

الجمهورية الديمقراطية  
الشعبية  
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم  
العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة بوابكر بك  
تلمسان  
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention d'un diplôme de MASTER**

**En : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

**Présenté par: Benabdellah Omar  
Taleb Bendiab Anes**

**Sujet**

**Etude expérimentale de l'isolation thermique dans le  
bâtiment par de la diatomite**

**Soutenu publiquement, le 29 / 06 /2021, devant le jury composé de :**

<b>M. SAIM Rachid</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>	<b>Président</b>
<b>M. SELADJI Chakib</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>	<b>Encadrant</b>
<b>M. HACHEMI Housseem</b>	<b>Doctorant</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>	<b>Co-Encadrant</b>
<b>M. KORTI Abdel Illah Nabil</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>	<b>Examineur</b>

**Année Universitaire 2020-2021**

# Remerciement

**Avec l'aide de Dieu tout puissant, nous avons pu accomplir ce modeste travail**

Nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances à nos directeurs de mémoire, Mr. SELADJI Chakib et Mr. HACHEMI Housseem, nous les remercions de nous avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs spécialement Mr. HOUTI Farid et M. GUELLIL Hocine intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant notre recherches.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres du jury M. KORTI Abdel Illah Nabil, et M. SAIM Rachid professeurs à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce travail, et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme finale de cette thèse.

A nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Nous tenons à remercier tous personnes qu'ont participé de près ou de loin à l'exécution de ce travail.

## *Dédicace*

*Nous dédions ce travail :*

*A nos chers parents.*

*A nos chers frères.*

*A nos amis.*

*Et a tous la famille **Taleb bendiab , Benabdellah , Boutaga, Tabet Aoul .***

## ملخص

نظرا للازمة الاقتصادية الحالية المرتبطة بأزمة الطاقة يجب اتخاذ تدابير وحلول من اجل خفض او التقليل من نسبة الاستهلاك وضمان التنمية المستدامة في العالم. وعلى الصعيد الوطني نرى ان من أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة هو قطاع السكن ، وذلك من اجل ضمان الراحة الحرارية للفرد في منزله و من اجل تحقيق ذلك يجب أن تكون التقلبات الحرارية ونسبه الرطوبة الداخلية منخفضة جدا و الهدف من كل هذا هو تقليل الخسائر من خلال الجدران والأسقف لتحسين الراحة الحرارية للمستخدم واستهلاك طاقة اقل وذلك بدراسة إمكانية استخدام مادة جديدة لها خاصية التحكم في الرطوبة وقابلية تغيير الحالة الفيزيائية، المكونة من مادة الدياتوميك والتي بإمكانها ان تحل محل البوليستر لأنه بعد عدة دراسات معمقة ظهر ان هذا الأخير يحتوي على سداسي البدروم ثنائي الفينيل والذي تم تصنيفه من بين اخطر 20 ملوث عالميا . من ناحية أخرى فان الدياتوميك يعتبر مادة طبيعية وبيئية وفيرة للغاية في الجزائر اذ انه يتميز بالتوصيل الحراري المنخفض والمسامية العالية. اشتملت المنهجية على استخدام المحاكاة العددية بواسطة برنامج COMSOL MULTI PHYSICS من اجل تحقيق الأهداف المذكورة اعلاه. النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة البرنامج تعطينا انخفاضا في تقلبات درجة الحرارة والرطوبة وان استخدام لوح عزل الدياتوميك على الجهة الخارجية يعتبر من أحسن العوازل من حيث النوع وسهولة صناعته

**كلمات مفتاحية** وسط مسامي، انتقال الحرارة والرطوبة المقترن، دياتوميك، المادة المتحكممة في الرطوبة والحرارة، الطوب المجوف، COMSOL multiphasics.

# Résumé

Compte tenu de la crise économique actuelle associée à la crise énergétique causée par la situation sanitaire et géopolitique, des mesures et des solutions doivent être prises pour réduire l'intensité énergétique et assurer un développement durable dans le pays. Au niveau national, nous constatons que l'un des secteurs les plus énergivores est le secteur du bâtiment, afin d'assurer le confort thermique de l'individu dans son logement, et pour y parvenir, les fluctuations de température et d'humidité interne doivent être très faibles. Le but de tout ce présent travail est de réduire les pertes à travers les murs et les plafonds et améliorer ainsi le confort thermique de l'utilisateur, consommer moins d'énergie et préserver nos ressources naturelles en étudiant la possibilité d'utiliser un nouveau matériau qui a les propriétés de contrôler l'humidité, la température et la capacité de changer l'état physique.

Les caractéristiques de la diatomite lui permettent d'avoir des propriétés permettant de remplacer le polystyrène, car après plusieurs études approfondies, il est apparu que ce dernier contenait de l'hexabromobiphényle, qui est classé parmi les 20 polluants les plus dangereux au monde. En revanche, la diatomite est considérée comme un matériau naturel et environnemental très abondant en Algérie, car elle se caractérise par une faible conductivité thermique et une porosité très élevée. Pour vérifier ces propos, une série d'études et de simulation numérique par le programme COMSOL MULTIPHYSICS confortés par des expériences réelles dans le laboratoire à l'université de Tlemcen sur des murs en brique avec différentes couches de finition (mortier, diatomite ...) ont été menées.

Les résultats expérimentaux et numériques obtenus nous permettent de conclure que l'utilisation de panneaux isolants en diatomite à l'extérieur est considérée comme l'une des meilleures solutions isolantes, ceci tenant compte de la facilité de fabrication (dans notre région et avec la paraffine utilisé).

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

# Abstract

In view of the current economic crisis associated with the energy crisis, measures and solutions must be taken in order to reduce or reduce the percentage of consumption and to ensure sustainable development in the world. At the national level, we see that one of the most energy-consuming sectors is the housing sector, in order to ensure the thermal comfort of the individual in his home, and in order to achieve this, the temperature fluctuations and the internal humidity must be very low.

The aim of all this is to reduce losses through walls and ceilings to improve the thermal comfort of the user and consume less energy by studying the possibility of using a new material that has the property of controlling humidity and the ability to change the physical state,

The component of diatomics, which can replace polystyrene, because after several in-depth studies it appeared that the latter contains hexabromobiphenyl, which is classified among the 20 most dangerous pollutants in the world. On the other hand, diatomite is considered a very abundant natural and environmental material in Algeria, as it is characterized by low thermal conductivity and high porosity.

The methodology included the use of numerical simulation by COMSOL MULTI PHYSICS program in order to achieve the above-mentioned goals.

The results obtained by the program give us a decrease in temperature and humidity fluctuations and that the use of diatomite insulation board on the outside is considered one of the best insulators in terms of type and ease of manufacture

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

# Table des matières

Remerciement.....	I
Résumé.....	II
Table des matières.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	V
Nomenclature.....	VI
<b>Introduction générale.....</b>	<b>21</b>
<b>Chapitre 1: Rapport énergie bâtiments et humidité.....</b>	<b>23</b>
I-1 Introduction.....	24
I-2 Bâtiment et sa consommation énergétique.....	24
I-3 Humidité.....	26
I-4 Problèmes causés par l'humidité dans le bâtiment.....	26
I-4-1 Infiltration d'eau.....	26
I-4-2 Humidité ascensionnelle.....	27
I-4-3 Humidité de condensation.....	27
I-4-4 Humidité de construction.....	27
I-5 Désordre de l'humidité dans le bâtiment.....	27
I-6 Pathologies au niveau de l'ambiance habitable.....	28
I-6-1 Détérioration de la qualité de l'air intérieur.....	28
I-6-2 Confort thermo-humidité des habitants.....	29
I-6-3 Problèmes de santé causée par l'humidité.....	29

I-7	Caractéristiques des milieux poreux .....	30
I-7-1	Porosité.....	30
I-7-2	Humidité relative.....	31
I-7-3	Teneur en eau et degré de saturation.....	31
I-7-4	Perméabilité.....	31
I-7-5	Pression capillaire - Loi de Laplace et Loi de Kelvin.....	32
I-7-6	Isothermes de sorption.....	33
I-7-7	Phénomène d'hystérésis .....	33
I-8	Transfert de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux.....	33
I-8-1	Mécanismes de transport d'humidité.....	33
I-8-1-1	Transport de vapeur d'eau.....	35
I-8-1-2	Transport d'eau liquide.....	35
I-8-1-3	Transport de l'humidité totale .....	35
I-8-2	Transfert et stockage thermique dans les milieux poreux .....	36
I-8-2-1	Stockage d'énergie dans les matériaux de construction.....	36
I-8-2-2	Transfert de chaleur dans les matériaux de construction.....	36
I-8-2-3	Flux de chaleur avec changement de phase.....	36
I-8-3	Modélisation de transfert de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches de bâtiments.....	37
I-8-3-1	Modélisation par homogénéisation.....	37
I-8-3-2	Modélisation phénoménologique.....	37
I-9	Transfert de chaleur et d'humidité dans les murs des bâtiments.....	38
I-9-1	Interaction entre le bâtiment et l'environnement.....	38
I-9-2	Interaction entre deux parois .....	40
I-10	Conclusion .....	41

<b>Chapitre 2: Matériaux hygroscopiques à changement de phase dans les bâtiments .....</b>	<b>42</b>
II-1 Introduction .....	43
II-2 Matériaux de contrôle d'humidité (matériaux hygroscopiques) .....	43
II-3 Diatomite (matériau de contrôle d'humidité et d'isolation thermique).....	44
II-3-1 Description et situation géographique .....	44
II-3-2 Définition .....	45
II-3-3 Domaine d'utilisation .....	46
II-3-4 Propriétés physico-chimique .....	46
II-3-5 Classification des diatomite d'après KARPOV .....	47
II-3-6 Analyse microstructurale .....	47
II-4 Le stockage de l'énergie thermique.....	47
II-4-1 Chaleur sensible .....	48
II-4-2 Chaleur latente .....	48
II-4-3 Stockage thermochimique .....	48
II-5 Matériaux à changements de phase (MCPs) .....	49
II-6 Intégration du MCP à l'enveloppe du Bâtiment.....	49
II-6-1 Critères de choix d'un matériau à changement de phase.....	50
II-6-2 Utilisation de paraffine pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure du Bâtiment	
51	
II-6-2-1 Paraffine intégrés dans les murs.....	52
II-6-2-2 Paraffine intégrés à la toiture .....	52
II-6-2-3 Protections solaires avec paraffine.....	52
II-7 Matériaux hygroscopiques à changement de phase (MHCP) .....	53
II-8 Diatomite /MCP comme matériau de construction .....	53
II-9 Application du composite (Diatomite /MCP) dans le bâtiment .....	53
II-10 Conclusion.....	54

<b>Chapitre3: Description du problème physique et modélisation mathématique .....</b>	<b>55</b>
III-1 Introduction .....	56
III-2 Description du problème physique .....	56
III-2-1 propriétés .....	58
III-3 modélisation mathématique et équation gouvernantes .....	59
III-3-1 Hypothèses du modèle .....	59
III-3-2 Equations gouvernantes de transfert de chaleur et d'humidité .....	59
III-3-2-1 Transfert d'humidité.....	60
III-3-2-2 Transfert de chaleur.....	61
III-3-2-3 Conditions aux limits.....	61
III-4 Solution numérique .....	62
III-4-1 Etapes de travail sur COMSOL Multiphysic .....	62
III-4-2 Méthode des éléments finis .....	65
III-4-2-1 Grandes lignes de la méthode .....	65
III-4-2-2 Choix de maillage .....	66
III-4-2-3 Forme Conservative des équations de conservation .....	68
III-4-3 calcul numérique.....	69
III-5 Partie expérimental .....	71
III-6 Conclusion.....	74
<b>Chapitre 4: Discussion des résultats .....</b>	<b>75</b>
IV-1 Introduction :.....	76
IV-2 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numérique :.....	76
IV-2-1 Analyse du 1 <sup>er</sup> cas mur en mortier simple .....	76
IV-2-2 Analyse du 2eme cas mur avec diatomite intérieur :.....	77
IV-2-3 Analyse du 3eme cas mur avec diatomite extérieur .....	78
IV-2-4 Analyse du 4eme cas mur avec diatomite/paraffine intérieur .....	79

IV-2-5 Analyse du 2eme cas mur avec diatomite/paraffine extérieur.....	79
IV-3 commentaire .....	80
IV-4comparaison .....	80
IV-5 Explications :.....	81
IV-5-1 Diatomite seule ou diatomite + paraffine ?.....	81
IV-5-2 Diatomite à l'extérieur ou à l'intérieur ? .....	81
IV-6 Conclusion : .....	81
<b>Conclusion général :</b> .....	<b>82</b>
<b>Référence</b> .....	<b>84</b>

---

## Liste des figures

---

Figure I.1 : Construction résidentielle dans le projet de logement social Algérienne [5].....	25
Figure I.2: Structure de la consommation finale d'énergie par produits [Bilan énergétique national 2018].....	25
Figure I.3 : Exemples de dégradations causées par l'humidité (Zhong and Braun, 2008) .....	28
Figure I.4 : Plages d'humidité favorable à la croissance de polluants (Roulet, 2004).....	29
Figure I.5 : Pertes thermiques du corps humaines [8].....	29
Figure I.6 : Représentation schématique d'un milieu poreux .....	30
Figure I.7 : Différents types de pores : a- pore isolé, b- pore aveugle, c- pore interconnecté (Malvault, 2013).....	30
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) .....	32
Figure I.9 : Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en humidité dans les pores. [5].....	34
Figure 1.10 : Illustration des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore [8].....	35
Figure I.11: Transport d'humidité dans un système de pores combinant la diffusion de vapeur et le transport de liquide (LO. Nilsson, 2004) [5].....	36
Figure I.12 : Homogénéisation par prise de moyenne volumique (Y. Ferroukhi, 2015)[6] .....	37
Figure I.13 : Sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment [8].....	39
Figure I.14 : Types de contact possibles entre deux matériaux (VP. De Freitas et al, 1996) .....	40
Figure II-1: Carte géologique de la région ouest avec les principaux gisements.....	45
Figure II.2 : Site de dépôt de Sig (Algérie).....	45

Figure II-3 : Microstructure de la diatomite [21] .....	47
Figure II-4 : Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase [5,32]. .....	49
Figure II-5 : Formes de paraffine en construction[25].....	50
Figure II-6 : Classification des matériaux à changement de phase [24] .....	50
Figure III.1 : Mur en brique avec une plaque de diatomite.....	57
Figure III.2 : Mur en brique avec une plaque de diatomite+ paraffine.....	57
Figure III.3 : Mur en brique avec une plaque de mortier.....	58
Figure III.4: Profil de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents [38].....	59
Figure III.5 : Géométrie en 3D des murs en brique avec mortier à étudier sur logicielCOMSOL Multiphasiques avant calcul.....	63
Figure III.5 (suite): Géométrie en 3D des mur en brique avec mortier a étudier sur logiciel COMSOL Multiphasiques avant calcul.....	64
Figure III.6 : Géométrie en 3D des mur en brique avec diatomite et diatomite+paraffine a étudier sur logicielCOMSOL Multiphasiques. Avant et après calcul.....	65
Figure III.7 : Trapézoïdale de Fourier de p-élément.....	66
Figure III.8 : Élément quadrilatère courbe.....	67
Figure III.9 : Élément coque quadrilatère à 8 nœuds de contrainte assumée hybride.....	67
Figure III.10 : Maillage avec éléments triangulaires dans la méthode des éléments finis alpha alternatif (A $\alpha$ FEM).....	68
Figure III -11 Constructeur de modèle COMSOL.....	69
Figure III -12 matériaux COMSOL.....	69
Figure III -13 6791720 éléments de volumes .....	70
Figure III-14 1721245 éléments de volumes.....	70
Figure III -15 770829 éléments de volumes.....	70
Figure III -16 Test de maillage.....	71
Figure III -17 Résistance électrique.....	72
Figure III -18 Contrôleur de température.....	72
Figure III -19 Camera thermique TESTO.....	73
Figure III -20 TESTO logiciel de la caméra thermique.....	73

Figure IV-1 Résultats obtenus avec un mur en mortier simple.....	77
Figure IV-2 Résultats obtenus avec un mur avec diatomite .....	77
Figure IV-3 Comparaison diatomite extérieur.....	78
Figure IV-4 Comparaison diatomite/paraffine intérieur.....	79
Figure IV-5 Comparaison diatomite/paraffine extérieur.....	80
Figure IV.6 Comparaison des 5 cas expérimentaux.....	80

---

## Liste des tableaux

---

Tableau I.1 : Consommation nationale par agrégat (Source : Ministre de l'énergie Bilan énergétique).....	26
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). [5].....	34
Tableau II.1 : Application de matériaux de contrôle d'humidité dans le bâtiment. Z. Rao et al, 2012 [5]. .....	43
Tableau II-2 : Composition chimique de diatomite . .....	46
Tableau II-3 : Classification de diatomite selon les normes Russe (KARPOV, 1979).....	47
Tableau III.1: Propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés [5, 31, 32, 33,34, 35,36,42,43].....	58

---

# Nomenclature

---

## Lettres latines

$V_p$	volume des pores	[m <sup>3</sup> ]
$V_0$	volume apparent du matériau	[m <sup>3</sup> ]
$V_s$	volume solide	[m <sup>3</sup> ]
$M$	l'échantillon humide	[kg]
$m_0$	la masse de l'échantillon sec	[kg]
$V$	le volume de l'échantillon	[m <sup>3</sup> ]
$u$	la teneur en eau massique de l'échantillon humide	[kg/kg]
$K_{eff}$	la perméabilité effective du matériau	[m <sup>2</sup> ]
$P_g$	pression totale de gaz	[Pa]
$P_l$	pression totale de l'eau liquide	[Pa]
$u_{cap}$	la teneur en eau massique du même échantillon à la saturation capillaire	[kg/kg]
$K_{eff,i}$	Perméabilité effective de la phase i (liquide ou gazeuse)	
$K_i$	Perméabilité intrinsèque	[m <sup>2</sup> ]
$P_c$	Pression capillaire	[Pa]
$R$	le constant du gaz parfait	[J/(K.mol)]
$M_w$	la masse molaire de l'eau	[kg/mol]
$S_h$	une source de chaleur due à la condensation ou à l'évaporation	[J/(s.m <sup>3</sup> )]
$h_{l,v}$	la chaleur latente du changement de phase	[J/kg]
$j_v$	la densité de flux de la diffusion de la vapeur d'eau	[kg/(s.m <sup>2</sup> )]
$Se$	Le rayonnement à la surface extérieur de la paroi	[W/m <sup>2</sup> ]
$S_{dir}$	le rayonnement direct	[W/m <sup>2</sup> ]
$S_{dif}$	le rayonnement direct et diffus	[W/m <sup>2</sup> ]
$T_{sol}$	La température à la surface du sol	[K]
$T_{ciel}$	la température du ciel	[K]
$F$	le facteur de forme	
$h_c$	coefficients d'échange convectif de chaleur	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$h_m$	coefficients d'échange massique	[kg/(m <sup>2</sup> .s.Pa)]
$Q_{conv}$	Le flux convectif thermique	[J/(m <sup>2</sup> .s)]

$H_{\text{conv}}$	Le flux convectif massique	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$P_{\text{v,air}}$	La pression de vapeur d'eau de l'air (extérieur ou intérieur)	$[\text{Pa}]$
$P_{\text{v,surf}}$	La pression de vapeur de la surface de la paroi (intérieure ou extérieure)	$[\text{Pa}]$
$J_{\text{l,pluie in filitée}}$	l'infiltration de la pluie	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$J_{\text{l}}$	le flux d'eau liquide arrivant sur la paroi	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$C_p$	la chaleur spécifique	$[\text{J}/(\text{kg}.\text{K})]$
$d\vec{Q}_{\text{cond}}$	Le flux de chaleur élémentaire traversant une surface $dS$	$[\text{W}]$
$\vec{q}_{\text{cond}}$	la densité de flux de chaleur	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$p_{\text{v}}$	la pression de vapeur	$[\text{Pa}]$
$p_{\text{v,sat}}$	la pression de vapeur saturante	$[\text{Pa}]$
$H_{\text{s}}$	l'enthalpie du matériau poreux	$[\text{J}/\text{m}^3]$
$R_{\text{hydrique}}$	résistance hydrique	$[\text{m}^2.\text{s}/\text{kg}]$
$J_{\text{interface}}$	La densité du flux hydrique à l'interface	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$R_{\text{thermique}}$	résistance thermique	$[\text{m}^2.\text{K}/\text{W}]$
$Q_{\text{interface}}$	la densité du flux thermique à l'interface	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$L_{\text{f}}$	chaleur latente de changement de phase	$[\text{J}/\text{kg}]$
$T$	le temps	$[\text{s}]$
$g_{\text{v}}$	la diffusion de flux de vapeur	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$g_{\text{l}}$	le flux liquid	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$Q_{\text{w}}$	un terme source	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$T_{\text{int}}$	température intérieur	$[\text{°C}]$
$h_{\text{int}}$	coefficient de transfert de chaleur intérieur	$[\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})]$
$T_{\text{ini}}$	la température initiale	$[\text{°C}]$
$\varphi_{\text{ini}}$	l'humidité relative initiale	
$P_{\text{v}}$	la pression partielle de vapeur d'eau	$[\text{Pa}]$
$P_{\text{v,s}}(T)$	la pression de vapeur saturante	$[\text{Pa}]$
$D_{\text{m}}$	le coefficient de diffusion lié à la masse	$[\text{kg}/(\text{m}.\text{s})]$
$T_{\text{a,ext}}$	la température de l'air à l'extérieur	$[\text{K}]$
$T_{\text{a,int}}$	la température de l'air à l'intérieur	$[\text{K}]$
$T_{\text{s,ext}}$	la températures de surface externe du mur	$[\text{K}]$
$T_{\text{s,int}}$	la températures de surface interne du mur	$[\text{K}]$
$E_{\text{p}}$	épaisseur de parpaing	$[\text{m}]$

Rb	résistance de brique	$[(m^2.K)/W]$
ed	épaisseur de diatomite dans brique	[m]
nd	nombre d'épaisseur de diatomite dans brique	
$c_s$	capacité thermique spécifique du matériau de construction sec	$[J/(Kg.K)]$
$c_e$	capacité thermique spécifique de l'eau	$[J/(Kg.K)]$
eb	épaisseur de brique	[m]
nb	nombre d'épaisseur de brique	
ea	épaisseur de lame d'air de brique	[m]
na	nombre d'épaisseur de lame d'air de brique	
$D_T$	Le coefficient de la thermo-diffusion	$[kg/(m.s.k)]$
$D_w$	Coefficient de diffusion d'humidité	$[m^2/s]$
$P_{v,s}$	pression de saturation de la vapeur d'eau	[Pa]
$Q_T$	un terme source	$[W/m^3]$
$T_\infty$	la température de ciel	[K]
$h_{a,ext}$	le coefficient de transfert convective extérieur de l'air	$[W/(m^2.K)]$
$h_{a,int}$	le coefficient de transfert convective intérieur de l'air	$[W/(m^2.K)]$
T	Température	[K]
$L_v$	enthalpie d'évaporation de l'eau	[J/kg]
<b>Symbole</b>		
$E_{to}$	La porosité totale	
$v$	La teneur en vapeur	$[kg/m^3]$
$v_{sat}$	La teneur en vapeur à la saturation	$[kg/m^3]$
$\vec{\sigma}_p$	Représente le gradient de pression auquel est soumis le matériau	[Pa/m]
$\mu$	La viscosité dynamique du fluide	[Pa.s]
$\vec{v}$	La vitesse de filtration d'un fluide	[m/s]
$\sigma$	Tension superficielle	

$\theta$	Angle de contact	
$\tau_p$	Rayon du pore	[m]
$\rho_w$	La densité de l'eau	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	La densité du matériau	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	La conductivité thermique du milieu poreux	[W/(m.K)]
$\varepsilon$	L'émissivité du matériau	
$\sigma$	La constante de Boltzmann	[W/ (m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]
$k$	Le coefficient d'absorption solaire	
$w$	La teneur en humidité	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	Une absorptivité	
$\beta_{s,ext}$	Un coefficient de transfert d'humidité	[s/m]
$\varphi_{int}$	Humidité relative intérieur	
$\beta_{s,int}$	coefficient de transfert d'humidité intérieur	[s/m]
$\lambda_{ap}$	Conductivité thermique lame d'air de parpaing	[W/(m.K)]
$\lambda_d$	Conductivité thermique de diatomite	[W/(m.K)]
$\lambda_a$	Conductivité thermique de lame d'air	[W/(m.K)]
$\lambda_b$	Conductivité thermique de brique	[W/(m.K)]
$\lambda_p$	Conductivité thermique de parpaing	[W/(m.K)]
$\delta$	Le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air	[kg/(m.s.Pa)]
$\mu$	Le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	
$w$	La teneur en eau	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	L'humidité relative	
$\delta p$	Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de construction	[kg/(m.s.Pa)]
$\beta_{s,ext}$	Coefficients de transfert de vapeur sur la surface externe	[s/m]
$\beta_{s,int}$	Coefficients de transfert de vapeur sur la surface interne	[s/m]
$\phi_{a,ext}$	L'humidités relative de l'air à l'extérieur	
$\phi_{a,int}$	L'humidités relative de l'air à l'intérieur	
$\phi_{s,ext}$	L'humidités relative de surface externe du mur	
$\phi_{s,int}$	L'humidités relative de surface interne du mur	
$\xi$	Capacité de stockage d'humidité	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	la densité apparente du matériau de construction sec	[kg/m <sup>3</sup> ]
$w$	la teneur en eau	[kg/m <sup>3</sup> ]

$\lambda_{\text{eff}}$	conductivité thermique effective du matériau de construction	$[W/(m.K)]$
$\delta_p$	perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de construction	$[kg/(m.s.Pa)]$
$v_a$	la vitesse moyenne de l'air intérieur	$[m/s]$
$v_{\text{vent}}$	la vitesse de vent	$[m/s]$
$\gamma^o$	Coefficient de diffusion dépendant du scalaire transportée	
$S_\emptyset$	Terme source relatif à la variable $\emptyset$	

# Introduction générale

---

La demande d'énergie galopante et les problèmes de protection de l'environnement sont deux grands défis pour l'humanité et ont constitué une préoccupation majeure pour les chercheurs du monde entier. La consommation d'énergie dans la société moderne augmente rapidement avec l'augmentation rapide du niveau de vie au cours des dernières décennies. L'énergie fossile est la plus utilisée dans les pays en développement. Sa combustion augmente les gaz à effet de serre, entraînant le changement climatique et la pollution de l'environnement. Par conséquent, il est désormais important d'améliorer l'efficacité énergétique, réduire la consommation des combustibles fossiles et de lutter contre le changement climatique.

Dans ce contexte, le secteur de la construction représente 45% de la consommation énergétique mondiale totale et génère des milliards de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub>. La consommation d'énergie dans le bâtiment provient principalement des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC). De nombreuses méthodes ont été proposées pour réduire la consommation de l'énergie des bâtiments en améliorant l'efficacité du système HVAC et utiliser des matériaux passifs innovants pour la température et l'humidité intérieures, assurant ainsi un bon confort de l'espace intérieur. En effet, pour s'adapter, nos systèmes de production et de consommation d'énergie doivent être modifiés. Ces transformations dureront puisque les bâtiments, les machines, les véhicules, dureront plusieurs décennies. On peut effectivement se demander pourquoi essayer de rénover des bâtiments pour réduire leur consommation d'énergie à la moitié de celle des constructions neuves actuelles ou pourquoi construire des bâtiments énergétiques ? Les pertes de régénération d'air représentent une part importante de la consommation énergétique des bâtiments. L'installation d'un système de chauffage par climatisation a un rôle clé pour assurer le confort et le bien-être des occupants. L'homme dans la pièce où il se trouve en dit assez, il est donc primordial que les techniciens en climatisation connaissent les bases du confort biologique. Ce concept de confort est sous-estimé dans notre pays, un projet consistant principalement en " études architecturales, conceptuelles et structurelles ", mais personne ne s'intéresse à l'étude de l'équilibre thermique à l'analyse des déplacements dans les bâtiments

Un bâtiment mal isolé laisse s'échapper la chaleur en hiver et perd rapidement sa fraîcheur en été. Une mauvaise isolation des murs peut perdre 25% de la chaleur dans une maison, ce qui équivaut 30% à une isolation faible ou inexistante du grenier. Grâce à une isolation efficace, les factures de chauffage et de climatisation associées à ces pertes de chaleur sont considérablement réduites. Ainsi, réaliser des travaux d'isolation permet de réduire jusqu'à 80% de la consommation d'énergie liée au chauffage.

L'interaction entre l'homme et son environnement a été le sujet de nombreuses études traitant du confort thermique. Celui-ci dépend de plusieurs paramètres tels que la température et l'humidité et la fluctuation de ces deux paramètres peut causer des problèmes dans le cadre de confort de vie. La fluctuation de la température ambiante due aux alternances jour / nuit et hiver / été conduit à un inconfort thermique dans le cadre de la vie. L'utilisation de matériaux à changement de phase introduits dans les bâtiments absorbera de grandes quantités de chaleur pendant les heures chaudes

de la journée et passera progressivement du solide au liquide sur une période de temps. de manière isotherme, cela empêche la pénétration du flux de chaleur à l'intérieur et favorise l'isolation thermique. Pendant de nombreuses heures, la température descend en dessous de la température du composite MCP, puis libère la chaleur dans l'enveloppe du bâtiment et redevient solide afin de démarrer la fusion / cycle de congélation à nouveau pendant les 24 heures suivantes. Les fluctuations de l'humidité relative entraînent des températures inconfortables dans l'habitat. Des études montrent que le maintien d'un taux d'humidité intérieur entre 40% et 60% est le milieu de vie le plus confortable. Les matériaux de contrôle de l'humidité sont des matériaux structurels poreux, capables d'absorber ou de libérer automatiquement de l'humidité, des équipements électriques ou mécaniques, en raison de leur variation d'humidité relative et de température ambiante. Certains chercheurs ont tenté de préparer un nouveau matériau hygroscopique endothermique en synthétisant des Microcapsules de MCP (MMCP) et du MCH poreux [1].

Dans ce présent travail de fin d'étude, nous tenterons d'étudier la possibilité d'utiliser un matériau hygroscopique appelé la diatomite et la diatomite avec un MCP dans l'isolation thermique. Le travail est divisé en quatre chapitres :

### **Chapitre 1 :**

Permet de comprendre le phénomène de transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction poreux, l'interface des bâtiments, et présente aussi quelques notions sur les caractéristiques des milieux poreux et les différents problèmes causés par l'humidité.

### **Chapitre 2 :**

Contient des définitions et des généralités sur les matériaux de contrôle d'humidité (matériaux hygroscopiques), explique la possibilité d'application de la diatomite dans le domaine de construction, le stockage de l'énergie thermique, Les matériaux à changements de phase, et l'application de la diatomite /paraffine comme matériau de construction et leurs différentes applications dans les bâtiments.

### **Chapitre 3 :**

Ce dernier est consacré dans la modélisation mathématique, la description du problème phasique, les équations mathématiques (équations gouvernantes) et la solution numérique.

### **Chapitre 4 :**

Ce chapitre expose les résultats expérimentaux pour les cinq cas et leurs analyses et une comparaison entre ces résultats et celles de la solution numérique.

Enfin, une conclusion générale sera consacrée aux différents enseignements tirés de ce travail et les perspectives à envisager pour une meilleure utilisation de la diatomite dans les prochaines réalisations.

# **Chapitre 1 :**

# **Rapport énergie bâtiments et**

# **humidité**

## I-1 Introduction

Dans la construction moderne, divers organismes environnementaux comptent sur la nécessité de construire des bâtiments éco énergétiques.

Le concept de performance du bâtiment repose sur une consommation d'énergie faible ou nulle pour assurer son fonctionnement, Pour cela, il convient de disposer de systèmes énergétiques efficaces et économes en énergie pour assurer le chauffage, la climatisation, la ventilation, Il est par ailleurs important de soigner la conception de l'enveloppe du bâtiment de manière à limiter les déperditions thermiques et à favoriser le stockage thermique fournie par les systèmes de climatisation.

Les pertes thermiques de l'enveloppe concernent plusieurs postes :

- les déperditions à travers les parois opaques (murs, planchers hauts, planchers bas...) représentent 46% des déperditions totale.
- les déperditions à travers les parois vitrées
- les déperditions par une filtration d'air.[1]

Le transfert thermique dans les matériaux de construction et dans les enveloppes des bâtiments implique plusieurs interactions complexes de différents mécanismes de transfert de chaleur et d'humidité, Au cours des dernières décennies, ce sujet a suscité l'intérêt de nombreux scientifiques et chercheurs, car il comprenait de nombreuses théories et modèles (H. Hens, 1996).[2]

La principale difficulté réside dans le fait que les matériaux de construction sont des milieux poreux à 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 d'hiver, L'eau de pluie s'infiltré à travers les murs poreux des bâtiments, provoquant des conditions insalubres et inconfortables, et modifiant les charges associées au chauffage et au refroidissement.

Afin de mieux comprendre ce phénomène (transfert de chaleur humide dans les matériaux de construction poreux), nous présentons dans ce chapitre l'effet du transfert de chaleur équatorial lié à la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment.

## I-2 le bâtiment et sa consommation énergétique :

Selon les statistiques de (Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie) [3], le secteur des bâtiments absorbe 41% de la consommation totale d'énergie finale de l'Algérie.

La raison est la construction de la plupart des bâtiments au niveau national, anciens et nouveaux, sans aucune considération des aspects énergétiques et environnementaux. Tout cela s'est traduit par une augmentation significative de l'utilisation du système HVAC (chauffage, ventilation et climatisation) utilisé pour contrôler la température et l'humidité relative de l'environnement à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment, entraînant une augmentation de la consommation d'énergie, d'électricité et de gaz. [4]



**Figure I.1 :** Construction résidentielle dans le projet de logement social Algérienne [5]

Selon le bilan énergétique national de l'année 2018, La structure de la consommation nationale reste dominée par le gaz naturel (33.3%) suivi par l'électricité (28.9%) et les produits pétroliers (32.2%), comme illustré dans la figure suivant :



\*Autres: Bois, coke sidérurgique.

**Figure I.2 :** Structure de la consommation finale d'énergie par produits [Bilan énergétique national 2018].

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 2018 et 2019 est détaillée dans le tableau suivant :

Produit	2018[K Tep]	2019[K Tep]	Evolution	
			Quantité	(%)
Produits pétroliers	15338	15517	179	1.2
Gaz naturel	13655	16024	2369	17.4
Electricité	13270	13926	656	4.9
GPL	2335	2588	253	10.8

**Tableau I.1** : Consommation nationale par agrégat (Source : Ministre de l'énergie Bilan énergétique).

L'augmentation de la consommation de gaz naturel par un taux de 17.4 % 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 2019, soit plus de 345 mille nouveaux clients. Suite à la hausse des demande des clients de la haute et basse tension (essentiellement les ménages), dont le nombre totale d'abonnés a dépassé 9.2 millions en fin 2019, contre 8.8 millions en fin 2018 ou la consommation résidentiel à augmenter par un taux de 5.7%, alors la consommation d'électricité à subir un croissance importante de 4.9%. 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 %).[6]

### I-3 Humidité

L'humidité est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance (linge, pain, produit chimique, humidité du bois, etc.).

Dans l'air elle peut se mesurer grâce à un hygromètre à cheveux ou numérique et s'exprime en pourcentage le plus souvent.

Le terme humidité, dans le langage de la construction, correspond à une présence anormale d'eau dans un bâtiment, sous forme liquide par infiltration ou remontée capillaire, ou de vapeur d'eau, dans les espaces intérieurs; l'humidité est envisagée pour des matériaux hygroscopiques

### I-4 Problèmes causés par l'humidité dans les bâtiments

L'humidité dans les bâtiments peut avoir différentes causes :

#### I-4-1 Infiltration d'eau

Les fuites d'eau, ainsi que la hauteur capillaire, la pression hydrostatique et une mauvaise ventilation sont des causes occasionnelles et l'une des principales sources d'humidité à l'intérieur des maisons. Ce type de problème d'humidité survient principalement dans les bâtiments anciens où le revêtement mural (brique ou plâtre) est devenu poreux au fil des années.

#### I-4-2 Humidité ascensionnelle

L'humidité du sol ascensionnelle. Si vous êtes confronté aux taches d'humidité au niveau du sol, Une fondation obsolète qui absorbe l'eau de sol et qui n'est pas équipée d'une barrière contre l'humidité est la cause de ce problème d'humidité.

#### I-4-3 Humidité de condensation

Le problème d'humidité n'est pas toujours dû à des défauts dans la structure du bâtiment. Des facteurs intérieurs tels que le manque de ventilation peuvent être la cause de l'humidité dans la maison. Parce qu'en cas de condensation, l'air humide se transforme en liquide, en raison du contact de l'air avec un taux d'humidité élevé avec une partie froide du bâtiment. ... Il en résulte des gouttelettes d'eau sur le verre ou l'apparition de taches d'humidité sur les murs, le tout dû à la grande quantité de vapeur d'eau produite lors de la cuisson ou de la douche.

#### I-4-4 Humidité de construction

Cela provient des résidus d'eau provenant du mélange du lisier ou d'une protection insuffisante contre les intempéries pendant le travail. Parce que l'une des erreurs courantes lors de la construction d'une maison traditionnelle est d'utiliser beaucoup d'eau. Le séchage complet d'une maison peut prendre plus d'un an et avoir des conséquences désagréables s'il n'est pas pris en compte. Le coulis peut se séparer et la moisissure peut apparaître dans les zones humides.[7]

#### I-5 Désordres de l'humidité dans le bâtiment :

En effet, l'humidité a un effet direct et indirect sur l'enveloppe du bâtiment. Parce que dans un environnement à humidité défavorable, de nombreuses maladies peuvent apparaître dans le mur du bâtiment. Ces maladies (écarts) sont soit de nature structurelle comme une diminution des performances mécaniques et une détérioration due au phénomène de gel-dégel ainsi que des changements dimensionnels. Ils peuvent aussi être biologiques et chimiques, comme le développement de moisissures à la surface du mur ou l'érosion des structures métalliques **La figure I.3** ci-dessous montre quelques exemples de perturbations et de problèmes causés par l'humidité. Les principales pathologies liées à l'humidité au niveau l'enveloppe sont détaillés dans ce qui suit.



Apparition de moisissures



Corrosions des aciers



Détérioration du plafond



Désordres dus au cycle gel/dégel



Fissurations

**Figure I.3 :** Exemples de dégradations causées par l'humidité

### I-6 Pathologies au niveau de l'ambiance habitable

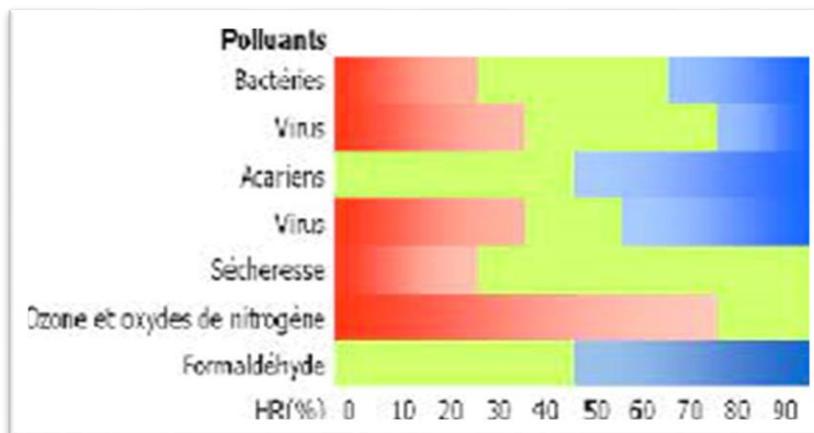
Des conditions thermiques internes défavorables favorisent l'émergence et le développement de facteurs biologiques nocifs. La température et l'humidité de l'air intérieur sont les principaux facteurs qui affectent directement le confort et le bien-être des occupants.

#### I-6-1 Détérioration de la qualité de l'air intérieur

Une bonne qualité de l'air intérieur est un paramètre primordial pour assurer un bien-être des occupants. Cependant, différents polluants sont une source de contamination de l'atmosphère intérieure. Les polluants susceptibles d'apparaître ou de se développer dans des conditions hygrométriques défavorables, nous trouvons principalement les polluants et contaminants biologiques (Baughman and Arens, 1996). En effet, dans la plupart des études réalisées sur ce sujet, les contaminants biologiques ont tendance à se développer dans des humidités relatives élevées, généralement supérieures à 60% (Baughman and Arens, 1996). Dans une autre étude (Green, 1985), les résultats ont montrés que de faible taux d'humidité peuvent être un milieu favorable de développement des agents biotiques et ainsi provoquer l'augmentation de la sensibilité des occupants par rapport à ces agents biologiques.

Dans un travail mené par (Roulet, 2004), un état de l'art a été proposé sur les polluants biologiques et les hygrométries favorables à leur développement. **La Figure I.4** résume les plages d'humidité relative favorable à la croissance des principaux agents biotiques. Les zones bleues et rouges représentent respectivement les zones de fortes et faibles humidités relatives favorables au

développement des polluants ainsi que la zone verte qui représente les taux d'humidité défavorables à leur croissance. Comme pour les conclusions de (Berger 2013), la figure montre que la plage d'humidité optimale pour une bonne qualité d'air intérieur est entre 40% et 60%.



**Figure I.4** : Plages d'humidité favorable à la croissance de polluants (Roulet, 2004)[8]

### 1-6-2 Confort thermique des habitants

Le confort thermique est un concept complexe qui dépend de nombreuses variables de natures différentes (physiologiques, psychologiques et physiques).

Cela signifie qu'il faut assurer une température constante en toutes saisons (entre 18 et 20 ° C), et un taux d'humidité de 40 à 60%.



**Figure I.5** : Les pertes thermiques du corps humaines.[8]

### I-6-3 Problèmes de santé causée par l'humidité :

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

- Congestion nasale et sinusale.
- Yeux brûlants et larmoyants.
- Une toux sévère et sèche
- Brûlures et maux de gorge.
- Irritation du nez et de la gorge.
- Difficultés de respiration.
- Irritation de la peau.
- Sauts d'humeur (problèmes) [5]

### I-7 Caractéristiques des milieux poreux :

Le concept de milieux poreux est utilisé dans de nombreux domaines, y compris la construction. Les matériaux de construction sont des milieux poreux dans lesquels se produisent les divers phénomènes de transfert et d'échange de masse et de chaleur. Un milieu poreux est un matériau qui contient des pores (vides) et ces derniers sont partiellement ou complètement remplis avec un fluide (gaz ou liquide). La partie solide est souvent appelée «matrice» ou «structure», elle a une Porosité, perméabilité, résistance et autres propriétés.

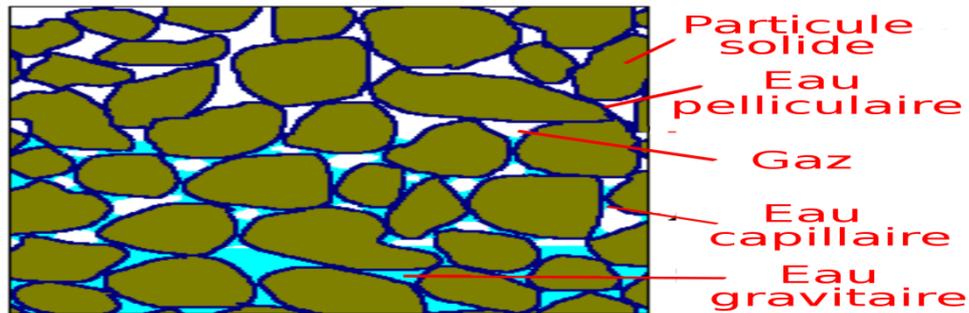


Figure I.6 : Représentation schématique d'un milieu poreux.

#### I-7-1 Porosité :

La porosité est un groupe de vides dans une substance solide, appelée pore. Ces vides sont remplis de liquides ou de gaz. La géométrie et la densité de ces pores dépendent du type de matériau. La porosité totale est déterminée par le rapport entre la taille des pores et le volume total ou le volume apparent du matériau. De plus, le volume total se compose du volume solide et de la taille des pores.

$$\varepsilon_{\text{tôt}} = \frac{v_p}{v_0} = \frac{v_p}{v_p + v_s} \quad (\text{I.1})$$

L'ensemble des pores est constitué de :

- Pores interconnectés(c), qui forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de matière dans le matériau.
- Pores aveugles ou bras morts(b), qui sont connectés uniquement par une voie. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.
- Pores isolés (a), qui ne communiquent pas avec le milieu extérieur (figure I.7).

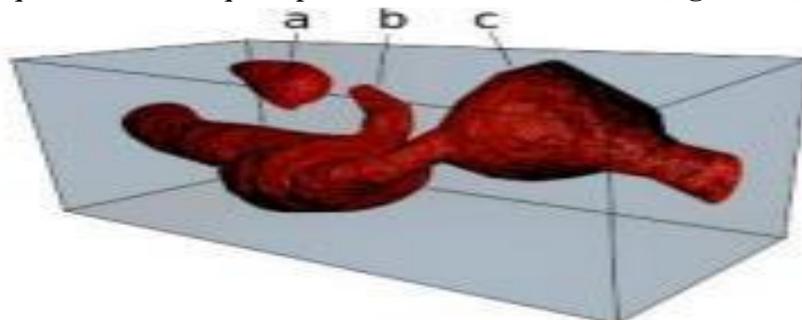


Figure I.7 Différents types de pores

La porosité ouverte  $\varepsilon$ , rassemble les deux premières catégories de pores précités. Dans le cas du béton, la proportion volumique de pores isolés est négligeable et  $\varepsilon$  peut être considérée comme égale

à etot (Picandet, 2001). En particulier, on peut donner une classification des pores selon leur taille de la manière suivante (Jaffel, 2006) :

- Micropores : avec un diamètre  $< 2$  nm.
- Méso-pores : ou pores capillaires, avec un diamètre de 2-50 nm.
- Macro-pores : avec un diamètre  $> 50$  nm.

La porosité est le paramètre le plus utilisé pour la caractérisation du milieu poreux.

Les techniques les plus usuelles utilisées pour sa détermination sont (Pinot, 2015) :

- Les méthodes intrusives dont la prosimètre au mercure.
- La pycnomètre : elle consiste à déterminer la masse volumique apparente à partir de la pénétration d'un fluide dans les pores ouverts (Wade, 2013).
- La sotériologie : elle permet d'observer au moyen d'un microscope électronique une coupe du matériau (Biswal, 2009).

### I-7 -2 Humidité relative :

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  $RH$  ou  $\varphi(\%)$  :

$$RH = \varphi = \frac{v}{v_{sat}} = \frac{pv}{pv_{sat}} \quad (I.2)$$

La pression de vapeur saturante ( $P_a$ ) 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) :

$$P_{v,sat} = e^{235771 - \left(\frac{4042.9}{T} - 37.58\right)} \quad (I.3)$$

Ou  $T$  la température en [K].

### I-7 -3 Teneur en eau et degré de saturation :

La teneur en humidité peut être donnée en masse  $u$  [kg/kg] ou en volume  $w$  [kg/m<sup>3</sup>] :

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

$$w = \frac{m - m_0}{v} \quad (I.5)$$

Le degré de saturation capillaire est largement utilisé pour évaluer la teneur en humidité des matériaux de construction poreux. Selon (LO. Nilsson 2003), 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

$$S_{cap} = \frac{u}{u_{cap}} \quad (I.6)$$

### I-7 -4 Perméabilité :

La perméabilité d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression (Géraud, 2000). La vitesse de filtration  $v \rightarrow$  d'un

fluide régie par la loi de Darcy, en conditions non saturées et en négligeant les effets de gravité, est donnée pour un écoulement laminaire d'un fluide Newtonien par la relation suivante (Hamami, 2009)

$$v = -\frac{k_{zff}}{\mu} \sigma p$$

Cette perméabilité est le produit d'une perméabilité intrinsèque et d'une perméabilité relative (Mayer et al., 1992) :

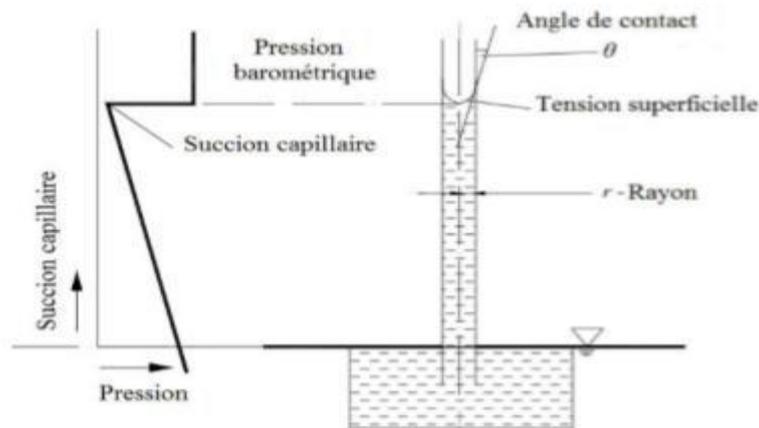
$$K_{eff,i} = K_i * K_{r,i} \quad (I.8)$$

Avec :  $0 \leq K_{r,i} \leq 1$ .

Pour le béton, les perméabilités relatives aux gaz et aux liquides, en fonction du degré de saturation.

### I-7 -5 Pression capillaire - Loi de Laplace et Loi de Kelvin :

La pression de Laplace, ou pression capillaire, est la différence de pression entre les deux côtés d'une interface courbe séparant deux milieux fluides. Par extension, elle désigne aussi la différence de pression à travers une interface (courbe ou plane) séparant un milieu solide d'un milieu fluide.



**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).

A l'échelle d'un pore, lorsque l'eau liquide et le gaz coexistent, ces deux phases sont séparées par une interface courbe. La pression est discontinue à la traversée de cette interface et la différence de pressions entre la phase non mouillante ( $P_g$ ) et la phase mouillante ( $P_l$ ) s'appelle la pression capillaire, elle est donnée par la loi de Laplace qui s'écrit comme suit :

$$P_c = P_g - P_l \quad (I.9)$$

Dans le cas d'un pore cylindrique, on peut écrire (Picandet, 2001):

$$p_c = p_g - p_l = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_p} \quad (I.10)$$

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 :

$$p_c = \frac{RT\rho_w}{M_w} \ln\left(\frac{v}{v_s}\right) \quad (I.11)$$

### **I-7 -6 Isothermes de sorption :**

Traditionnellement, l'adsorption est divisée en deux sous-catégories d'adsorption physique (ou d'adsorption de van der Waal) et d'adsorption chimique. L'adsorption physique se produit par les forces de réactions physiques. Il se produit sans modification de la structure moléculaire, et Elle s'applique à tous les systèmes adsorbants à condition que les conditions de pression et de température soient appropriées, 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.

### **I-7 -7 Phénomène d'hystérésis :**

Le phénomène de désorption est fréquemment décrit comme l'inverse du processus d'adsorption. Néanmoins, lors des expériences, une dissymétrie apparaît toujours entre les isothermes de sorption et de désorption, elle est nommée hystérésis (Hamaker et Thompson, 1972). La désorption d'une molécule ne semble donc pas correspondre à l'inverse de son adsorption par un milieu poreux. En terme énergétique, ce phénomène indique qu'il est plus difficile de désorber un fluide d'un échantillon que d'adsorber ce même fluide. D'un point de vue pratique, cette notion est directement perceptible si nous comparons les temps nécessaires à réaliser les deux types d'isothermes. Le phénomène d'hystérésis implique qu'une fraction du liquide adsorbé est très fortement ou irréversiblement liée au milieu poreux (Boivin, 2003). L'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels le sens de l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels le sens de l'évolution de celle-ci, l'histoire antérieure de la saturation du poreux, la structure de l'espace poreux et les phénomènes de piégeage auxquels elle donne lieu, la nature compressible ou non, volatile ou non des fluides en présence. La largeur du domaine d'hystérésis dépend de la composition porométrique et de la structure de l'espace poreux ( Daian, 2012). Le phénomène d'hystérésis est couramment expliqué par la présence de la forme de « bouteille d'encre » de certains pores ou l'interconnexion particulière de pores de tailles différentes (Daian, 1986).[9]

## **I-8 Transfert de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux**

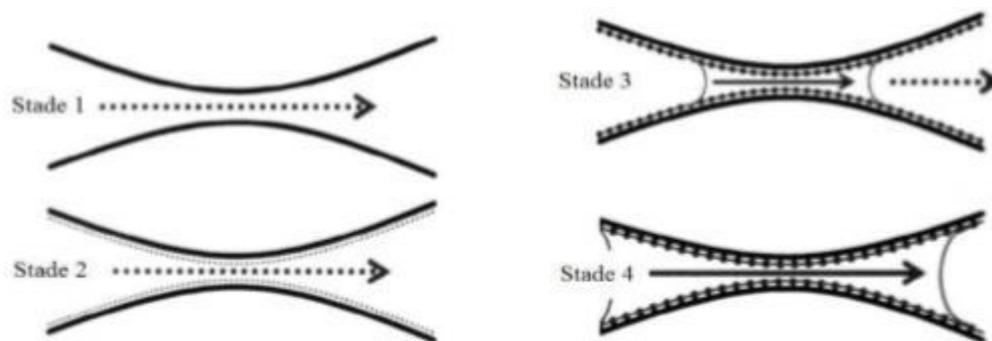
### **I-8-1 Mécanismes de transport d'humidité :**

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) , 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 (diffusion du knudsen)	Pression de vapeur et température
	Convection	Gradient de pression total
Transport du liquide	Conduction capillaire	Pression capillaire
	Effet solet	Température
	Diffusion surfacique	Humidité relative
	Flux hydraulique	Gradient de pression total

**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). [5]

**La figure I.9** illustre ces différents processus de transport d'humidité au niveau microscopique de la taille des pores pour différentes 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) [10]



**Figure I.9 :** Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en humidité dans les pores. [5]

### I-8 -1-1 Transport de vapeur d'eau :

Les matériaux de construction peuvent absorber différentes quantités d'eau (sous forme d'eau liquide ou de vapeur) en fonction de la température, de leurs structures et de celles des pores. ... dans cette région relativement sèche, le transport de l'eau suit les lois de la diffusion de vapeur, 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) [11]. 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). 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 [5].

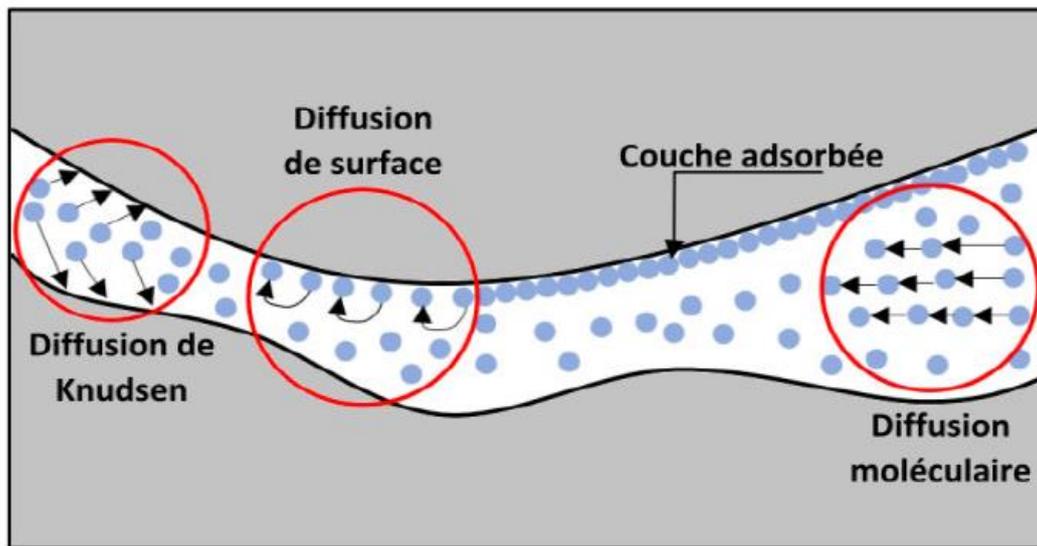


Figure 1.10 : Illustration des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore [8].

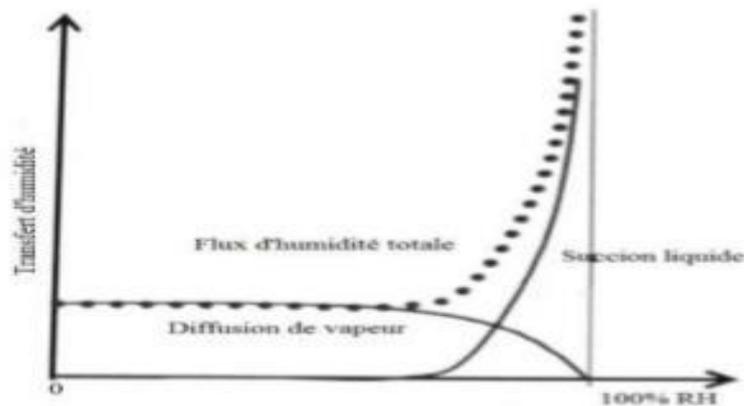
### I-8 -1-2 Transport d'eau liquide :

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) . 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) appelé un tel transfert un transfert liquide quand il n'y avait que le transport de liquide dans les pores saturés (figure I.9 état 4). Tout qui reste est considéré comme un transfert de vapeur (figure I.9, états 1-3). Le transport de vapeur et de liquide est souvent distingué par son taux d'humidité critique  $w_{cr}$ .

### I-8-1-3 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.11



**Figure I.11:** Transport d'humidité dans un système de pores combinant la diffusion de vapeur et le transport de liquide (LO. Nilsson, 2004) [5].

## I-8 -2 Transfert et stockage thermique dans les milieux poreux :

### I-8 -2-1 Stockage d'énergie dans les matériaux de construction :

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

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

### I-8 -2-2 Transfert de chaleur dans les matériaux de construction :

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

$$dQ_{cond}^{\rightarrow} = -\lambda \text{grad}^{\rightarrow}(T) \cdot ds = q_{cond}^{\rightarrow} \cdot ds \quad (\text{I.13})$$

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

### I-8 -2-3 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.

L'interaction 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 :

$$Sh = hl \cdot v \cdot \nabla j_p \quad (\text{I.14})$$

### I-8-3 Modélisation des transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches de bâtiments :

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

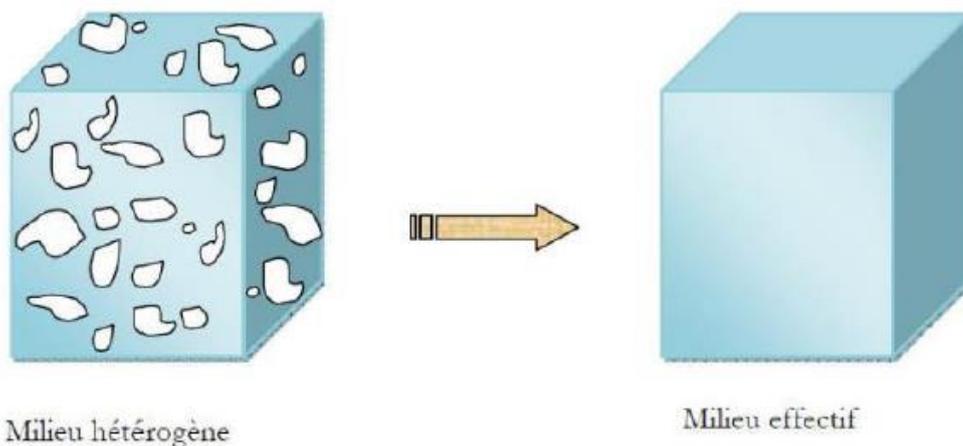
une approche par homogénéisation et changement d'échelle microscopique-macroscopique et une approche phénoménologique macroscopique.

#### I-8-3-1 Modélisation par homogénéisation

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 troistypes de méthodes :

- Homogénéisation par prise de moyenne (Whittier, 1977), (Whitaker, 1986) et (Samson et al. 1999) où les phénomènes physiques sont modélisés à l'échelle du pore.
- Homogénéisation périodique (E. Sanchez-Palencia, 1985), (C. Moyne and M. Murad, 2006) [39], et (T. Lemaire et al, 2007).
- 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), (J. Snahuja et al, 2007) , et (Q. Zhu et al, 2009) .



**Figure I.12 :** Homogénéisation par prise de moyenne volumique (Y. Ferroukhi, 2015) [8]

#### I-8-3-2 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 où le milieu poreux est considéré comme un milieu homogène, cette supposition permet d'établir les équations de transferts hygrothermiques à partir des principes fondamentaux de la thermodynamique (JF.Daïan, 2013).

Les bilans énergétique et massique sont exprimés à l'aide de moteurs de transfert mesurables (Température, teneur en eau, pression de vapeur....) et des coefficients liés explicitement aux propriétés macroscopiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique, perméabilité à la vapeur d'eau,...) déterminés expérimentalement.[Y. Farrokhi 2015] [5].

### **I-9 Transfert de chaleur et d'humidité dans les murs des bâtiments :**

L'accumulation d'humidité dans les composants du bâtiment peut conduire à une mauvaises 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) .

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-9-1 Interaction entre le 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.12** résume les différentes sollicitations extérieures et intérieures aux interfaces de la paroi.

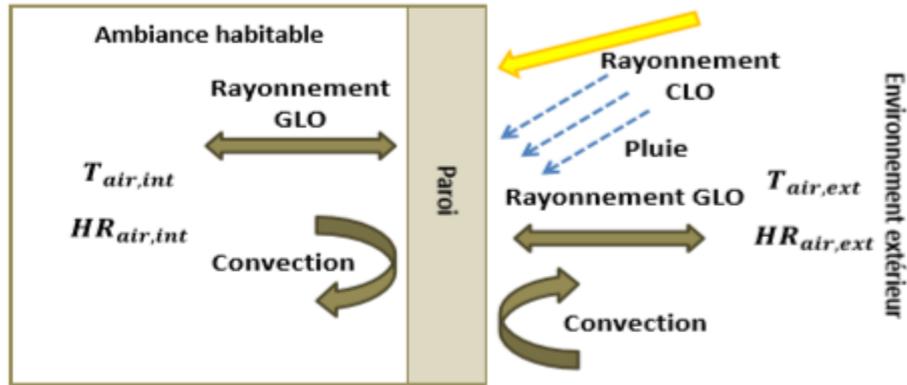


Figure I.13 : Sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment [8].

### 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 ( $Se$  [ $W/m^2$ ]) est exprimé comme suit (H. Janssen et al, 2007) [12].

$$Se = k(S_{dir} + S_{dif}) + \sigma \cdot \epsilon \cdot [F_{sol}(T_{sol}^4 - T_e^4) + F_{ciel}(T_{ciel}^4 - T_e^4)] \quad (I.15)$$

Le rayonnement direct et diffus ; obtenus à partir des données météo. Un appareil de mesure de la trajectoire des rayons solaire (R. Kittler, 1981) [13] est utilisé pour projeter le rayonnement direct sur la surface de la construction. La température à la surface du sol est prise égale à celle de l'air extérieur (H. Janssen, 2002/ et al) [14]. Pour le calcul de la température du ciel, plusieurs modèles ont été proposés qui donnent généralement des résultats similaires (H. Janssen, 2002) [14]. Pour notre cas n'a utilisé le modèle suivant [A.I.N. Korti, 2016] [15] :

$$T_{ciel} = 0.0552(T_e)^{1.5} \quad (I.16)$$

### 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  $hc$  [ $W/(m^2 K)$ ] et de masse  $hm$  [ $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ] comme suit :

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

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

Ou :

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

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

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

$P_{v,r,f}$  [ $Pa$ ] 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).

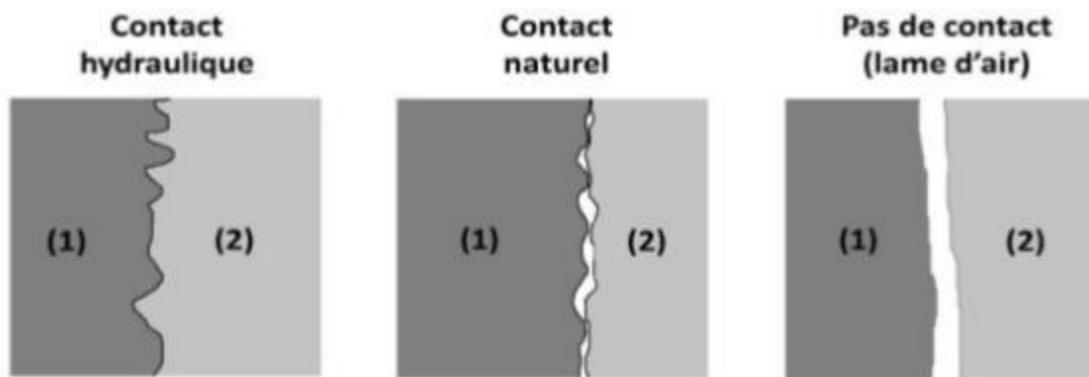
## Pluie

La pluie battante est rarement considérée dans la modélisation des conditions aux limites extérieures. (Künzel, 1995) a exprimé l'infiltration de la pluie par un flux d'eau liquide comme suit :

$$J_{I,pluie\ infiltré} = a_p \cdot J_{I,pluie} \quad (I.19)$$

### I-9-2 Interaction entre deux parois :

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.13) ont été proposés par (VP. De Freitas et al, 1996) dans leur étude : contact naturel, contact hydraulique ou une lame d'air entre les deux couches.



**Figure I.14** : Types de contact possibles entre deux matériaux (VP. De Freitas et al, 1996) [5]

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

$$\begin{aligned} T_1^{interface} &= T_2^{interface} \\ P_{v,1}^{interface} &= P_{v,2}^{interface} \end{aligned}$$

Concernant le contact naturel où les deux matériaux sont considérés en contact sans interpénétration. Dans ce cas la conservation du flux thermique à l'interface est maintenue. En revanche, pour le transfert hydrique, le flux à l'interface est exprimé en fonction d'une résistance hydrique. La densité du flux hydrique à l'interface est exprimé par l'équation I.20.

$$J_{interface} = - \frac{HR_1^{interface} - HR_2^{interface}}{R_{hydrique}}$$

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.21 décrite ci-dessus et une résistance thermique est imposée lors de l'écriture de la densité du flux thermique à l'interface (équation I.21).

$$Q_{interface} = - \frac{T_1^{interface} - T_2^{interface}}{R_{thermique}} \quad (I.21).$$

Lors de la modélisation des transferts hygrothermiques dans les parois multicouches de bâtiment, l'hypothèse de la continuité hydraulique est souvent adoptée (Qin et al. 2009), (Aït Ouméziane, 2013) et (Ferroukhi et al. 2014). Cependant, cette hypothèse n'est pas valable lors de l'utilisation de la teneur en eau comme moteur de transfert hydrique (Tariku et al. 2010a) et (Prommas, 2011). En effet la teneur en eau est une variable qui dépend fortement de la nature du matériau et sa structure poreuse, ainsi au niveau de l'interface entre deux matériaux, ayant une microstructure différente, une discontinuité du flux hydrique est observée. Pour s'affranchir de cette problématique, le transfert hydrique est décrit en utilisant des variables d'état qui ne sont pas tributaires à la microstructure du matériau comme la pression de vapeur d'eau et la pression capillaire ou encore l'humidité relative [5].

### I-10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous pouvons conclure que la réduction de la facture énergétique dans un habitat reste liée aux performances de l'enveloppe et de l'étanchéité hygrothermique et par conséquent des natures des matériaux constitutifs de cette structure. Une bonne compréhension du comportement hygrothermique de ces derniers permet de mieux prédire les risques causés par l'humidité en termes de dégradation de la qualité de l'air des ambiances habitables ainsi que la détérioration structurelle de l'enveloppe. 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 de nouveau matériau passive à faible impact environnementale et à moindre cout, appelé diatomite 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.

# **Chapitre2: Matériaux hygroscopiques à changement de phase dans les bâtiments**

## II-1 Introduction

L'utilisation des matériaux poreux et des matériaux à changement de phase comme isolant nécessite une étude approfondie des propriétés physiques. Parce que la propriété contrôleuse de sa rigidité diélectrique est la conductivité thermique. La présence de pores dans le matériau contribue à réduire la conductivité thermique et, par conséquent, augmente ses propriétés isolantes.

Dans ce chapitre, on donne une revue sur les matériaux à changement de phase comme la paraffine 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.

En utilisant un matériau naturelle écologique appelé "Diatomite", qui est caractérisé par une forte hygroscopicité et faible conductivité thermique comme isolant hygrothermique dans le secteur du bâtiment.

## II-2 Les matériaux de contrôle d'humidité (matériaux hygroscopiques)

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-1 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 [5].

Matériau	Méthode de préparation	Conclusions principales
Kaolinite	Préparé par lixiviation sélective et combustion.	L'eau absorbée a fortement augmenté à une humidité relative comprise entre 50 et 75%
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
Zeolite	La conversion est réalisée dans des conditions de vapeur	La nouvelle méthode de synthèse des zéolithes

	d'eau inférieures à la saturation	pourrait être appliquée de manière générale
Silice-n Méso- structuré	Synthétisé à l'aide de silice sublimée et de tensioactif alkyl ammonium quaternaire	La teneur maximale en eau adsorbée est comprise entre 40 et 90%.
Composite poreux	Composé de zéolite, diatomite, sépiolite, dioxyde de nano-titane	La quantité de teneur en eau adsorbée était de 5–6%
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.
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
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%)
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.

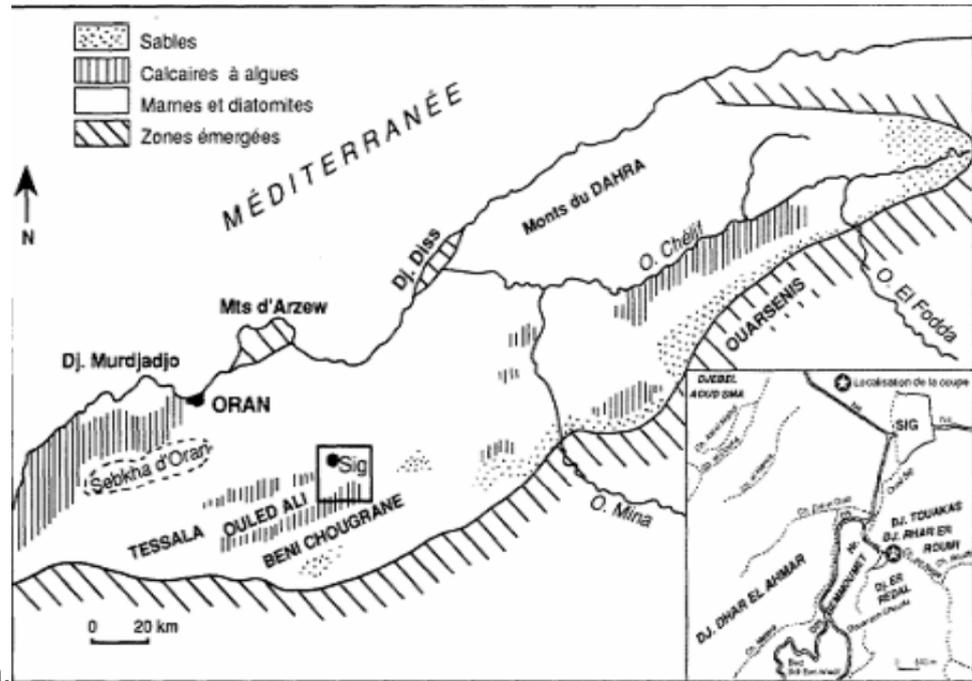
**Tableau II.1** : Application de matériaux de contrôle d'humidité dans le bâtiment. Z. Rao et al, 2012 [5].

### II-3 Diatomite (matériau de contrôle d'humidité et d'isolation thermique) :

#### II-3-1 description et situation géographique

Les gisements sont rencontrés dans deux contextes différents, soit des gisements lacustres en contexte volcanique (exemple des dépôts miocènes du Massif Central), soit des gisements marins dans les zones de remontée des courants froids (exemple de la Californie). Les matériaux extraits subissent différentes phases de traitement : séchage, broyage, sélection, calcination avec ou sans ajout de fondant. A une granulométrie fine, la diatomite broyée allie une faible densité, une grande porosité et une surface spécifique élevée. Elle est utilisée à la filtration des liquides (45 %, sous forme calcinée), notamment le vin, comme charge dans les peintures et les plastiques (25-30 %), à l'isolation (15-20 %), enfin comme absorbant (moins de 5 %) . Le kieselguhr se forme dans des conditions exogènes, il est issu des roches sédimentaires chimiques ou biochimiques qui se sont formées dans les lacs et les milieux marins par 15 accumulations de produits organiques, surtout les carapaces siliceuses de diatomées. Les diatomées sont des algues unicellulaires, présentes dans tous les milieux aquatiques et les sables des déserts les plus chauds. Le gisement de kieselguhr de Talahait comme présenté sur

la figure II-1, est situé à 5 km au Sud Est de la ville de Sig, à 50 km de la ville d'Oran et à 40 km de



la ville de Mascara.

**Figure II-1** : Carte géologique de la région ouest avec les principaux gisements.

La capacité de production est d'environ 10000 tonnes par an, dont 2000 tonnes exportées et le reste servira au besoin du marché national. Les réserves géologiques sont estimées à 6 500 000 tonnes.

### II-3-2 Définition

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.

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) .[5]



**Figure II.2** : Site de dépôt de Sig (Algérie). [5]

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

### II-3-3 Domaine d'utilisation

La diatomite est utilisée dans les domaines suivants (exprimé en % de la production mondiale) :

- 60 % pour la filtration des huiles végétales et minérale, les jus de fruits et les eaux industrielles.
- 25 % pour la fabrication de peintures, pesticides et comme charge dans de nombreux autres produits.
- 15 % pour l'industrie d'isolation (très faible conductibilité thermique).

La structure alvéolaire de la diatomite est utilisée pour diverses boissons : alcoolisées, sucre, huile, produits chimiques et eau, elle a également été utilisée pour éliminer les bactéries et les virus de l'eau des objets de distribution, elle compte chimiquement inerte, sa surface spécifique et sa capacité à absorber trois fois son poids liquide sont des propriétés qui peuvent rendre le minéral utile comme support de pesticide, comme absorbant dans la litière pour animaux de compagnie et comme matériau pour absorber les déversements d'hydrocarbures. [5]

### II-3-4 Propriétés physico chimique

La diatomite se compose principalement de silice et d'impuretés (composés organiques, sable, argile, carbonate de calcium et magnésium, sels,...) La composition chimique moyenne du kieselguhr de différentes régions est indiquée dans le tableau II-2:

Constituant %	Californie	Nevada	France	Allemagne	Algérie
SiO <sub>2</sub>	88.9	83.13	86	89.5	86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	4.6	2.8	4.1	0.36
CaO	0.53	2.5	0.6	0.5	9.4
MgO	0.56	0.64	-	-	1.67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.69	2	4.7	1.6	-
Na <sub>2</sub> O	1.44	1.6	0.7	3.6	0.99
K <sub>2</sub> O	1.44	1.6	0.7	3.6	0.99
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.05	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	3.60	5.3	-	-	0.01
Perte au Feu	0.14	0.18	0.3	0.2	1

**Tableau II-2** : Composition chimique de diatomite

La couleur du kieselguhr dépend de sa pureté. La couleur blanche correspond à un kieselguhr pur. La présence d'impureté rend sa couleur plus au moins grise. La densité apparente varie de 112 à 320 kg/m<sup>3</sup>, mais dans certain cas, elle peut aller jusqu'à 960 kg/m<sup>3</sup>. La température de fusion est environ de 1590 °C.

### II-3-5 Classification des diatomites d'après KARPOV

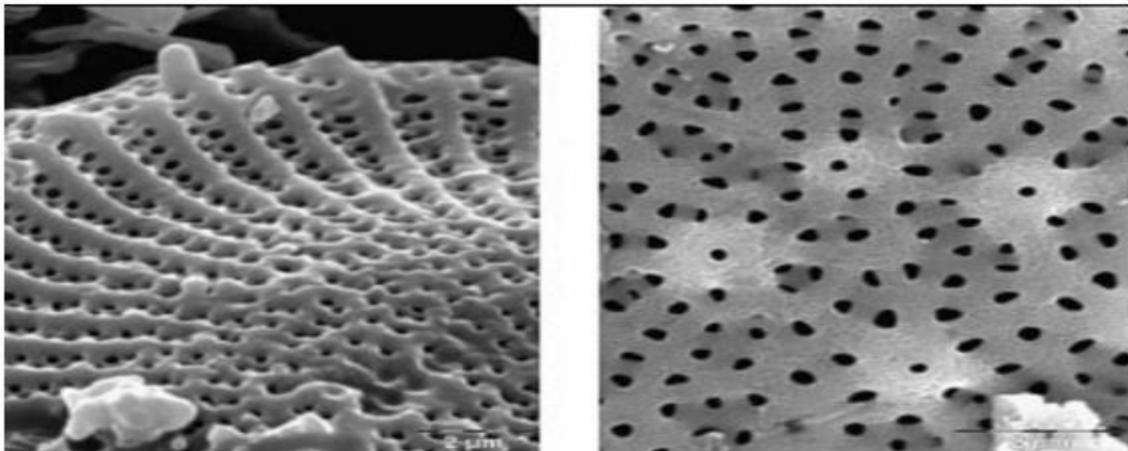
Les normes russes ont classé la diatomite en fonction de la teneur en minéraux principaux, ainsi que de l'humidité et de la densité comme suit [21]

Composants	1ere qualité	2eme qualité	3eme qualité
SiO <sub>2</sub> pas moins de	80%	62%	51%
CaO pas plus de	9%	11%	17%
H <sub>2</sub> O pas plus de	25%	—	—
Poids volumique ( t/m <sup>3</sup> )	0.73	—	—

**Tableau II-3** : classification de diatomite selon les normes Russe (KARPOV, 1979).

### II-3-6 Analyse microstructurale

Les propriétés importantes des diatomites sont liées à leur physique, formant des agrégats de fines particules qui sont perforées en forme régulière de petits pores (figure II 3), En raison de cette porosité lui confère une perméabilité élevée[22] la diatomite est largement utilisée dans les industries alimentaires telles que la purification de l'eau , extraction de jus de bonbons et d'huiles, pour éliminer les protozoaires bactériens, Il constitue également des aides chromatographiques, sinon, en raison de la présence de silice amorphe ultrafine, il est utilisé comme source de silice réactive, conclusions précédentes, La nature amorphe de la diatomite sa structure poreuse forte produira une forte diffusion de photons et une faible conductivité thermique, ce sont ces caractéristiques qui déterminent son application dans l'isolation thermique.



**Figure II-3** : Microstructure de la diatomite [21].

## II-4 Stockage de l'énergie thermique

Le stockage de l'énergie thermique consiste à emmagasiner une quantité d'énergie durant laquelle celle-ci est abondante ou moins coûteuse, en un lieu donné afin de la restituer ultérieurement lorsqu'elle est rare ou plus chère [Dumas, 2002]. A titre d'exemple, il est nécessaire pour les énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire ou l'éolien, de stocker l'énergie immédiatement disponible car celle-ci est variable avec le temps. Ainsi, le principal intérêt d'une unité de stockage est la réduction de la consommation d'énergie. Le stockage de la chaleur peut se faire de trois façons différentes, soit par :

- Chaleur sensible
- Chaleur latente
- Stockage thermochimique

#### II-4-1 Chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est réalisé par un apport thermique augmentant la température du milieu récepteur « monophasé » (liquide ou solide). Le déstockage (ou soutirage) de la chaleur entraînera une diminution de la température de ce milieu. Considérons le réchauffement d'un corps à haute température qu'on place ensuite dans un système d'utilisation dont la température est plus basse. À pression constante, pour l'élévation de la température  $T_1$  à  $T_2$  d'un corps de masse  $m$  et de capacité thermique massique  $c(T)$ , l'énergie stockée est donnée par la variation d'enthalpie [Dumas, 2002] :

$$H_2 - H_1 = m c (T_2 - T_1).$$

**Remarque 1** : La quantité d'énergie qui est stockée est proportionnelle à la différence de température. Ainsi, le choix de ce stockage est intéressant lorsque l'écart de température est grand.

Au cours processus de stockage, si nous rencontrons les cas suivants :

1. Si  $T_2 > T_1$  alors il s'agit du stockage chaud.
2. Si  $T_2 < T_1$  alors il s'agit du stockage froid.

#### II-4-2 Chaleur latente

Le stockage par chaleur latente consiste à emmagasiner de l'énergie, qui par la suite va provoquer une variation de température et un changement de phase du matériau. Lors de la restitution de l'énergie, on observera le phénomène du changement de phase inverse. La chaleur  $Q$ , absorbée ou cédée, durant le processus de changement de phase est régie par :

$$Q = m L_f$$

En pratique, il peut arriver que la chaleur latente et la chaleur sensible interviennent successivement avec les processus thermique.

En effet, si l'on considère qu'un composant sert d'initiale à la température  $T_1$ , inférieure au point de fusion  $T_f$  et  $T_f$  à la température finale  $T_2$  ( $T_1 < T_f < T_2$ ), alors le réservoir est sous une forme sensible et latente.

Le stockage par chaleur latente est ainsi performant pour de grandes quantités d'énergie lorsque les masses et l'écart de température sont faibles.

Cependant, ce type de stockage oblige à utiliser des technologies très élaborées.

Les principaux constituants employés pour le stockage par chaleur sont des liquides ou des solides possèdent des chaleurs importantes.

#### II-4-3 Stockage thermochimique

Le stockage thermochimique fait référence à l'énergie absorbée dans une réaction chimique endothermique. Pendant le chauffage, la stœchiométrie est perturbée et elle se déplace vers la droite (sens de réaction).

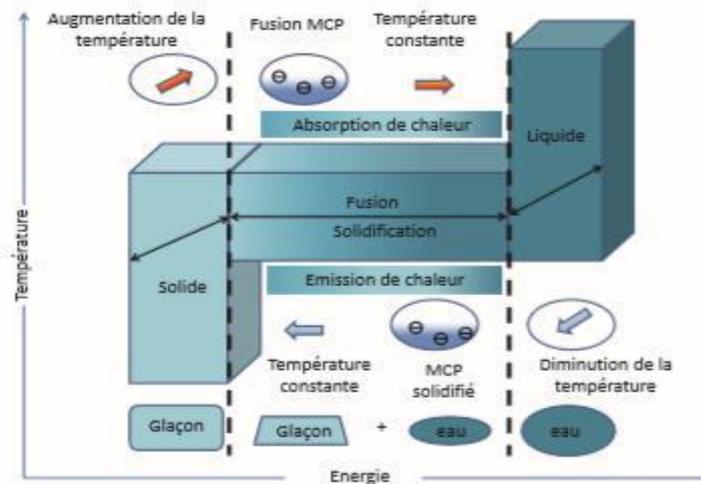
Lors d'un contact initial avec une source inférieure, un décalage stœchiométrique est observé dans le sens opposé, dans le premier cas de l'énergie est stockée et dans le second effacée du collecteur.

Selon [Dumas, 2002] , le déplacement de l'équilibre n'est généralement pas assez et le gain d'énergie est obtenu à moins de 10% du type sensible.

Parmi les trois types de stockages présentés précédemment, le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique. Les matériaux utilisant ce type de stockage sont qualifiés de « Matériaux à Changement de Phase (MCP) » [23].

## II-5 Matériaux à changements de phase (MCPs)

Les matériaux à changements de phase (MCPs) sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur latente lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à température constante. Leur principe de fonctionnement est simple et est illustré par la **figure II-4**. Comme pour la transformation de la glace en eau qui se produit lorsque la température dépasse les 0 °C, les matériaux à changements de phase changent d'état (solide-liquide) en fonction de leur température de fusion.



**Figure II-4** : Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.

Dans les bâtiments, le principe est le même, dès que la température des matériau à changement de phase atteint le point de fusion, il commence à fondre et absorbe une partie de l'énergie autour de lui pour la stocker en vrac et dès que la température est plus basse, le stockage d'énergie est rétablie. Cette transition de phase est facilitée par une augmentation de la surface d'échange entre le MCP et l'air ambiant, généralement intégrée dans les composants muraux pour réduire les pics de température ambiante et l'utilisation de systèmes énergivores.

Le MCP peut être combiné avec un système de nuit dans lequel, au niveau du climatiseur, la taille de mesure est réduite, de sorte que plus d'efficacité peut être créée.(décharge de l'énergie) [24].

## II-6 Intégration du MCP à l'enveloppe du Bâtiment

Les bâtiments ont besoin d'une attention particulière pour réduire la consommation énergétique mondiale et les émissions de gaz à effet de serre. Le bâtiment est considéré comme un système thermique complexe, soumis à des sollicitations internes et externes. Les conditions externes se résument dans la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Les internes quant

à elles, proviennent des charges internes. La température de l'air intérieur est liée aux propriétés du matériau de l'enveloppe du bâtiment, en particulier sa résistance thermique et sa capacité calorifique.

L'ambiance dans la pièce est confortable lorsque la variation de température dans l'espace est la plus faible, d'un endroit à l'autre, ou dans le temps et ce pendant la journée ou de saison en saison. La façon de créer cette sensation de confort dans la construction est d'utiliser des matériaux qui contiennent des MCP.

Méthode d'utilisation du MCP	Applications	Objectif	Secteur
Stockage par MPC réparti dans la cloison (plâtre, ciment, PVC, mousse, verre, nids d'abeille)	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Tous
Chauffage électrique avec stockage MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Stockage MCP dans les gaines aérauliques pour le chauffage et la climatisation	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses	Commercial, institutionnel et industriel
Préchauffage d'air à MCP pour pompe à chaleur	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Murs rideaux	Chauffage des locaux	Conservation	Commercial, industriel et institutionnel
Chauffe-eau avec le stockage par les MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses	Résidentiel, commercial et institutionnel

Figure II-5 : Formes de paraffine en construction [25].

Il existe de nombreux MCP disponibles dans n'importe quelle plage de température requise, qui appartiennent aux trois catégories suivantes : organique, inorganique, eutectiques qui sont illustrés sur la figure II-6.

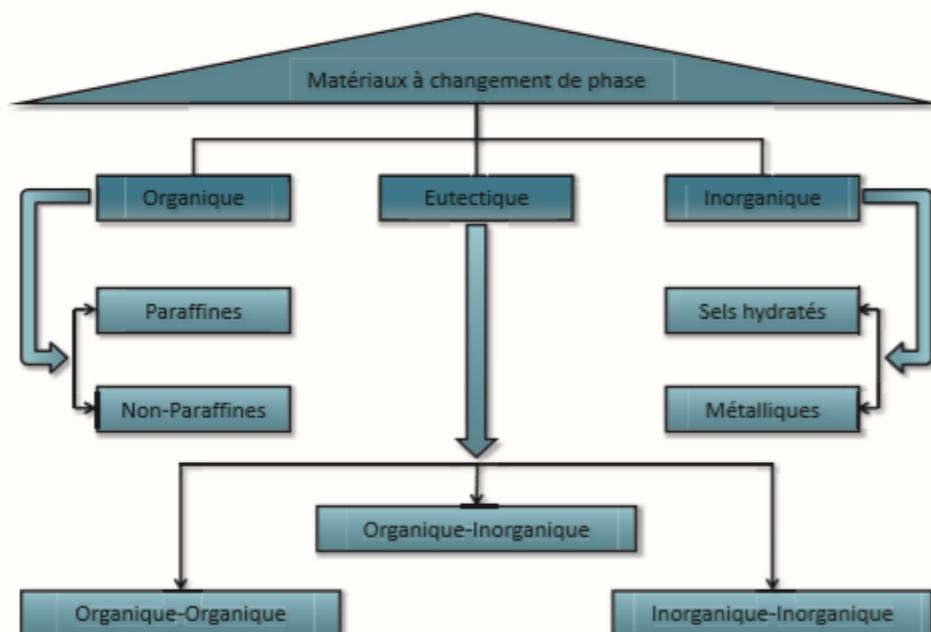


Figure II-6 : Classification des matériaux à changement de phase [24]

### II-6-1 Critères de choix d'un matériau à changement de phase :

Le choix d'un MCP doit être fait selon plusieurs critères. Principalement le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente.

Ces critères se représente sous formes de :

#### Propriétés thermiques

- La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne qualité de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie.

#### Propriétés physiques

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité (exemple : les MCP aqueux).
- Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.
- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur.

#### Propriétés cinétiques

- La surfusion doit être réduite. Le recours à l'utilisation d'additif est nécessaire.
- Un taux de cristallisation important.

#### Propriétés chimiques :

- Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- La compatibilité avec les matériaux de construction.
- L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,...) passant par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée.
- Recyclable.

#### Aspects économiques :

- Le coût est un critère également très important. Celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes.
- Disponible en grande quantité.

#### Critères technologiques :

- La fiabilité des matériels de confinement passe par une compatibilité avec les matériaux du conteneur [23].

### II-6-2 Utilisation de paraffine pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure du Bâtiment

Le MCP est utilisé pour gérer la chaleur à l'intérieur des bâtiments un grand nombre d'études sur les MCP utilisés dans les bâtiments ont confirmé que le stockage de chaleur latente à l'intérieur est une solution énergétique et qui respecte les normes environnementaux.

L'utilisation de MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment se fait de trois manières différentes [Sharma et al. 2009a] :

- intégration dans les murs du bâtiment ;
- intégration dans les éléments de constructions autres que les murs ;
- intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid ;

### **II-6-2-1 Paraffine intégrés dans les murs**

Parmi toutes les applications existantes, l'intégration du MCP dans le mur est la plus utilisée en raison de la grande et efficace zone d'échange thermique, et sa mise en œuvre est également pratique et simple. Deux méthodes d'intégration de MCP dans des murs «trempés» et «attachés» [Suliang, 2010].

La méthode «d'immersion» consiste à intégrer des matériaux à changement de phase dans le matériau de la coque d'un bâtiment, comme le béton, le plâtre et la brique. Cette intégration peut se faire par l'immersion directe, et la micro-encapsulation. Selon l'état de la technique réalisée [Sharma et al. 2009a], le procédé de micro-encapsulation du MCP est plus adapté car le MCP est encapsulé dans le polymère et la taille de la capsule de l'ordre du micromètre ne permet pas de la casser, assurant ainsi que le taux d'écoulement est presque nul en phase liquide. La méthode d'attachement consiste à attacher une ou plusieurs couches de MCP à une paroi. La différence entre les deux méthodes est que le MCP est intégré directement dans un panneau mural au lieu d'être présent dans le mur de construction principal. Outre son efficacité et sa réduction des coûts, cette méthode permet d'embellir l'enveloppe du bâtiment lors de son processus de finition. C'est dans de tels objectifs que la méthode d'attachement est plus répandue et utilisée que la méthode d'immersion.

### **II-6-2-2 Paraffine intégrés à la toiture**

Les sollicitations solaires sont plus importantes au niveau des toitures d'un bâtiment, car il s'agit de la surface la plus exposée au rayonnement solaire. La toiture joue un rôle de « tampon thermique » entre l'environnement intérieur et extérieur. Pour réduire cet apport énergétique provenant de la toiture, trois solutions peuvent être envisagées [Miranville, 2002] :

- Cas 1 : arrêter le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la paroi ;
- Cas 2 : limiter l'absorption de l'énergie par la paroi ;
- Cas 3 : limiter le transfert de l'énergie précédemment absorbée par la paroi.

### **II-6-2-3 Protections solaires avec paraffine**

Une autre façon d'améliorer l'effet de tampon thermique d'un est de prendre en charge les mesures de protection solaire de MCP, les rideaux sont généralement installés du côté intérieur afin qu'ils ne soient pas exposés à des vents violents de l'extérieur. Le côté intérieur provoque un chauffage rapide de la pièce lors de l'absorption du rayonnement solaire à la surface du store.

D'après [Mehling, 2004], c'est à partir de ces observations et dans le cadre d'une collaboration avec Warema Rebkhoff GmbH et Merck KGaA que Mehling a proposé un système de protection solaire utilisant le sel hydraté  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  comme MCP, pour accroître la capacité de stockage de chaleur des stores et permettre ainsi de retarder la montée de température l'après-midi et de faciliter la ventilation de la chaleur emmagasinée vers l'extérieur. Les systèmes de protection solaire sont installés pour les climats chauds d'été et sont particulièrement adaptés dans les zones à fortes variations de température et la nuit.

Les principaux résultats sur les protections solaires développées et testées à l'échelle du laboratoire sont :

- la diminution de la température maximum des stores de l'ordre de 10 K à 15 K
- la diminution de la température de fonctionnement (environ de 3 K) ;
- le décalage du gain de chaleur du midi au soir ;
- l'amélioration du confort thermique ;
- l'emploi des MCP dans les stores empêchent ces derniers d'agir comme une source de chaleur [24].

### **II-7 Matériaux hygroscopiques à changement de phase (MHCP)**

Les chercheurs ont tenté de préparer un nouveau matériau hygroscopique endothermique par l'incorporation de 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.

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. 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.

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. 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.

### **II-8 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. 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. 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 [5].

### II-9 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, cette matière naturelle a été utilisée comme un matériau de support de stabilisation des MCP. S. Benayache et al, (2018) [26] et B. Xu et al (2014) [27], 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) [28] 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.

Z. Chen et al. (2015) [29] 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.

### II-10 Conclusion

La notion de confort thermique peut être perçue sous différents angles, celui de l'interaction dynamique entre le corps humain et son environnement thermique ou encore celui du comportement de l'enveloppe d'un bâtiment vis-à-vis d'un environnement climatique déterminé. L'environnement thermique est caractérisé par un ensemble de grandeurs physiques (La température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air). L'enveloppe du bâtiment et les matériaux qui la constituent se caractérisent par des paramètres propres tels que l'isolation.

Ainsi qu'à travers ce chapitre nous avons étudié la possibilité d'utiliser le composite (diatomite/MCP) pour pouvoir stocker une grande densité d'énergie par unité de volume lors du changement d'état (solide-liquide), et leurs application dans le secteur du bâtiment permet d'améliorer la qualité thermique et hygroscopique de ses derniers de manière passive.

# **Chapitre 3 :**

## **Description du procédé expérimental et analyse du problème numérique**

### III-1 Introduction

L'enveloppe d'un bâtiment habité interagit en permanence avec l'environnement et l'air intérieur, tels que des changements temporaires d'humidité, de température et de pression atmosphérique qui ont un effet clair sur les propriétés physiques des matériaux de construction et pour l'enveloppe du bâtiment (perméabilité, coefficient de diffusion, la teneur eau et la conductivité thermique...)

Pour assurer une bonne construction et durabilité des bâtiments, il est nécessaire de vérifier tous les points tels que la chaleur et l'humidité des composants

Ce chapitre s'intéresse au modèle numérique du comportement thermique des murs multicouches et à la méthode utilisée lors des expériences menées à l'université de Tlemcen.

## A) Etude théorique, équations gouvernantes et programmation COMSOL

### III-2 Description du problème physique

Notre problème consiste à étudier la possibilité d'utiliser des isolants contre l'humidité tels que la diatomite et la diatomite / paraffine dans les bâtiments résidentiels et commerciaux en Algérie, et en même temps une solution écologique rentable à étendre pour remplacer le polystyrène (PSE) de l'autre côté.

Le PSE est largement utilisé en isolation dans la construction de bâtiments en Algérie. D'autre part, l'isolant en polystyrène rigide contient jusqu'à récemment de l'hexabromocyclododécane (HBCD), ce dernier est un dangereux retardateur de flamme à base de brome. Cette molécule synthétique toxique est pratiquement non biodégradable et elle est présente dans les tissus vivants. C'est un perturbateur endocrinien qui est toxique pour les organismes aquatiques, mais pas pour les organismes vivants.

En raison de son utilisation en grande quantité dans les tissus et l'électronique par exemple, le HBCD se trouve partout: dans l'eau, la terre, la mer et dans les régions polaires.

Du côté du polystyrène, il n'était pas prouvé que le HBCD emprisonné dans la matière se libère aussi dans l'environnement. En mai 2013, lors de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP), qui a regroupé plus de 150 pays, le HBCD a rejoint la liste des vingt polluants les plus dangereux.

L'Algérie fait partie des pays qui ont signé cette convention, et à l'horizon de 2020, notre pays doit trouver une solution pour le substituer.

D'après les recherches effectuées dans les chapitres, il est constaté que l'utilisation de diatomite et diatomite / paraffine peut être une solution finale à ce problème [30]

Et pour améliorer la méthode de construction en Algérie, plusieurs travaux ont été réalisés:

- Utilisez 2 cm de diatomite et diatomite + paraffine comme panneaux à l'intérieur et à l'extérieur d'un mur de briques et les comparez avec un simple mur de contrôle.



**Figure III.1** : Mur en brique avec une plaque de diatomite.



**Figure III.2** : Mur en brique avec une plaque de diatomite+ paraffine.



Figure III.3 : Mur en brique avec une plaque de mortier.

### III-2-1 propriétés :

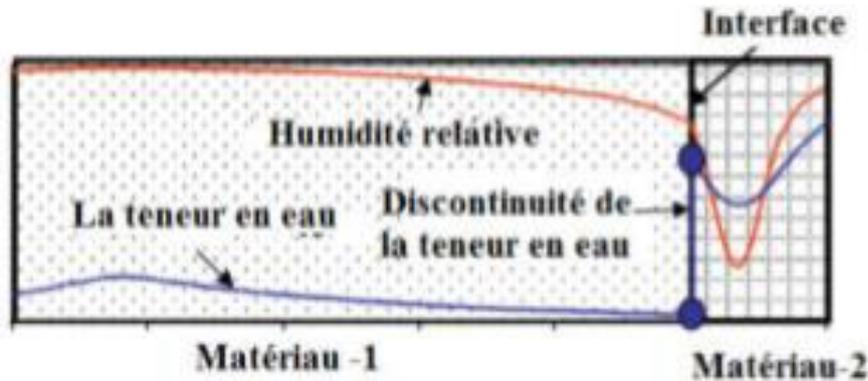
. Les propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés dans la résolution numérique sont données dans le **tableau III.1**

propriétés	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$C_p$ [J/(kg.K)]	$\delta_p^* 10^{-10}$ [s]	T. fusion [K]
Brique	2000	0.84	900	0.26	-
Diatomite	400	0.1	1436	0.295	-
Air	1.23	0.026	1006.23	5.65	-
Mortier	1863	1.41	840	0.0385	-
Paraffine	773	0.21	2400	-	61
Diatomite/ paraffine (16%)	523	0.12	1543.8	5	58

**Tableau III.1:** Propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés [5,31,32 ,33,34,35,36,37,38]

### III-3 Modélisation mathématique et équation gouvernantes

Modèle de transfert combiné de chaleur et d'humidité dans les travaux de HM.Künzel, (1995) [39], est établi pour décrire le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche. 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 continu 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-8.



**Figure III.4:** Profil de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents [5].

#### III-3-1 Hypothèses du modèle

Basé sur une recherche de HM Künzel [33], les hypothèses suivantes sont prises en compte:

- Chaque matériau est traité comme un milieu poreux;
- L'équilibre thermodynamique local est vérifié;
- La phase liquide se compose uniquement d'eau pure
- L'air sec et la vapeur d'eau sont des gaz parfaits et incompressibles
- Ne pas tenir compte des effets des réactions chimiques, de l'hystérésis, de la déformation et de la gravité.

#### III-3-2 Equations gouvernantes de transfert de chaleur et d'humidité

La forme générale des équations décrivant les processus de transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux est donnée par un système de deux équations dérivées en imposant un équilibre de masse et d'énergie d'une décimale analyse volumétrique :

##### III-3-2-1 Transfert d'humidité

L'équation de la conservation de masse est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dw}{dt} = -\Delta[g_y + g_l] + Qw \quad (\text{III.1})$$

Comme mentionné précédemment, l'humidité est discontinue, de sorte que la conservation de l'équation de masse est transformée en utilisant l'humidité relative et la température comme un moteur thermique ou l'équation de composition décrite par la loi de Fick et Darcy, l'humidité relative est déterminée par la relation:

$$\phi = \frac{Pv}{Pvs(T)} \quad (\text{III.2})$$

La teneur en eau,  $w$  [kg/ m<sup>3</sup>] peut être exprimée en humidité relative.

La pression partielle de la vapeur d'eau saturée dans l'air forme:

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

La densité du flux de diffusion de vapeur a la forme:

$$g_v = D_m \cdot \nabla_m + DT \cdot \nabla T \approx Dm \cdot \nabla m + \delta \nabla P v \quad (\text{III.4})$$

La contribution  $Dt \cdot \nabla T$  est généralement négligeable, et la fraction massique d'eau associée à la masse totale du mélange vapeur-air est remplacée par la pression partielle de vapeur d'eau.

Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air forme:

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

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 doit être introduit et la densité de flux de diffusion de la vapeur se présente sous la forme :

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

À l'aide de l'équation III.6, la densité de flux de diffusion de vapeur peut être écrite sous la forme :

$$g_v = -\delta_p \nabla p_v = g_v - \frac{\delta}{\mu} \nabla p_v = -\delta_p \nabla p_{v,s}(T) \nabla \phi - \delta_p \phi \frac{dp_{v,s}(T)}{dT} \nabla T \quad (\text{III.7})$$

La conduction liquide est décrite par la densité du flux liquide [kg/(m<sup>2</sup>.s)] sous la forme:

$$g_l = -Dw(w) \cdot \nabla w = -Dw \cdot \xi \cdot \nabla \phi \quad (\text{III.8})$$

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial \phi} \quad (\text{III.9})$$

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

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\xi \partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left[ (Dw \cdot \xi + \delta p \cdot Pv, s(T)) \nabla \varphi + \delta p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial p_{v,s}(T)}{\partial t} \cdot \nabla T \right] + Qw. \quad (\text{III.10})$$

### 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 :

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

$$(\rho \cdot cp)_{eff} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \rho s \cdot (cs + \frac{1}{\rho s} \cdot ce \cdot w) \quad (\text{III.12})$$

$$q = [\lambda_{eff} \cdot \nabla T + Lv \cdot \delta p \cdot \nabla (Psat \cdot \varphi)] =$$

$$[(\lambda_{eff} + Lv \cdot \delta p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial p_{v,s}(T)}{\partial t}) \nabla T + \delta p \cdot Pv, s(T) \cdot \nabla \varphi] \quad (\text{III.13})$$

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

$$\rho s \cdot (cs + \frac{1}{\rho s} \cdot ce \cdot w) = \nabla [(\lambda_{eff} + Lv \cdot \delta p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial p_{v,s}(T)}{\partial t}) \nabla T + Lv \cdot \delta p \cdot Pv, s(T) \cdot \nabla \varphi] + Qr \quad (\text{III.14})$$

### III-3-2-3 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 :

$$(Dw \cdot \xi + \delta p \cdot Pv, s(T)) \nabla \varphi + \delta p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial p_{v,s}(T)}{\partial t} \cdot \nabla T =$$

$$\beta_{s, ext} (\phi_{a, ext} \cdot Pv, s(T_{a, ext}) - \phi_{s, ext} \cdot Pv, s(T_{s, ext})) \quad (\text{III.15})$$

$$(Dw \cdot \xi + \delta p \cdot Pv, s(T)) \nabla \varphi + \delta p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial p_{v,s}(T)}{\partial t} \cdot \nabla T =$$

$$\beta_{s, int} (\phi_{a, int} \cdot Pv, s(T_{a, int}) - \phi_{s, int} \cdot Pv, s(T_{s, int})) \quad (\text{III.16})$$

Le flux de chaleur sur la surface extérieure, et intérieure, respectivement, sont données par l'équation III.17 et III.18. Dans ces équations, la convection de la chaleur et le rayonnement sont pris en compte :

$$(\lambda_{eff} \nabla T + Lv \cdot \delta p \cdot Pv, s(T) \cdot \nabla \varphi = ha_{, ext} \cdot (T_{a, ext} - T_{s, ext}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\infty 4}^4 - T_{a, ext}^4)$$

$$+ \beta_{s, ext} Lv (\phi_{a, ext} \cdot Pv, s(T_{a, ext}) - \phi_{s, ext} \cdot Pv, s(T_{s, ext})) \quad (\text{III.17})$$

$$(\lambda_{eff} \nabla T + Lv \cdot \delta p \cdot Pv, s(T) \cdot \nabla \varphi = ha_{, int} \cdot (T_{a, int} - T_{s, int})$$

$$+\beta s, intLv(\phi a, int. Pv, s(Ta, int) - \phi s, int. Pv, s(Ts, int)) \quad (III.18)$$

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

$$h_{a, int} = 2.8 + 3. va \quad (III.19)$$

$$h_{a, ext} = 2.8 + 3. vvent \quad (III.20)$$

$$T_{\infty} = 0.0552. (Ta, ext)1.5 \quad (III.2)[5].$$

### III-4 Solution numérique

La solution numérique a été réalisée à l'aide d'un logiciel appelé COMSOL Multiphysics. Ce dernier est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis comme il permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - choisir la ou les physiques, définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, résoudre et afficher les résultats.

Ce logiciel sert aussi à obtenir le profil de température et d'humidité relative à travers une paroi multicouches. 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 [5].

#### III-4-1 Etapes de travail sur COMSOL Multiphysics

Cliquer sur logiciel → assistant de modélisation → la physique de l'espace (3D) → la physique transfert de chaleur puis matériaux de construction (ajouter) → étude → étude temporel (terminer) → dessin de la géométrie → matériaux (bibliothèque des matériaux ou bien nous remplissons les matériaux qui n'existe pas dans la bibliothèque ou bouton droit et on choisit matériaux vierge). Pour ajouter des équations dans les matériaux : bouton droit dans basique, on choisit le type d'équation → transfert de chaleur on remplir les données → maillage on fait un test de maillage → étude temporel (choisir le temps et le pas de temps qui tu vas tester ton travail).

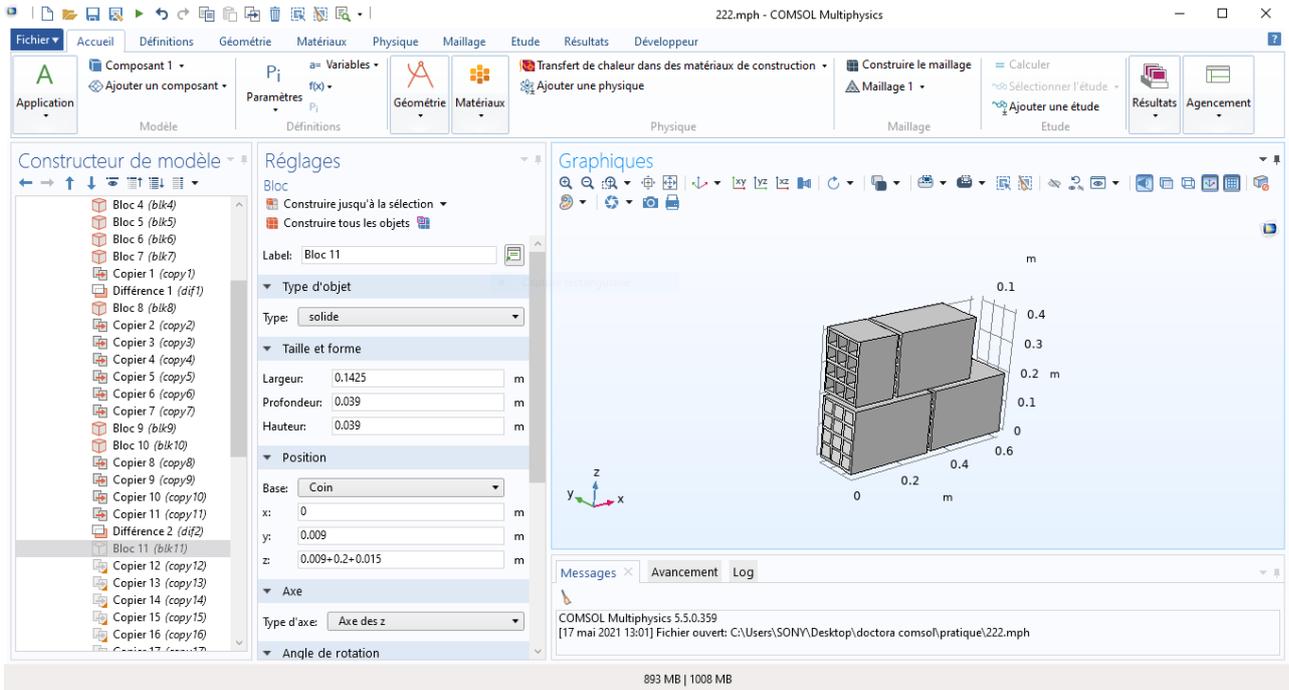
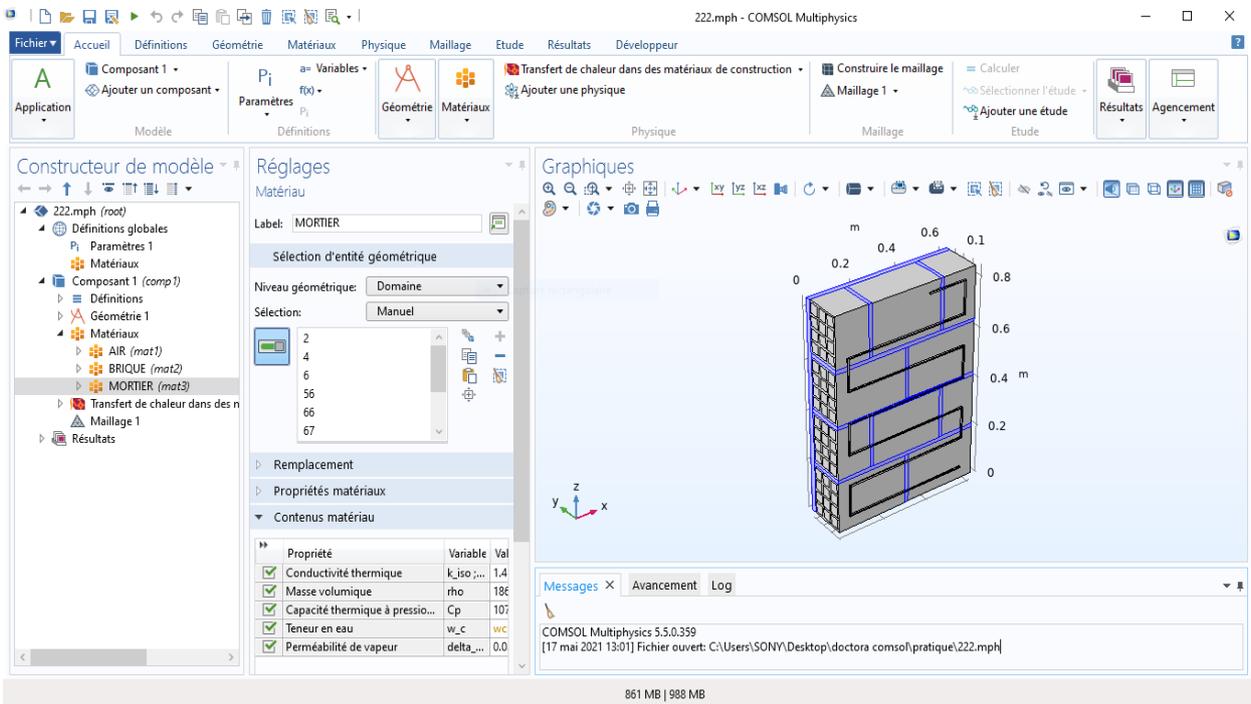


Figure III.5 : Géométrie en 3D des murs en brique avec mortier à étudier sur logiciel COMSOL Multiphysiques avant calcul



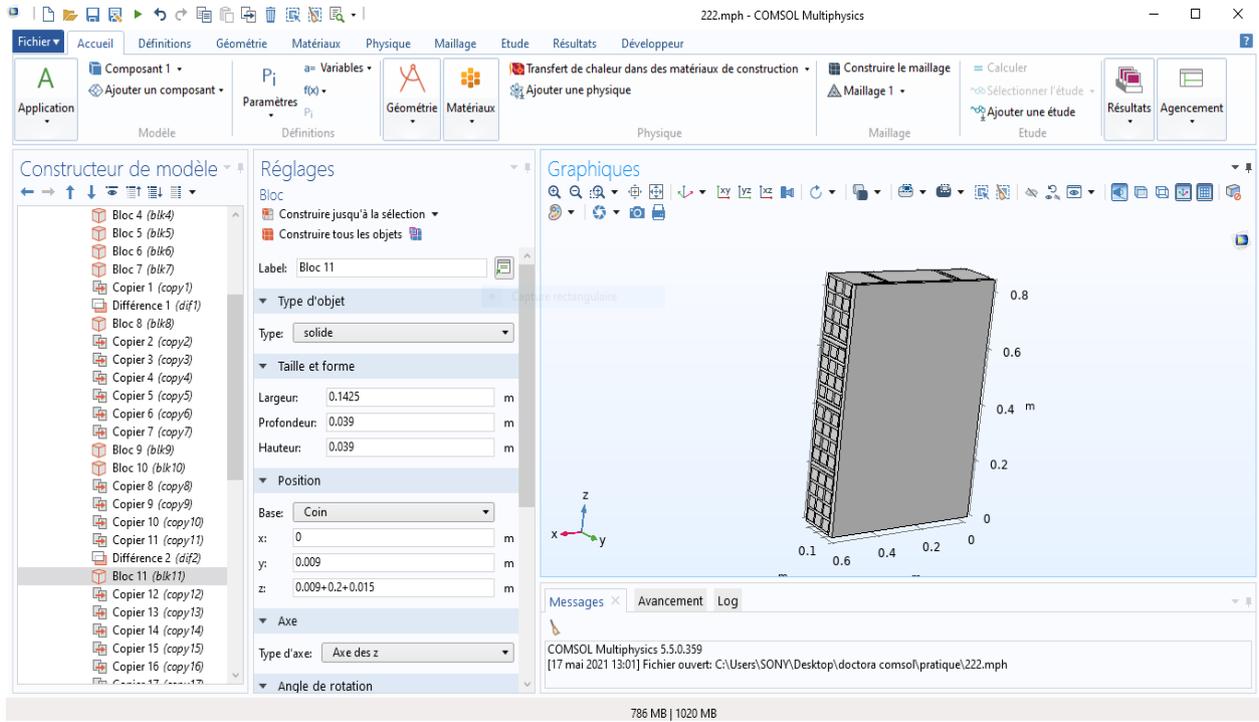
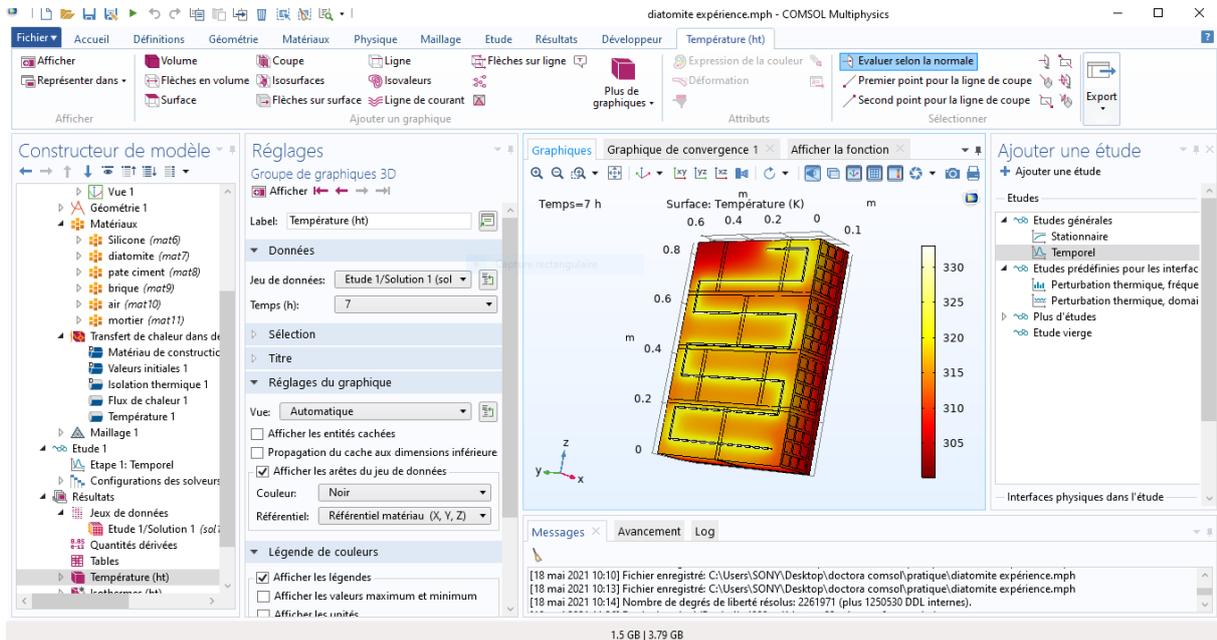
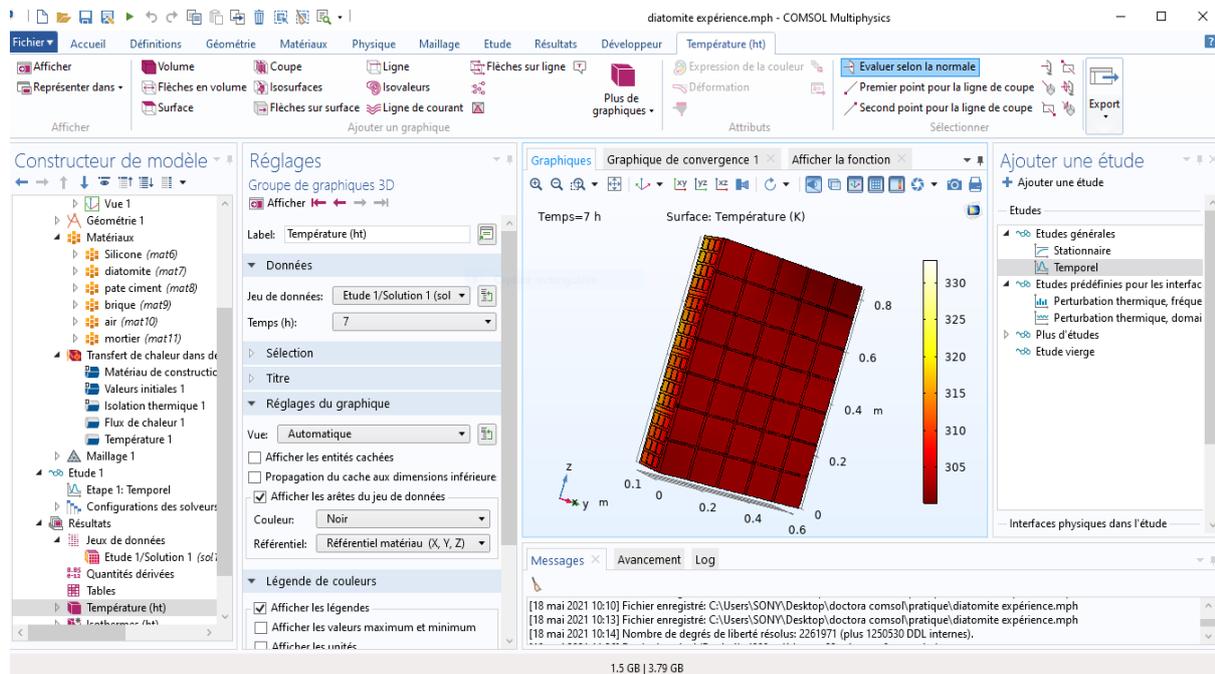


Figure III.5 (suite): Géométrie en 3D des mur en brique avec mortier a étudier sur logicielCOMSOL Multiphasiques avant calcul





**Figure III.6 :** Géométrie en 3D des murs en brique avec diatomite et diatomite + paraffine à étudier sur logiciel COMSOL Multiphysiques. Avant et après calcul.

### III-4-2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode numérique approximative pour résoudre des équations différentielles qui décrivent des phénomènes physiques en ingénierie.

Depuis 1970 environ, elle connaît une grande extension, qui va de pair avec le développement et l'augmentation de la puissance de calcul.

Elle est devenu un outil familier, informatique et quotidien pour les ingénieurs, dans des domaines tels que l'analyse structurale, le transfert de chaleur, les fluides, l'électromagnétisme, les écoulements souterrains, la combustion ou la diffusion, disperser les polluants [41].

#### III-4-2-1 Grandes lignes de la méthode

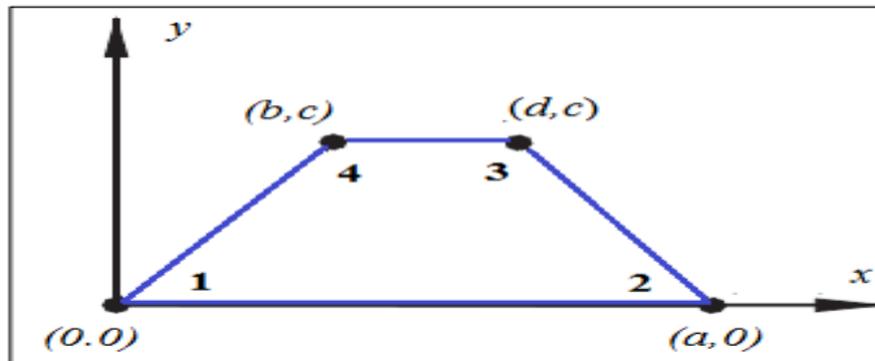
- **Etape 1 :** Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites. La majorité des problèmes d'ingénierie sont décrits par des équations différentielles aux dérivées partielles associées à des conditions aux limites définies sur un domaine et son contour. L'application de la MEF exige une réécriture de ces équations sous forme intégrale. La formulation faible est souvent utilisée pour inclure les conditions aux limites.
- **Etape 2 :** Division du domaine en sous domaines. Cette étape consiste à discrétiser le domaine en éléments et calculer les connectivités de chacun ainsi que les coordonnées de ses nœuds. Elle constitue ainsi la phase de préparation des données géométriques.
- **Etape 3 :** Approximation sur un élément. Dans chaque élément la variable tel que le déplacement, la pression, la température, est approximée par une simple fonction linéaire, polynomiale ou autre. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre des nœuds

de l'élément. L'approximation nodale est appropriée. C'est dans cette étape que se fait la construction des matrices élémentaires.

- **Etape 4** : Assemblage et application des conditions aux limites. Toutes les propriétés de l'élément (masse, rigidité,...) doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités calculées à l'étape 2 pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires.
- **Etape 5** : Résolution du système global : Le système global peut être linéaire ou non linéaire. Il définit soit un problème d'équilibre qui concerne un cas stationnaire ou statique ou un problème de valeurs critiques où il faut déterminer les valeurs et vecteurs propres du système qui correspondent généralement aux fréquences et modes propres d'un système physique. Un problème de propagation qui concerne le cas transitoire (non stationnaire) dans lequel il faut déterminer les variations dans le temps des variables physiques et la propagation d'une valeur initiale. Les méthodes d'intégration pas à pas sont les plus fréquentes telles que, méthode des différences finies centrales, méthode de New mark, méthode de Wilson. A ces méthodes doivent être associées des techniques d'itération pour traiter le cas non linéaire. La plus célèbre est la méthode de Newton Raphson [42].

### III-4-2-2 Choix de maillage

En 2003 A.Y.T. Leung, Zhu Bin, Jian jin Zheng, Hao Yang , utilisent un élément appelé trapèze de Fourier pour analyser les vibrations des p-éléments de solides élastiques bidimensionnels, Ils montrent que cet élément de Fourier est plus précis que celui utilisant le problème de vibration perpendiculaire gaussienne dans le plan(des éléments utilisant la quadrature de Gauss pour les problèmes de vibration dans le plan), ce qui est plus efficace pour les oscillations à haute fréquence.



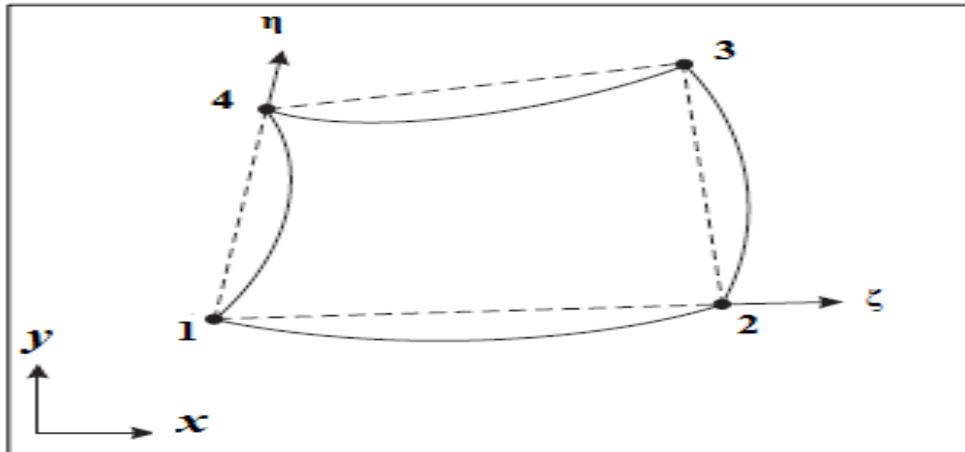
**Figure III.7** : Trapézoïdale de Fourier de p-élément.

En 2006, les auteurs Yeon Seok Choo, Noori Choi Chai Lee , ont proposé des éléments plans tétraogonaux triangulaires élastiques linéaires flexibles, précis et robustes, avec l'introduction de degrés de liberté de rotation supplémentaires.

Ils montrent que les rotations supplémentaires augmentent la précision et la qualité de la durabilité de l'élément développé.

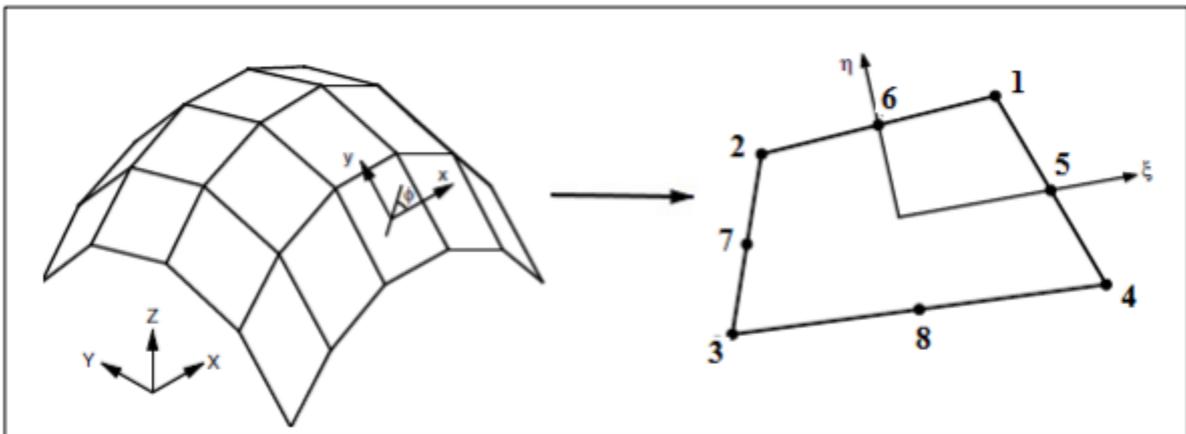
Les travaux de recherche de A. Houmat 2006, ont été consacrés à l'étude de la version trigonométrique de la méthode des éléments finis est basée sur l'élément quadrilatère courbe. Ce facteur a été développé et appliqué à l'analyse des vibrations libres de structures membranaires de forme arbitraire. Il a calculé les valeurs de fréquence pour les arcs ouverts et fermés à l'aide de maillages quadrilatéraux courbes et a montré une convergence rapide et une grande précision en

utilisant cette méthode. Ces valeurs sont très précises et peuvent être comparées à d'autres techniques de calcul.



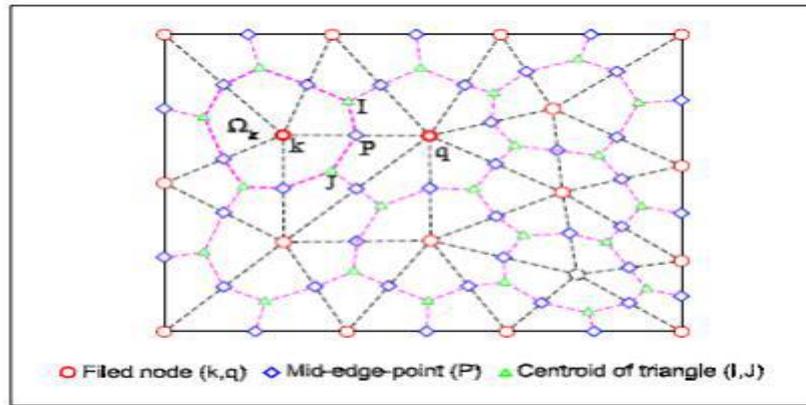
**Figure III.8** : Élément quadrilatère courbe.

Les études de Kutlu Darılmaz et Nahit Kumbasar 2006, [11] sont consacrées à l'étude d'un élément de coque à 8 nœuds de contrainte hybride hypothétique, avec six libertés par nœud, et chaque nœud à trois et trois rotations. Ils ont étudié les performances des éléments pour différentes structures, mais ils ont utilisé sous condition l'élément pour l'analyse statique et vibratoire de la structure avec les propriétés de matériau (isotrope / orthotrope).



**Figure III.9** : Élément coque quadrilatère à 8 nœuds de contrainte assumée hybride.

en 2009 N.Nguyen-Thanha[12], et tous, ont utilisé la méthode alternative finie alpha pour analyser les vibrations libres et les structures en utilisant des maillages avec des éléments triangulaires



**Figure III.10** : Maillage avec éléments triangulaires dans la méthode des éléments finis alpha alternatif (AαFEM).

La méthode proposée améliore considérablement la précision de l'élément triangulaire standard et fournit une solution standard d'énergie super-convergente pour l'analyse statique et dynamique dans des problèmes bidimensionnels. Ainsi ils ont trouvé que :

- Les résultats numériques de l'AαFEM utilisant des éléments triangulaires sont toujours plus précis que celles de FEM-T3 et même plus précis que ceux de la FEM-Q4 avec le même nombre de nœuds. Les taux de convergence de la norme de l'énergie sont asymptotiquement les mêmes que celle de cette technique standard FEM.
- Dans la fréquence propre et l'analyses des vibrations forcées, la AαFEM est toujours stable et donne des résultats plus précis que la méthode correspondante FEM-T3 et FEM-Q4 ;
- La méthode AαFEM est facile à mettre en oeuvre dans un programme d'éléments finis et des maillages triangulaires sont idéals pour les domaines de problèmes complexes.

### III-4-2-3 Forme Conservative des équations de conservation

La personnalisation de l'équation peut être illustrée plus facilement en considérant que l'équation de conservation pour une variable scalaire générale  $\phi$  peut être exprimée comme suit:

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla \phi) + S_\phi$$

$$\underbrace{\rho \frac{\partial \phi}{\partial t}}_I + \underbrace{\nabla \cdot (\gamma \phi)}_{II} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla \phi)}_{III} + \underbrace{S_\phi}_{IV} \quad (\text{III.22})$$

I. terme transitoire

II. terme de transport par convection de  $\phi$

III. terme diffusion de  $\phi$

IV. terme source.

L'équation différentielle générale dans un écoulement 3D instationnaire, incompressible est la suivante :

$$\rho \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\Delta \phi}{\Delta x} + \frac{\Delta \phi}{\Delta y} + \frac{\Delta \phi}{\Delta z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\gamma \omega \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\gamma \omega \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma \omega \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_\phi \quad (\text{III.23})$$

∅ Une des variables suivantes  $l$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $k$ ,  $\varepsilon$  et  $T$  [43].

**III-4-3 calculs numériques :**

Elle se résume en trois parties :

- **La construction du mur :** en utilisant le constructeur d'objet, lui donnée la hauteur largeur de chaque bloc, introduire l'air comme matière, ajouté les jointures, la couche de finition par exemple le mortier en un seul bloc et la diatomite et diatomite/paraffine en plusieurs blocs et une jointure en plâtre pour ce rapprocher le plus de la réalité.

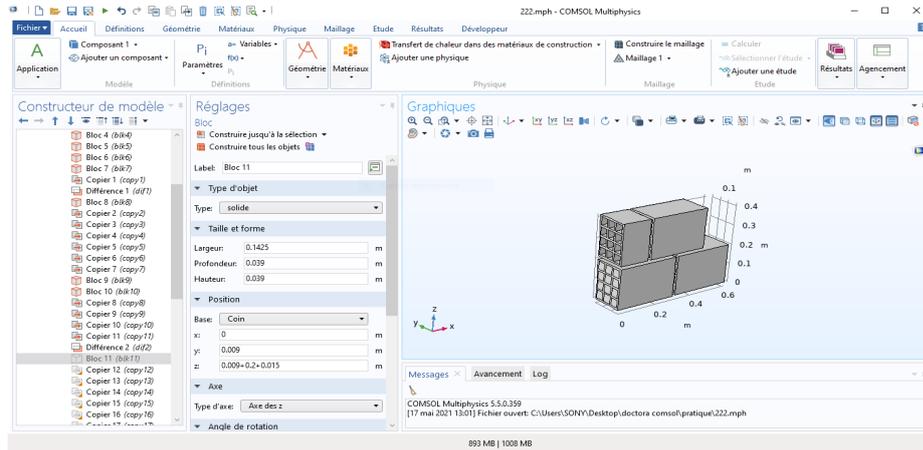


Figure III -11 Constructeur de modèle COMSOL

- **Propriétés :** en utilisant matériaux on a introduit les propriétés de chaque bloc (brique, mortier, paraffine, silicone, diatomite, plâtre)

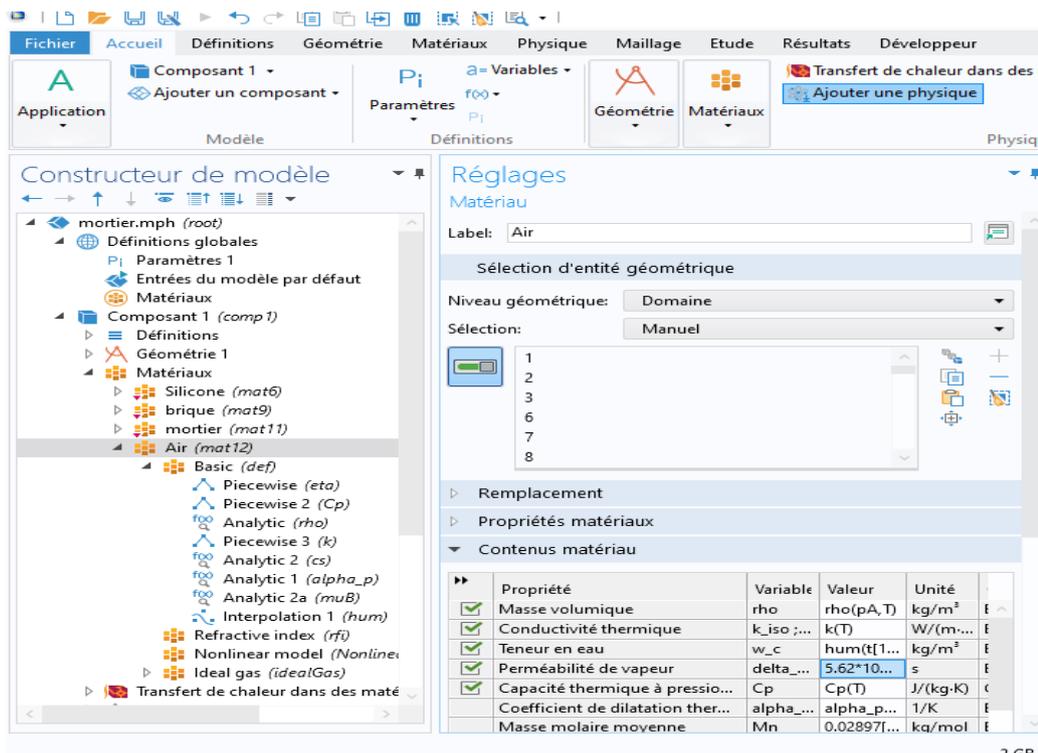
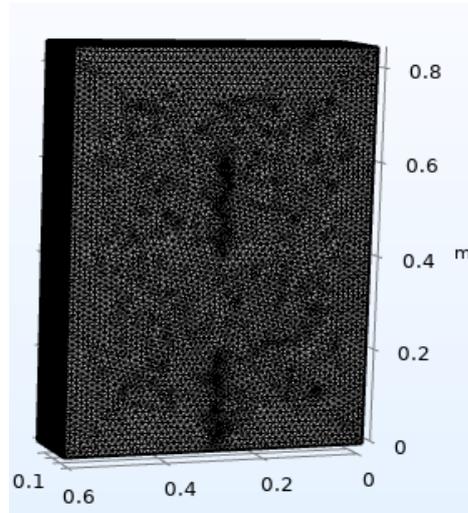
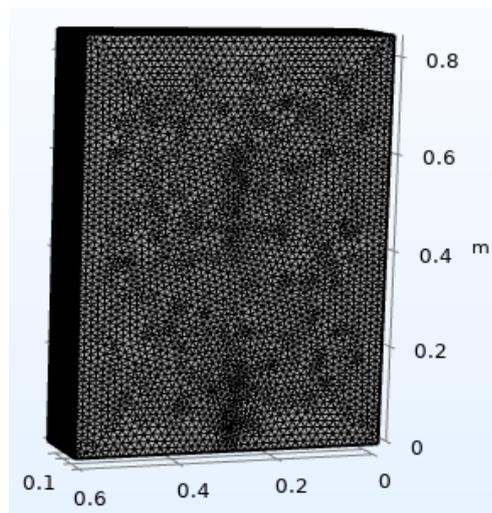


Figure III -12 Matériaux COMSOL

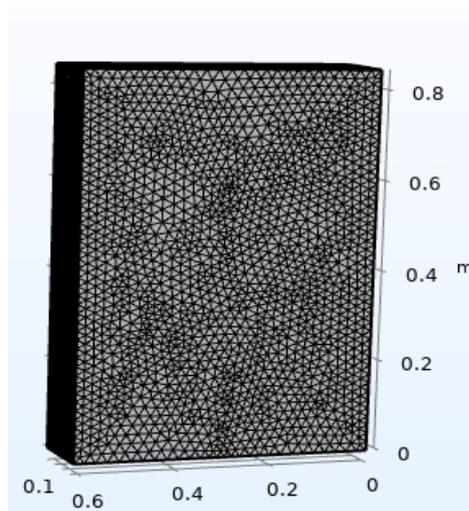
- **Calcul :** Avant d'exploiter le modèle numérique, on doit d'abord effectuer une étude sur le maillage. Pour cela, nous avons analysé trois grilles de maillage qui correspondent à un nombre d'éléments de volume de 6791720, 1721245 et 770829.



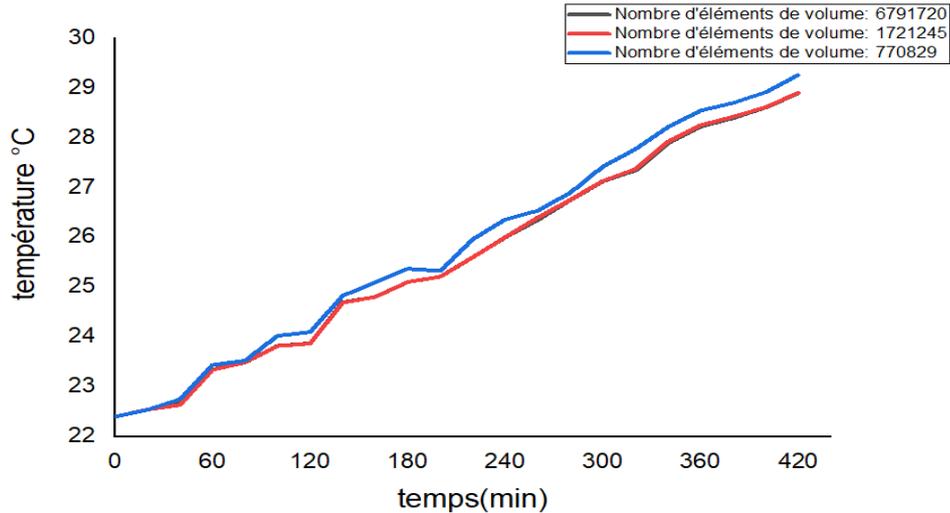
**Figure III -13** 6791720 éléments de volumes



**Figure III-14** 1721245 éléments de volumes



**Figure III -15** 770829 éléments de volumes



**Figure III -16** Test de maillage.

Par la suite, nous avons adopté pour nos calculs la grille avec 1721245 éléments de volumes qui donne un bon compromis de temps de calcul par rapport à la grille de 6791720 (NEV) et une bonne précision que celle de 770829 (NEV). Après on fixe la température à 60°C sur la résistance, on isole le mur et on lance le calcul.

## B) Description du protocole expérimental réalisé à l'université de Tlemcen

### III -5 partie expérimentale:

Les expériences en étaient menées dans un laboratoire à l'université d'Abou Baker Belkaid Tlemcen avec trois murs en briques de 83 cm de hauteur 61.5 cm de largeur et 17cm de profondeur :

- Avec une finition de 2cm de mortier (**Figure III.3**)
- Avec une finition de 2cm de diatomite (**Figure III.1**)
- Avec une finition de 2cm de diatomite/paraffine (**Figure III.2**)

Les murs en étaient isolés avec de la laine de roche des 5 cotés, on a mis une résistance en silicone sous forme de serpentin de 4m de long et 5 mm d'épaisseur comme le montre la **figure IV-1** collé au mur et fixé à 60 °C à l'aide d'un contrôleur de température (Xmtd-4000)



Figure III -17 Résistance électrique

#### ➤ Contrôleur de la température

Pour contrôler la température de la résistance avec précision, sans intervention considérable de la part de l'opérateur, le système de régulation de température repose sur un régulateur qui accepte un capteur de température comme entrée tel qu'un thermocouple . Il compare la température réelle à la température de régulation désirée, ou la consigne, et fournit une sortie à un élément de commande. Le régulateur de température est une partie du système de contrôle complet, et l'ensemble du système doit être analysé lors de la sélection du régulateur de température correspondant.



Figure III -18 Contrôleur de température.

#### ➤ Caméra thermique

Une caméra thermique capte le rayonnement infrarouge (ondes de chaleur) émis par les corps et qui varie en fonction de leur température. Une caméra thermique ne permet généralement pas de voir derrière une paroi ou un obstacle. Elle reproduit la chaleur emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière.

La nôtre s'appelle TESTO elle est performante et polyvalente elle permet la visualisation des températures au moyen de la thermographie facilite grandement le travail, entre autres, pour ces applications :

- Dans le secteur de la thermographie des bâtiments, une caméra thermique de Testo peut vous aider à détecter les ponts thermiques et vices de construction.
- Dans le secteur du chauffage, la thermographie vous permet de contrôler le bon fonctionnement des chauffages par le sol ou de détecter les fuites sans qu'aucune destruction ne soit requise.
- Dans le secteur de la maintenance, une caméra thermique vous permet également de voir les traces d'usure avant que les installations ne tombent en panne.



Figure III -19 Camera thermique TESTO

Et en ce qui concerne la prise de température on prends celle de l'ambiance a l'aide d'un thermocouple et celles des murs avec une caméra thermique TESTO en réglant l'émissivité de chaque mur, le pas de temps était de 20 minutes durant 7 heures, puis on copie les photos sur l'ordinateur et lire plusieurs paramètre comme la températures moyen des murs avec le logiciel TESTO comme le montre la figure IV-3

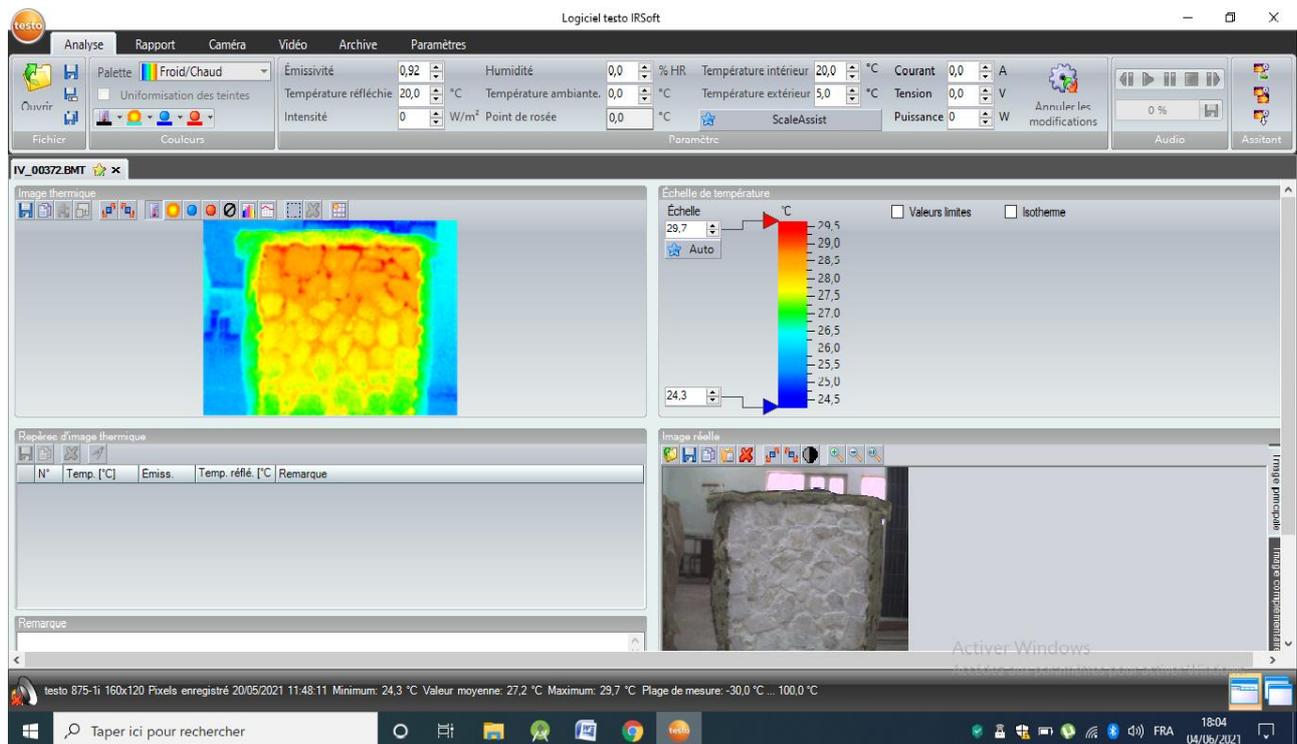


Figure III -20 TESTO logiciel de la caméra thermique

### III-6 Conclusion

Les travaux réalisés dans ce chapitre doivent décrire et analyser le comportement thermique des matériaux et étendre l'étude au niveau des murs stratifiés à travers une étude expérimentale.

Un modèle numérique basé sur COMSOL Multiphysic qui considère la température comme un facteur potentiel d'énergie thermique, a été utilisé pour assurer la continuité du transfert entre les couches des matériaux et résoudre les équations de transfert thermique.

Des expériences ont été menées à l'université de Tlemcen pour voir le comportement thermique dans des murs multicouches.

# **Chapitre 4:**

# **Discussion des résultats**

#### IV-1 Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à la discussion des résultats obtenus à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysic avec celle de l'expérimental

Par ailleurs, la partie expérimentale sera comparée tenant compte des expériences menées sur des murs en brique vide avec une couche de finition de mortier, de la diatomite et enfin diatomite/paraffine à l'intérieur et à l'extérieur.

L'expérience se résume en 5 cas :

- **Premier cas** : avec un mur fini au mortier, la température initiale était de 22.4°C et après une exposition de 7 heures avec la résistance a 60°C et un transfert thermique sous forme de conduction la température final était de 28.4°C ( $\Delta T=6^{\circ}\text{C}$ )
- **deuxième cas** : avec un mur fini à la diatomite extérieure, la température initiale était de 24.9°C et après une exposition de 7 heures avec la résistance a 60°C et un transfert thermique sous forme de conduction la température finale était de 28.3°C ( $\Delta T=3.4^{\circ}\text{C}$ )
- **troisième cas** : avec un mur fini à la diatomite intérieure, la température initiale était de 25°C et après une exposition de 7 heures avec la résistance a 60°C et un transfert thermique sous forme de conduction la température finale était de 28.6° C ( $\Delta T=3.6^{\circ}\text{C}$ )
- **quatrième cas** : avec un mur fini à la diatomite/paraffine extérieur, la température initiale était de 24.8°C et après une exposition de 7 heures avec la résistance a 60°C et un transfert thermique sous forme de conduction la température finale était de 28.5°C ( $\Delta T=4.1^{\circ}\text{C}$ )
- **cinquième cas** : avec un mur fini à la diatomite/paraffine intérieur, la température initiale était de 24.4°C et après une exposition de 7 heures avec la résistance a 60°C et un transfert thermique sous forme de conduction la température finale était de 28.2°C ( $\Delta T=3.8^{\circ}\text{C}$ )

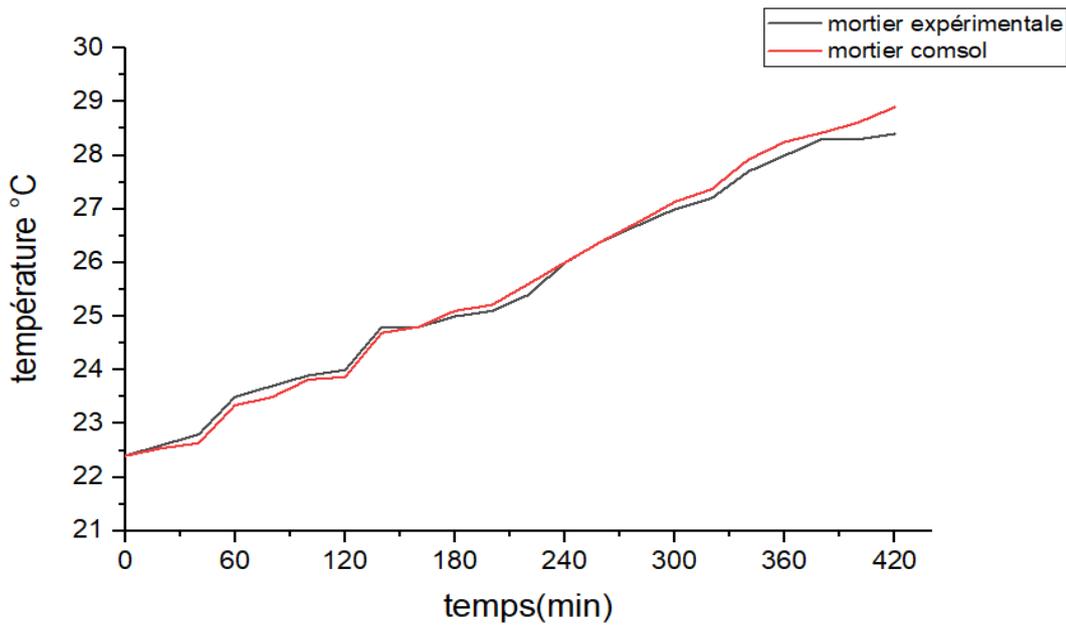
#### IV-2 comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques :

La comparaison va être entre deux courbes dans un même graphe qui représente les résultats du COMSOL et celle de l'expérience qui se résumant dans la température moyenne atteinte du côté opposé de la résistance (calculé avec TESTO) après 7 heures de charge et un pas de temps de 20 minutes pour le même mur.

##### IV-2-1 Analyse du cas mur en mortier simple :

Les travaux expérimentaux ainsi que ceux élaborés avec le simulateur COMSOL ont été réalisés sur une durée de 7h soit 420 minutes, ceci afin de prendre en considération le temps nécessaire pour la charge thermique durant une journée typique (10 :00 à 17 :00).

La température considérée dans cette analyse est la température moyenne calculée sur toute la face du mur évaluée par le logiciel TESTO.



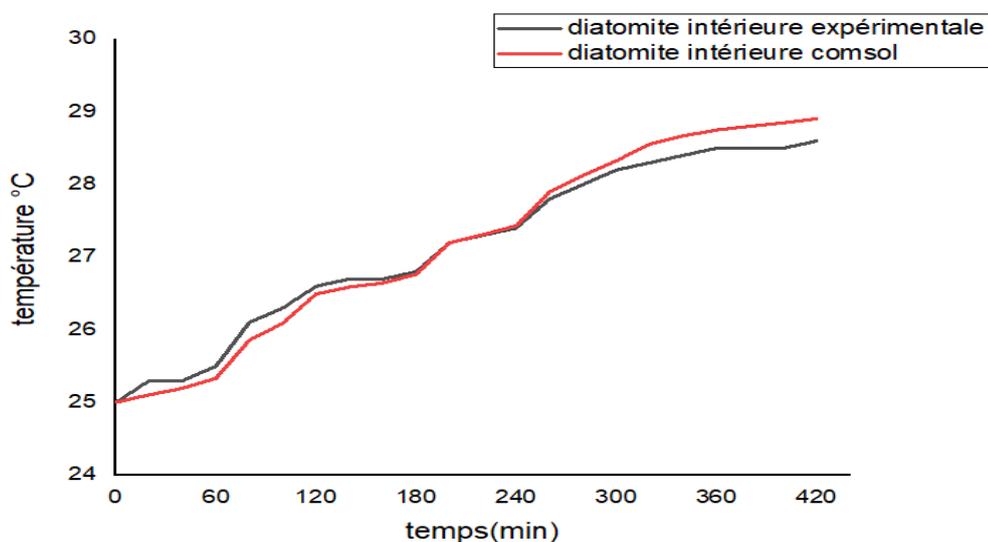
**Figure IV-1** résultats obtenus avec un mur en mortier simple

Il advient de la lecture du graphe (Figure IV-7) que la température initialement à 22,4 °C a évolué jusqu'à la température 28,4 °C pendant les 7 heures d'exposition soit 6 °C de différence. Cette constatation est confortée expérimentalement et abouti au même profil de température avec une légère différence durant la dernière heure. En effet, l'écart de température entre les deux résultats ne dépasse pas les 1%, ce qui est largement accepté.

#### IV-2-2 Analyse du cas mur avec diatomite intérieur :

Les travaux expérimentaux ainsi que ceux élaborés avec le simulateur COMSOL ont été réalisés sur une durée de 7h soit 420 minutes, dans des conditions légèrement différentes à cause de la température ambiante qui a évolué lors de cette journée.

De même, La température considérée dans cette analyse est la température moyenne calculée sur toute la face du mur évaluée par le logiciel TESTO.



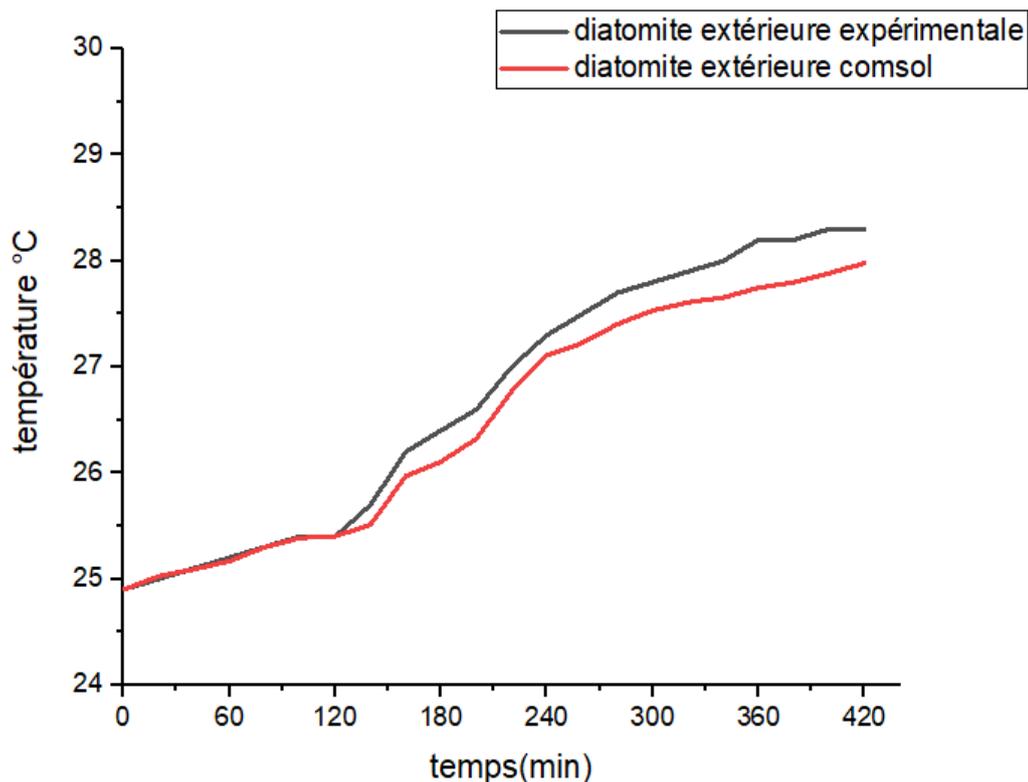
**Figure IV-2** résultats obtenus avec un mur avec diatomite

Il advient de la lecture du graphe (**Figure IV-8**) que la température initialement à 25 °C a évolué jusqu'à la température 28,6 °C pendant les 7 heures d'exposition soit 3,6 °C de différence. Cette constatation est confortée expérimentalement et abouti au même profil de température avec une légère différence durant la dernière heure. En effet, l'écart de température entre les deux résultats ne dépasse pas les 1%, ce qui est largement accepté. Par ailleurs, il ya lieu de noter que la diatomite a réduit l'écart de température et contribue à l'isolation thermique.

#### IV-2-3 Analyse du cas mur avec diatomite extérieur :

Les travaux expérimentaux ainsi que ceux élaborés avec le simulateur COMSOL ont été réalisés sur une durée de 7h soit 420 minutes, ceci afin de prendre en considération le temps nécessaire pour la charge thermique durant une journée typique (10 :00 à 17 :00).

La température considérée dans cette analyse est la température moyenne calculée sur toute la face du mur évaluée par le logiciel TESTO.



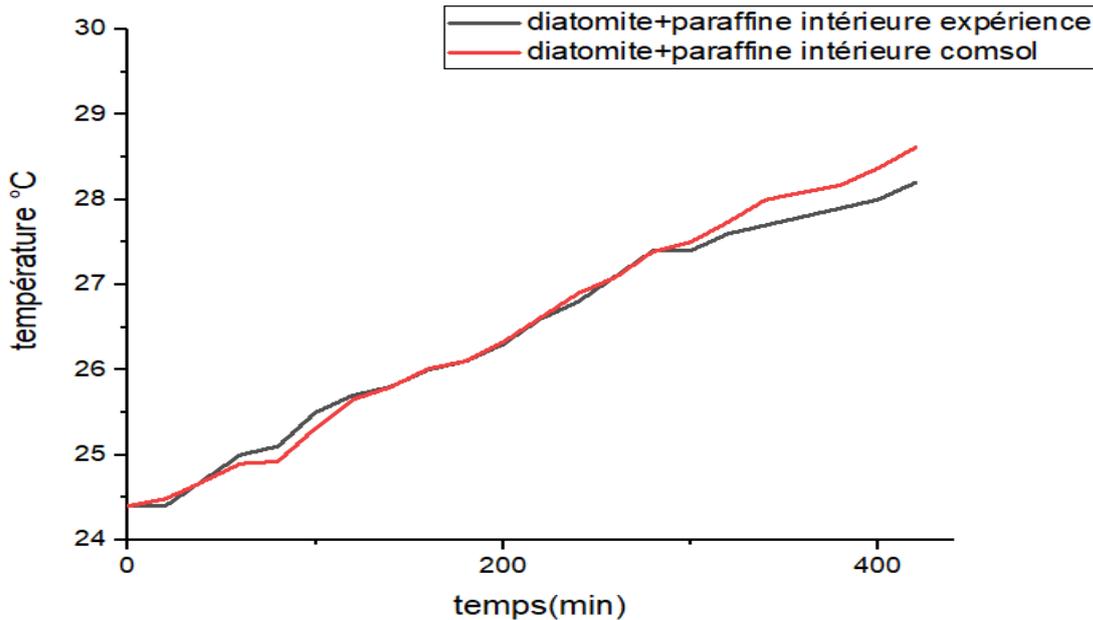
**Figure IV-3** comparaison diatomite extérieur

Il advient de la lecture du graphe (**Figure IV-9**) que la température initialement à 24,9 °C a évolué jusqu'à la température 28 °C pendant les 7 heures d'exposition soit 3,1°C de différence. Cette constatation est confortée expérimentalement et abouti au même profil de température avec une légère différence durant la dernière heure. En effet, l'écart de température entre les deux résultats ne dépasse pas les 1%, ce qui est largement accepté. Par ailleurs, il ya lieu de noter que la diatomite a réduit l'écart de température et contribue à l'isolation thermique.

#### IV-2-4 Analyse du cas mur avec diatomite/paraffine intérieur :

Les travaux expérimentaux ainsi que ceux élaborés avec le simulateur COMSOL ont été réalisés sur une durée de 7h soit 420 minutes, dans des conditions légèrement différentes à cause de la température ambiante qui a évolué lors de cette journée.

De même, La température considérée dans cette analyse est la température moyenne calculée sur toute la face du mur évaluée par le logiciel TESTO.



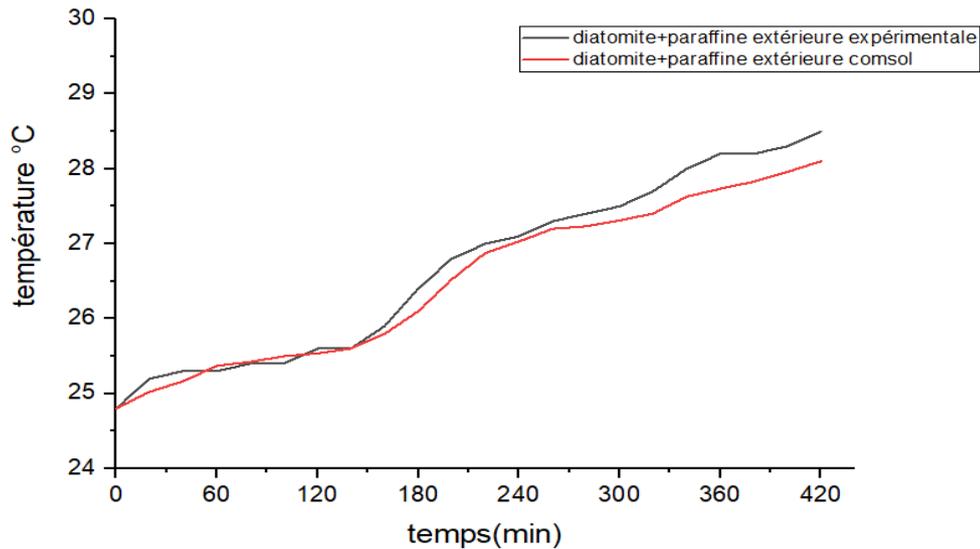
**Figure IV-4** comparaison diatomite/paraffine intérieur

Il advient de la lecture du graphe (**Figure IV-10**) que la température initialement à 24,4 °C a évolué jusqu'à la température 28,2 °C pendant les 7 heures d'exposition soit 3,8 °C de différence. Cette constatation est confortée expérimentalement et abouti au même profil de température avec une légère différence durant la dernière heure. En effet, l'écart de température entre les deux résultats ne dépasse pas les 1%, ce qui est largement accepté. Par ailleurs, il y a lieu de noter que la diatomite a réduit l'écart de température et contribue à l'isolation thermique.

#### IV-2-5 Analyse du cas mur avec diatomite/paraffine extérieur :

Les travaux expérimentaux ainsi que ceux élaborés avec le simulateur COMSOL ont été réalisés sur une durée de 7h soit 420 minutes, dans des conditions légèrement différentes à cause de la température ambiante qui a évolué lors de cette journée.

De même, La température considérée dans cette analyse est la température moyenne calculée sur toute la face du mur évaluée par le logiciel TESTO.



**Figure IV-5** comparaison diatomite/paraffine extérieur

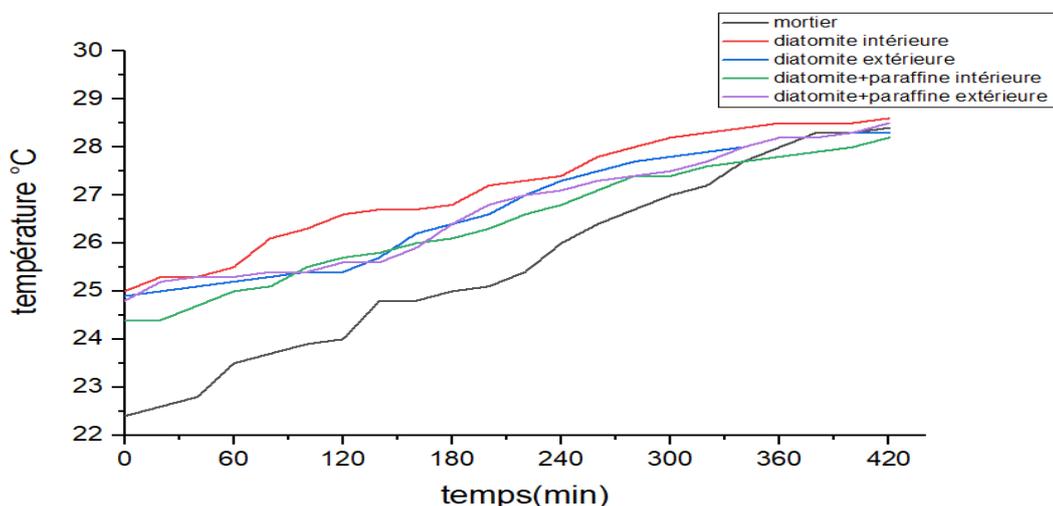
Il advient de la lecture du graphe (**Figure IV-11**) que la température initialement à 24,8 °C a évolué jusqu'à la température 28 °C pendant les 7 heures d'exposition soit 3,2 °C de différence. Cette constatation est confortée expérimentalement et abouti au même profil de température avec une légère différence durant la dernière heure. En effet, l'écart de température entre les deux résultats ne dépasse pas les 1%, ce qui est largement accepté. Par ailleurs, il ya lieu de noter que la diatomite a réduit l'écart de température et contribue à l'isolation thermique.

#### IV-3 Commentaire :

Les résultats expérimentaux montrent un bon compromis vis-à-vis le numérique pour toutes les positions avec des erreurs relatives moyennes observées de l'ordre de 0,76 % pour le mortier, 1% pour le diatomite intérieur, 1,12% pour diatomite extérieur, 1,08% pour diatomite/paraffine intérieur et 1,07% pour le diatomite/paraffine extérieur.

La cause de ces erreurs se résume dans l'influence des lampes, du courant d'air, l'isolation imparfaite, et la conduction qui n'est pas à 100% comme illustré sur COMSOL.

#### IV-4 Comparaison :



**Figure IV.6** comparaison des 5 cas expérimentaux

A l'issue de cette analyse entre les différentes configurations, il nous a été donné de constater à travers la **Figure IV.12** qui synthétise les différents profils de température suggère que la meilleure isolation thermique préconisée est celle qui engendre la plus faible évolution de températures soit celle de la diatomite extérieur avec un  $\Delta T=3.1^{\circ}\text{C}$ . Plusieurs explications peuvent être élaborées.

#### **IV-5 Explications :**

##### **IV-5-1 Diatomite seule ou diatomite + paraffine ?**

Si on devait classer les trois options d'isolation (diatomite, diatomite/paraffine, mortier) vis-à-vis du taux d'isolation alors la diatomite seule est la plus proche, puis la diatomite /paraffine, puis le mortier, Ce classement est expliqué par la conductivité thermique de la diatomite seule qui est faible, ce qui veut dire une résistance plus grande.

Quand on ajoute de la paraffine dans la diatomite, sa conductivité thermique augmente car on remplace les pores qui contiennent l'air (de conductivité thermique  $0.026 \text{ W}/(\text{m.K})$ ) avec de la paraffine (de conductivité thermique  $0.2 \text{ W}/(\text{m.K})$ ). Or, malgré l'amélioration de la capacité thermique de diatomite ( $C_p$ ), cela n'est pas suffisant.

Du côté économique utiliser la diatomite seule est plus rentable qu'avec la paraffine.

##### **IV-5-2 Diatomite à l'extérieur ou à l'intérieur ?**

Les résultats obtenus par la diatomite seule à l'extérieur sont plus isolatrice qu'à l'intérieur car la plaque de diatomite contient une conductivité thermique faible et ne permet pas le passage de la chaleur depuis l'extérieur ce qui la favorise à celle de l'intérieur

#### **IV-6 Conclusion :**

Dans ce dernier chapitre l'influence d'utiliser un matériau hygroscopique (la diatomite) comme matériaux de construction a une influence importante sur la performance hygrothermique des parois multicouches de bâtiment qui a été étudié et analysé.

On observe que la diatomite a un effet assez remarquable sur l'amélioration de l'isolation habitable. L'ajout d'une paraffine avec une température de fusion très élevée n'améliore en aucun cas l'effet de l'isolation, pour cela il faut choisir la paraffine selon les conditions de la région considérée.

Ensuite on observe aussi que l'isolation avec une couche de diatomite de l'extérieur donne de meilleur résultat par rapport à celle de l'intérieur. Ce qui nous permet de conclure que l'isolation avec de la diatomite à l'extérieur d'un habitacle est la meilleure isolation qu'on peut obtenir parmi nos cas.

# Conclusion général :

Dans un monde où la consommation énergétique augmente de jour en jour en utilisant des sources énergétiques de plus en plus rares, il est temps de prendre conscience de la manière la plus efficace d'améliorer le confort thermique dans les foyers en réduisant les fuites et les ponts thermiques et en même temps réduire la consommation énergétique et préserver l'environnement

En Algérie, le secteur résidentiel est le plus consommateur d'énergie par rapport aux autres secteurs suite à l'occupation continue du foyer. Cela va augmenter les besoins énergétiques devant assurer une amélioration des ambiances intérieures. Afin de résoudre les problèmes d'étanchéité liée à la conception et à la réalisation des constructions, l'isolation thermique est l'une des solutions essentielles et primaires à considérer dans l'efficacité énergétique du bâtiment. La principale solution passive est de traiter le bâtiment, en réduisant ses échanges thermiques avec le milieu extérieur en été comme en hiver, puisque l'extérieur dépend du climat, un paramètre variable aléatoire et parfois extrême.

Notre étude répond à la question de l'isolation thermique par l'utilisation de la diatomite et la diatomite mélangée avec la paraffine comme une solution qui peut réduire la consommation énergétique en minimisant l'échange thermique avec le milieu extérieur.

Le modèle utilisé dans ce travail est un modèle de transfert de chaleur pour analyser la performance thermique d'un mur multicouche, isolé selon différentes configurations et données climatiques. Ce modèle a été développé dans le logiciel COMSOL et validé par des expériences menées à l'université de Tlemcen.

Les résultats obtenus numériquement et confrontés aux expériences au laboratoire ont démontré une bonne concordance, ce qui prouve que le modèle mathématique est suffisamment robuste. Par ailleurs, plusieurs configurations ont fait l'objet d'analyse minutieuse dont les conclusions sont comme suit :

Cas 1 : Utilisation d'une plaque de mortier seule (2 cm d'épaisseur) sur une face d'un mur en brique vide.

Cas 2 : Utilisation d'une plaque de diatomite (2 cm d'épaisseur) du côté intérieur d'un mur en brique vide

Cas 3 : Utilisation d'une plaque de diatomite (2 cm d'épaisseur) du côté extérieure d'un mur en brique vide

Cas 4 : Utilisation d'une plaque de diatomite/paraffine (2 cm d'épaisseur) sur la face extérieure d'un mur en brique vide

Cas 5 : Utilisation d'une plaque de diatomite/paraffine (2 cm d'épaisseur) du côté intérieur d'un mur en brique vide

Les résultats issus des 05 expériences montrent que la diatomite seule disposée sur le côté extérieur du mur est la meilleure. De l'autre côté, il nous été donné de constater que la diatomite sans paraffine présente de meilleures caractéristiques. Cette dernière constatation pourrait s'expliquer que la paraffine dans les différentes expériences n'a pas atteint la température de fusion et dans ce cas précis

l'effet de changement de phase n'a pas contribué dans réduction des écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur.

### **Perspectives et recommandations**

Le travail présenté est loin d'être parfait et présentent plusieurs aspects techniques expérimentaux à surmonter. En effet, les expériences souffrent d'une volatilité des conditions aux limites car elles ont été conduites dans un milieu non contrôlé (ouverture de la salle, variation de la température durant les différentes journées de la semaine etc...). Pour cela, il est très souhaitable de concrétiser ces expériences dans une enceinte thermique appropriée.

## Référence :

- [1] : Julien BERGER, Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle, Thèse soutenue publiquement le 10 Décembre 2014, THÈSE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE Spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat.
- [2] : H. Hens, Final report, volume 1: Task 1: Modelling, IEA Annex 24 Hamtie, 1996.
- [3]: <http://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premierconsommateur-denergie-en-algerie> 05/03/2020.
- [4] : <http://capouest.info/2019/12/17/accellerer-laffichage-des-listes-des-beneficiaires/> 05/03/2020.
- [5] : FRAINE Youssouf, Etude et analyse de transfert de chaleur et d'humidité avec changement de phase dans les matériaux de construction poreux, Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle En : Génie mécanique Energétique et thermique appliquée.
- [6] : Bilan énergétique national, 2018, <http://www.energy.gov.dz>
- [7] : <https://www.humidite-expert.be/problemes-d-humidite> 05/03/2020
- [8] : Mohammed Yacine Ferroukhi. Modélisation des transferts thermo-hydroaérauliques dans les enveloppes de bâtiments : ´évaluation des désordres causes par l'humidité. Génie civil. Université de La Rochelle, 2015. Français.
- [9] : CHIKHI Ali, Etude du Comportement Thermo-Hydrique des Parois des Bâtiments. Influence des Effets de l'Etat Hygrothermique et des Propriétés Thermo-Physiques Soutenue le 06 Novembre 2016 THESE En vue de l'obtention du DOCTORAT EN SCIENCES Spécialité Génie Climatique.
- [10] : LO. Nilsson, Moisture mechanics in building materials and building components, PhD course, Lund Institute of Technology, Sweden, 2003.
- [11] : CR. Pedersen, Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions, Ph.D. Thesis (Report no.214), Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1990.

- [12] : 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.
- [13] : 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.
- [14] : H. Janssen, The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, thèse en génie civil. Katholieke Universiteit Leuven, 2002.
- [15] : 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.
- [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] : Mr. MERADI Hazem, Synthèse et Caractérisation d'une Poudre Thermo protectrice à 1600 °C, MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER Faculté des sciences de l'ingénieur Département de Métallurgie et Génie des Matériau UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA
- [22] : Vasconcelos et al ; Permeability of diatomite layers processed by different colloidal techniques ; *J. of the Eur. Ceram. Soc.* 20, pp201-207, (2000)
- [23] : Mr. HESSAD Ahmed, apport des matériaux nouveaux dans le confort Thermique des bâtiments : cas des matériaux à changement de phase (MCP), En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en architecture, UNIVERSITE MOULOUDMAMMERI TIZI OUZOU/ FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION. Septembre 2017
- [24] : Stéphane Guichard. Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des

Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale. Physique Générale [physics.gen-ph]. Université de La Réunion, 2013. Français

[25] : Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique N. Madjoudj \* et K. Imessad Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340 Algiers, Algeria (reçu le 10 Décembre 2016 - accepté le 25 Décembre 2016)

[26] : S. Benayache, S. Alleg, A. Mebrek, J. J. Suñol, Thermal and microstructural properties of paraffin/diatomite composite, *Vacuum* 157 (2018) 136–144.

[27] : 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.

[28] : 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.

[29] : 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-hydroscopic material, *Energy and Building*. 86 (2015) 1–6.

[30] : [https://centrecfs.wordpress.com/2016/10/27/le-polystyrene-est-une-veritablebombe-a-retardement/?fbclid=IwAR0UI\\_bzy2Im0-gg3GJamfK8yPZYuEHRIBBdib\\_XhUtrHGSzulilPtz9kFY](https://centrecfs.wordpress.com/2016/10/27/le-polystyrene-est-une-veritablebombe-a-retardement/?fbclid=IwAR0UI_bzy2Im0-gg3GJamfK8yPZYuEHRIBBdib_XhUtrHGSzulilPtz9kFY) 21/04/2020.

[31] : <http://www.acoustique-materiaux.net/m-277-permeabilite-vapeur-d-eau.html> 20/04/2020.

[32] : ZAIM Mounia ,KADRI Asma, Bilan thermique de construction : étude d'un cas et présentation de solutions, Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master Spécialité : Génie Civil, 2018-2019

[33] : <http://blogs.paysmellois.org/terrecrue/public/materiaux.pdf> 23/04/2020.

[34] : Hazem MERADI1 , L. ATOUI2 , A. Balaska1 , S. BOUHOUCHE1 . 1 Unité de Recherche Appliquée en Sidérurgie Métallurgie, URASM / CSC, BP196, 23000, Annaba. 2 Laboratoire de Métallurgie et Génie des Matériaux, Université de Annaba, BP12, Sidi Ammar, 23000, Annaba.

[35]:<http://absolusystem.com/public/spec/upload/Guide-couleur-en-exterieur.4056.pdf> 25/04/2020

[36] : Hazem MERADI1, L. ATOUI2, A. Balaska1, S. BOUHOUCHE1.  
CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION D'UNE DIATOMITE NATURELLE. 1  
Unité de Recherche Appliquée en Sidérurgie Métallurgie, URASM / CSC, BP196,

23000, Annaba. 2 Laboratoire de Métallurgie et Génie des Matériaux, Université d'Annaba, BP12, Sidi Ammar, 23000, Annaba.

[37] : Hazem MERADI , contribution à la caractérisation d'une diatomite naturel. Unité de recherche en sidérurgie métallurgie, URASM/CSC BP12sisi ammar.23000 Annaba.

[38] : Emilio SASSINE, étude expérimentale et numérique des parois verticales université dARTOIS, these sur l'analyse typologique et thermique des maisons anciennes de lille.

[39] : HM. 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).

[40] : 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.

[41] : <http://thesis.univ-biskra.dz/2294/4/Chapitre%2002.pdf> 28/04/2020.

[42] : [http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06\\_lessons\\_gcmethodes\\_elements\\_finis.pdf](http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06_lessons_gcmethodes_elements_finis.pdf) 29/04/2020.

[43] : BOUSBIA SALAH Seif Eddine Analyse vibratoire forcée des structures par éléments finis. UNIVERSITÉ DE BATNA FACULTÉ DE TECHNOLOGIE DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE Mémoire présenté Pour l'obtention du diplôme de MAGISTÈRE En Mécanique Option : CONSTRUCTION MÉCANIQUE.