussions

In this section, two parts are presented. The first one is related to the validation aspect considering some benchmark tests given in the

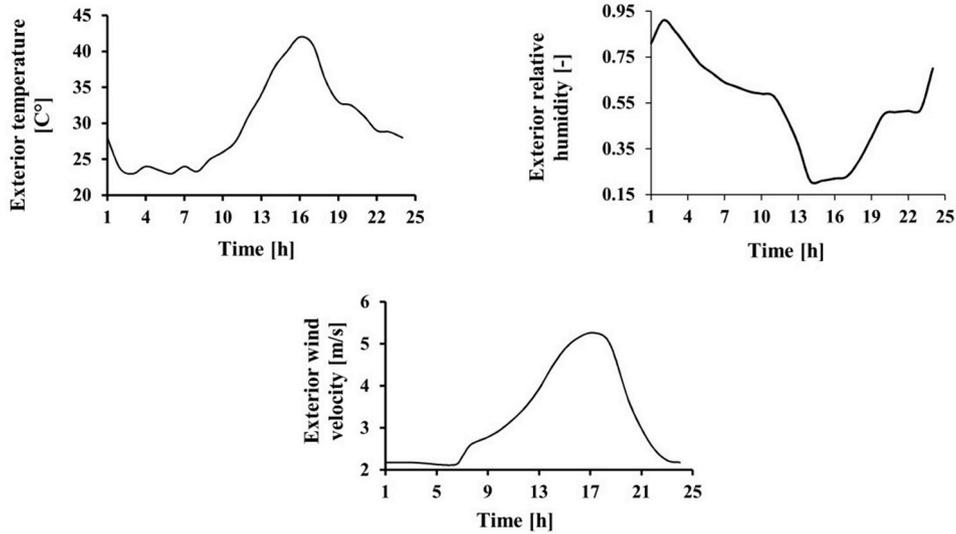


Fig. 6. Variation of outdoor temperature, relative humidity, and air velocity used in simulations [43].

literature. The second part is dedicated to the analysis of the diatomite, EPS, and MPCM/diatomite composite filling impacts on the hygro-thermal performance of the considered hollow bricks wall (case 01). In order to get optimal performance, different filling ratios and locations of PCHCM are considered (case 02), analyzed and compared. The mathematical model of coupled heat and moisture transfer represented by equations (1) and (2) is solved numerically using finite element method, and an explicit scheme with variable time stepping, based computational COMSOL Multiphysics tool [42]. By using the partial differential interface in the COMSOL program (PDE equations), we can define own coupled heat and moisture transfer model by specifying the equations parameters and driving potentials. As a results of simulations, temperature and relative humidity can be determined at any location, and can be exported as a data file, and plotted.

4.1. Model validation

The presented model is benchmarked using HAMSTAD tests [40], which were initiated to develop a platform to assess the computational modeling of heat, moisture, and air transport mechanisms in building physics.

In the benchmark test, a moisture redistribution inside a multilayers wall was analyzed in one dimension, and the properties of capillary

Table 2

Material properties definition of layers [40].

| Parameters   | value   |
|--|---|
| Sorption isotherm [kg/m <sup>3</sup> ] as function of capillary suction $P_{suc}$ [Pa] | $w(P_{suc}) = w_{sat} \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{(1 + (a_i h(P_{suc}))^{m_i})^{m_i}}$                        |
| Capillary suction height [m]   | $h(P_{suc}) = P_{suc}/(\rho_w g)$   |
| Kelvin relation  | $P_{suc}(\phi) = -\rho_w R v T \ln(\phi)$   |
| Vapor gas constant   | $R_v = R/M_w$   |
| The vapor diffusion [m <sup>2</sup> /s]  | $D_v(w) = \frac{26.1 \cdot 10^{-6}}{RT} \frac{1 - \frac{w}{w_{sat}}}{(1-p)(1 - \frac{w}{w_{sat}})^2 + p}$ |
| Liquid water permeability [s]  | $\delta_p(w, T) = \frac{M_w}{RT} D_v(w)$  |
| Liquid water conductivity [s]  | $k(w) = \exp[\sum_{i=0}^5 a_i (w/\rho_w)^i]$  |
| Thermal conductivity [W/m k]   | $\lambda = (\lambda_{matry} + \lambda_{mst} \frac{w}{\rho_w})$  |
| Volumetric liquid water content [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]                      | $\theta_l(w) = w/\rho_w$  |
| The reference temperature [K]  | $T = 293.15$  |
| Liquid water density [kg/m <sup>3</sup> ]  | $\rho_w = 1000$   |
| Molar water mass [kg/mol]  | $M_w = 0.018$   |
| Universal gas constant [J/mol K]   | $R = 8.314$   |
| Gravity acceleration [m/s <sup>2</sup> ]   | $g = 9.81$  |

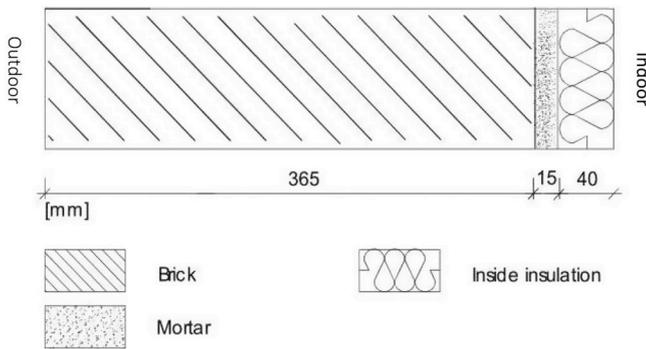


Fig. 7. An inside insulated wall structure with initial temperature and relative humidity of  $T = 25^\circ C$ .

active insulations were calculated. The wall consists of three materials from exterior to interior as shown in Fig. 7: brick (365 mm thick), coating mortar (15 mm thick), and an insulating material (40 mm thick). The structure is airtight.

$\phi = 60\%$  , and boundary conditions of  $T = 0^\circ C$  ,  $\phi = 80\%$  ,  $T = 20^\circ C$  ,  $\phi = 60\%$  at the outside and inside of the structure, respectively [40].

The simulation time is 60 days. As results of the simulation using the coupled heat and moisture transfer model, both moisture content and relative humidity at last time step (60 days) are shown in Fig. 8a and Fig. 8b, and compared with the values of benchmark solutions. The numerical solutions show a good agreement for all positions, and in Fig. 8b, a discontinuity is visible because each material has its own moisture sorption curve.

**Table 3**  
Parameters for all given materials [40].

|   | Brick                 | Mortar   | Inside insulation |
|---|-----------------------|----------|-------------------|
| <i>Sorption isotherm</i>                        |                       |          |                   |
| water saturation $w_{sat}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 373.5                 | 700      | 871               |
| $k_1$ [-]                                       | 0.46                  | 0.2      | 0.41              |
| $k_2$ [-]                                       | 0.54                  | 0.8      | 0.59              |
| $a_1$ [-]                                       | 0.47                  | 0.5      | 0.006             |
| $a_2$ [-]                                       | 0.2                   | 0.004    | 0.012             |
| $n_1$ [-]                                       | 1.5                   | 1.5      | 2.5               |
| $n_2$ [-]                                       | 3.8                   | 3.8      | 2.4               |
| <i>Vapor diffusion [m<sup>2</sup>/s]</i>        |                       |          |                   |
| $p$ [-]   | 0.2                   | 0.2      | 0.2               |
| <i>Liquid water conductivity [s]</i>            |                       |          |                   |
| $a_0$ [-]                                       | -36.484               | -40.425  | -46.245           |
| $a_1$ [-]                                       | 461.325               | 83.319   | 294.506           |
| $a_2$ [-]                                       | -5240                 | -175.961 | -1439             |
| $a_3$ [-]                                       | 2.907 10 <sup>4</sup> | 123.863  | 3249              |
| $a_4$ [-]                                       | -7.41 10 <sup>4</sup> | 0        | -3370             |
| $a_5$ [-]                                       | 6.997 10 <sup>4</sup> | 0        | 1305              |
| <i>Thermal conductivity [W/m K]</i>             |                       |          |                   |
| Dry material $\lambda_{mdry}$                   | 0.682                 | 0.6      | 0.06              |
| Saturation material $\lambda_{mst}$             | 0                     | 0.56     | 0.56              |
| <i>Heat capacity</i>                            |                       |          |                   |
| Density [kg/m <sup>3</sup> ]                    | 1600                  | 230      | 212               |
| Specific heat capacity [J/(kg K)]               | 1000                  | 920      | 1000              |

4.2. Cases studies

Due to the symmetry of the cells in the bricks wall, one cell of the brick surrounded by mortar is taken in all simulations for the cases studies, with an insulation condition in both below, and above the brick cell as illustrated in Fig. 9.

4.2.1. Case 01

In order to improve the hygrothermal performance of the hollow bricks wall, the influence of filling diatomite, PCHCM, and EPS in cavities of the sintered hollow bricks on heat and moisture transfer are analyzed and compared.

As results, the time-variations of temperature and relative humidity at the inner surface of the bricks unit surrounded by mortar, and filled by different hygroscopic materials are shown in Fig. 10.

As shown in Fig. 10, there is an obvious difference between outside and inside temperature and relative humidity fluctuations under different hygroscopic materials. It can be clearly seen that air, and EPS can reduce the inner surface temperature, and relative humidity better than diatomite due to the difference in thermal conductivity, and hygroscopicity. Whereas, filling PCHCM in brick cavities gives the lowest fluctuation of temperature, and relative humidity compared to other materials, and the reduction of total heat flux (THFR) by using relationship (14) is 50% in 24 h compared to EPS which is 11.62% as shown in Fig. 11.

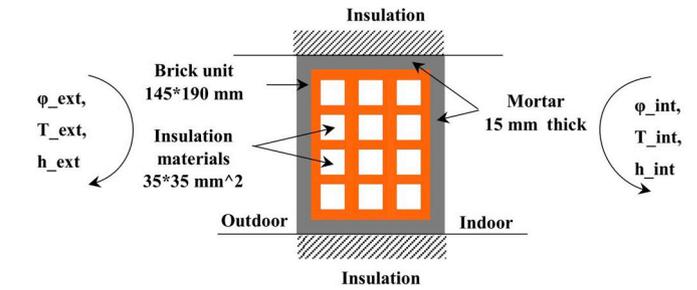
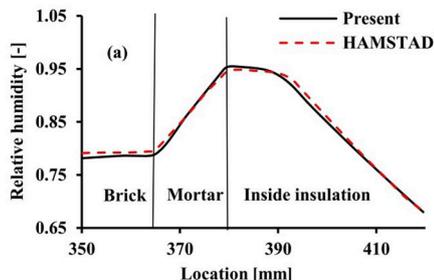


Fig. 9. A two-dimensional section of the cell of sintered hollow brick and mortar. Filled by different hygroscopic materials used in the simulation.

$$THFR (\%) = \frac{\text{total heat flux without insulation} - \text{total heat flux with insulation}}{\text{total heat flux without insulation}} * 100 \quad (14)$$

The difference in fluctuations can be explained by the fact that PCHCM contains the PCM, while the latter has the capability to absorb a large amount of energy, and needs more time to change his state from solid to liquid. This fact leads to a decrease in inner surface temperature. In addition, it contains diatomite; which can absorb water vapor due to its high porosity, leading to a decrease of inner surface relative humidity.

4.2.2. Case 02

Based to the results of the first case, the improvement of hygrothermal performance of the hollow bricks is achieved by filling the MPCM/diatomite composite in the holes of bricks.

In this part, the effect of different filling ratios of PCHCM, and its locations in sintered hollow bricks is studied and analyzed in order to obtain the best insulation (Fig. 12). All configurations are subjected to the same boundaries conditions of the case (01) in Fig. 9.

The variation of the inner surface temperature, and the relative humidity under different PCHCM filling ratios, and locations are figured in Fig. 13.

As shown in Fig. 13, under the same PCHCM filling ratio of 33% (Fig. 12), PCHCM filled in the internal air cavities has the lowest temperature, and relative humidity fluctuations (see case (B\_3)), while PCHCM filled in center, and internal air cavities simultaneously has the lowest temperature, and relative humidity fluctuations for the case (C\_2) with filling ratio of (66%). On the other hand, with the increase of PCHCM filling ratios from case (A) to case (C), the temperature, and relative humidity fluctuations decrease gradually, but when the filling ratio attain the max value (see case (D)), an increase in fluctuations of inner surface temperature and relative humidity is observed.

Variation of decrement factor of inner surface temperature, and relative humidity with different filling ratios, and locations of PCHCM are shown in Fig. 14. It can be seen that there is an inverse relationship between decrement factor, and PCHCM filling ratios. Moreover, we observe a large difference of decrement factor for the same filling ratio due to PCHCM locations. This result means that inner temperature, and

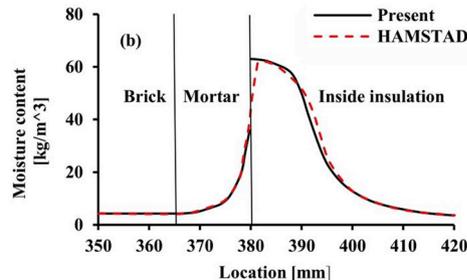


Fig. 8. Simulation results after 60 days: (a) Relative humidity [-] profile; (b) Moisture content [kg/m<sup>3</sup>] profile.

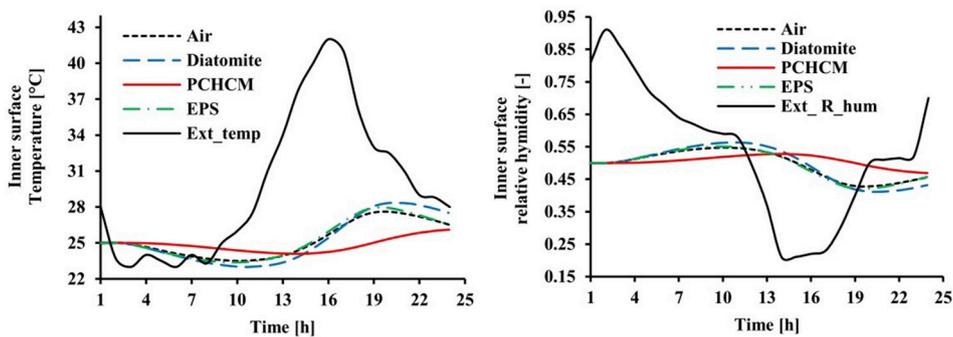


Fig. 10. Time-variation of inner temperature and relative humidity vs external conditions (Ext\_temp, Ext\_R\_him) under different hygroscopic materials filling.

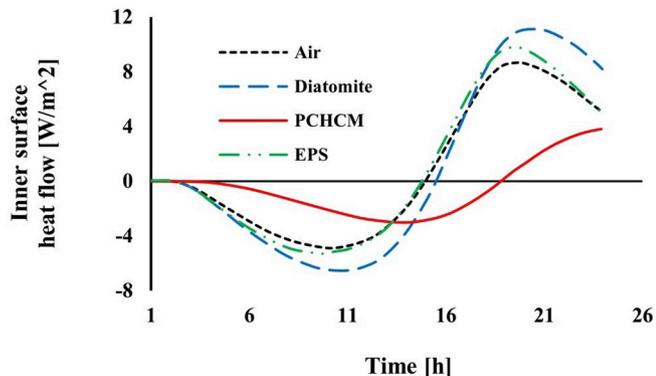


Fig. 11. Time-variation of the inner surface thermal flux under different hygroscopic materials.

relative humidity trends to stabilize, reaching a high indoor comfortable level.

Variations of time lag of inner surface temperature, and relative humidity according to different filling ratios, and locations of PCHCM are shown in Fig. 15. As indicated, there is a direct relationship between time lag and PCHCM filling ratios, and a large difference of time lag of inner temperature of the same filling ratio due to PCHCM locations.

5. Conclusion

The MPCM/diatomite composite has been proposed as an alternative solution for the substitution of EPS, for adjusting indoor temperature and relative humidity. The insulation material is filled in air cavities of a sintered hollow brick. The effect of filling ratios, and locations of PCHCM on hygrothermal performances of a hollow brick under Tlemcen city (the northwest of Algeria) climate conditions are analyzed using finite element methods. Results show that PCHCM has a

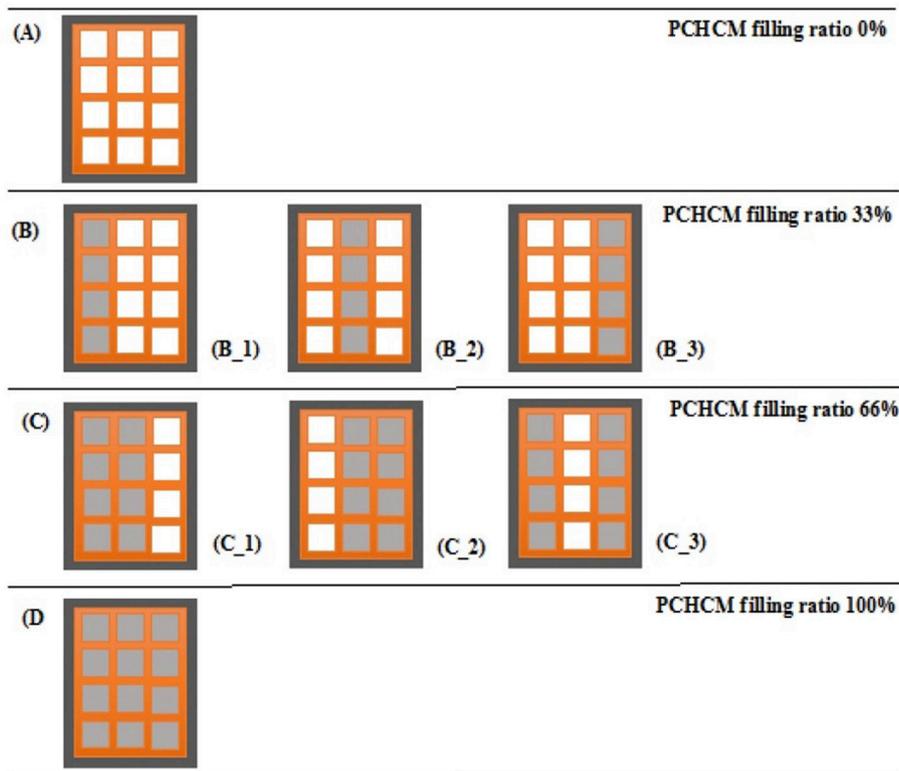


Fig. 12. Schematic diagram of the cell of sintered hollow brick surrounded by Mortar with different PCHCM filling ratios and locations, from outdoor to indoor.

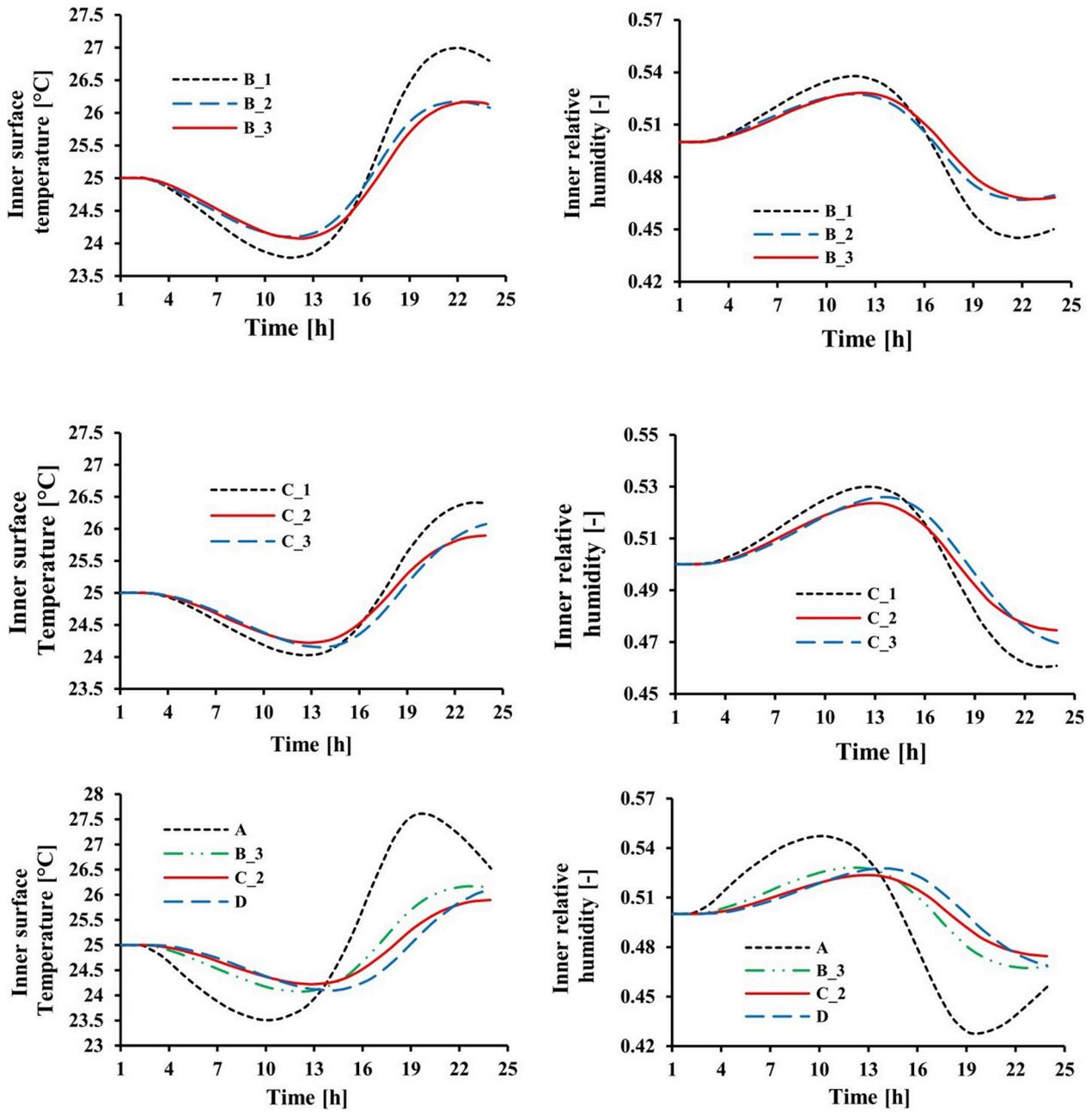


Fig. 13. Time-variation of the inner temperature, and the inner relative humidity under. Different PCHCM filling ratios, and locations in sintered hollow bricks for 24 h.

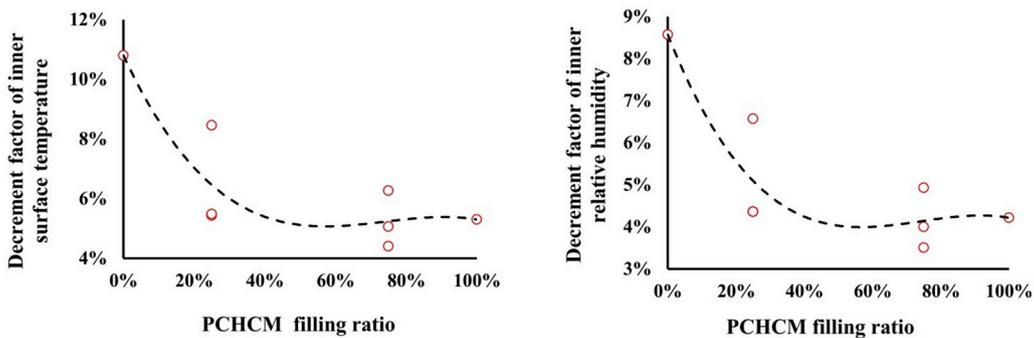


Fig. 14. Variation of the decrement factor of inner temperature, and relative humidity according to different PCHCM filling ratios and locations.

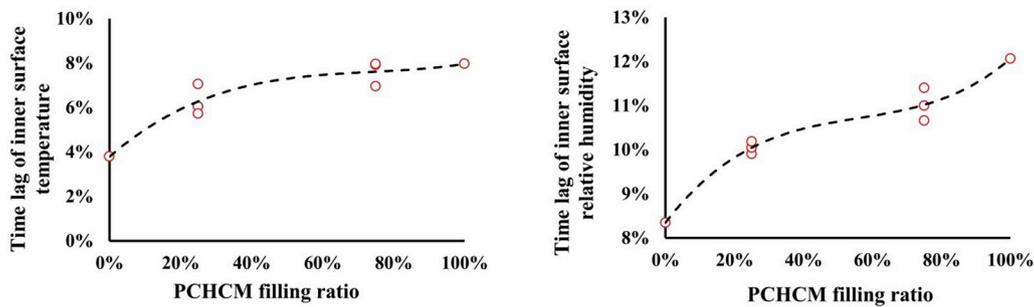


Fig. 15. Variations of the time lag of inner temperature, and relative humidity with different PCHCM filling ratios and locations.

great ability to reduce the fluctuations of inner temperature, and the relative humidity, and can reduce 50% of the total heat flux. The optimum effect of PCHCM was obtained by filling it in the center, and in the internal air cavities of the sintered hollow bricks simultaneously (case C<sub>2</sub>). With the increase of PCHCM filling ratio, the decrement factor decreases, and the time lag increases for the inner surface temperature, and relative humidity. For the same filling ratio, due to PCHCM locations, a difference of decrement factor, and time lag is observed. Above all, the proposed material (PCHCM) has the potential to be a high energy saving material, and could constitute one of the solutions for the substitution of the EPS in thermal insulating in the building.

## References

- J. Li, X. Meng, Y. Gao, W. Mao, T. Luo, L. Zhang, Effect of the insulation materials filling on the thermal performance of sintered hollow bricks, *Case stud. Therm. Eng.* 11 (2018) 62–70 <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.12.007>.
- A. Bouchair, Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation, *Build. Environ.* 43 (2008) 1603–1618 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.005>.
- Z. Chen, D. Su, M. Qin, G. Fang, Preparation and characteristics of composite phase change material (CPCM) with SiO<sub>2</sub> and diatomite as endothermal-hygroscopic material, *Energy Build.* 86 (2015) 1–6 <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.013>.
- Z. Wu, M. Qin, Z. Chen, Phase change humidity control material and its application in buildings, *Procedia Eng.* 205 (2017) 1011–1018 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.162>.
- N.P. Sharifi, G.E. Freeman, A.R. Sakulich, Using COMSOL modeling to investigate the efficiency of PCMs at modifying temperature changes in cementitious materials – case study, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 965–974 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.162>.
- M. Qin, Z. Chen, Synthesis and characteristics of composite phase change humidity control materials, *Energy Procedia* 139 (2017) 493–498 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.243>.
- Z. Chen, M. Qin, Synthesis and characterization of composite phase change material (CPCM) with SiO<sub>2</sub> and diatomite as endothermal-hygroscopic material, *Energy Procedia* 78 (2015) 201–206 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.140>.
- M.Y. Ferroukhi, R. Djedjig, K. Limam, R. Belarbi, Hygrothermal behavior modeling of the hygroscopic envelopes of buildings: a dynamic co-simulation approach, *Build. Simul.* 9 (5) (2016) 501–512 <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0292-5>.
- J.F. Nicol, M.A. Humphreys, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy Build.* 34 (2002) 563–572 [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3).
- S.N. Al-Saadi, Z.J. Zhai, Modeling phase change materials embedded in building enclosure: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 21 (2013) 659–673 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.024>.
- A. Jamekhorshid, S.M. Sadrameli, M. Farid, A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31 (2014) 531–542 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.033>.
- A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 318–345 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12 (2008) 39–64 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.010>.
- S.D. Zwanig, Y. Lian, E.G. Brehob, Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope, *Energy Convers. Manag.* 69 (2013) 27–40 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.003>.
- K.O. Lee, M.A. Medina, E. Raith, X. Sun, Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management, *Appl. Energy* 137 (2015) 699–706 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.003>.
- H. Xie, G. Gong, Y. Wu, Y. Liu, Y. Wang, Research on the hygroscopicity of a composite hygroscopic material and its influence on indoor thermal and humidity environment, *Appl. Sci.* 430 (8) (2018), <https://doi.org/10.3390/app8030430>.
- M. Qin, A. Ait-Mokhtar, R. Belarbi, Two-dimensional hygrothermal transfer in porous building materials, *Appl. Therm. Eng.* 30 (16) (2010) 2555–2562 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.006>.
- D.H. Vu, K.S. Wang, B.H. Bac, B.X. Nam, Humidity control materials prepared from diatomite and volcanic ash, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 1066–1072 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.040>.
- A. Trabelsi, R. Belarbi, P. Turcay, A. Ait-Mokhtar, Water vapour desorption variability of in situ concrete and effects on drying simulations, *Mag. Concr. Res.* 63 (5) (2011) 333–342 <https://doi.org/10.1680/mac.9.00161>.
- B. Zhou, Z. Chen, Experimental study on the hygrothermal performance of zeolite-based humidity control building materials, *Int. J. Heat. Technol.* 34 (3) (2016) 407–414, <https://doi.org/10.18280/ijht.34.03.09>.
- J. Zheng, J. Shi, Q. Ma, X. Dai, Z. Chen, Experimental study on humidity control performance of diatomite-based building materials, *Appl. Therm. Eng.* 114 (2017) 450–456 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.203>.
- A. Bouguerra, O. Amiri, A. Ait-Mokhtar, M.B. Diop, Water sorptivity and pore structure of wood-cementitious composites, *Mag. Concr. Res.* 54 (2) (2002) 103–112 <https://doi.org/10.1680/mac.2002.54.2.103>.
- M. Tanaka, Saito, *The Variance of Humidity in Room According to Wall Materials, 3rd version*, Shukosha Printing Co., Ltd., Fukuoka, 1949, pp. 21–25 *Research Report of Architectural Institute of Japan*.
- T. Horikawa, Y. Kitakaze, T. Sekida, J.I. Hayashi, M. Katoh, Characteristics and humidity control capacity of activated carbon from bamboo, *Bioresour. Technol.* 101 (11) (2010) 3964–3969 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.032>.
- T. Hasegawa, S. Iwasaki, Y. Shibutani, I. Abe, Preparation of superior humidity-control materials from kenaf, *J. Porous Mater.* 16 (2) (2009) 129–134 <https://doi.org/10.1007/s10934-007-9176-5>.
- J.J.D.C. Díaz, F.P.A. Rabanal, P.J.G. Nieto, J.D. Hernandez, B.R. Soria, J.M. Pérez-Bella, Hygrothermal properties of lightweight concrete: experiments and numerical fitting study, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 543–555 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.045>.
- R.M. Wang, J.F. Wang, X.W. Wang, Y.F. He, Y.F. Zhu, M.L. Jiang, Preparation of acrylate-based copolymer emulsion and its humidity controlling mechanism in interior wall coatings, *Prog. Org. Coating* 71 (4) (2011) 369–375 <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.04.007>.
- L. Navarro, A. de Gracia, S. Colclough, M. Browne, S.J. Mc-Cormack, P. Griffiths, L.F. Cabeza, Thermal energy storage in building integrated thermal systems: a review. Part 1. Active storage systems, *Renew. Energy* 88 (2016) 526–547 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.040>.
- F. Bruno, M. Liu, N.H.Z. Tay, Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems, *Advances in Thermal Energy Storage Systems (Methods and Applications)*, Woodhead Publishing Series in Energy, 2015, pp. 201–246 <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16453-7>.
- Y. Yuan, H. Zhang, N. Zhang, Q. Sun, X. Cao, Effect of water content on the phase transition temperature, latent heat and water uptake of PEG polymers acting as endothermal hygroscopic materials, *J. Therm. Anal. Calorim.* 126 (2) (2016) 699–708 <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5537-0>.
- S. Karaman, A. Karaipekli, A. Sari, A. Biçer, Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 95 (2011) 1647–1653 <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.022>.
- J.L. Shang, Z.F. Zong, H. Zhang, Synthesis and analysis of new humidity-controlling composite materials, *Int. J. Min. Metall. Mater.* 24 (5) (2017) 594 <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1441-2>.
- UNEP-POPS-NIP-GUID-InventoriesAndSubstitution-HBCD-201703.En, Guidance for Inventory and Substitution.Pdf.
- H. Meradi, L.H. Atoui, L. Bahloul, K. Labiod, F. Ismail, Characterization of diatomite from Sig region (West Algeria) for industrial application, *Manag. Environ. Qual. Int. J.* 27 (3) (2016) 281–288 <https://doi.org/10.1108/MEQ-04-2015-0057>.
- B. Hamdi, S. Hamdi, Thermal properties of Algerian diatomite, study of the possibility to its use in the thermal insulation, *Springer Proc. Phys.* 155 (2014) 27–32 [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05521-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05521-3_4).
- F. Tariku, K. Kumaran, P. Fazio, Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53 (2010) 3035–3044 <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2010.03.024>.
- H.M. Kunzel, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and Two Dimensional Calculation Using Simple Parameters*, Dissertation university Stuttgart, Germany, 1995 (ISBN 3-8167-4103-7).
- A.I.N. Korti, Numerical heat flux simulations on double-pass solar collector with

- PCM spheres media, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 24 (2) (2016) 13 <https://doi.org/10.1142/S2010132516500103>.
- [39] R.J. De-Dear, E. Arens, Z. Hui, Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments, *Int. J. Biometeorol.* 40 (1997) 141–156 <https://doi.org/10.1007/s004840050035>.
- [40] C.E. Hagentoft, A.S. Kalagasidis, B. Adl-Zarrabi, Assessment method of numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building components: benchmarks for one-dimensional cases, *J. Therm. Envelope Build. Sci.* 27 (4) (2004) 327–352 <https://doi.org/10.1177/1097196304042436>.
- [41] F. Liu, B. Jia, B. Chen, Influence of hygroscopic material on indoors environment, *Procedia Eng.* 205 (2017) 3662–3669 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.240>.
- [42] A.G. FEMLAB, Comsol 33 Multiphysics FEM Software Package, (2007).
- [43] <https://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle/60531/aout/2017/temperatures.html>.
- [44] Fraunhofer WUFI Light 6.2.1 free version, Germany: Fraunhofer IBP, Available from: <https://wufi.de/en/webshop/>.
- [45] H. Asan, Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials, *Build. Environ.* 41 (2006) 615–620 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.020>.
- [46] N. Degirmenci, A. Yilmaz, Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 284–288 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.008>.

# La Diatomite Algérienne un Matériau d'Isolation Hygrothermique Ecologique pour l'Habitat

FRAINE Youssouf<sup>1, \*</sup>, SELADJI Chakib<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Laboratoire Energétique et Thermique Appliquée (ETAP), Université de Tlemcen, Algérie

\*Correspondance: youfraine@hotmail.fr

## Résumé :

*L'intégration des matériaux passifs innovants dans les enveloppes de bâtiment est un moyen pertinent de réduire la consommation d'énergie et d'assurer un niveau élevé de confort intérieur de l'habitat. Le polystyrène expansé (EPS) est l'un des matériaux le plus utilisé dans le secteur des constructions résidentiels et commerciales en Algérie. Tandis que ce dernier contient le hexabromocyclododecane (HBCD), qu'est considéré comme un matériau persistant organique polluant (POP). La matière diatomite est très abondante en Algérie, se caractérise par une faible conductivité thermique et une porosité élevée. Dans la présente étude, cette dernière est suggérée comme une solution efficace pour remplacer le EPS. Un modèle bidimensionnel de transfert transitoire de chaleur et d'humidité (HAM) a été développé, et résolu numériquement à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, afin d'étudier, et comparer l'effet de ces deux matériaux sur la performance hygrothermique d'un mur multicouche en brique creuse sous les conditions climatiques de la ville de Tlemcen en Algérie.*

**Mots clefs :** Milieu poreux ; Transfert de chaleur et de l'humidité (HAM); Diatomite; Brique creuse ; COMSOL multiphysics.

## 1. Introduction :

Dues aux alternances (jour / nuit) et (hiver / été), les fluctuations externes de la température et de l'humidité relative sont considérées comme des facteurs extrêmement importants affectant le cadre de vie environnant. Le système de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) utilisé pour contrôler la température et l'humidité relative de l'environnement intérieur de l'enveloppe du bâtiment est responsable de 45% de la consommation totale d'énergie du monde (Wu et al. 2017, Chen et al. 2015, Ferroukhi. 2016). À cet égard, plusieurs méthodes ont été développées pour réduire l'utilisation du système CVC et augmenter le niveau de confort du cadre de vie, tandis que les matériaux passifs innovants sont présentés comme la meilleure solution pour réduire la consommation d'énergie (Chen et al. 2015, Qin et al. 2017, Nicol et al. 2002). Les matériaux de contrôle de l'humidité (HCM) sont développés pour stabiliser l'humidité relative intérieure par l'absorption et par la libération de l'humidité (Vu et al. 2013, Zhou et al. 2016).

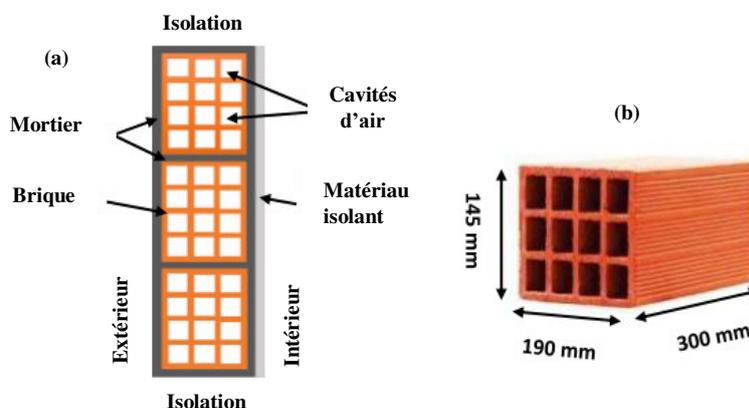
De nombreux chercheurs se sont concentrés sur l'énergie du bâtiment utilisant des modèles numériques. L'utilisation d'un modèle numérique pris en charge les phénomènes couplés de chaleur et d'humidité à travers les parois du bâtiment est essentiel. Un modèle dynamique a été développé par Tariku et al (2010) pour résoudre le problème de transfert de la chaleur, de l'air et de l'humidité existant entre l'enveloppe et la chambre. Un modèle basé sur une concentration de vapeur d'eau et de température a été fondé par Qin et al (2010), un accord important avec les résultats expérimentaux a été trouvé. Afin de fournir des données valides au modèle HAM, Desta et al (2011) ont testé le transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité d'un habitat. Abahri et al (2011) ont proposé un modèle unidimensionnel permettant d'évaluer le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans des matériaux de construction poreux, ce qui a permis de simplifier le problème mathématique initial en une équation du quatrième ordre facilement

à résoudre. Un modèle dynamique couplé de transfert de chaleur et d'humidité avec condensation dans un tissu poreux avec une faible température a été résolue par Xu et al (2013).

Dans cet article, un model couplé de chaleur et d'humidité basé sur l'étude Kunzel, et al (1995) est mise en œuvre pour décrire le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans un mur multicouche. Un logiciel de simulation numérique (COMSOL multiphasics) a été exploité pour résoudre les équations différentielles de transfert, afin d'étudier et comparer l'effet de polystyrène expansé (EPS) et la diatomite sur le comportement hygrothermique d'un mur fabriquer en brique creuse, et du mortier.

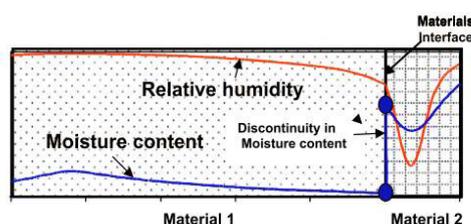
## 2. Description du model physique :

Un mur typique multicouche utilisé dans la construction des bâtiments Algérienne est illustré dans la figure.1. L'enveloppe est construit avec des briques creuses frittées de  $30 \times 19 \times 14,5$  cm, et d'un poids de 5 à 6 kg, avec 12 cavités d'air (modèle BB12CE) (Bouchair, 2008) de section parallélépipédique ( $3,5 \times 3,5\text{cm}^2$ ). Le mortier est placé sur les deux côtés du mur en briques, et dans les joints avec une épaisseur de 1.5 cm. Le matériau isolant est placé à l'intérieur de l'enveloppe avec une épaisseur de 2 cm.



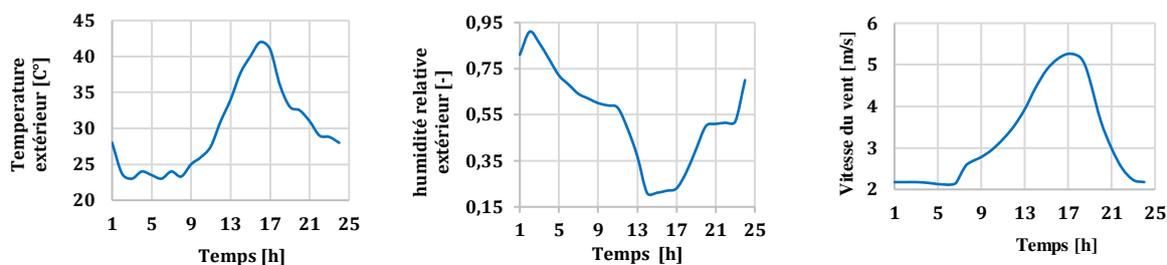
**Figure.1.** (a). Vue axonométrique d'un mur construit avec des briques creuses (modèle BB12CE), (b). Vue volumétrique et dimensions globales de la taille de brique utilisée dans la modélisation.

Dans cette étude, un modèle couplé de chaleur et d'humidité basé sur l'étude Kunzel, et al (2004) est mise en œuvre pour décrire le transfert couplé de chaleur et d'humidité à travers le mur multicouche, chaque matériau est considéré comme un milieu poreux homogène, l'équilibre thermodynamique est vérifié, l'air sec et la vapeur d'eau sont des gaz parfaits et incompressibles, les effets de la réaction chimique, de l'hystérésis, de la déformation, et de la gravité ne sont pas pris en compte. La température et l'humidité relative sont considérées comme un moteur de transfert pour assurer la continuité du transfert de masse dans l'interface entre les couches, contrairement à la teneur en eau, qui est discontinue comme la montre la Fig.2.



**Figure.2.** Profile de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents. (Tariku et al, 2010).

Due à la symétrie de la géométrie et des conditions aux limites dans la direction longitudinale du mur (direction Z), la simulation numérique de transfert de chaleur et de l'humidité dans le mur en brique creuse est adressé en deux dimensions sous les conditions climatique de la ville de Tlemcen. La surface extérieure du mur est simultanément soumise à une variation temporaire de l'humidité relative, de la température, du rayonnement solaire avec une absorptivité de  $\varepsilon = 0,87$ , et à une convection forcée  $h_{ext} = 2,8 + 3v_{vent}$  (Korti, 2016), comme illustré dans la Figure. 3.



**Figure.3.** Variation de la température, de l'humidité relative, et de la vitesse du vent de l'air extérieur, (le jour le plus chaud le 07 aout 2017 à Tlemcen).

A l'état initial, la température, l'humidité relative, et le coefficient de convection à l'intérieur du mur sont fixées à  $T_{ini} = 25 [^{\circ}C]$ ,  $\varphi_{ini} = 0.5 [-]$ ,  $h_{int} = 3.25 [W/(m^2 K)]$ .

Les propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés sont énumérées sur le tableau 1.

| Parameters | $\rho_s$<br>[Kg/m <sup>3</sup> ] | $cp$<br>[J/Kg K] | $\lambda$<br>[W/m K] | $\delta$ [Kg/m s Pa]<br>$\times 10^{-8}$ |
|------------|----------------------------------|------------------|----------------------|--|
| Diatomite  | 650                              | 1436             | 0.097                | 0.00295                                  |
| Air        | 1.23                             | 1006.43          | 0.026                | 0.0562                                   |
| Brique     | 1600                             | 840              | 0.682                | 0.0026                                   |
| Mortier    | 230                              | 920              | 0.6                  | 0.000385                                 |
| EPS        | 20                               | 1500             | 0.04                 | 0.000187                                 |

Ou  $\rho_s$ [Kg/m<sup>3</sup>] est la densité des matériaux ;  $cp$ [J/Kg K] est la capacité thermique ;  $\lambda$ [W/m K] est la conductivité thermique;  $\delta$  [Kg / (m s Pa)] est la perméabilité.

### 3. Résultats et discussions :

#### 3.1 Validation numérique :

Afin d'étudier l'effet des deux matériaux isolants sur le comportement hygrothermique du mur en brique creuse, une validation numérique du model de transfert de chaleur et d'humidité utilisé est nécessaire. Le model a été validé par rapport un test benchmark du projet HAMSTAD (Hagentoft, 2004). Le test porte sur une solution analytique de redistribution monodimensionnelle de l'humidité dans les conditions isothermes dans une paroi homogène de 0.2 m d'épaisseur. La comparaison montre une bonne concordance entre la simulation numérique et la solution analytique comme la montre la figure.4.

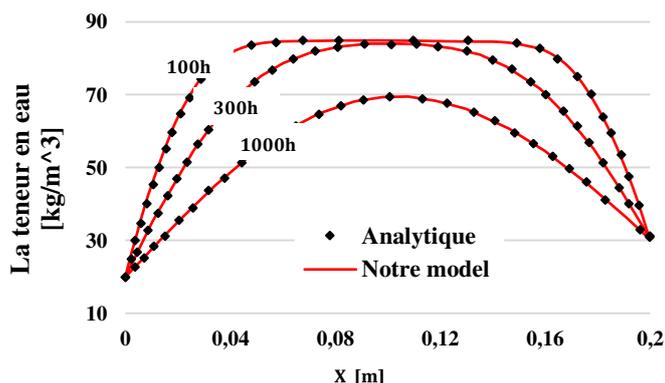


Figure.4. La redistribution de la teneur en eau dans une paroi homogène à 100h, 300h, et 1000h

### 3.2 Etude de cas :

L'influence de la performance hygroscopique de deux matériaux hygroscopique sur la chaleur et l'humidité dans la paroi sous les conditions climatiques de la ville de Tlemcen est analysée et comparée pendant 24 heures, (Figure.5).

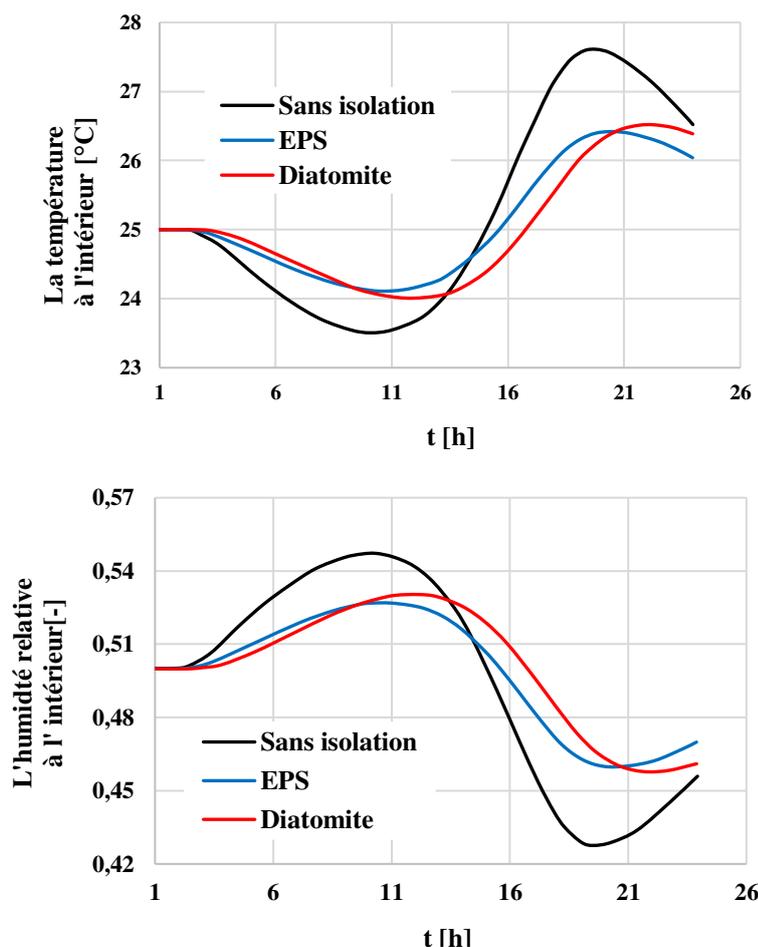
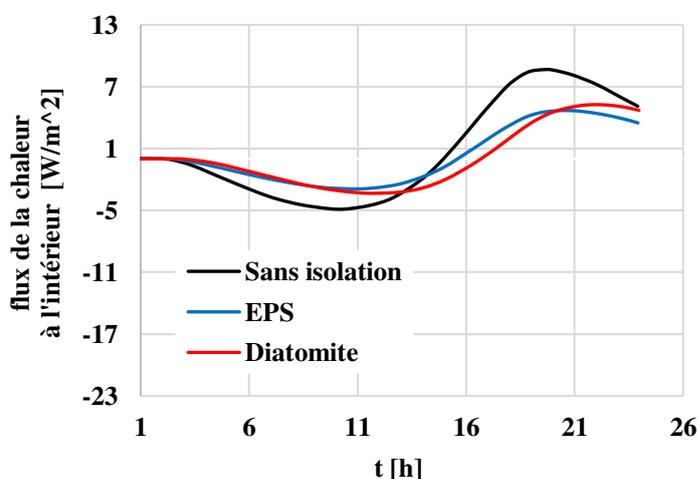


Figure.5. La variation temporaire de la température et de l'humidité relative à la surface intérieure du mur pour les deux matériaux isolants.

Comme la montre la Figure.5, il existe une différence évidente de la fluctuation de la température et de l'humidité relative à la surface intérieure de la paroi avec isolation et sans isolation. Les deux matériaux ont la capacité de stabiliser la température et l'humidité relative, une petite différence est remarquée entre le EPS et la diatomite due aux caractéristiques hygroscopique et thermique pour chaque matériaux. L'écart des deux variantes pour les deux matériaux isolants est calculé, on trouve que la température pour le EPS varie par un écart de 2.3 °C, et pour la diatomite varie par 2.5 °C, pour l'humidité relative on trouve un écart de 0.072 pour le EPS et 0.07 pour la diatomite. De l'autre côté, la réduction du flux de chaleur par le EPS est de 43.77 % par rapport la diatomite qui est de 36.2 %, calculer par l'équation (1).Figure.6.

Réduction du flux totale (%) =

$$\frac{\text{Flux totale sans isolation} - \text{Flux totale avec isolation}}{\text{Flux totale sans isolation}} * 100 \quad (1)$$



**Figure.6.** La variation tempore du flux de chaleur totale à la surface intérieure du mur pour les deux matériaux isolants.

#### 4. Conclusion :

L'influence des deux matériaux passifs sur la performance hygrothermique des habitats est étudiée et analysée. Les résultats trouvés montrent que le EPS et la diatomite ont la capacité de stabiliser la température et l'humidité relative de l'environnement intérieur. Une petite différence entre l'effet des deux matériaux sur le comportement de mur en brique creuse est observé. La diatomite algérienne peut être un matériau économique d'énergie, organique et écologique pour l'environnement, et peut être une solution future de l'Algérie pour substitué le Polystyrène expansé (EPS).

**Références:**

- Abahri K., *et al*, Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials, *Building and Environment*, 46 (2011) pp1354-1360.
- Bouchair A., Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation, *Building and Environment*, 43 (2008) pp1603–1618.
- Chen Z., *et al*, Synthesis and characterization of composite phase change material (CPCM) with SiO<sub>2</sub> and diatomite as endothermal-hygroscopic material, *Energy and Proceeding*, 78 (2015), pp6.
- Desta T. Z., *et al*, Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes, *Building and Environment*, 46 (2011) pp1038-1046.
- Ferroukhi M.Y., *et al*, Hygrothermal behavior modeling of the hygroscopic envelopes of buildings: A dynamic co-simulation approach, *Building and Simulation*, 12 (2016), DOI 10.1007/s12273-016-0292-5.
- Hagentoft CE., 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 (2004) pp327–352.
- Korti A.I.N., Numerical Heat Flux Simulations on Double-Pass Solar Collector with PCM Spheres Media, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 24(2) (2016) pp13.
- Kunzel H.M., Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two dimensional calculation using simple parameters. Dissertation, university Stuttgart, Germany, (1995) (ISBN 3-8167-4103-7).
- Nicol J. F., *et al*, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy and Building*, 34 (2002), pp10.
- Qin M., *et al*, Synthesis and characteristics of composite phase change humidity control materials, *Energy Proceeding*, 139 (2017), pp6.
- Qin M. H., *et al*, Two-dimensional hygrothermal transfer in porous building materials, *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010) pp2555-2562.
- Tariku F., *et al*, Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (2010) pp 3111-3120.
- Vu D. H., *et al*, Humidity control materials prepared from diatomite and volcanic ash, *Construction and Building Material*, 38 (2013), pp7.
- Wu Z., *et al*, Phase Change Humidity Control Material and its Application in Buildings, *Procedia engineering*, 205 (2017), pp8.
- Xu D. H., *et al*, Numerical solution of a dynamic model of heat and moisture transfer in porous fabric under low temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61(2013) pp149-157.
- Zhou B., *et al*, Experimental Study on the Hygrothermal Performance of Zeolite-Based Humidity Control Building Materials, *International journal of heat and technology*, 34 (2016), pp8.