

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



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie mécanique

**Spécialité** : Energétique

**Par** : HACHEMI Housseem

BOUCHETA Ilyes

### Sujet

**Contribution à l'amélioration de l'isolation thermique  
des bâtiments par l'utilisation de la diatomite et  
paraffine.**

Soutenu publiquement, le 31/08/2020, devant le jury composé de :

M. KORTI Abdel Illah Nabil	Professeur	UAB. Tlemcen	Président
M. SELADJI Chakib	Professeur	UAB. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. FRAINE Youssouf	Docteur	UAB. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. GUELLIL Hocine	MCB	UAB. Tlemcen	Examineur 1

Année Universitaire 2019-2020

---

## Remerciements

---

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

Nous tenons à exprimer toute nous reconnaissance à nos directeurs de mémoire, M. SELADJI Chakib et M. FRAINE Youssouf. Nous les remercions de nous avoir encadrés, orienté, aidé et conseillé.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs spécialement M. HOUTI Farid, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes 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. GUELLIL Hocine 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 modeste travail.

## *Dédicace*

*Nous dédions ce modeste travail :*

*A nos chers parents.*

*A nos chers frères.*

*A nos chers amis.*

*Et à tous la famille BOUCHETA, MERAH et HACHEM, BENOTMANE.*

---

## ملخص

---

تتطلب الأزمة الاقتصادية الحالية المرتبطة بأزمة الطاقة تطبيق الحلول من أجل خفض نسبة استهلاك وضمان التنمية المستدامة في العالم. وعلى الصعيد الوطني نرى أن قطاع السكن الموجود حالياً في الجزائر من أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة. ولضمان الراحة الحرارية للفرد في منزله يجب أن تكون التقلبات الحرارية ونسبة الرطوبة الداخلية منخفضة جداً. والهدف من أطروحتنا هذه هو تقليل الخسائر من خلال الجدران والأسقف لتحسين الراحة الحرارية الداخلية واستهلاك الطاقة بدراسة إمكانية استخدام مادة جديدة لها خاصية التحكم في الرطوبة، وقابلة تغيير الحالة الفيزيائية، المكونة من مادة دياتوميت ومواد تغيير الطور لتحل محل البوليستيرين الموسع في حين هذا الأخير يحتوي على سداسي البروم ثنائي الفينيل، والذي تم اعتباره مؤخراً ملوث عضويًا ثابتًا. من ناحية أخرى فإن الدياتوميت يعتبر مادة طبيعية وبيئية وقيمة للغاية في الجزائر، إذ يتميز بالتوصيل الحراري المنخفض والمسامية العالية.

اشتملت المنهجية على استخدام المحاكاة العددية بواسطة برنامج COMSOL MULTIPHYSICS من أجل تحقيق الأهداف المذكورة أعلاه. النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة البرنامج تعطينا انخفاضاً في تقلبات درجة الحرارة والرطوبة. إن استخدام لوح عزل دياتوميت على الجهة الخارجية يعتبر من أحسن العوازل من حيث النوع وسهولة صناعته.

**كلمات مفتاحية:** مواد تغيير الطور ; الدياتوميت ; COMSOL MULTIPHYSICS.

---

## Résumer

---

La crise économique actuelle associée à la crise énergétique nécessite l'application des solutions afin de réduire la consommation énergétique et d'assurer un développement durable dans le monde. A l'échelle nationale, il est constaté que le secteur du bâtiment en Algérie, est le secteur le plus énergivore. Pour assurer un niveau de confort hygrothermique pour l'individu dans son logement, les fluctuations de température et le taux d'humidité intérieure doivent être optimisés.

L'objectif de notre mémoire est de réduire les pertes énergétiques à travers les murs et les plafonds pour améliorer le confort thermique interne et la consommation d'énergie en étudiant la possibilité d'utiliser un nouveau matériau de contrôle d'humidité, et une tribu de changement d'état physique, constituée de la diatomite et de matériau à changement de phase pour substituer le polystyrène expansé, tandis que ce dernier contient un molécule de synthèse appelé le Hexabromobiphényle, qui a récemment été considéré comme un polluant organique persistant. En revanche, la diatomite est considérée comme un matériau naturel et environnemental très abondant en Algérie, il se caractérise par une faible conductivité thermique et une porosité élevée.

La méthodologie comprenait l'utilisation de la simulation numérique par le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS afin d'atteindre les objectifs susmentionnés. Les résultats obtenus par le programme de simulation nous permettent de réduire les fluctuations de température et d'humidité. L'utilisation d'un panneau isolant à l'extérieur est considérée comme l'un des meilleurs isolants en termes de type et de facilité de fabrication.

**Mots clefs :** matériaux à changement de phase ; diatomite ; COMSOL Multiphysics.

---

# Abstract

---

The current economic crisis, linked to the energy crisis, requires the urgent application of solutions in order to lower the rate of the energy consumption and to ensure a sustainable development in the world. Nationally, it is clearly appeared that the building sector is currently one of the most energy-intensive sectors in Algeria. To ensure the hygrothermal comfort of the individual at home, the thermodynamic fluctuations and the interior humidity should be optimized. The objective of this work is to minimize losses through walls and roofs in order to improve indoor hygrothermal comfort and the energy consumption by studying the ability of using a new moisture control material and a viability of changing the physical state. It consists of diatomite and phase change material to substitute the expanded polystyrene (EPS) which contains a synthetic molecule called hexabromobiphenyl. It's recently considered as persistent organic pollutant. On the other hand, diatomite is valuable, natural and eco-substance in Algeria. It characterize by the low thermal conductivity and the high porosity. The methodology consisted of using a numerical simulation, using COMSOL MULTIPHYSICS software, in order to achieve the objectives mentioned above. The results obtained by the software give us a decrease in temperature and humidity fluctuations. The use of diatomite insulating plate on the outside in the brick is almost the best configuration in terms of cost, nature and feasibility.

**Keywords** : phase change material ; diatomite ; COMSOL MULTIPHYSICS.

---

# Table des matières

---

Remerciement .....	I
Résumer .....	II
Table des matières .....	III
Liste des figures .....	IV
Liste des tableaux.....	V
Nomenclature .....	VI
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1: Bibliographie.....</b>	<b>5</b>
I-1 Introduction.....	6
I-2 La consommation énergétique et l'enveloppe du bâtiment.....	6
I-3 Humidité .....	8
I-4 Les différents types de problème d'humidité dans les bâtiments .....	8
I-5 Désordres causés par l'humidité dans le bâtiment .....	9
I-6 Pathologies au niveau de l'ambiance habitable.....	10
I-6-1 Détérioration de la qualité de l'air intérieur.....	11
I-6-2 Confort hygrothermique des habitants : .....	12
I-6-3 Problèmes de santé liés à l'humidité .....	12
I-7 Caractéristiques des milieux poreux.....	13
I-7-1 Porosité.....	13
I-7-2 Humidité relative .....	14
I-7-3 Teneur en eau et degré de saturation.....	15

I-7-4 Perméabilité .....	15
I-7-5 Pression capillaire - Loi de Laplace et Loi de Kelvin .....	16
I-7-6- Isothermes de sorption .....	17
I-7-7 Phénomène d'hystérésis.....	17
I-8 Transfert de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux.....	18
I-8-1 Mécanismes de transport d'humidité.....	18
I-8-1-1 Transport de vapeur d'eau.....	19
I-8-1-2 Transport d'eau liquide .....	20
I-8-1-3 Transport de l'humidité totale .....	20
I-8-2 Transfert et stockage de chaleur dans les milieux poreux .....	21
I-8-2-1 Stockage d'énergie dans les matériaux de construction .....	21
I-8-2-2 Transfert de chaleur dans les matériaux de construction .....	21
I-8-2-3 Flux de chaleur avec changement de phase .....	21
I-8-3 Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches de bâtiments .....	22
I-8-3-1 Modélisation par homogénéisation.....	22
I-8-3-2 Modélisation phénoménologique.....	22
I-9 Transfert de chaleur et d'humidité aux interfaces dans les bâtiments .....	23
I-9-1 Interaction entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement .....	23
I-9-2 Interaction entre deux couches de la paroi .....	25
I-10 Conclusion.....	26
<b>Chapitre 2: Les matériaux hygroscopiques à changement de phase dans les bâtiments.....</b>	<b>28</b>
II-1 Introduction.....	29
II-2 Les matériaux de contrôle d'humidité (matériaux hygroscopiques).....	29
II-3 Diatomite comme matériau de contrôle d'humidité et d'isolation thermique .....	31
II-3-1 Origine et situation géographique .....	31



II-3-2 Définition .....	32
II-3-3 Domaine d'utilisation .....	33
II-3-4 Propriétés physico chimique .....	33
II-3-5 Classification des kieselguhrs d'après KARPOV .....	34
II-3-6 Analyse microstructurale.....	35
II-4 Le stockage de l'énergie thermique.....	35
II-4-1 Chaleur sensible .....	36
II-4-2 Chaleur latente.....	37
II-4-3 Stockage thermochimique.....	37
II-5 Matériaux à changements de phase (MCPs) .....	39
II-6 Intégration du MCP à l'enveloppe du Bâtiment .....	39
II-6-1 Critères de choix d'un matériau à changement de phase .....	40
II-6-2 Utilisation des MCP pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure du Bâtiment .....	41
II-6-2-1 MCP intégrés dans les murs.....	41
II-6-2-2 MCP intégrés à la toiture. ....	42
II-6-2-3 Protections solaires avec MCP .....	42
II-7 matériaux hygroscopiques à changement de phase (MHCP) .....	43
II-8 Diatomite /MCP comme matériau de construction.....	44
II-9 Application du composite (Diatomite /MCP) dans le bâtiment .....	44
II-10 Conclusion.....	45
<b>Chapitre3: Description du problème physique et modélisation mathématique</b>	<b>46</b>
III-1 Introduction.....	47
III-2 Description du problème physique .....	47
III-3 Modélisation mathématique.....	54
III-3-1 Hypothèses du modèle .....	55

III-3-2 Equations gouvernantes de transfert couplé de chaleur et d'humidité .....	55
III-3-2-1 Transfert d'humidité .....	55
III-3-2-2 Transfert de chaleur .....	57
III-3-2-3 Conditions aux limites .....	57
III-4 Solution numérique.....	58
III-4-1 Etapes de travail de consol multiphysic .....	59
III-4-2 Méthode des éléments finis .....	59
III-4-2-1 Grandes lignes de la méthode .....	59
III-4-2-2 Choix de maillage .....	60
III-4-2-3 Forme Conservative des équations de conservation .....	63
III-5 Conclusion.....	63
<b>Chapitre 4: Discussion des résultats.....</b>	<b>65</b>
IV-1 Introduction .....	66
IV-2 Test de maillage.....	66
IV-3 Validation numérique .....	68
IV-3-1 HAMSTAD benchmark cas n°05 : Isolant intérieur actif par capillarité .....	69
IV-4 Hypothèses .....	71
IV-5 Discussions des résultats .....	71
IV-5-1 Cas n° 01 .....	71
IV-4-2 Cas n° 02.....	82
IV-4-3 Cas n° 03 .....	85
IV-5 Conclusion .....	88
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>89</b>
Références .....	92

---

## Liste des figures

---

Figure I.1 : Construction résidentielle dans le projet de logement social Algérienne [4]. .....	7
Figure I.2 : Structure de la consommation finale d'énergie par produits [Bilan énergétique national 2018]. .....	7
Figure I.3 : Exemples de dégradations causées par l'humidité (Zhong and Braun, 2008) .....	10
Figure I.4 : Plages d'humidité favorable à la croissance de polluants (Roulet, 2004)	11
Figure I.5 : Pertes thermiques du corps humaines [8]. .....	12
Figure I.6 : Représentation schématique d'un milieu poreux .....	13
Figure I.7. Différents types de pores : a- pore isolé, b- pore aveugle, c- pore interconnecté (Malvault, 2013). .....	14
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). .....	16
Figure I.9 : Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en humidité dans les pores. [5].....	19
Figure 1.10 : Illustration des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore [8]. .....	19
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]. .....	20
Figure I.12 : Sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment [8]. .....	23
Figure I.13 : Types de contact possibles entre deux matériaux (VP. De Freitas et al, 1996) .....	25
Figure II-1: Carte géologique de la région ouest avec les principaux gisements. ....	32
Figure II.2 : Site de dépôt de Sig (Algérie).....	33

Figure II-3 : Microstructure de la diatomite [21]. .....	36
Figure II-4 : Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase. .	38
Figure II-5 : Formes de MCP en construction[25]. .....	39
Figure II-6 : Classification des matériaux à changement de phase [24].....	40
Figure III.1 : Mur en brique avec une plaque de diatomite.....	48
Figure III.2 : Mur en brique avec une plaque de diatomite+ paraffine.....	48
Figure III.3 : Mur en brique avec une plaque de mortier. ....	49
Figure III.4 : Isothermes de sorption des matériaux constituant les cas étudiés selon [5,32].....	51
Figure III.5 : Géométrie en 3D du mur en brique avec diatomite sur logiciel COMSOL Multiphysics.....	53
Figure III.6 : Mur en brique avec mortier sur logiciel COMSOL Multiphysics. ....	53
Figure III.7 : Mur en parpaing sur logiciel COMSOL Multiphysics.....	54
Figure IV.1 : Influence des nombres des éléments de volume (NEV) sur les résultats. ....	67
Figure IV.2 : Influence des nombres de pas du temps sur les résultats.....	68
Figure IV.3 : Structure murale multicouche à isolation intérieure active par capillarité [5].....	69
Figure IV.4 : Résultats de Simulation après 60 jours: (a) Profile de l'humidité relative [%]; (b) Profile de la teneur en humidité [ $\text{kg/m}^3$ ] . ....	70
Figure IV.5 : Vue axonométrique des murs typiques en briques creuses.....	71
Figure IV.6: Influence des conditions extérieures de saison chaud ( $T\text{-ext}$ et $HR\text{-ext} = 10\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures. ....	72
Figure IV7 : Influence des conditions extérieures de saison chaud ( $T\text{-ext}$ et $HR\text{-ext} = 90\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures. ....	73
Figure IV.8 : Résultat d'humidité intérieur de la saison chaude avec humidité extérieur de 10% .....	74

Figure IV.9 : Résultat de température intérieur de la saison chaude avec humidité extérieur de 10% .....	74
Figure IV.10: Résultat d'humidité intérieur de la saison chaude avec humidité extérieur de 90% .....	75
Figure IV.11 : Résultat de température intérieur de la saison chaude avec humidité extérieur de 90% .....	75
Figure IV.12 : Influence des conditions extérieures saison froide (T-ext et HR-ext = 10%) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures. ....	78
Figure IV.13 : Influence des conditions extérieures saison froide (T-ext et HR-ext = 90%) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures. ....	79
Figure IV.14 : Résultat d'humidité intérieur de la saison froid avec humidité extérieur de 10%. ....	79
Figure IV.15 : Résultat de température intérieur de la saison froide avec humidité extérieur de 10%. ....	80
Figure IV.16 : Résultat d'humidité intérieur de la saison froid avec humidité extérieur de 90%. ....	80
Figure IV.17 : Résultat de température intérieur de la saison froide avec humidité extérieur de 90% .....	81
Figure IV.18 : Vue axonométrique d'un mur typique en parpaing.....	82
Figure IV.19 : Influence des conditions extérieures saison chaude (T-ext et HR-ext = 10%) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures de brique et parpaing.....	82
Figure IV.20 : Influence des conditions extérieures saison chaude (T-ext et HR-ext = 90%) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures de brique et parpaing.....	84
Figure IV.21 : Vue axonométrique d'un mur typique en brique avec isolation extérieur et dans les cavities d'air. ....	85
Figure IV.22 : Vue axonométrique d'un mur typique en parpaing avec isolation extérieur et dans les cavities d'air.....	85

Figure IV.23 : Influence des conditions extérieures saison chaude ( $T_{\text{ext}}$ et $HR_{\text{ext}} = 10\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures de brique plein, parpaing plein et brique vide. ....	86
Figure IV.24 : Influence des conditions extérieures saison chaude ( $T_{\text{ext}}$ et $HR_{\text{ext}} = 90\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures de brique plein, parpaing plein et brique vide. ....	87

---

## Liste des tableaux

---

Tableau I.1 Consommation nationale par agrégat (Source : Ministre de l'énergie Bilan énergétique) .....	8
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] .....	18
Tableau II.1 : Application de matériaux de contrôle d'humidité dans le bâtiment. Z. Rao et al, 2012 [5].....	31
Tableau II-2 : Composition chimique du kieselguhr de différentes régions du monde. ....	34
Tableau II-3 : classification du kieselguhr selon les normes Russe (KARPOV, 1979).. ..	35
Tableau III.1: Propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés[5,31,32,33,34,35,36]. ....	500

# 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> ]
$K_{r,i}$	Perméabilité relative à la phase $i$	
$P_c$	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> )]
$S_e$	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	$[\text{J}/(\text{kg}.\text{K})]$
$d\overrightarrow{Q}_{\text{cond}}$	Le flux de chaleur élémentaire traversant une surface $dS$	$[\text{W}]$
$\overrightarrow{q}_{\text{cond}}$	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 liquide	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$Q_{\text{w}}$	un terme source	$[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$
$T_{\text{int}}$	température intérieur	$[^{\circ}\text{C}]$
$h_{\text{int}}$	coefficient de transfert de chaleur intérieur	$[\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})]$
$T_{\text{ini}}$	la température initiale	$[^{\circ}\text{C}]$
$\varphi_{\text{ini}}$	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	$[\text{m}]$
$n_{\text{p}}$	nombre d'épaisseur de parpaing	

$e_{ap}$	épaisseur de lame d'air de parpaing	[m]
$R_p$	résistance de parpaing	$[(m^2.K)/W]$
$R_b$	résistance de brique	$[(m^2.K)/W]$
$e_d$	épaisseur de diatomite dans brique	[m]
$n_d$	nombre d'épaisseur de diatomite dans brique	
$e_{dp}$	épaisseur de diatomite dans parpaing	[m]
$R_{bp}$	la résistance de brique plein	$[(m^2.K)/W]$
$R_{pp}$	la résistance de parpaing plein	$[(m^2.K)/W]$
$c_s$	capacité thermique spécifique du matériau de construction sec	$[J/(Kg.K)]$
$c_e$	capacité thermique spécifique de l'eau	$[J/(Kg.K)]$
$e_b$	épaisseur de brique	[m]
$n_b$	nombre d'épaisseur de brique	
$e_a$	épaisseur de lame d'air de brique	[m]
$n_a$	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]
$ap$	Le coefficient d'absorptivité aux précipitations	
$m$	La fraction massique de vapeur d'eau	
<b>Symbole</b>		
$\epsilon_{tot}$	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	$[m/s]$
$\gamma^\omega$	Coefficient de diffusion dépendant du scalaire transportée	
$S_\emptyset$	Terme source relatif à la variable $\emptyset$	

---

# Introduction générale

---

En 2013, au Québec, le secteur résidentiel comptait pour 19 % de la consommation d'énergie. Une proportion de 63,7 % de ce pourcentage était consacrée au chauffage résidentiel (Gouvernement du Québec, 2014). Au rythme actuel de la consommation, les réserves prouvées d'énergie sont de quelques centaines d'années pour le pétrole et le gaz. Si, au lieu de raisonner à consommation constante (ce qui est évidemment faux), on tient compte de l'augmentation annuelle de la demande, dans quelques dizaines d'années l'ensemble des réserves prouvées sera épuisé.

En effet, pour s'adapter, nos systèmes de production et de consommation d'énergie doit être changer. Ces transformations seront longues : bâtiments, machines, véhicules, sont conçus pour durer plusieurs décennies. On peut effectivement se demander pourquoi essayer de rénover des bâtiments pour réduire leur consommation de chauffage à la moitié de celle des constructions neuves actuelles ou pourquoi construire des bâtiments à Energie ?

Les déperditions par renouvellements d'air représentent une part importante de la consommation énergétique des bâtiments. Les installations de chauffage et de climatisation ont pour rôle principal d'assurer le confort et le bien-être de l'homme dans le local où il se trouve en parlant santé, joie de vivre, efficacité au travail. Il est donc de première importance que les techniciens en Génie Climatique connaissent les bases du confort physiologique et donc son influence sur l'organisme humain. Cette notion de confort est sous-estimée dans notre pays, un projet couvre essentiellement les phases d'études 'architecturales, conceptuelles et structurelles', mais aucune ne s'intéresse à l'étude du bilan thermique et à l'analyse des transferts aérauliques dans les locaux.

Un bâtiment mal isolé laisse s'échapper la chaleur en hiver et perd rapidement sa fraîcheur en été. Une mauvaise isolation thermique des murs peut faire perdre jusqu'à 25% de la chaleur du logement, ce chiffre atteignant 30% pour une isolation des combles faible ou inexistante. Grâce à une isolation performante, les factures de chauffage ou de climatisation liées à ces déperditions thermiques baissent drastiquement. Ainsi, effectuer des travaux d'isolation thermique permet de réduire jusqu'à 80% les consommations d'énergie liées au chauffage. En limitant les besoins en énergie du logement, l'isolation thermique est l'accès principal aux économies

d'énergie, bien avant le renouvellement des équipements de chauffage et/ou de refroidissement du logement.

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 vie. L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) introduits dans l'enveloppe des bâtiments absorbe une grande quantité de chaleur durant les heures chaudes de la journée et se transforme progressivement de l'état solide à l'état liquide d'une façon isotherme, ce qui empêche l'entrée du flux de chaleur à l'intérieur des habitats et favorise l'isolation thermique. Durant les heures de la nuit la température baisse au-dessous de la température de fusion du MCP, ce dernier dégage de la chaleur dans l'enveloppe du bâtiment et redevient solide pour qu'il recommence le cycle de fusion/solidification durant les 24 heures suivantes.

La fluctuation d'humidité relative conduit à un inconfort thermique dans le cadre de vie. Des études montrent que le maintien d'un taux d'humidité relative à l'intérieur de 40% à 60% est le milieu de vie le plus confortable. Les matériaux de contrôle de l'humidité (MCH) sont des matériaux à structures poreuses, capables d'absorber ou de libérer automatiquement l'humidité, sans source d'alimentation ni équipement mécanique, en raison de leur sensibilité aux variations d'humidité relative et de la température ambiante.

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 projet de fin d'étude on va 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 :

- **Premier chapitre** : présente l'importance de contrôler la consommation énergétique dans le secteur des bâtiments. Les différents types de problème

d'humidité dans les bâtiments. Présente aussi quelques notions sur les caractéristiques des milieux poreux, le transfert de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux et le transfert de chaleur et d'humidité aux interfaces dans les bâtiments.

- **Deuxième chapitre** : constitue des définitions et des généralités sur les matériaux de contrôle d'humidité (matériaux hygroscopiques). L'application de la diatomite dans le domaine de construction. Le stockage de l'énergie thermique. Les matériaux à changements de phase (MCPs). Et l'application de la diatomite /MCP comme matériau de construction et leurs différentes applications dans les bâtiments.
- **Troisième chapitre** : est consacré à la description du problème physique abordé dans cette thèse ; les formulations mathématiques pour la modélisation (les équations gouvernante), et enfin la solution numérique.
- **Quatrième chapitre** : ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats de simulations numériques effectués pour différentes configurations. En premier cas, la possibilité d'utiliser la diatomite et la diatomite/ paraffine comme plaque isolante (intérieur et extérieur) a été étudié et analysé. Ensuite, une comparaison entre l'utilisation de la brique ou le parpaing comme murs de construction. Le troisième cas présente une configuration qui peut être la solution efficace pour l'isolation en utilisant la diatomite comme isolant.

Enfin, on termine par une conclusion générale qui réunit tous les résultats développés dans les chapitres précédents.



---

# Chapitre 1 : Bibliographie

---

## **I-1 Introduction**

Les préoccupations environnementales actuelles incitent à construire des bâtiments performants d'un point de vue énergétique. La notion de performance d'un bâtiment repose, sur une limite de consommation des énergies utilisées 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 chauffage ou de refroidissement. Les pertes thermiques de l'enveloppe concernent plusieurs postes : les déperditions à travers les parois opaques (murs, planchers hauts, planchers bas..) représentent 46% de déperditions totale, les déperditions à travers les parois vitrées et les déperditions par une filtration d'air[1].

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

La principale difficulté est soulignée par le fait que les matériaux de construction sont des milieux poreux avec une structure complexe. Les pores peuvent contenir de l'humidité (vapeur d'eau, eau absorbante ou capillaire et glace) et de l'air sec. Pendant les saisons hivernales, l'eau de pluie s'infiltré à travers les parois poreuses constituant les murs et le toit des bâtisses provoquant des conditions inconfortables, non hygiéniques, et modifie les charges liées au chauffage et refroidissement.

Afin de mieux comprendre le phénomène de transfert hygrothermique dans les matériaux de construction poreux, nous présentons dans ce chapitre l'impact de transfert hygrothermique liés à la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment.

## **I-2 Consommation énergétique et l'enveloppe du bâtiment**

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

en Algérie, il absorbe 41 % de la consommation totale d'énergie finale, selon l'APRUE (Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie [APRUE, 2019] [3].

La plupart des bâtiments Algérienne anciens et nouveaux sont construits sans prendre en considérations les aspects énergétiques et environnementaux. Cela engendre une augmentation de l'utilisation du système de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) utilisé pour contrôler la température et l'humidité relative de l'environnement intérieur de l'enveloppe du bâtiment, traduisant une augmentation de la consommation d'électricité et du gaz [4].



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

Selon le bilan énergétique national de 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 :

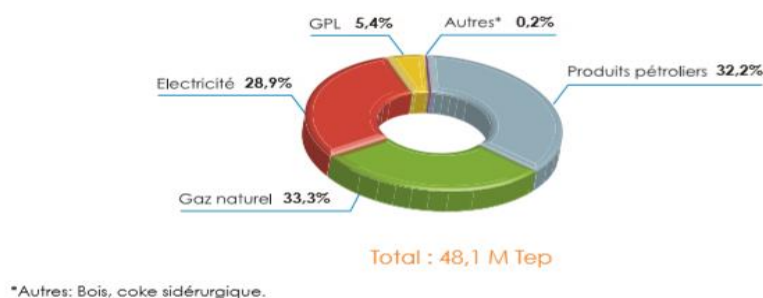


Figure I.2 : Structure de la consommation finale d'énergie par produits [Bilan énergétique national 2018].

Selon ce dernier, La consommation finale est passée de 44.6 M Tep en 2017 à 48,1 M Tep en 2018, reflétant une hausse de 3,5 M Tep, soit (+7,8%), 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 2017 et 2018 est détaillée dans le tableau suivant :

produit	2017 [K Tep]	2018 [K Tep]	évolution	
			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 5.6 millions en 2018, soit plus de 400 mille nouveaux clients [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, etc.). Dans l'air elle peut se mesurer grâce à un hygromètre à cheveu 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. Celle-ci peut être sous forme de liquide, de vapeur d'eau.

### I-4 Différents types de problème d'humidité dans les bâtiments

L'humidité dans les bâtiments peut avoir différentes causes :

#### Humidité ascensionnelle :

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

#### **Infiltration d'eau :**

S'il y a des taches d'humidité clairement visibles sur les murs extérieurs ou intérieurs, vous avez à faire à de l'infiltration d'eau. Ce type de problème d'humidité se passe surtout dans des bâtiments plus anciens où le revêtement de mur (briques ou plâtre) est devenu poreux au fil des années.

#### **Humidité de condensation :**

Un problème d'humidité n'est pas toujours dû aux erreurs dans la structure du bâtiment. Des facteurs internes, comme un manque de ventilation, peut être à l'origine de l'humidité dans la maison. Ce type de problème d'humidité est causé par une grande quantité de vapeur d'eau produite en faisant la cuisine ou en prenant une douche ou un bain.

Si la vapeur d'eau ne peut pas être évacuée d'une façon appropriée, la vapeur d'eau se dépose sur les murs avec tout ce qui s'ensuit.

#### **Humidité de construction :**

Lors de la construction d'une maison traditionnelle, beaucoup de l'eau est utilisée. Le séchage complet d'une maison peut durer plus d'un an et peut avoir des conséquences désagréables si on n'en a pas tenu compte. Il peut se passer que le plâtre se détache et des moisissures peuvent apparaître dans les espaces humides [7].

### **I-5 Désordres causés par l'humidité dans le bâtiment**

L'humidité a une action directe et indirecte sur l'enveloppe du bâtiment. En effet, dans un environnement présentant une hygrométrie défavorable, plusieurs pathologies peuvent se manifester au niveau de la paroi du bâtiment. Ces dégradations sont ou bien d'ordre structurel comme la baisse des performances mécaniques et la détérioration dû au phénomène gel/dégel ainsi que la variation dimensionnelle. Elles peuvent être aussi d'ordre biologique et chimique comme le développement des moisissures à la surface de la paroi ou encore la corrosion des structures métalliques. La Figure 1.3 donne quelques exemples des désordres et problèmes causés par l'humidité. Les principales pathologies liées à l'humidité au niveau l'enveloppe sont détaillés dans ce qui suit.



Corrosions des aciers



Détérioration du plafond



Apparition de moisissures



Fissurations



Désordres dus au cycle gel/dégel

Figure I.3 : Exemples de dégradations causées par l'humidité (Zhong and Braun, 2008)

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

La température et l'humidité de l'air intérieur représentent les facteurs principaux qui influent directement sur le confort et le bien être des occupants. D'un autre côté, des conditions hygrothermiques intérieures défavorables favorisent l'apparition et le développement d'agents biologiques nocifs.



### 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 tendances 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 et al., 2013a), la figure montre que la plage d'humidité optimale pour une bonne qualité d'air intérieur est entre 40% et 60%.

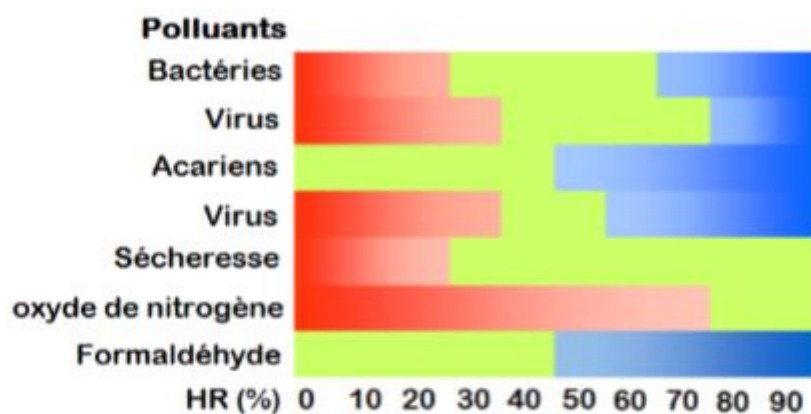


Figure I.4 : Plages d'humidité favorable à la croissance de polluants (Roulet, 2004)

### I-6-2 Confort hygrothermique des habitants :

Le confort hygrothermique est défini par la société américaine ASHRAE « American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers » comme l'ensemble des conditions requises pour assurer une satisfaction et un bien être des occupants. Le confort hygrothermique est une notion complexe qui dépend de plusieurs variables de natures différentes (physiologique, psychologique et physique ...) [8].

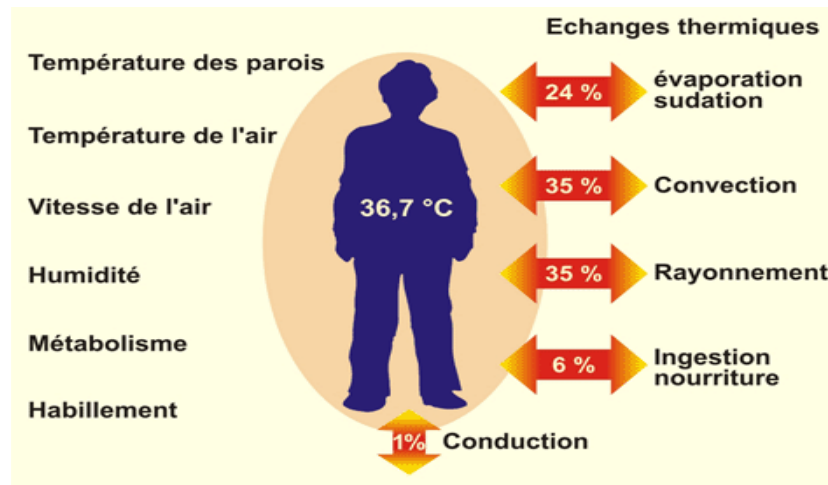


Figure I.5 : Les pertes thermiques du corps humaines [8].

### I-6-3 Problèmes de santé liés à l'humidité

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

- Problèmes respiratoires, comme la respiration sifflante, et difficulté à respirer ;
- Congestion nasale et des sinus ;
- Brûlure et larmolement des yeux ;
- Sécher, la toux sèche ;
- Gorge irritée ;
- Irritation du nez et de la gorge ;
- Essoufflement ;
- Irritation de la peau ;
- Problèmes d'humeur. [5]



## I-7 Caractéristiques des milieux poreux

Dans le domaine de la physique du bâtiment, les matériaux de construction sont considérés comme des milieux poreux où se produisent les différents phénomènes de transferts et d'échanges de masse et de chaleur.

Un milieu poreux est composé d'une matrice solide rigide comportant des cavités et des pores isolés ou reliés, formant ainsi un espace poreux qui peut être occupé par un ou plusieurs fluides, sous forme liquide ou gazeuse (Daïan, 2013) (Figure 1.6). Généralement un milieu poreux est décrit par différentes grandeurs caractéristiques qui donnent des informations sur l'espace poral total disponible (porosité et distribution des pores) et sa géométrie (tortuosité et connectivité).

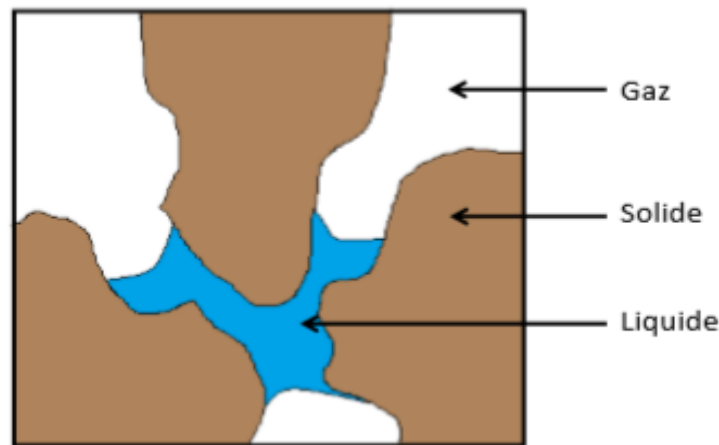


Figure I.6 : Représentation schématique d'un milieu poreux

### I-7-1 Porosité

Un milieu poreux comporte des vides, appelés pores susceptibles ou non de contenir des gaz ou des liquides. La géométrie et la densité de ces pores est fonction du type de matériau. La porosité totale est définie par le rapport entre le volume des pores, et le volume total, ou volume apparent du matériau. Le volume total est par ailleurs composé du volume solide et du volume des pores.

$$\rightarrow \varepsilon_{\text{tot}} = \frac{V_p}{V_0} = \frac{V_p}{V_p + V_s} \quad (I.1)$$

L'ensemble des pores est constitué de :

- Pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de matière dans le matériau.

- Pores aveugles ou bras morts qui sont connectés uniquement par une voie. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.
- Pores isolés qui ne communiquent pas avec le milieu extérieur (figure I.7).

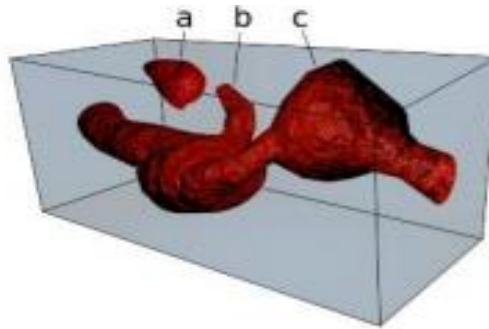


Figure I.7. Différents types de pores : a- pore isolé, b- pore aveugle, c- pore interconnecté (Malvault, 2013).

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  $\varepsilon_{\text{tot}}$  (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.
- Mésopores : ou pores capillaires, avec un diamètre de 2-50 nm.
- Macropores : 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 porosimétrie au mercure.
- La pycnométrie : elle consiste à déterminer la masse volumique apparente à partir de la pénétration d'un fluide dans les pores ouverts (Wade, 2013).
- La stériologie : 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  $\varphi(\%)$  :

$$\text{➤ } RH = \varphi = \frac{v}{v_{\text{sat}}} = \frac{P_v}{P_{v,\text{sat}}} \quad (\text{I.2})$$

La pression de vapeur saturante ( $P_a$ ) est dépendante de la température avec une relation empirique, validé pour  $0 < T < 80$  [°C] avec une précision de  $\pm 0.15$  % (R. Peuhkuri, 2003) :

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

Où 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>] :

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

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

Le degré de saturation capillaire est également 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 :

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

### 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 (Geraud, 2000). La vitesse de filtration  $\vec{v}$  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) :

$$\text{➤ } \vec{v} = - \frac{K_{\text{eff}}}{\mu} \sigma \vec{p} \quad (\text{I.7})$$

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

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

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 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.

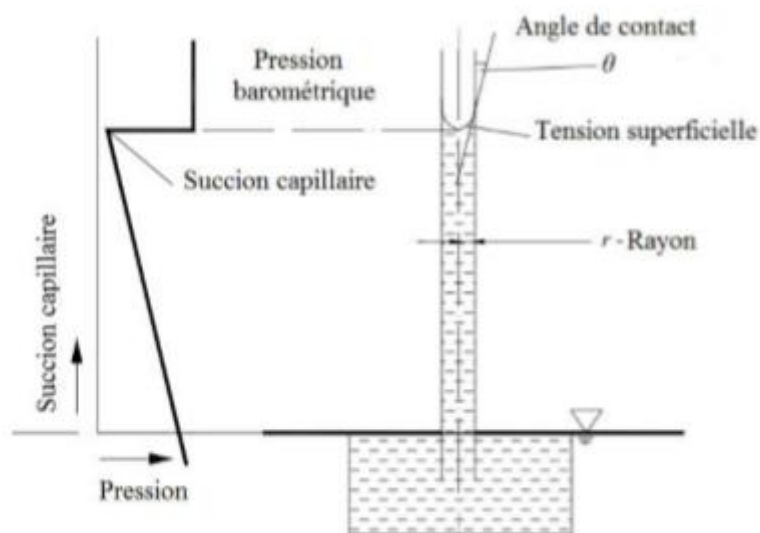


Figure I.8 : Vue schématique de la colonne d'eau (à gauche) et des conditions de pression (à droite) dans un capillaire cylindrique (HM. Künzle, 1995).

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 :

$$\triangleright P_c = P_g - P_l \quad (\text{I.9})$$

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

$$\triangleright P_c = P_g - P_l = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_p} \quad (\text{I. 10})$$

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 :

$$\triangleright P_c = \frac{R.T.\rho_w}{M_w} \ln\left(\frac{v}{v_s}\right) \quad (\text{I. 11})$$

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

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

### I-7-7 Phénomène d'hystérésis

Le phénomène de désorption est fréquemment décrit comme l'inverse du processus d'adsorption. Néanmoins, lors des expérimentations, une dissymétrie apparaît toujours entre les isothermes de sorption et de désorption, elle est nommée hystérésis (Hamaker et Thompson, 1972b). 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 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]

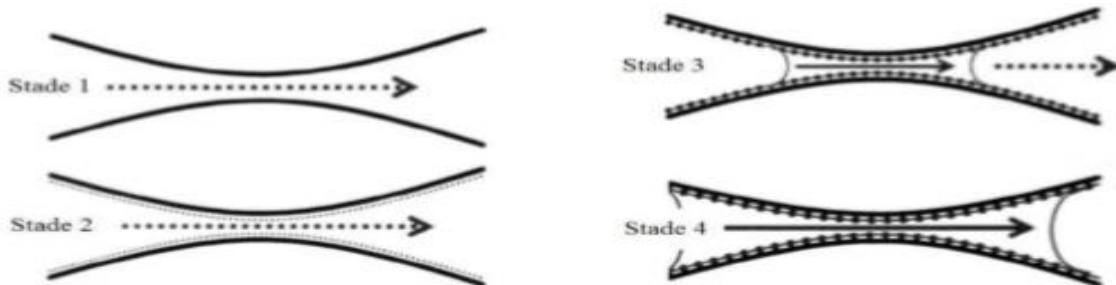


Figure I.9 : Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en humidité dans les pores. [5]

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

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].

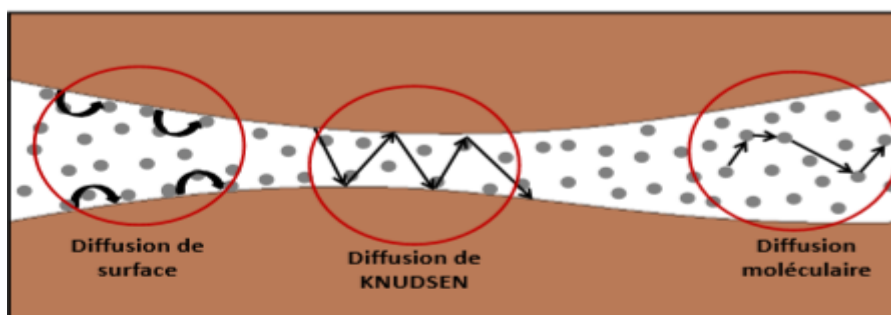


Figure 1.10 : Illustration des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore [8].

### 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

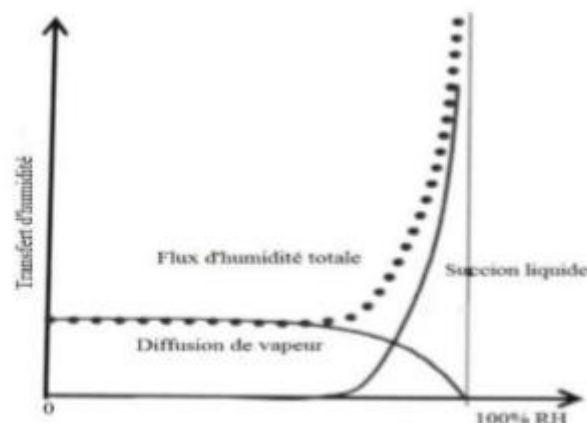


Figure I.11: Transport d'humidité dans un système de pores combinant la diffusion de vapeur et le transport de liquide (LO. Nilsson, 2004) [5].



## I-8-2 Transfert et stockage de chaleur 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°C et 40°C, l'enthalpie varie linéairement avec la variation de la température. L'enthalpie d'un matériau de construction sec est décrite par l'équation :

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

### 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  $d\overrightarrow{Q}_{\text{cond}}$  traversant une surface  $dS$  est proportionnel au gradient de la température  $T$ .

$$\triangleright d\overrightarrow{Q}_{\text{cond}} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot ds = \overrightarrow{q}_{\text{cond}} \cdot ds \quad (\text{I.13})$$

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 :

$$\triangleright S_h = h_{l,v} \cdot \nabla j_p \quad (\text{I.14})$$

### **I-8-3 Modélisation des transferts couplés 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 trois types de méthodes :

- Homogénéisation par prise de moyenne (Whitaker, 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) .

#### **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 ou 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. Ferroukhi 2015] [5].

### I-9 Transfert de chaleur et d'humidité aux interfaces dans les bâtiments

Les modèles de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité décrits précédemment sont valables au niveau du matériau poreux lui-même. En revanche, au niveau du contour et à limite du domaine d'application des modèles d'autres phénomènes décrits avec d'autres équations rentrent en jeu dans la modélisation. Dans le cas d'une modélisation macroscopique des transferts hygrothermiques aux niveaux des parois multicouches, deux types de conditions aux limites sont distingués. Le premier est à l'interface entre la paroi et l'air (intérieur ou extérieur) et le deuxième c'est l'interface entre deux couches successives de matériaux différents d'une paroi multicouche.

#### I-9-1 Interaction entre l'enveloppe du bâtiment et l'environnement

En considérant une paroi extérieure, les deux faces de cette paroi sont exposées à deux environnements différents, l'environnement climatique extérieur et l'ambiance habitable intérieure.

Concernant l'environnement extérieur, la paroi est soumise, en plus des variations de températures et 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 de température et d'humidité relative, au rayonnement de grande longueur d'onde ainsi qu'à la convection naturelle ou forcée selon la stratégie de ventilation adoptée. La Figure I.12 résume les phénomènes se déroulant aux interfaces intérieure et extérieure de la paroi.

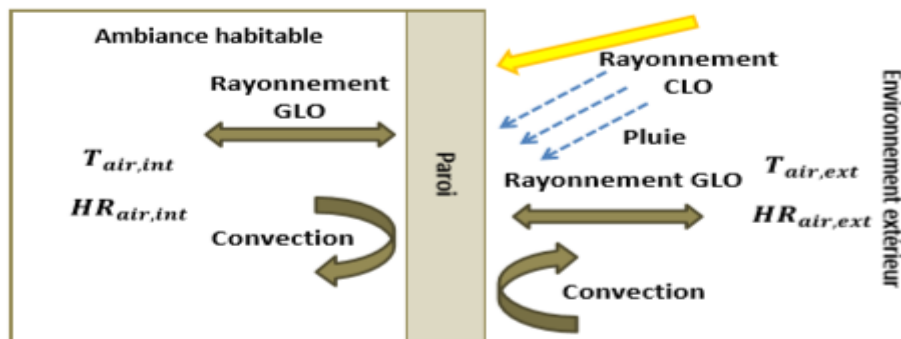


Figure I.12 : Sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment [8].

### 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 extérieur de la paroi ( $S_e$  [ $W/m^2$ ]) est exprimé comme suit (H. Janssen et al, 2007) [12].

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

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] :

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

### 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 et de masse comme suit :

$$\text{➤ } Q_{\text{conv}} = h_c (T_{\text{air}} - T_{\text{surf}}) \quad (\text{I.17})$$

$$\text{➤ } H_{\text{conv}} = h_m (P_{V,\text{air}} - P_{V,\text{surf}}) \quad (\text{I.18})$$

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 :

$$\text{➤ } J_{l,\text{pluie in filitée}} = a_p \cdot J_{l,\text{pluie}} \quad (\text{I.19})$$

### I-9-2 Interaction entre deux couches de la paroi

Les parois de bâtiment sont généralement constituées de plusieurs couches de matériaux possédant des propriétés hygrothermiques différentes. Les conditions aux limites aux niveaux des interfaces entre deux couches successives sont définies selon la nature du contact entre les deux couches. Trois types de contact entre deux couches d'une paroi (figure I.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.

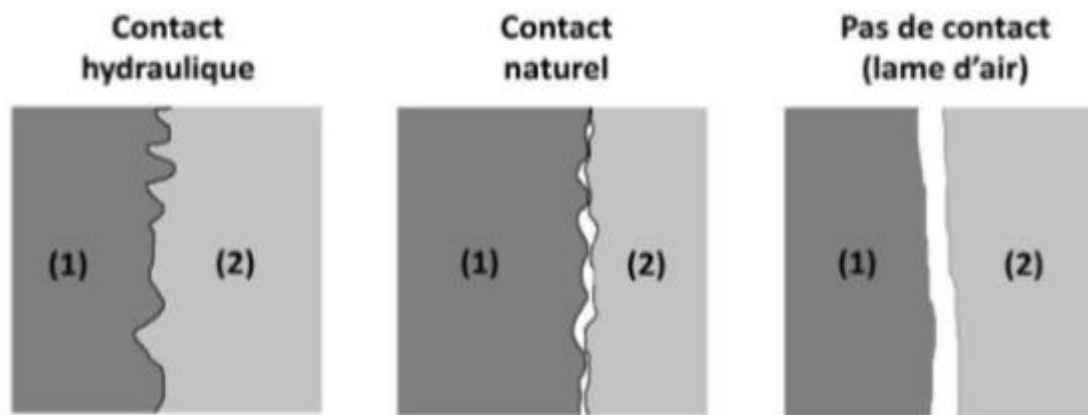


Figure I.13 : Types de contact possibles entre deux matériaux (VP. De Freitas et al, 1996)

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 :

$$\text{➤ } T_1^{\text{interface}} = T_2^{\text{interface}}$$

$$\text{➤ } p_{v,1}^{\text{interface}} = p_{v,2}^{\text{interface}}$$

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.

$$\triangleright J_{\text{interface}} = - \frac{HR_1^{\text{interface}} - HR_2^{\text{interface}}}{R_{\text{hydrique}}} \quad (\text{I. 20})$$

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).

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

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.

---

# **Chapitre 2 : Matériaux hygroscopiques à changement de phase dans les bâtiments**

---



## II-1 Introduction

Le développement des matériaux poreux et les matériaux à changement de phases nécessitent une connaissance approfondie de leurs propriétés physiques. Lorsqu'ils sont utilisés comme isolant thermique, la propriété qui gouverne leur pouvoir d'isolation est la conductivité thermique. La présence de pores dans les matériaux contribue à diminuer la conductivité thermique augmentant ainsi ses facultés d'isolation.

Dans ce chapitre, nous donne une revue sur les matériaux à changement de phase comme 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 sera présentés. On utilisant un matériau naturelle écologique appelé "Diatomite ", qui 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%
Sépiolite	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 d'eau inférieures à la saturation	La nouvelle méthode de synthèse des zéolithes pourrait être appliquée de manière générale
Silice-n Méso- structuré	Synthétisé à l'aide de silice sublimée et de tensioactif alkylammonium quaternaire	La teneur maximale en eau adsorbée est comprise entre 40 et 90%.
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	A montré une grande capacité d'absorption d'eau (27.4%)

	monomères principaux et de monomères fonctionnels.	
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 comme matériau de contrôle d'humidité et d'isolation thermique

#### II-3-1 Origine 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 SudEst de la ville de Sig, à 50 km de la ville d'Oran et à 40 km de la ville de Mascara.

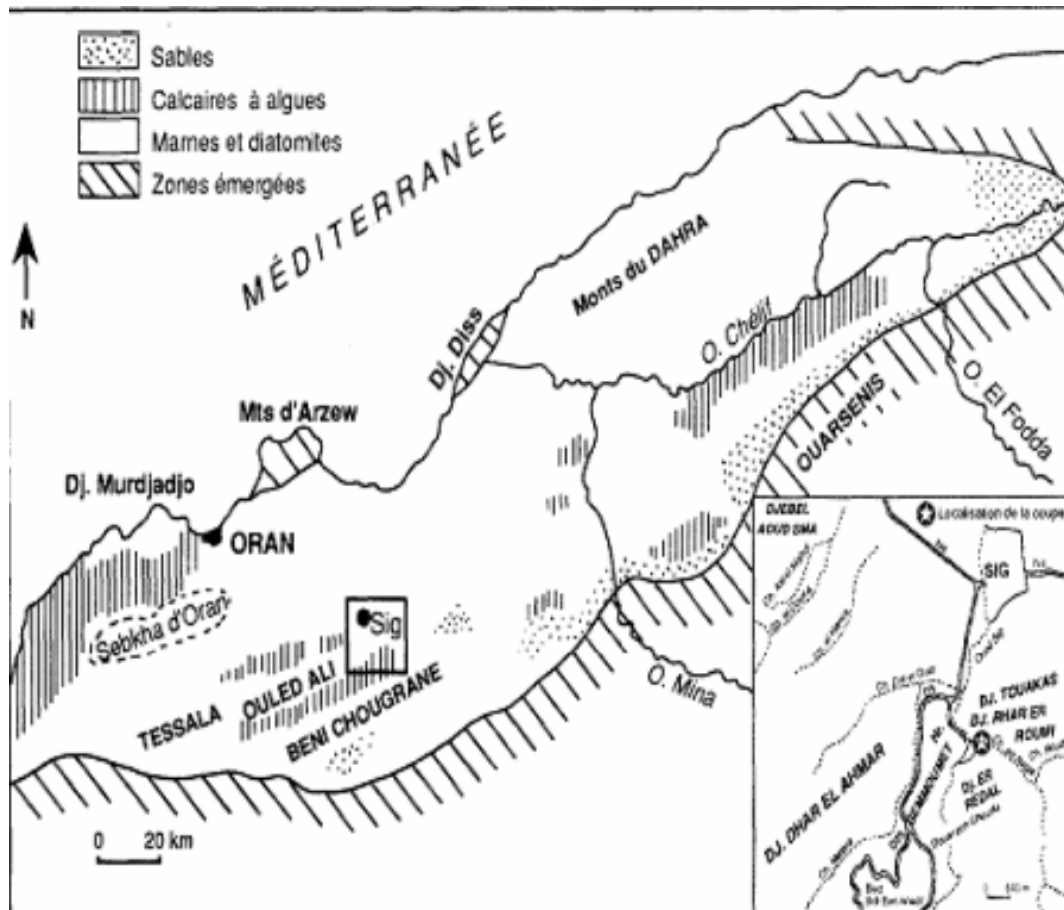


Figure II-1 : Carte géologique de la région ouest avec les principaux gisements.

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 appelée aussi terre à diatomées et kieselguhr est une roche sédimentaire légère constituée de coquilles fortement poreuses. Les diatomées sont des micro-organismes unicellulaires de type algue de taille généralement comprise entre 10 et 15  $\mu\text{m}$ , ayant une coque fortement siliceuse. C'est une roche de couleur claire. 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). En Algérie les réserves géologiques sont estimées à 6 500 000 [T] au Sig (ville de Mascara).



Figure II.2 : Site de dépôt de Sig (Algérie).

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

Le kieselguhr est utilisé 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 filtrer diverses boissons alcoolisées, le sucre, l'huile, des produits chimiques organiques/inorganiques et de l'eau. On s'en est déjà servi également pour éliminer les bactéries et les virus de l'eau des réseaux publics de distribution. Son inertie chimique, sa surface spécifique élevée et sa capacité d'absorber jusqu'à trois fois son poids de liquide sont des propriétés qui, lorsqu'elles sont réunies, rendent ce minéral utile comme support pour pesticides, comme absorbant dans les litières pour animaux domestiques et comme matière permettant d'absorber du pétrole déversé.

### II-3-4 Propriétés physico chimique

Le kieselguhr est constitué 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 présentée 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 du kieselguhr de différentes régions du monde.

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 kieselguhrs d'après KARPOV

Les normes Russes ont classé les diatomites (Kieselguhrs) en fonction de la teneur en principaux minéraux, ainsi que l'humidité et le poids volumique comme suit [21]



Composants	1 <sup>ere</sup> qualité	2 <sup>eme</sup> qualité	3 <sup>eme</sup> 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 du kieselguhr selon les normes Russe (KARPOV, 1979).

### II-3-6 Analyse microstructurale

Les propriétés importantes des diatomites sont liées à leur structure physique qui forme un agrégat de fines particules perforées suivant un motif régulier de petits pores (Figure II-3). En raison de cette porosité qui lui octroie une forte perméabilité [22], la diatomite est intensivement utilisée dans les industries alimentaires comme agent de filtration d'eau, des jus d'extraction des sucreries, du vin et de l'huile, dans le but d'enlever les bactéries et les protozoaires. Elle constitue également des supports chromatographiques. D'autre part, par la présence de la silice opaline ultra fine et amorphe, elle est utilisée comme source de silice réactive. Suivant les conclusions précédentes, la nature amorphe de la diatomite et sa structure fortement poreuse vont induire une forte diffusion des phonons et une faible conductivité thermique. C'est ces caractéristiques qui définissent son application dans l'isolation thermique.

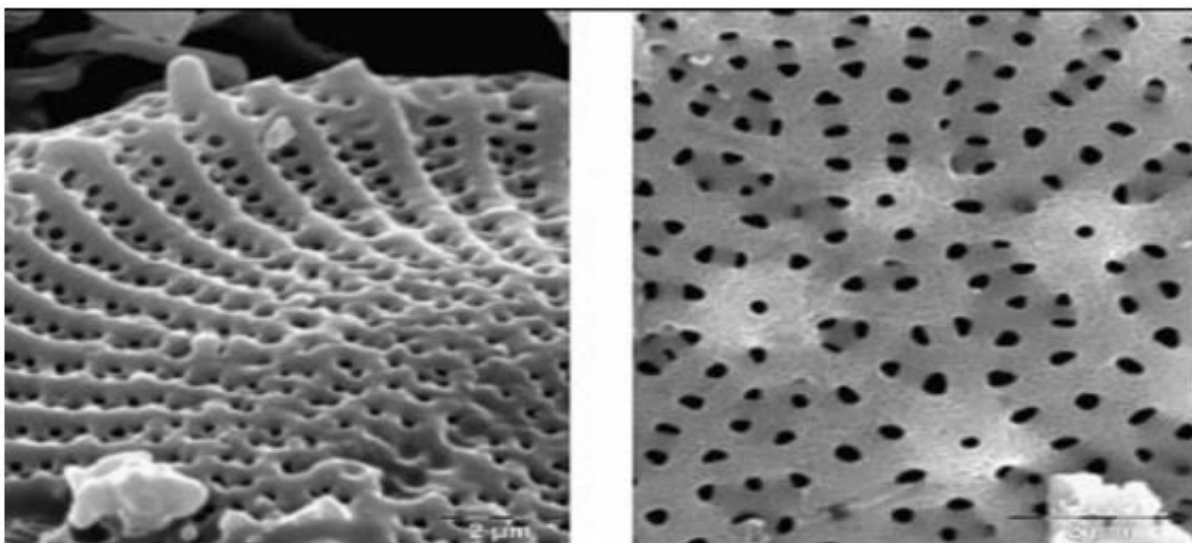


Figure II-3 : Microstructure de la diatomite [21].

## 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] :

$$\text{➤ } H_2 - H_1 = m c (T_2 - T_1).$$

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 :

$$\text{➤ } Q = m L_f$$

Dans la pratique, il se peut que la chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans les processus thermiques. En effet, si on considère qu'un constituant servant de stockage est initialement à la température  $T_1$ , qui est inférieure à la température de fusion  $T_f$  et que  $T_f$  soit inférieure à la température finale  $T_2$  ( $T_1 < T_f < T_2$ ), le stockage se fera sous forme sensible et sous forme latente.

Le stockage par chaleur latente est ainsi performant pour stocker de grandes quantités d'énergie lorsque les masses et l'écart de température sont faibles. Cependant, ce type de stockage oblige à recourir à des technologies très élaborées.

Les principaux constituants employés pour le stockage par chaleur sensible sont des liquides (eau) ou des solides (pierres) possédant des chaleurs spécifiques importantes.

### **II-4-3 Stockage thermochimique**

Le stockage thermochimique met en jeu l'énergie absorbée au cours d'une réaction chimique endothermique. Lors d'un réchauffement, l'équilibre chimique est perturbé et celui-ci se déplace vers la droite (sens de réaction). Lorsqu'il y a contact avec une source dont la température est plus basse que celle au départ, le déplacement de l'équilibre chimique est observé dans le sens inverse. Dans le premier cas, l'énergie est stockée et dans le second elle est déstockée. D'après [Dumas, 2002], le déplacement de l'équilibre est généralement insuffisant et le gain d'énergie est inférieur à 10 % de l'énergie de 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.

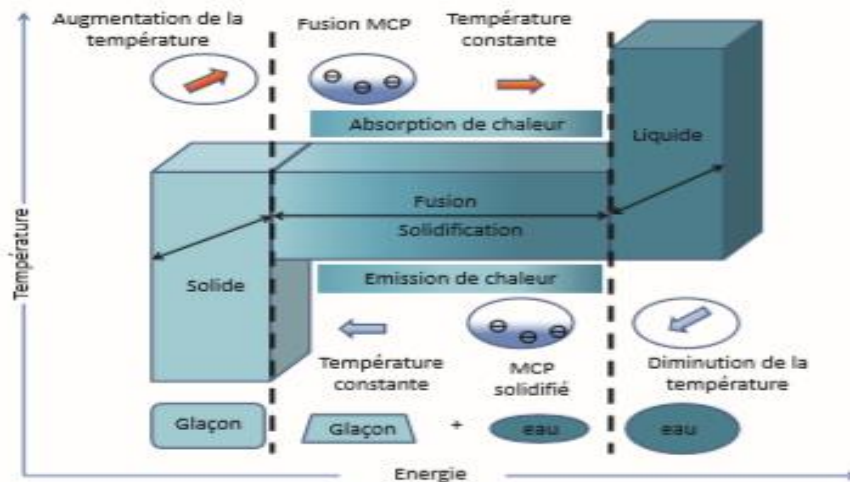


Figure II-4 : Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.

Dans les bâtiments, il s'agit du même principe. Dès que la température du matériau à changement de phase atteint sa température de fusion, il commence à fondre et va absorber une partie de l'énergie qui l'entoure à fin de la stocker en grande quantité et, dès que la température devient inférieure, l'énergie stockée est restituée. Cette transition de phase est facilitée par l'augmentation de la surface d'échange entre le MCP et l'air ambiant. Généralement, il est intégré au sein des constituants d'une paroi pour faire diminuer les pics de température d'une pièce et de limiter l'utilisation de systèmes coûteux en énergie. Le MCP peut être couplé avec un système de ventilation nocturne où à une climatisation de dimensionnement réduite, pour qu'il puisse se générer plus efficacement (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 thermodynamique complexe, soumis à des sollicitations internes et externes. Les sollicitations externes représentent les conditions climatiques telle la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Les sollicitations 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, particulièrement sa résistance thermique et sa capacité calorifique. L'ambiance dans une pièce est ressentie comme confortable quand les variations de température dans l'espace sont minimales, d'un endroit à l'autre, ou dans le temps et cela soit pendant la journée soit d'une saison à l'autre. La façon de créer cette sensation de confort dans une construction est l'utilisation de matériaux contenant 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 MCP 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.

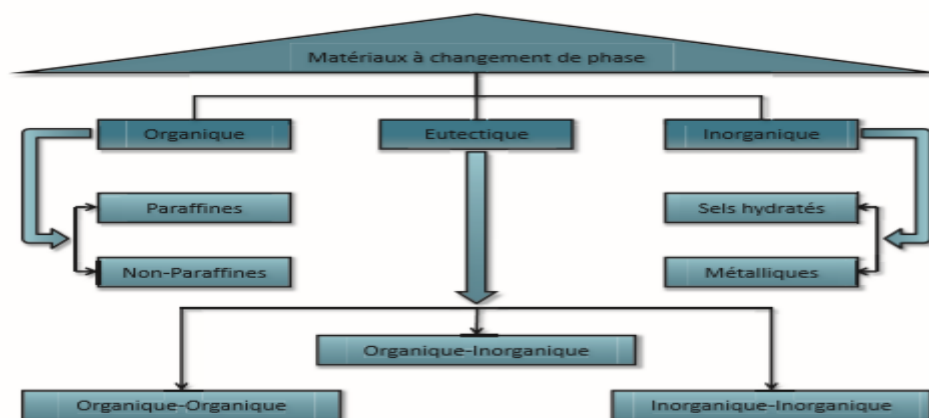


Figure II-6 : Classification des matériaux à changement de phase [24]

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

Le choix d'un MCP doit être fait selon plusieurs critères. Les principaux pour le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente sont :

#### **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 des MCP pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure du Bâtiment**

Les MCP sont utilisés pour la gestion thermique de l'ambiance intérieure du bâtiment. Un grand nombre de recherches et d'applications de MCP utilisées dans les bâtiments ont confirmé que le stockage de chaleur latente à l'intérieur est une solution économe en énergie et respectueuse de l'environnement. L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons 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 MCP intégrés dans les murs.**

Parmi l'ensemble des applications existantes, l'intégration des MCP dans les murs est la plus utilisée car la zone d'échange de chaleur est grande et efficace, mais également sa mise en œuvre est pratique et simple. Les deux méthodes d'intégrations des MCP dans les murs sont « l'immersion » et « l'attachement » [Suliang, 2010].

La méthode de « l'immersion » consiste à intégrer les matériaux à changement de phase dans les matériaux de construction de l'enveloppe du bâtiment, tels que le béton, les briques et le plâtre. Cette intégration peut se faire par l'immersion directe, la macro-encapsulation et la micro-encapsulation. Selon l'état de l'art fait par [Sharma et al. 2009a], la méthode de la microencapsulation du MCP est la mieux adaptée car le MCP est encapsulé dans des polymères et la dimension de la capsule étant de l'ordre du micromètre ne permet pas de la briser, assurant ainsi un taux d'écoulement du MCP quasi nul lors de la 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 la réduction du coût global, cette méthode permet de rendre esthétique l'enveloppe du bâtiment lors de sa finalisation. 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 MCP 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 MCP**

Une autre façon de renforcer l'effet tampon thermique d'un bâtiment est d'assister les protections solaires de MCP. Les stores solaires sont le plus souvent installés du côté intérieur des fenêtres à fin que ceux-ci ne soient pas exposés à des vents forts du côté de l'extérieur de la fenêtre. Cependant, il s'avère que son installation du côté intérieur des fenêtres va engendrer un réchauffement 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. Le système de protection solaire mis en place est adapté pour un climat chaud en été et est surtout relativement adéquat par des zones à fluctuations fortes de températures diurnes et nocturnes. 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.

---

# **Chapitre3 : Description du problème physique et modélisation mathématique**

---

### III-1 Introduction

L'enveloppe d'un bâtiment est en interaction constante avec l'environnement extérieur et l'air intérieur tels que la variation temporaire de température, l'humidité et la pression atmosphérique ont un effet clair sur les propriétés physiques des matériaux de constructions (perméabilité, coefficient de diffusion, la teneur eau et la conductivité thermique....) et en conséquence sur l'enveloppe du bâtiment. Pour garantir une bonne constructions et durabilité des bâtiments, il faut vérifier tous les points tels que l'hygrothermique de composants.

Ce chapitre porte sur la modélisation numérique du comportement hygrothermique d'une paroi multicouche.

### III-2 Description du problème physique

Notre problématique consiste à étudié la possibilité d'utiliser un matériau isolant hygrothermique comme la diatomite et la diatomite/ Paraffine pour les bâtiments résidentiels et commerciaux Algérienne d'une côté, et comme une solution rentable écologique pour substituer le polystyrène expansé (PSE) de l'autre côté.

Le PSE est largement utiliser dans l'isolation thermique dans la construction des bâtiments Algérienne. Les isolants rigides en polystyrène, eux, contenaient jusqu'à récemment de l'hexabromocyclododécane (HBCD), ce dernier, est un retardateur de flammes à base de brome dangereux. Cette molécule de synthèse toxique se dégrade difficilement et s'accumule dans les tissus vivants. C'est un perturbateur endocrinien toxique pour les organismes aquatiques, ou plutôt les êtres vivants.

À cause de son utilisation en grande quantité dans l'industrie des tissus et de l'électronique par exemple, on retrouve aujourd'hui le HBCD partout : dans l'eau et les sols, en 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 de cette convention, et à l'horizon de 2020, notre pays doit trouver une solution pour le substitue. D'après l'étude qui a été faite dans les chapitres précédant on a trouvé que l'utilisation de la diatomite et la diatomite/MCP peut être une solution finale pour ce problème [30].

Pour améliorer le mode de construction en Algérie, plusieurs configurations ont été réalisées :

- Utiliser la diatomite et la diatomite+paraffine avec une épaisseur de 2 cm comme une plaque intérieure et extérieure dans un mur en brique et les comparé avec un mur témoin simple (voir figure III.3).



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.

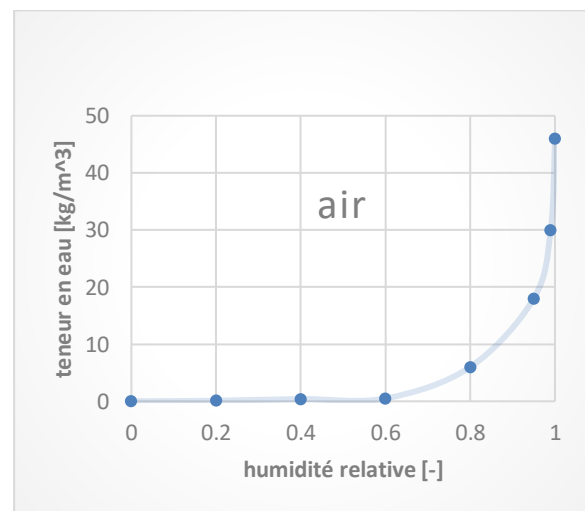
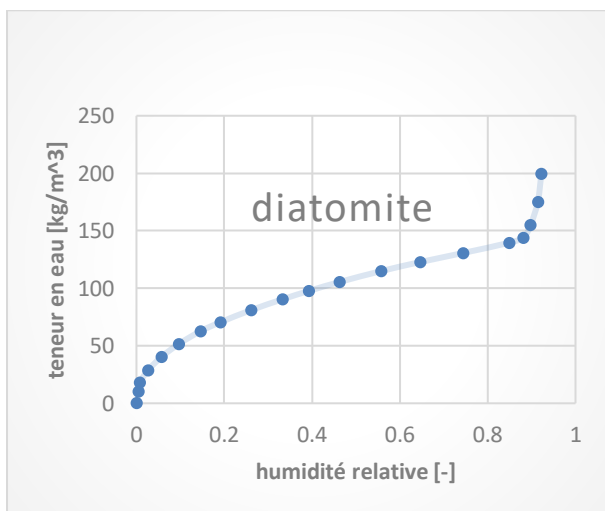
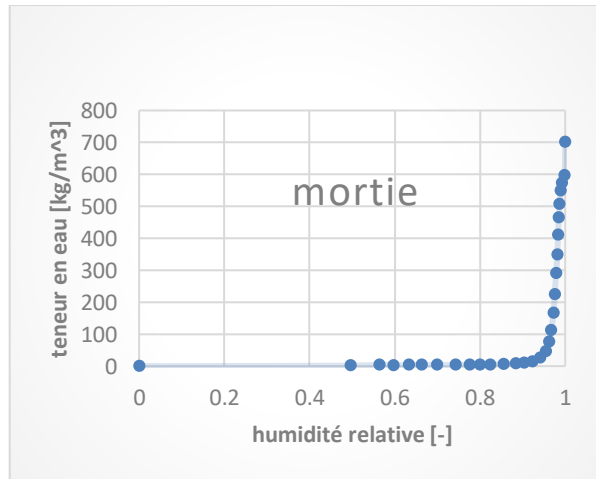
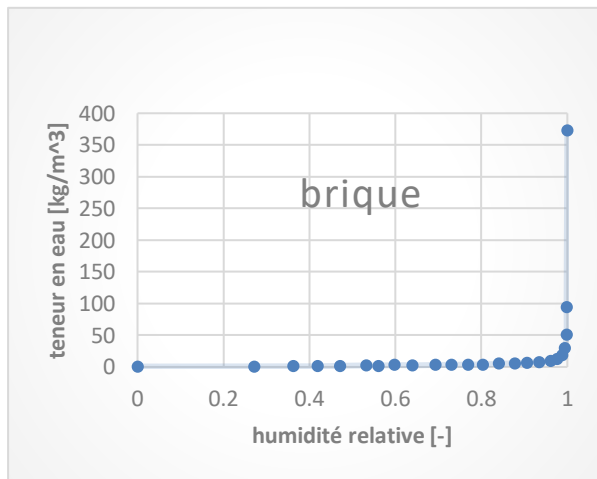
- Utiliser la diatomite comme une plaque extérieure dans un mur en parpaing et dans un mur en brique.
- Utiliser la diatomite comme une plaque extérieure dans un mur en parpaing et en brique ou les cavités d'air remplies de la diatomite.

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)]	Cp [J/(kg.K)]	$\delta_p * 10^{-10}$ [s]	T. fusion [K]
brique	1800	0.778	840	0.26	-
diatomite	400	0.1	1436	0.295	-
Air au repos dans brique	1.23	0.228	1006.43	1.9	-
mortier	1810	1.4	840	0.0385	-
paraffine	773	0.21	2400	-	59
parpaing	1950	1.05	1080	1.35	-

Air au repos dans parpaing	1.23	0.28	1006.43	1.9	-
Air au repos dans les pores	1.23	0.026	1006.43	1.9	-
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].



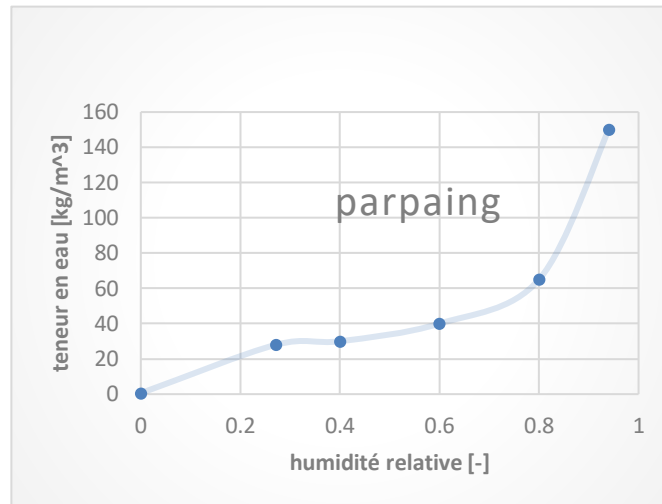
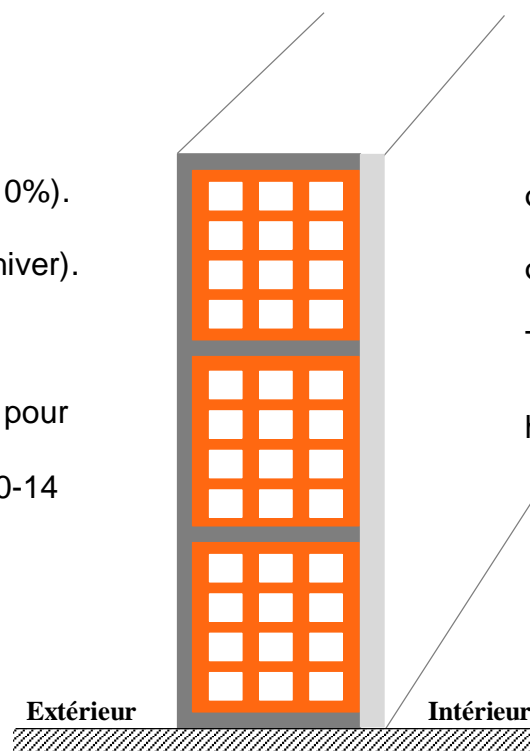


Figure III.4 : Isothermes de sorption des matériaux constituant les cas étudiés selon [5,32,8].

Dans notre travail, le problème est traité en trois dimensions.

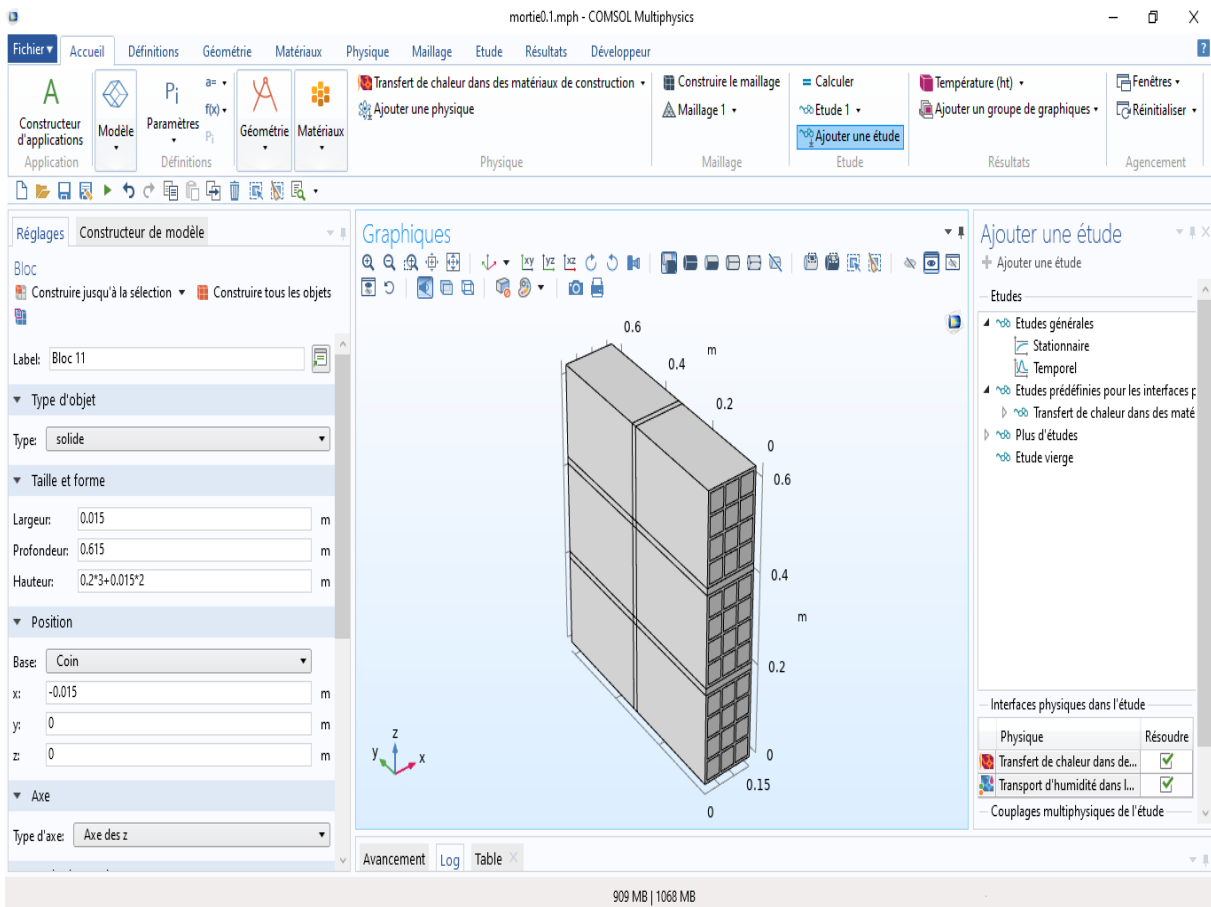
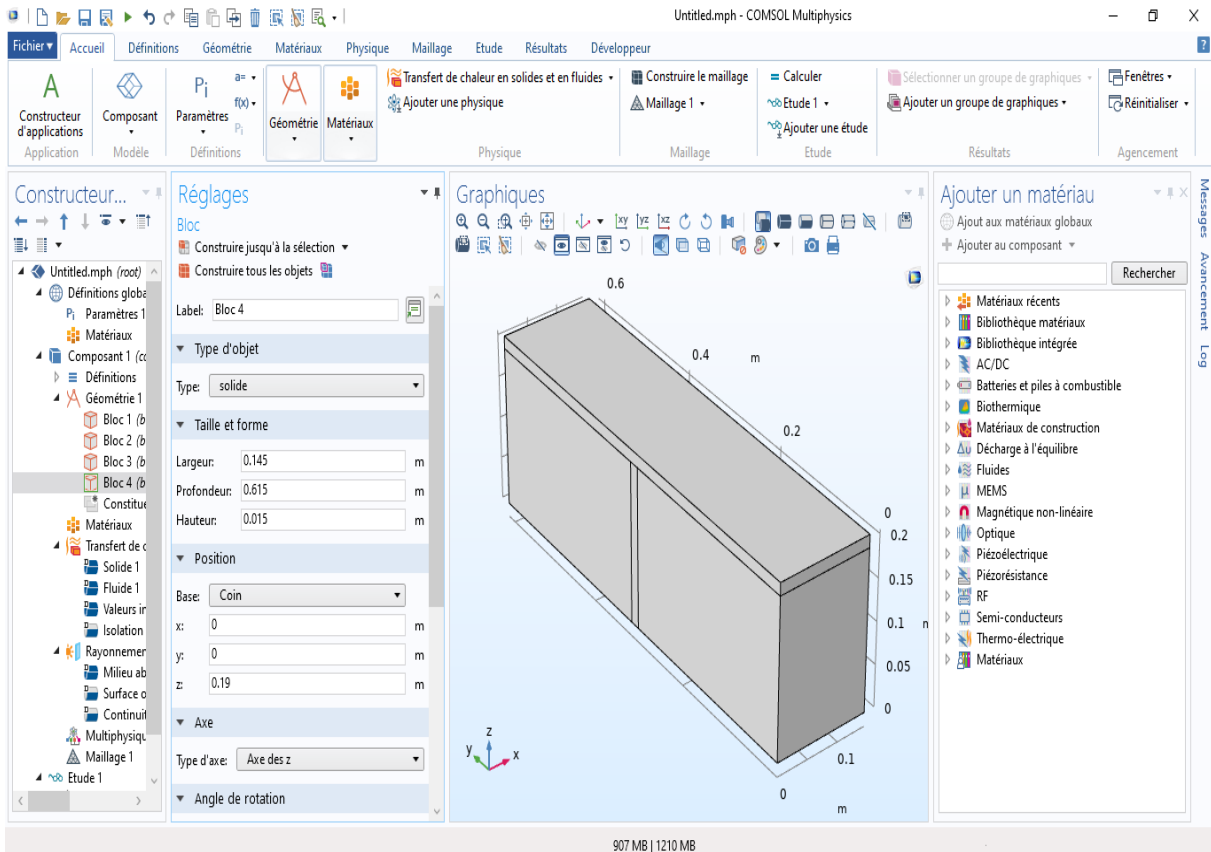
$\varphi_{ext}$  = constant (90% et 10%).  
 $T_{ext}$  = variable (t) (Été et hiver).  
 $h_{ext}$  = variable (vitesse).  
 $\beta_{s,ext} = 7.8382 \cdot 10^{-12}$  s/m pour  
 hiver et  $\beta_{s,ext} = 7.8382 \cdot 10^{-14}$   
 s/m pour été.



$\varphi_{int}$  = 50% pour été  
 $\varphi_{int}$  = 42% pour hiver  
 $T_{int}$  = 298,15 K  
 $h_{int}$  = 3,25 W/(m<sup>2</sup> \*K)  
 $\beta_{s,int} = 5.8823 \cdot 10^{-7}$  s/m.

[5]

Ces paramètres sont choisis comme des conditions de vie confortables. Au début,  $T_{ini} = 25$  [°C],  $\varphi_{ini} = 50$  % cas saison chaude et dans cas saison froide  $\varphi_{ini} = 42$  %. Rayonnement solaire avec  $\varepsilon = 0,87$  [5] quand on a le mortier et  $\varepsilon = 0,2$  [35] quand on a diatomite.





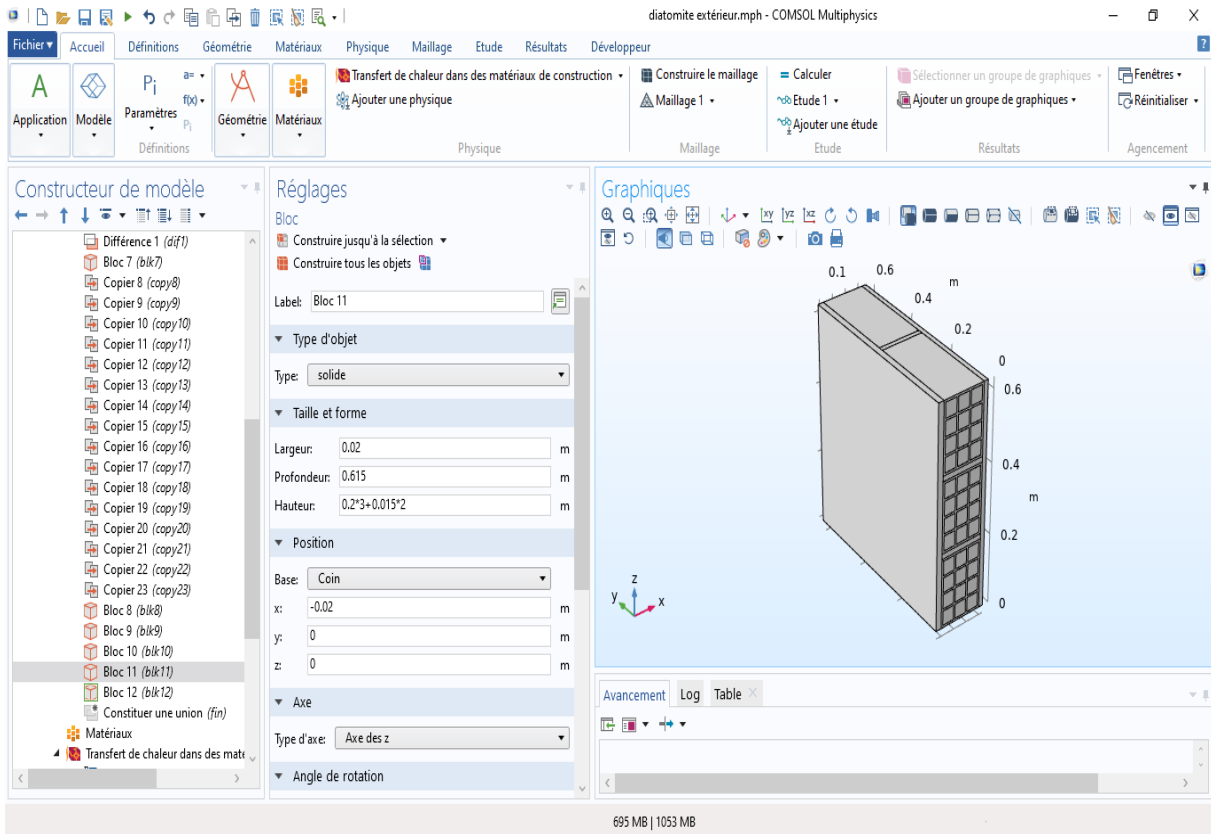


Figure III.5 : Géométrie en 03D du mur en brique avec diatomite sur logiciel COMSOL Multiphysics.

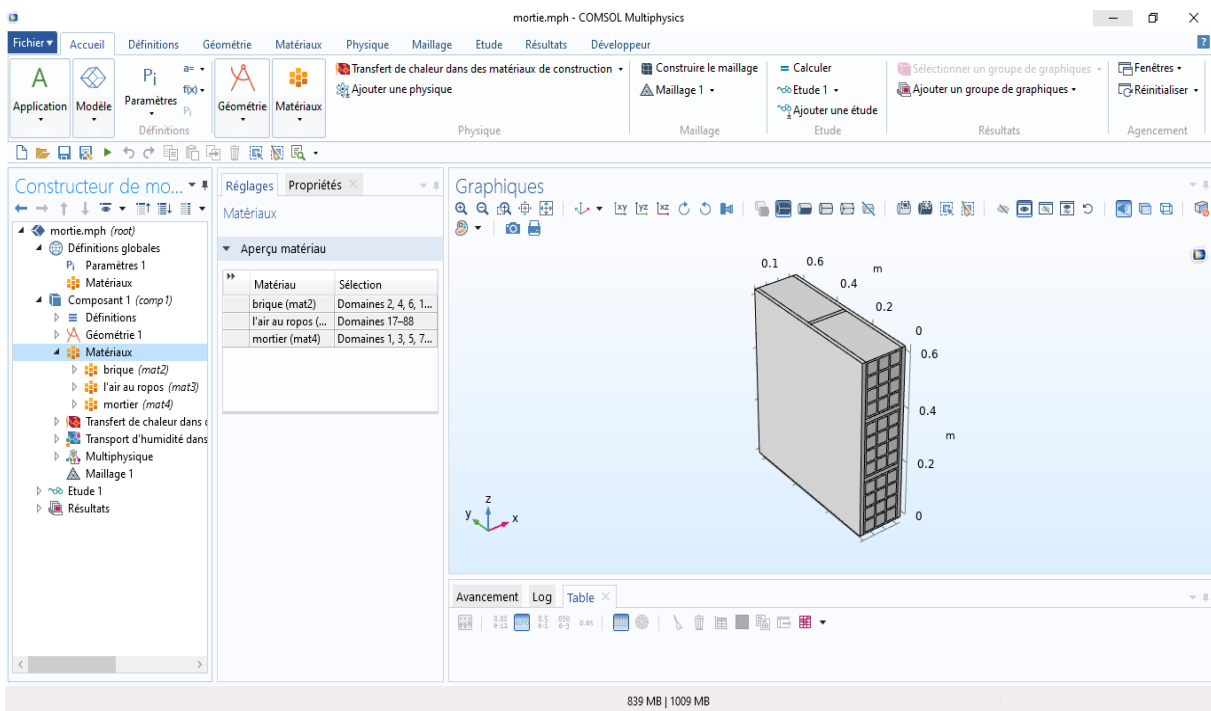


Figure III.6 : Mur en brique avec mortier sur logiciel COMSOL Multiphysics.

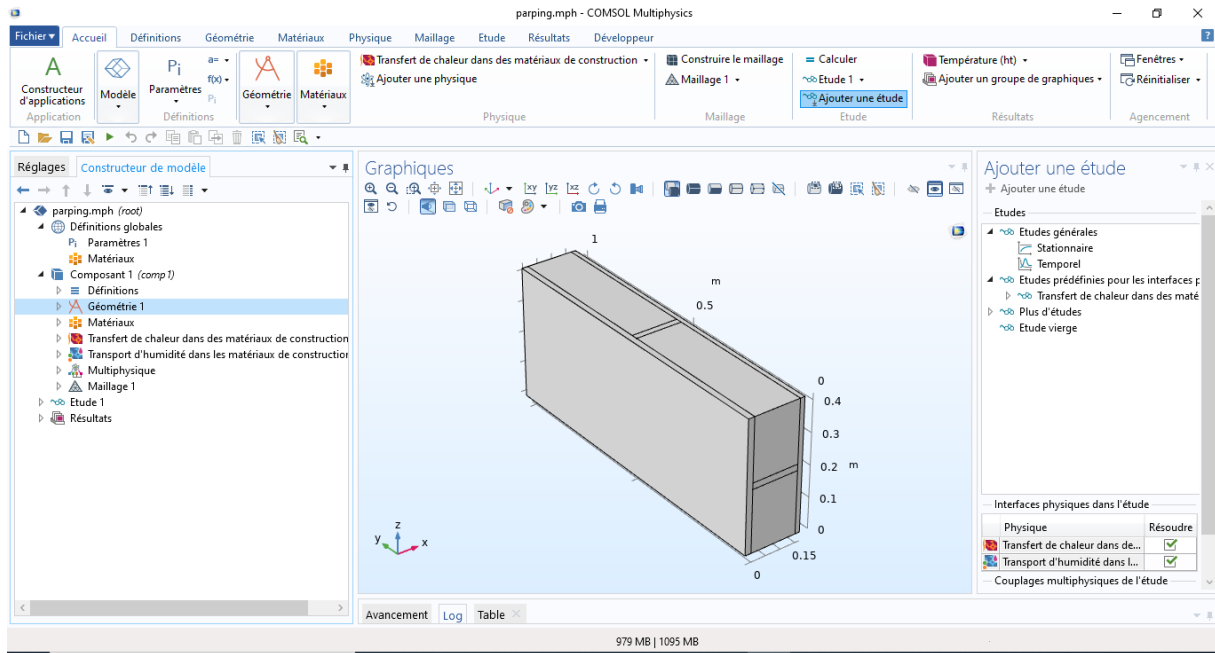


Figure III.7 : Mur en parpaing sur logiciel COMSOL Multiphysics.

### III-3 Modélisation mathématique

Un modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité basée sur le travail d'HM. Künzle (1995) [37], est établi pour décrire le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouches. Un logiciel de simulation numérique appelé COMSOL Multiphysics basé sur la méthode des éléments finis a été exploité pour résoudre les équations différentielles de transfert. Nous considérons la température et l'humidité relative comme des moteurs potentiels régissant le transfert de chaleur et d'humidité, assurant la continuité des variables à l'interface entre les couches. L'humidité relative est un paramètre continue permettant de qualifier la qualité des ambiances habitables, par contre la teneur en humidité est un variable d'état dépend de la nature microstructurale du matériau, ce qui engendre des problèmes de discontinuité comme illustré dans la figure III-8.

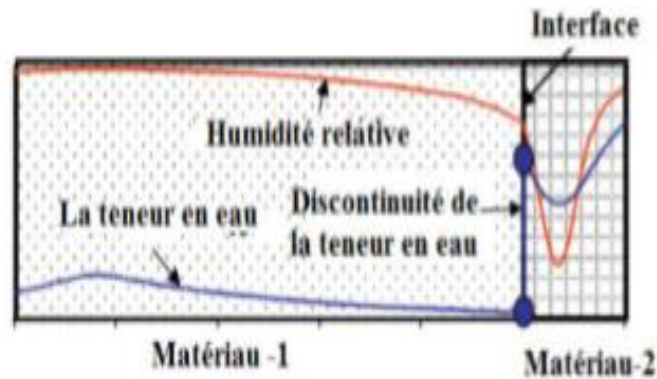


Figure III.8 : Profil de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents [38].

### III-3-1 Hypothèses du modèle

Sur la base de l'étude d'HM. Künzle [33], les hypothèses suivantes sont considérées :

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

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

La forme générale des équations qui décrivent les processus de transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux est donnée par un système de deux équations aux dérivées partielles en imposant l'équilibre de masse et d'énergie dans un élément infinitésimal de volume :

#### III-3-2-1 Transfert d'humidité

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

$$\triangleright \frac{dw}{dt} = -\nabla[g_v + g_l] + Q_w \quad (\text{III. 1})$$

Comme cité précédemment, la teneur en humidité est un variable discontinue, alors l'équation de conservation de masse est transformée en utilisant l'humidité relative et

la température comme moteurs de transfert hygrothermique ou les équations constitutives sont décrites par la loi de Fick et la loi de Darcy, l'humidité relative est définie par la relation :

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

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

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

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

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

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

La contribution  $D_T \cdot \nabla T$  est généralement négligeable et la fraction massique de vapeur d'eau liée à la masse totale du mélange vapeur-air peut être remplacée par la pression partielle de vapeur d'eau. Le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air a la forme :

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

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 :

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

À l'aide de l'équation III.7, la densité de flux de diffusion de vapeur peut être écrite sous la forme :

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

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

$$\triangleright g_l = -D_w(w) \cdot \nabla_w = -D_w \cdot \xi \cdot \nabla \varphi \quad (\text{III. 8})$$

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

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

$$\triangleright \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left[ \left( D_w \cdot \xi + \delta_p \cdot P_{v,s}(T) \right) \nabla \varphi + \delta_p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \cdot \nabla T \right] + Q_w \quad (\text{III. 10})$$

### 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 :

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

$$\triangleright (\rho \cdot cp)_{\text{eff}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_s \cdot \left( c_s + \frac{1}{\rho_s} \cdot c_e \cdot w \right) \quad (\text{III. 12})$$

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

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

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

### 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 :

$$\triangleright \left( D_w \cdot \xi + \delta_p \cdot P_{v,s}(T) \right) \nabla \varphi + \delta_p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \cdot \nabla T = \beta_{s,\text{ext}} \left( \phi_{a,\text{ext}} \cdot P_{v,s}(T_{a,\text{ext}}) - \phi_{s,\text{ext}} \cdot P_{v,s}(T_{s,\text{ext}}) \right) \quad (\text{III. 15})$$

$$\triangleright \left( D_w \cdot \xi + \delta_p \cdot P_{v,s}(T) \right) \nabla \varphi + \delta_p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial P_{v,s}(T)}{\partial T} \cdot \nabla T = \beta_{s,\text{int}} \left( \phi_{a,\text{int}} \cdot P_{v,s}(T_{a,\text{int}}) - \phi_{s,\text{int}} \cdot P_{v,s}(T_{s,\text{int}}) \right) \quad (\text{III. 16})$$

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 :

$$\triangleright (\lambda_{\text{eff}} \nabla T + L_v \cdot \delta_p \cdot P_{v,s}(T) \cdot \nabla \varphi = h_{a,\text{ext}} \cdot (T_{a,\text{ext}} - T_{s,\text{ext}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\infty}^4 - T_{a,\text{ext}}^4) + \beta_{s,\text{ext}} L_v (\phi_{a,\text{ext}} \cdot P_{v,s}(T_{a,\text{ext}}) - \phi_{s,\text{ext}} \cdot P_{v,s}(T_{s,\text{ext}})) \quad (\text{III. 17})$$

$$\triangleright (\lambda_{\text{eff}} \nabla T + L_v \cdot \delta_p \cdot P_{v,s}(T) \cdot \nabla \varphi = h_{a,\text{int}} \cdot (T_{a,\text{int}} - T_{s,\text{int}})$$

$$+\beta_{s,int}L_v(\phi_{a,int}\cdot P_{v,s}(T_{a,int}) - \phi_{s,int}\cdot P_{v,s}(T_{s,int})) \quad (\text{III. 18})$$

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 :

$$\text{➤ } h_{a,int} = 2.8 + 3 \cdot v_a \quad (\text{III. 19})$$

$$\text{➤ } h_{a,ext} = 2.8 + 3 \cdot v_{vent} \quad (\text{III. 20})$$

$$\text{➤ } T_{\infty} = 0.0552 \cdot (T_{a,ext})^{1.5} \quad (\text{III. 21}) \text{ [5].}$$

### III-4 Solution numérique

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel 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 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 multiphysic

Cliquer sur logiciel → assistant de modélisation → la physique de l'espace (3D) → la physique transfert de chaleur puis transfert de chaleur et d'humidité puis matériaux de construction (ajouter) → étude → étude temporel (terminer) → dessin de la géométrie → matériaux (soit bibliothèque des matériaux soit nous remplissons les matériaux qui n'existe pas dans la bibliothèque, on clique à droite et on choisit matériaux vierge). Pour entrer les équations dans les matériaux on clique à droite dans basique on choisit le type d'équation → transfert de chaleur on remplir les données → transfert d'humidité rempli tous les données → maillage fait en texte de maillage → étude temporel (choisir le temps et le pas de temps qui tu vas tester ton travail).

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

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de résolution approchée des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie. Elle connaît, depuis 1970 environ, une extension fantastique, qui va de pair avec le développement et l'accroissement de puissance des ordinateurs. Elle est devenue un outil de travail, calcul et conception quotidien, voir familier, de l'ingénieur, dans des domaines aussi variés que l'analyse des structures, le transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, les écoulements souterrains, la combustion ou encore la diffusion des polluants [39].

#### 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 Newmark, 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 [40].

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

En 2003 A.Y.T. Leung, Zhu Bin, Jian jin Zheng, Hao Yang[8], qui utilisent un élément appelé trapézoïdale de Fourier de p-élément pour l'analyse des vibrations de solides élastiques à deux dimensions 2D. Ils montrent que cet élément de Fourier est plus précis que ceux des éléments utilisant la quadrature de Gauss pour les problèmes de vibration dans le plan, et cet élément est plus efficace pour les vibrations de haute fréquence.

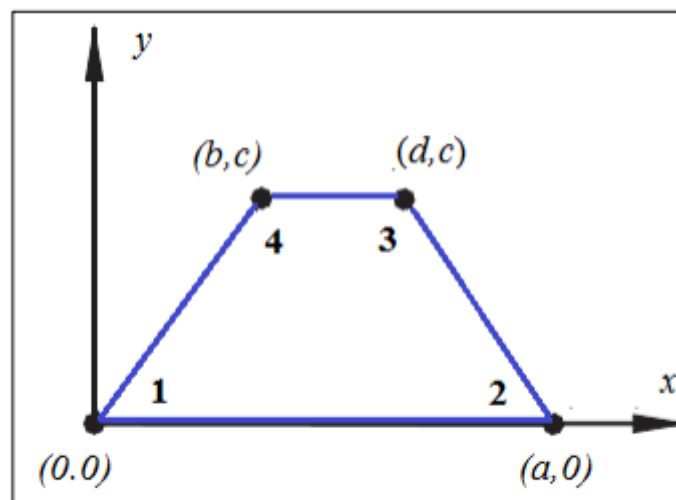


Figure III.9 : Trapézoïdale de Fourier de p-élément.

En 2006 les auteurs Yeon Seok Choo, Noori Choi Byung, Chai Lee [9], ont proposé des éléments plan quadrilatères et triangulaires élastiques linéaires flexibles, précis et robustes, avec l'introduire des degrés de liberté supplémentaires de rotation. Ils



montrent que les degrés de rotation supplémentaires augmentent la précision et la qualité de robustesse de l'élément développé.

Les travaux de recherche de A. Houmat [10] 2006, ont été consacrés à l'étude de PVersion trigonométrique de la méthode des éléments finis basé sur un élément quadrilatère courbé. Cet élément a été développé et appliqué à l'analyse des vibrations libres des structures en membranes de forme arbitraire. Il a calculé les valeurs de fréquence pour les éléments secteurs ouverts et fermés à l'aide de maillages à un élément quadrilatère courbe et a montré que la convergence est rapide et de haute précision par cette méthode. Ces valeurs sont très précises et peuvent servir de base de comparaison pour les autres techniques de calcul.

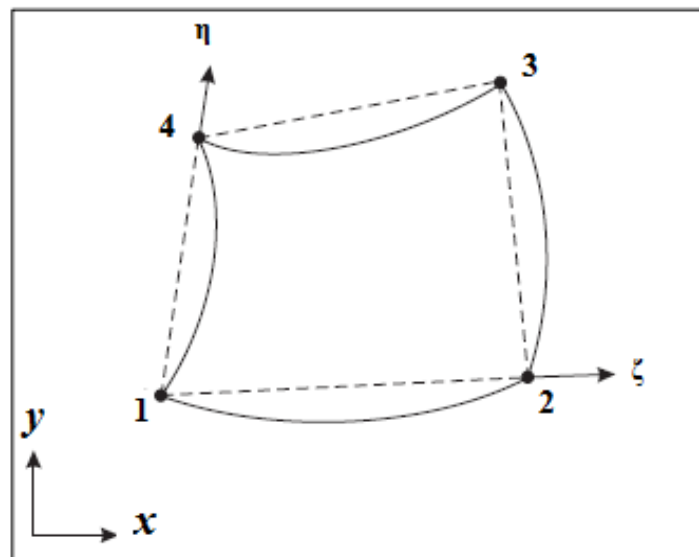


Figure III.10 : Élément quadrilatère courbe.

Les recherches de Kutlu Darılmaz et de Nahit Kumbasar [11] en 2006, ont été consacrés à l'étude d'un élément coque quadrilatère à 8 nœuds de contrainte assumée hybride, avec six degrés de liberté par nœud, et chaque nœud à trois déplacements et trois rotations. Ils ont étudié la performance de l'élément pour différents cas de structures, mais ils ont conditionné l'utilisation de l'élément dans l'analyse statique et vibratoire des structures avec propriétés de matériau (isotrope / orthotrope).

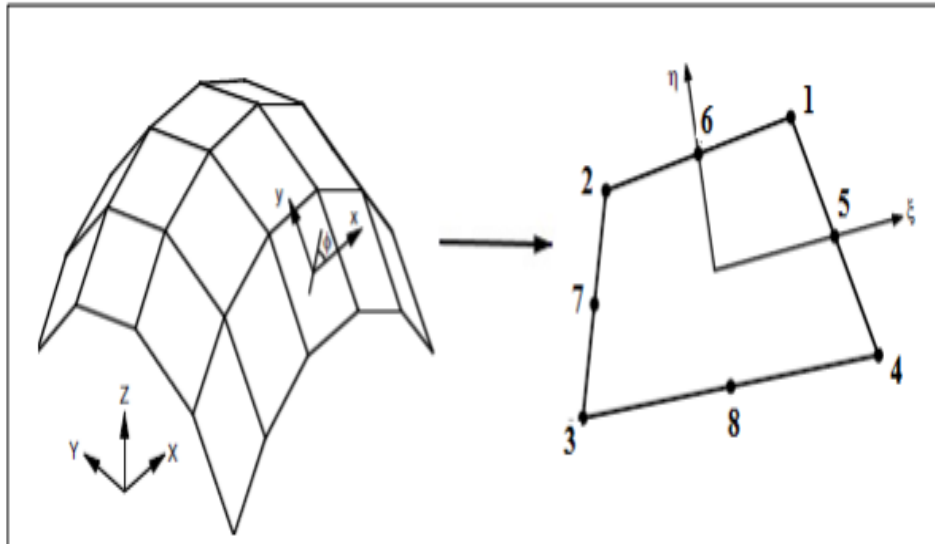


Figure III.11 : Éléments coque quadrilatère à 8 nœuds de contrainte assumée hybride.

En 2009 N. Nguyen-Thanh, et all [12], ont utilisé la méthode des éléments finis alpha alternatif (A $\alpha$ FEM) pour l'analyse des vibrations libre et forcée des structures en utilisant les maillages avec éléments triangulaires.

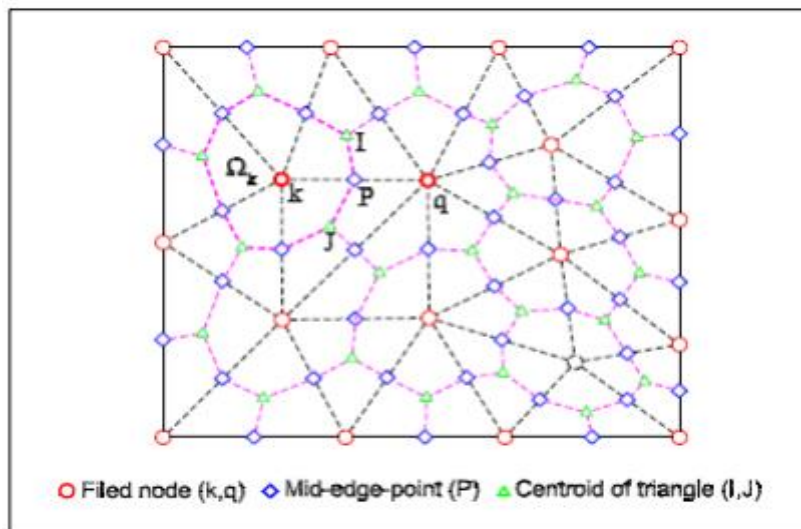


Figure III.12 : Maillage avec éléments triangulaires dans la méthode des éléments finis alpha alternatif (A $\alpha$ FEM).

La méthode proposée améliore considérablement la précision des éléments finis triangulaires standard et fournit une solution super convergente dans la norme de l'énergie pour l'analyse statique et dynamique des solides dans les problèmes de deux dimensions. 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 œuvre 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 discrétisation des équations peut être illustrée plus facilement en considérant l'équation de conservation pour une variable scalaire générale  $\phi$  pouvant être exprimée comme suit :

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

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 :

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

$\phi$  Une des variables suivantes 1, u, v, k,  $\epsilon$  et T [41].

### III-5 Conclusion

Les travaux menés au sein de ce chapitre ont permis de décrire et d'analyser le comportement hygrothermique de matériaux hygroscopiques et d'étendre l'étude au niveau d'une paroi multicouche de bâtiment par une étude expérimental.

Un modèle numérique basé sur d'HM. Kunzel qui considère la température et l'humidité relative comme des moteurs potentiels du transfert hygrothermique, pour assurer la continuité du transfert entre les couches des matériaux a été utilisé pour résoudre les équations gouvernantes de transferts hygrothermiques.

---

# Chapitre 4 : Discussion des résultats

---

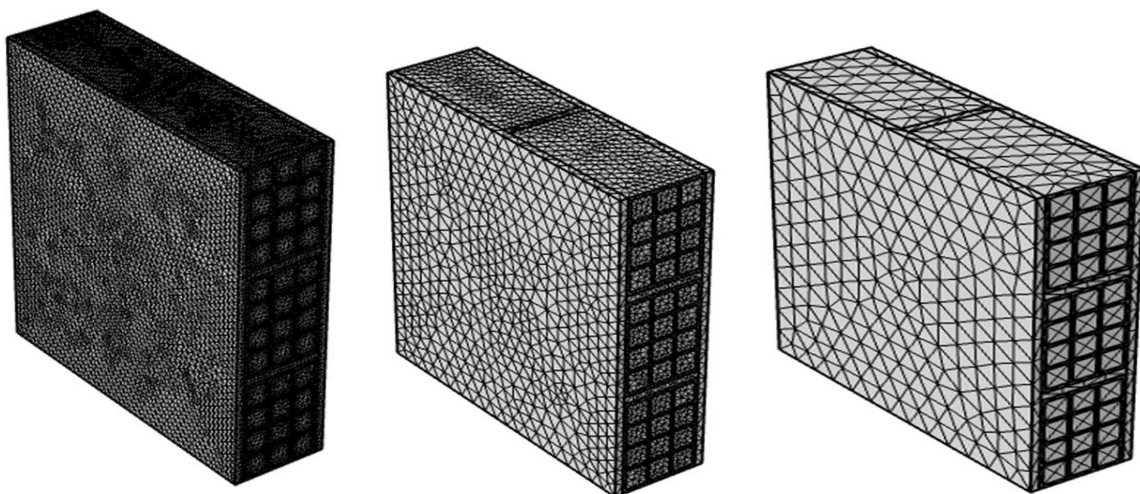
## IV-1 Introduction

Cette dernière partie est consacrée à la discussion des résultats exécutés à l'aide du logiciel COMSOL. Le travail est divisé en trois cas :

- **1-cas** : afin d'améliorer la performance hygrothermique des parois en briques creuses, l'influence de la plaque isolante en diatomite et en diatomite/ paraffine au côté intérieur et extérieur sur le transfert de chaleur et d'humidité a été comparé et analysé.
- **2-cas** : consiste à étudier la performance hygrothermique des parois en parpaing isolé en extérieur et les comparés avec le 1<sup>ier</sup> cas.
- **3-cas** : cette partie est consacré à étudier l'effet des plaques isolantes sur la performance hygrothermique des parois en brique et en parpaing avec des cavités d'air remplies par la diatomite.

## IV-2 Test de maillage

Avant d'exploiter le modèle numérique, il est important d'effectuer une étude sur l'indépendance du maillage. Pour cela, nous avons analysé trois grilles de maillage qui correspondent à un nombre d'éléments de volume de 823139, 107325 et 38610. La température et l'humidité relative sont choisies à titre de comparaison, Voir Fig. IV.1. On constate que les écarts obtenus pour les trois grilles étudiées est relativement faible.



823139 éléments de volume

107325 éléments de volume

38610 éléments de volume

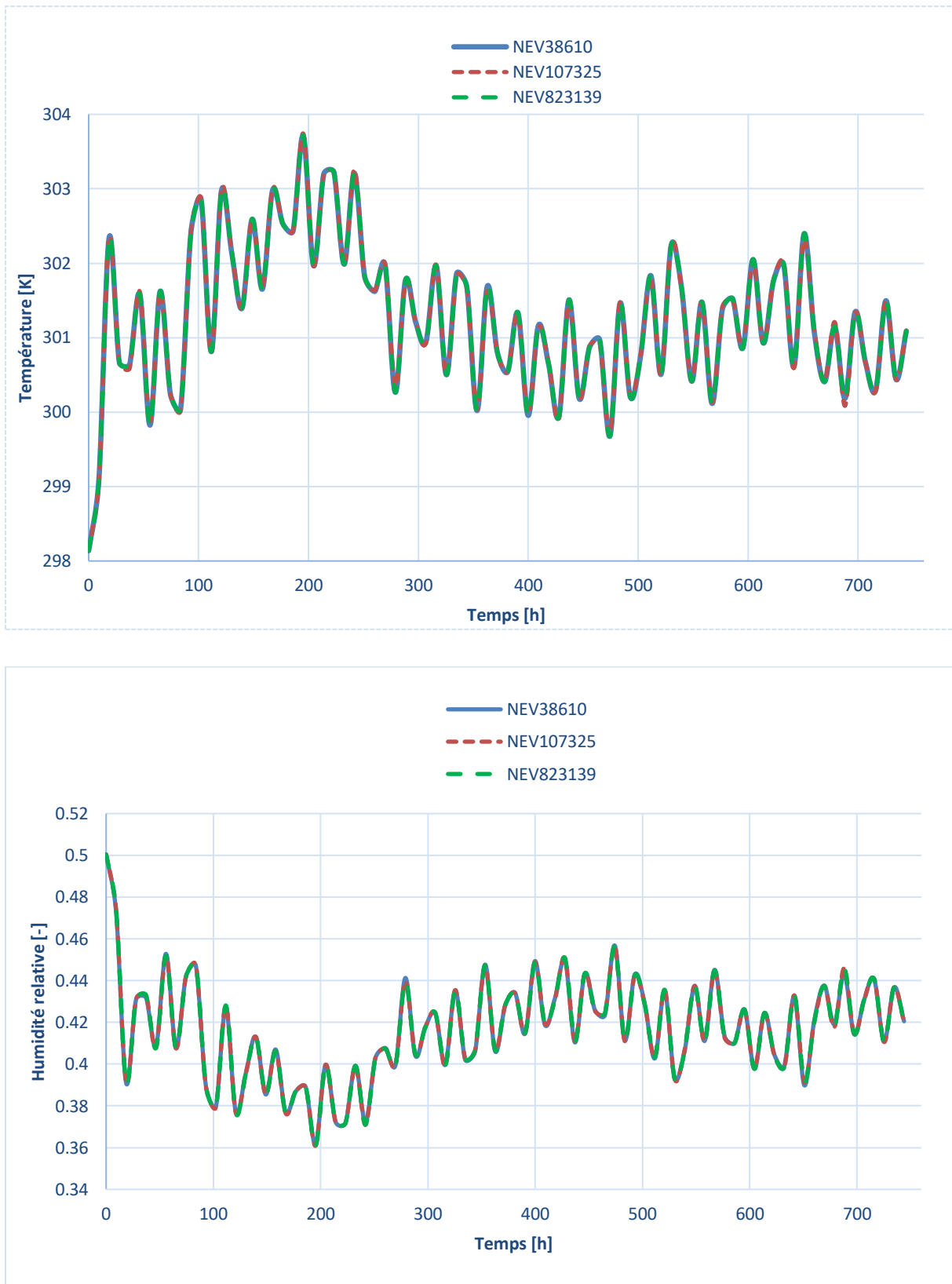


Figure IV.1 : Influence des nombres des éléments de volume (NEV) sur les résultats.

Par la suite, nous avons adopté pour nos calculs la grille avec 38610 élément de volume qui donne un bon compromis de temps de calcul. Par ailleurs, plusieurs pas

de temps ont été testés sur la grille adoptée  $\Delta t=1h$ ,  $\Delta t=2h$ ,  $\Delta t=9.3h$ ,  $\Delta t=74.4h$  ; nous avons retenu la valeur  $\Delta t=2h$  pour notre calcul car elle est stable.

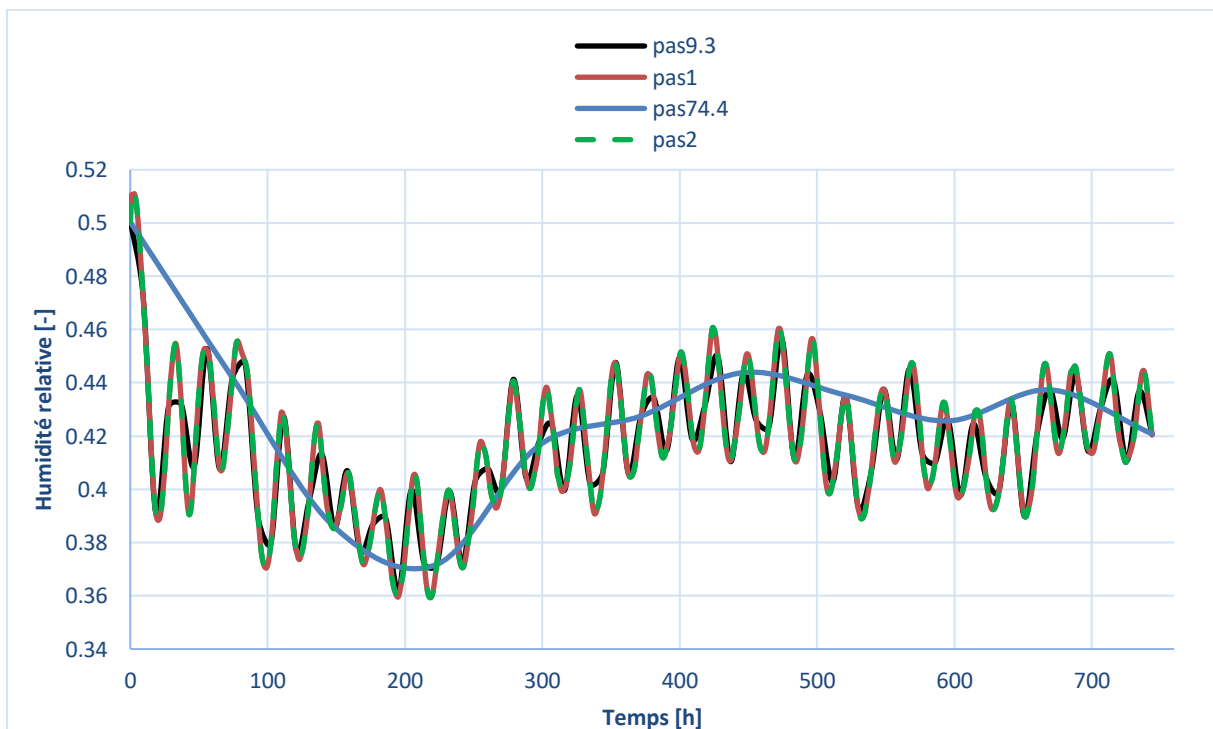
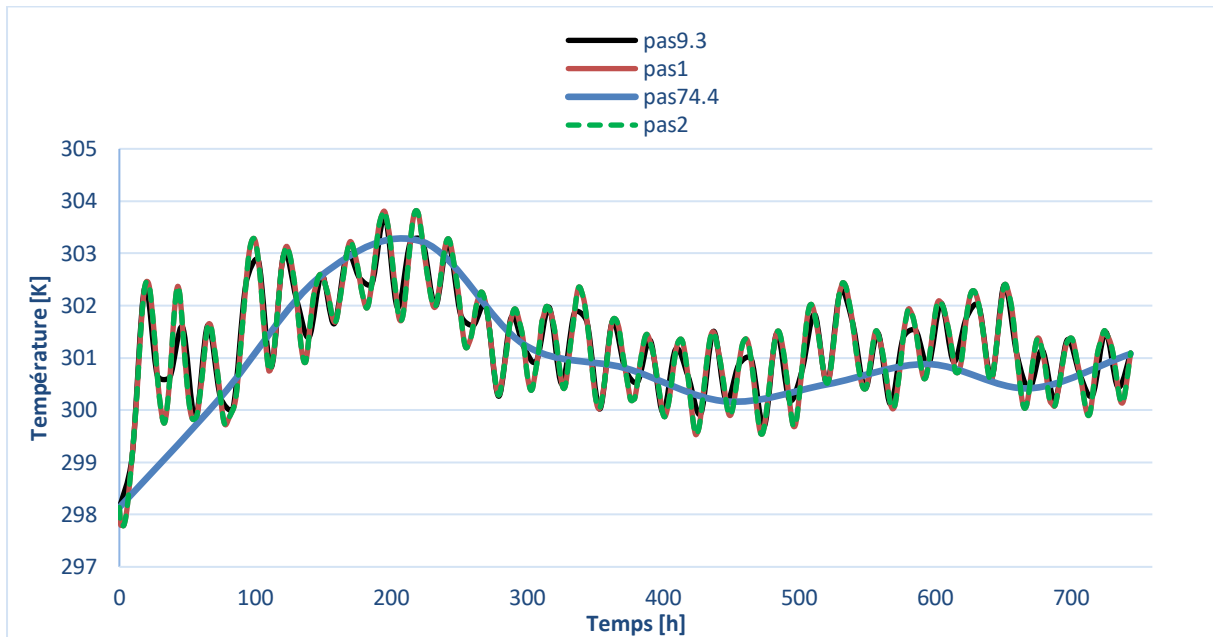


Figure IV.2 : Influence des nombres de pas du temps sur les résultats.

### IV-3 Validation numérique

Afin de valider nos résultats numériques, nous les avons comparés avec les travaux expérimentaux et numériques publiés par projet HAMSTAD. Le modèle de transfert de



chaleur et d'humidité décrit précédemment a été validé à travers un test benchmark parmi les cinq tests du projet Européen HAMSTAD (Hagentoft, 2004) [42].

Ce projet, initié par l'union Européen, a permis le développement d'une plateforme d'évaluation de la modélisation computationnelle du mécanisme de transport de la chaleur, de l'humidité et de l'air (HAM) en physique du bâtiment. Les résultats de cette partie du projet contiennent une définition du modèle de simulation mathématique du transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité appelé HAM (Heat, Air and Moisture) et les cinq tests benchmark. Ces tests benchmarks pourraient être utilisés comme références pour l'évaluation des logiciels existants et nouveaux. Plus de détail sur les différents matériaux utilisés et les propriétés liés au ces derniers dans ce projet est mentionné dans le manuscrit de CE. Hagentoft [42].

#### IV-3-1 HAMSTAD benchmark cas n°05 : Isolant intérieur actif par capillarité

La cinquième étude a été initiée par l'université technique de Dersde (Allemande). Le test porte sur la redistribution de l'humidité à l'intérieur d'un mur multicouche à isolation intérieure active par capillarité (figure IV.3). Le mur est composé de trois couches de l'extérieur à l'intérieur : brique (365 mm), mortier (15 mm) et matériau isolant (40 mm). La structure est hermétique. La température initiale et la teneur en humidité sont considérés constantes sur tout le mur  $T_{ini} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_{ini} = 60\%$ . Au temps zéro, il y a un changement soudain de température et de pression de vapeur à l'intérieur et à l'extérieur. Le temps de simulation est de 60 jours.

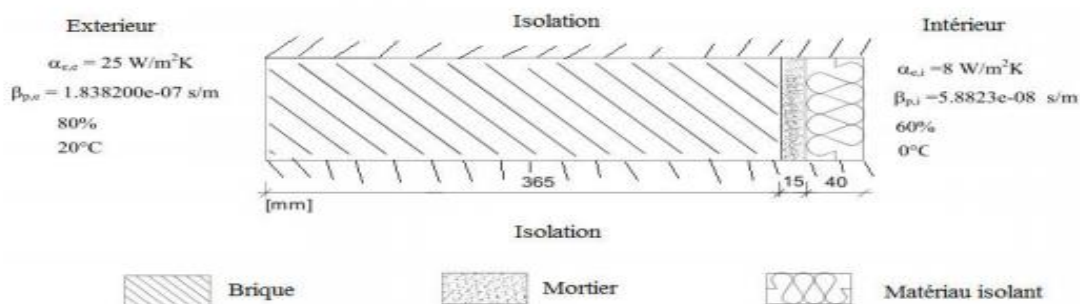


Figure IV.3 : Une structure murale multicouche à isolation intérieure active par capillarité [5].

Comme résultats de simulation utilisant le modèle couplé de transfert hygrothermique, la redistribution de l'humidité et la teneur en eau à travers le mur multicouche sont illustrés dans la figure VI.4, et comparés avec les valeurs de test benchmark au dernier pas de temps (60 jours).

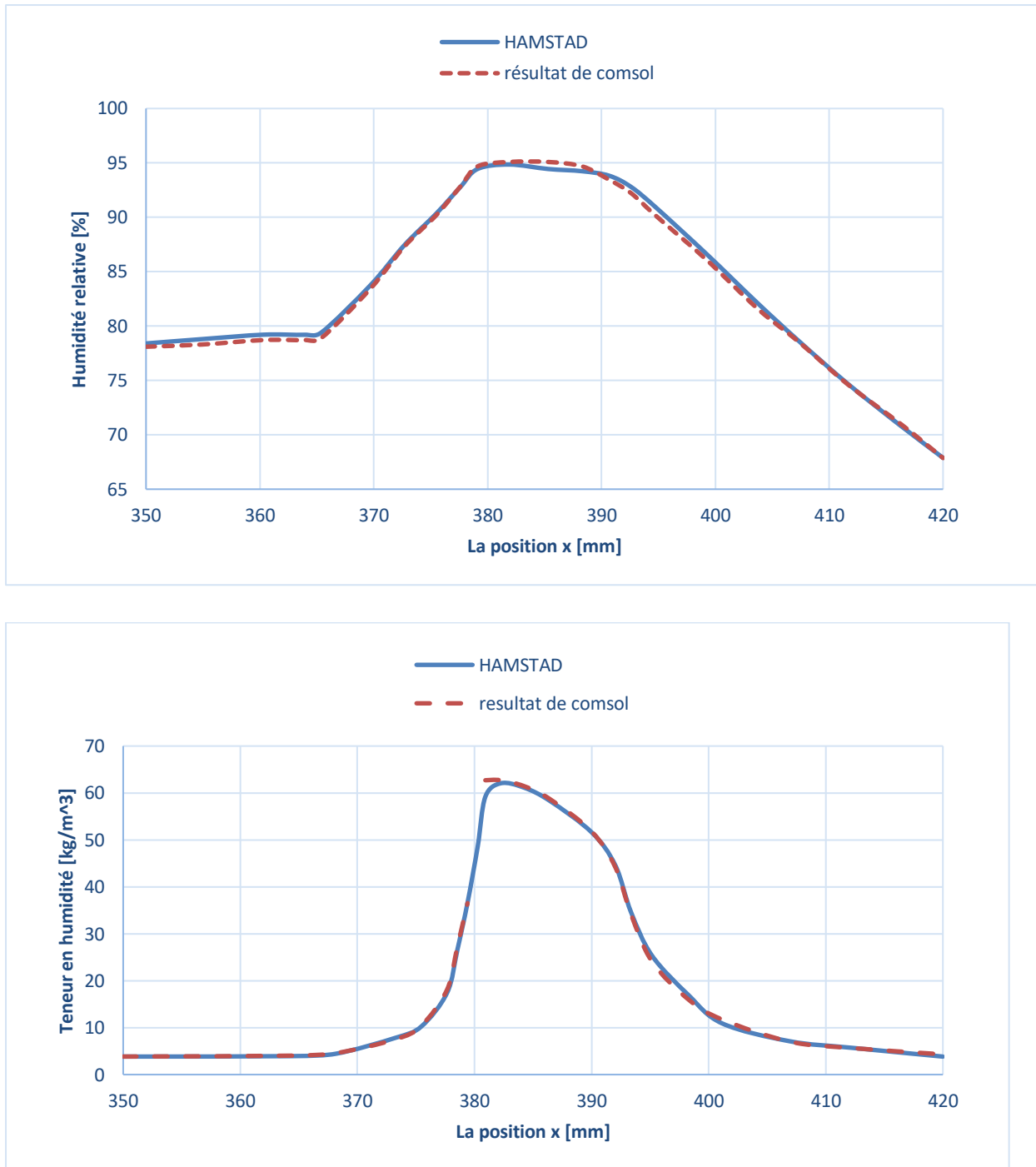


Figure IV.4 : Résultats de Simulation après 60 jours : (a) Profil de l'humidité relative [%] ; (b) Profil de la teneur en humidité [kg/m<sup>3</sup>].

Les solutions numériques montrent un bon accord pour toutes les positions avec des erreurs relatives moyennes observées de l'ordre 0,60 % pour humidité relative et de 0.1% pour la teneur en humidité. Sur la figure IV.4.b, une discontinuité est remarquée vue que chaque matériau a sa propre courbe de sorption d'humidité.

#### IV-4 Hypothèses

En raison de l'absence des données on prend dans les calculs :

- La conductivité thermique, la masse volumique, la capacité thermique, coefficient de diffusion, perméabilité de diatomite de brique et parpaing des constantes ne varient pas en fonction d'humidité.
- La conductivité thermique et la perméabilité de l'air au repos sont des constantes qui ne varient pas en fonction d'humidité.
- La masse volumique et la capacité thermique de mortier des constantes ne varient pas en fonction de l'humidité.
- La conductivité thermique et la masse volumique et la capacité thermique et coefficient de diffusion de brique sont des constantes qui ne varient pas en fonction d'humidité.

#### IV-5 Discussions des résultats

##### IV-5-1 cas n° 01

L'influence d'utiliser une plaque en (diatomite et diatomite paraffine) à l'intérieure et a l'extérieure sur les paramètres hygrothermiques. Les variables extérieures associées dépendantes du temps (température de l'air, la vitesse de vent) prises en compte dans cette étude sont extraites de données météorologiques typiques de la région d'Adrar dans la saison chaude (mois d'aout 2019) et Tlemcen dans la saison froide (mois de Janvier 2020) [43].

Nous avons considérés la température comme paramètre variable et l'humidité relative comme valeur constante (deux valeurs ont été sélectionnées : la première 10% et la deuxième 90%).

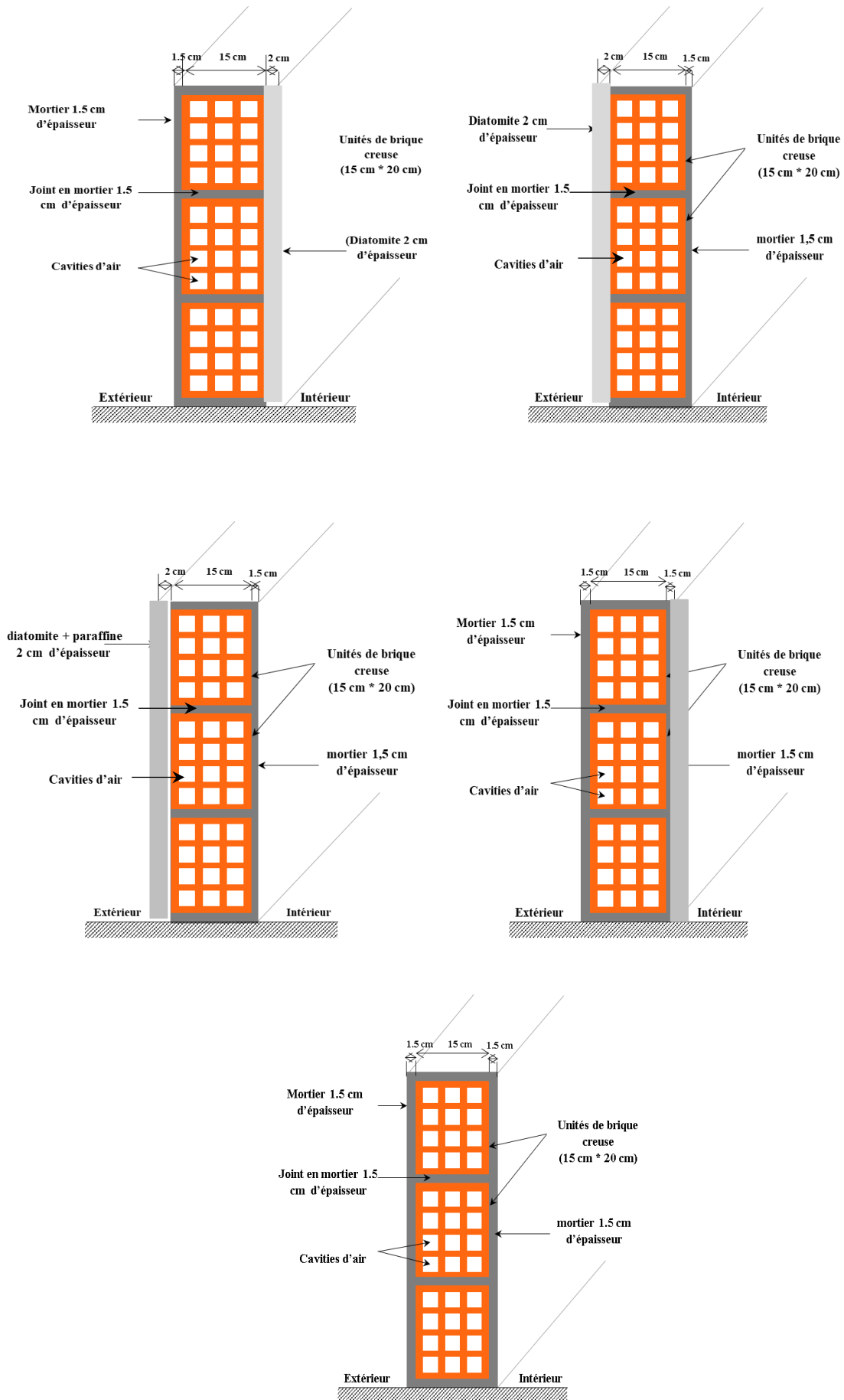


Figure IV.5 : Vue axonométrique des murs typiques en briques creuses.

## A- Saison chaud à l'extérieur

### A-1 Humidité de 10% à l'extérieur

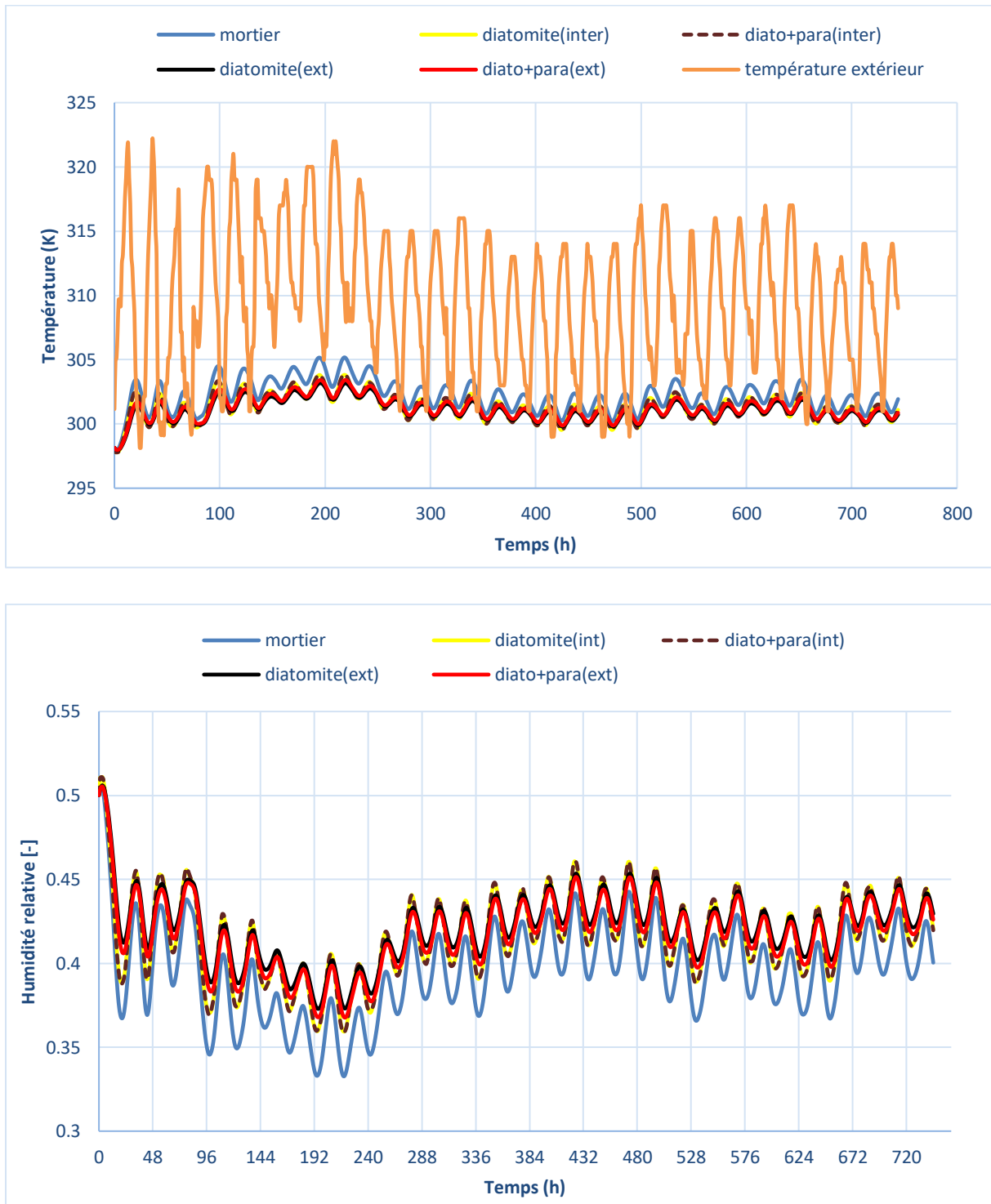


Figure IV.6 : Influence des conditions extérieures de saison chaud ( $T_{\text{ext}}$  et  $HR_{\text{ext}} = 10\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures.

## A-2 Humidité de 90% à l'extérieur

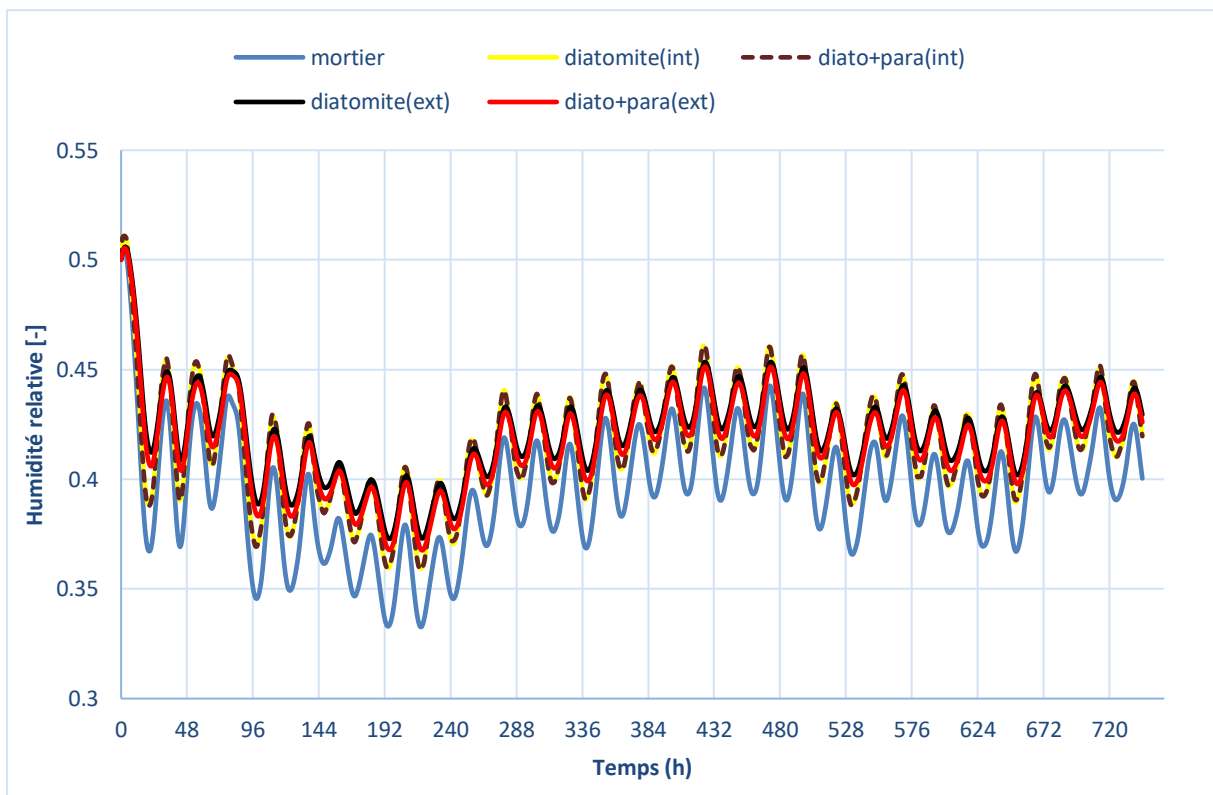
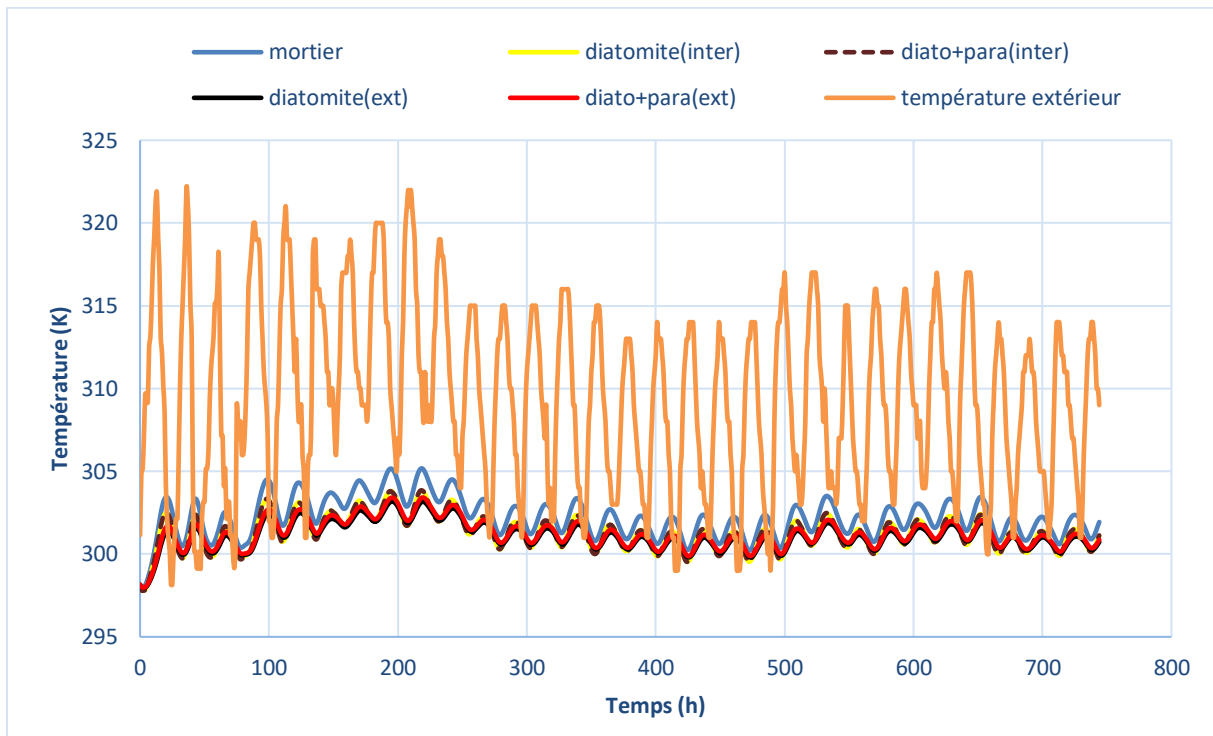


Figure IV.7 : Influence des conditions extérieures de saison chaude ( $T_{\text{ext}}$  et  $HR_{\text{ext}} = 90\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures.

**Interprétation des résultats :**

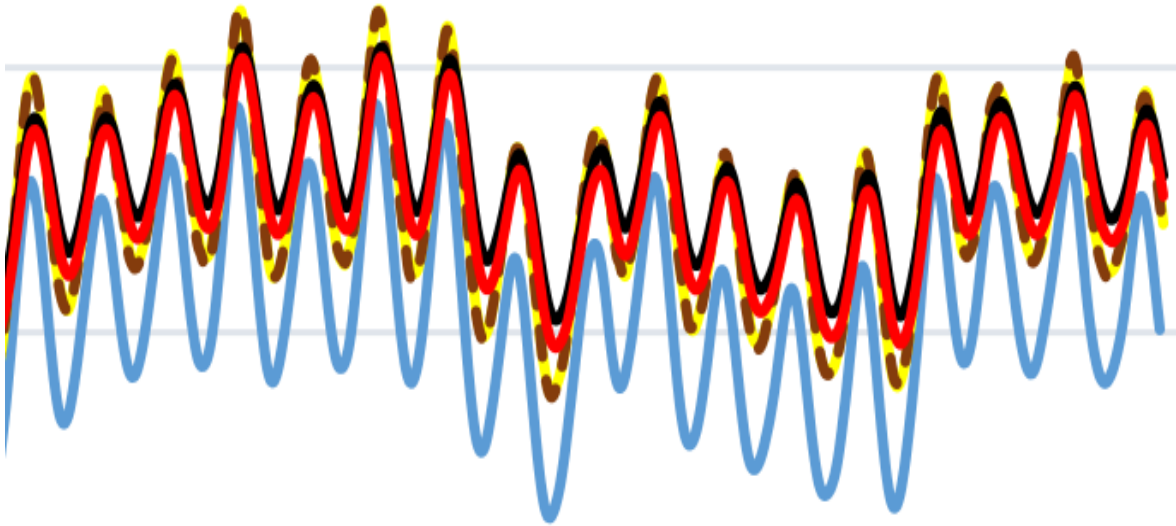


Figure IV.8 : Résultat d'humidité intérieur de la saison chaude avec humidité extérieur de 10%.

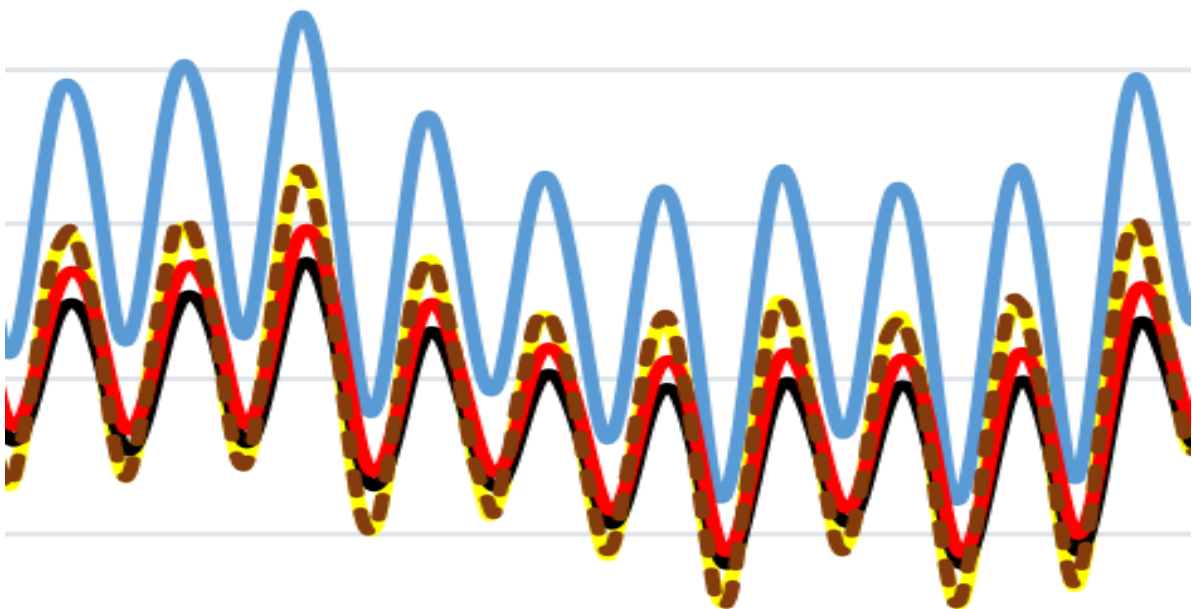


Figure IV.9 : Résultat de température intérieur de la saison chaude avec humidité extérieur de 10%.

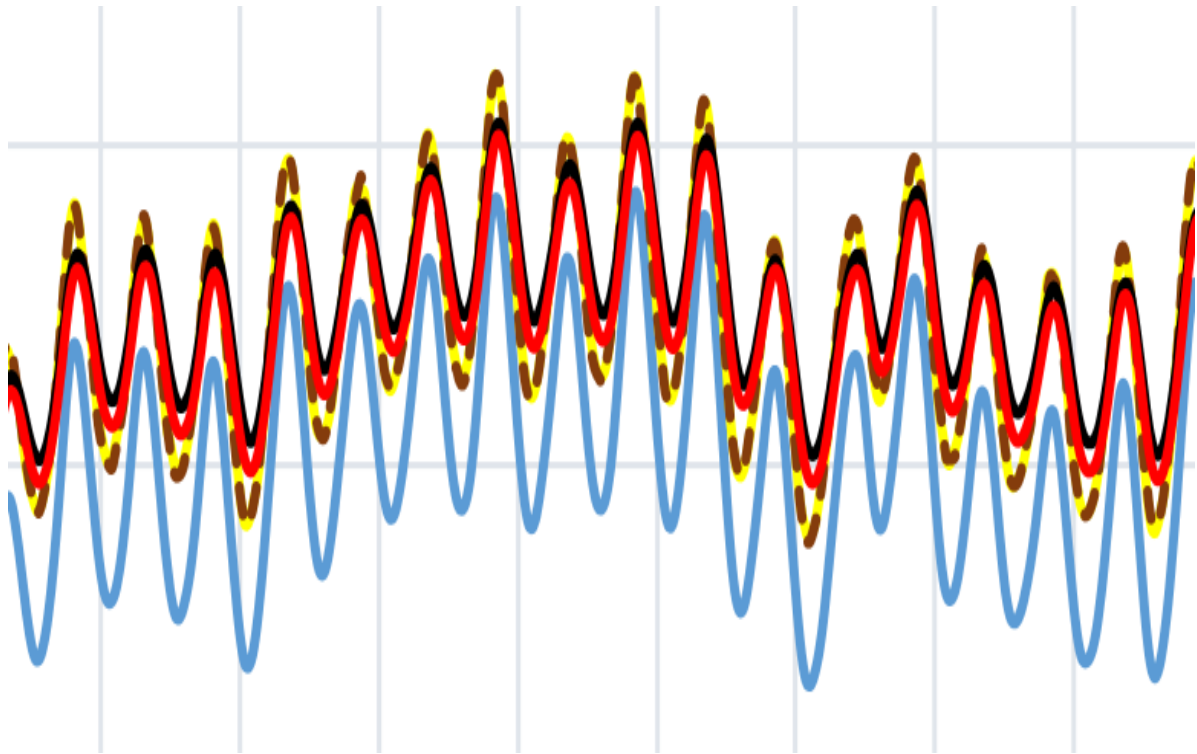


Figure IV.10 : Résultat d'humidité intérieur de la saison chaude avec humidité extérieure de 90%.

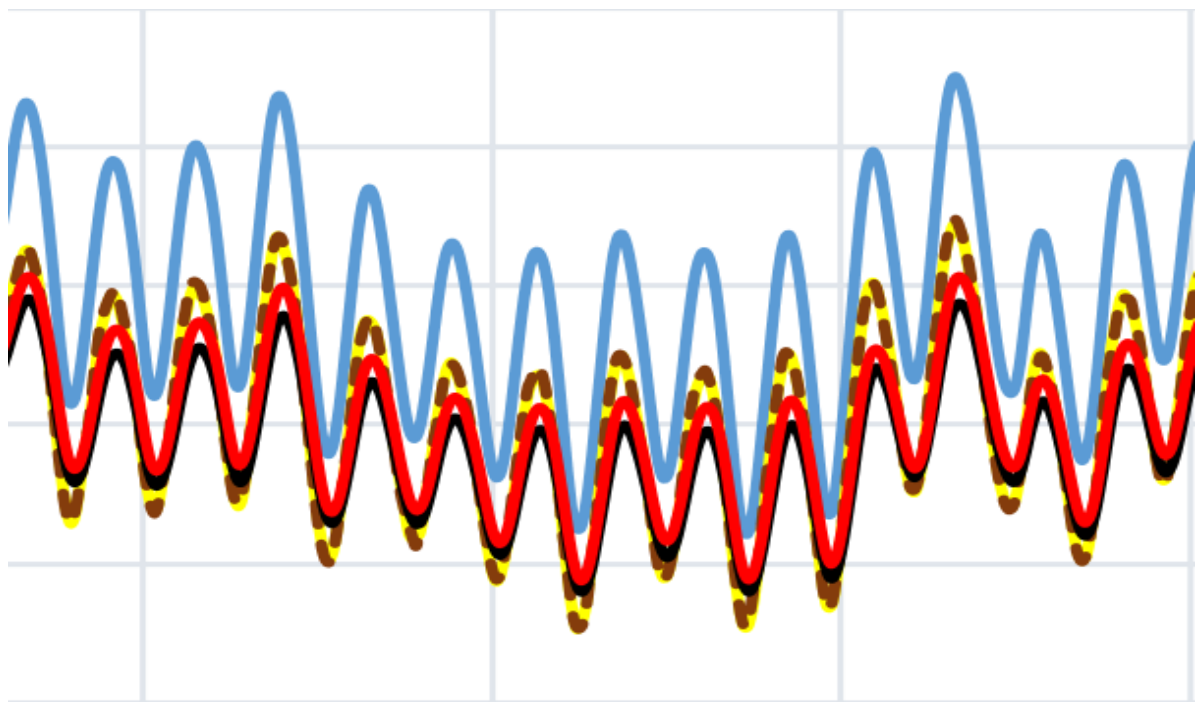


Figure IV.11 : Résultat de température intérieur de la saison chaude avec humidité extérieure de 90%.

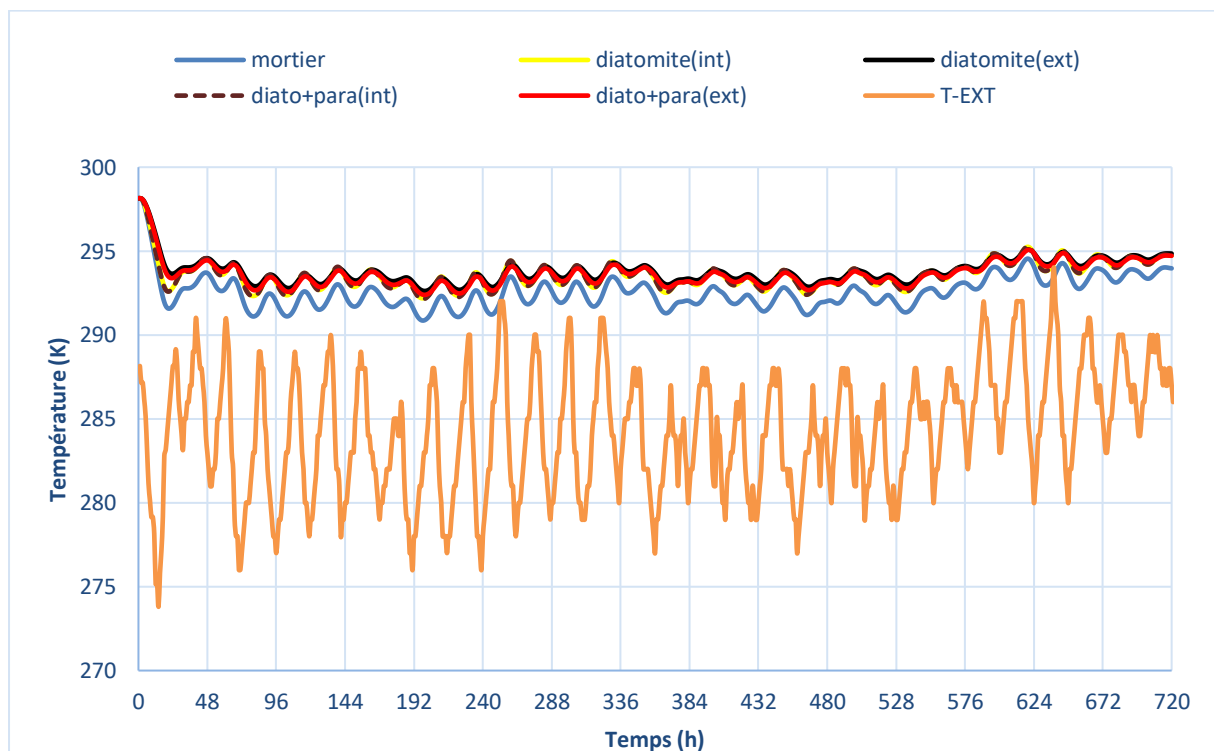


D'après les résultats obtenu (humidité extérieur 10% ou 90%) on remarque que :

- ✓ Les fluctuations de températures et d'humidité relative intérieurs avec isolation à l'extérieur de diatomite et la diatomite+paraffine est presque les même (différence maximale 0.9%). La diatomite et la diatomite+paraffine nous donne des résultats proches au confort dans l'intérieur. L'humidité ne descend pas à 0.4 sauf dans les jours à température élevée où l'humidité atteint 0.373.
- ✓ Les fluctuations de températures et d'humidité relative intérieure avec isolation a l'intérieure par la diatomite et la diatomite +paraffine est presque les mêmes. Les plaques intérieures de diatomite et la diatomite+paraffine nous donne le deuxième résultat qui est proche au confort intérieur de mur. On a remarqué que l'humidité relative est inférieure à 0,4 dans plusieurs cas. Elle atteint 0,36.
- ✓ Les fluctuations de température et d'humidité relative de mortier nous donnent des résultats loin de confort intérieur. L'humidité intérieure atteint 0.33.

## B- Saison froide à l'extérieur

### B-1 Humidité de 10% à l'extérieur



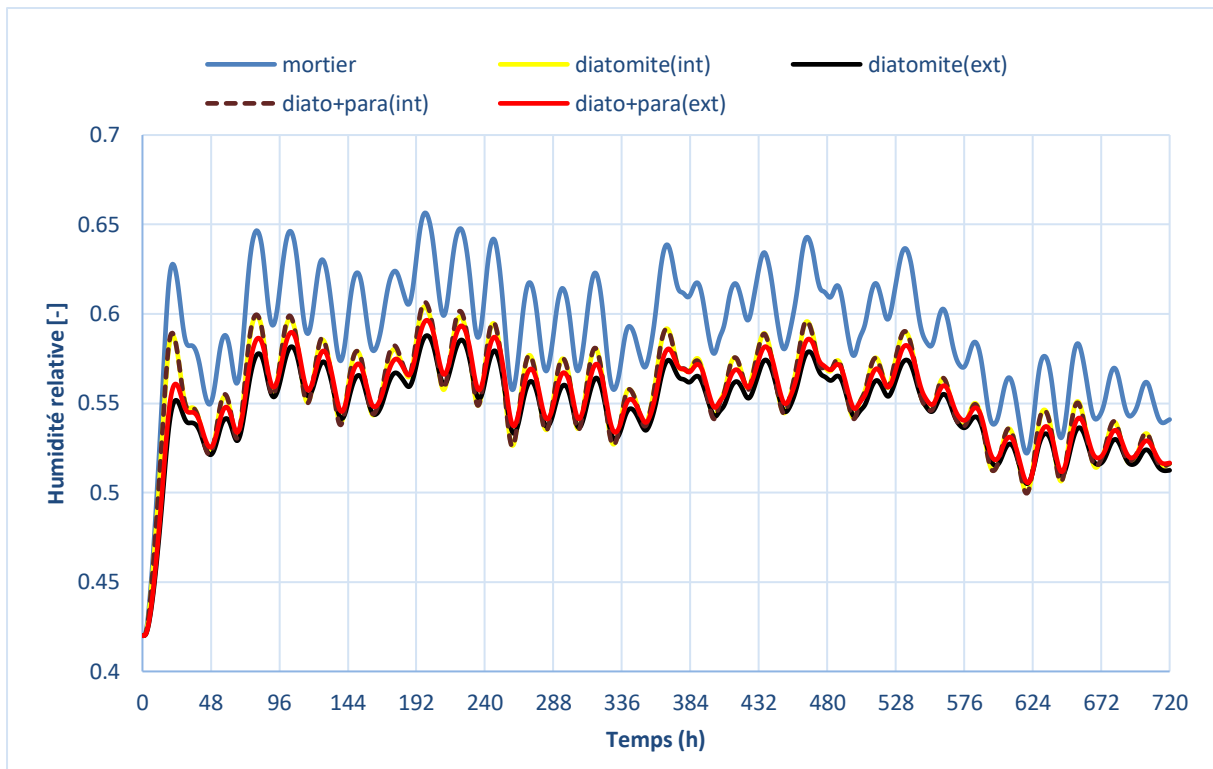
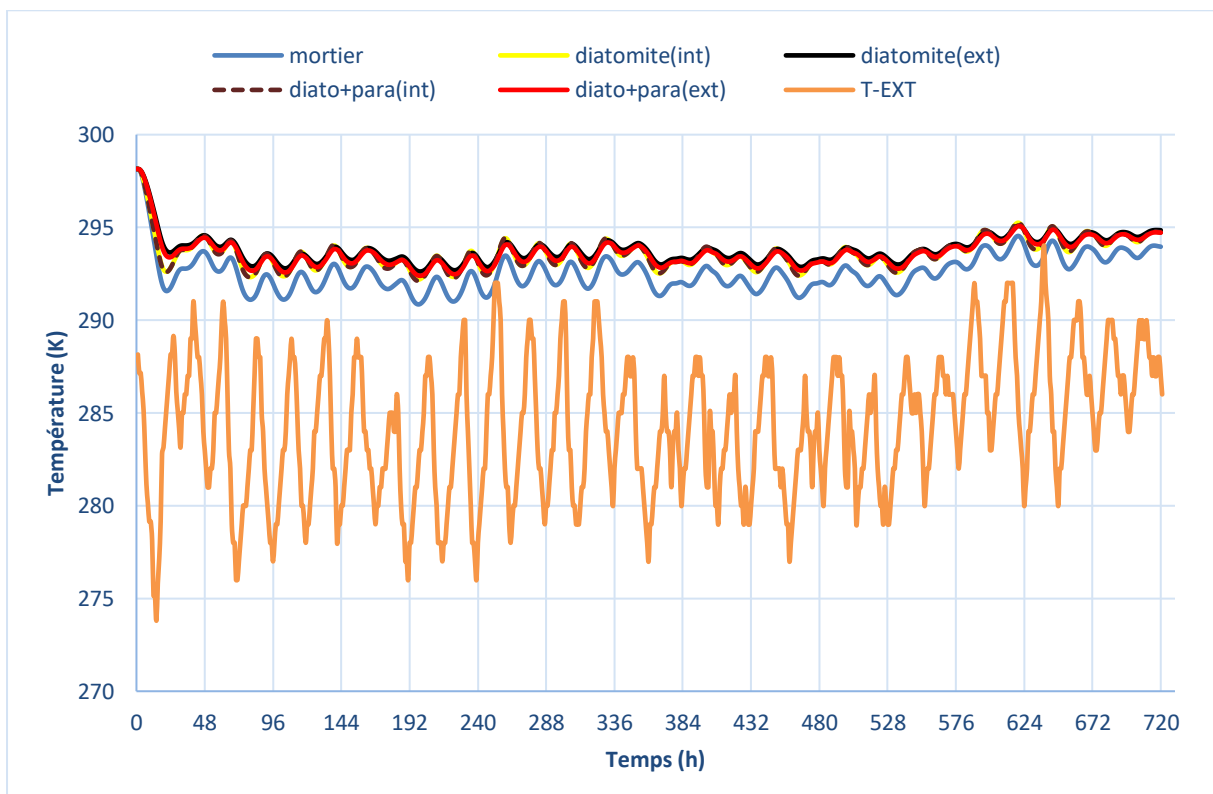


Figure IV.12 : Influence des conditions extérieures saison froide ( $T_{\text{ext}}$  et  $HR_{\text{ext}} = 10\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures.

### B-2 humidité de 90% à l'extérieure



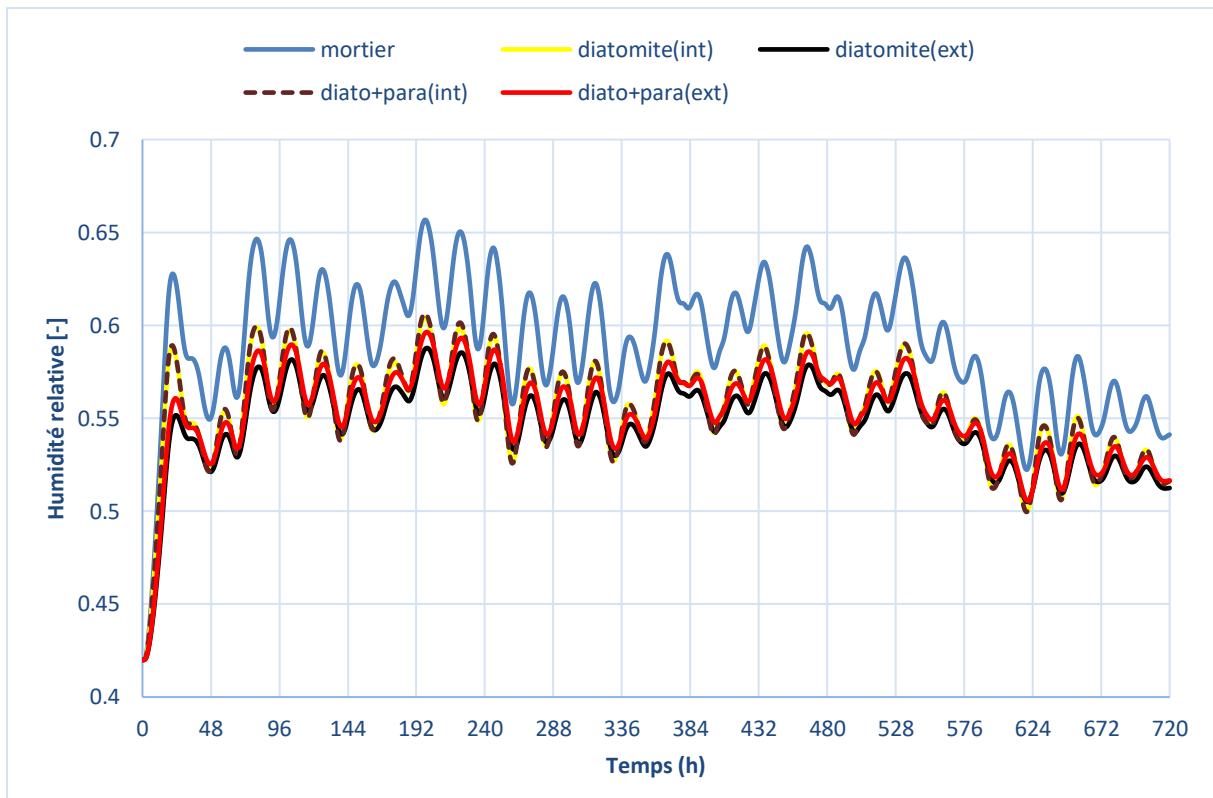


Figure IV.13 : Influence des conditions extérieures saison froide ( $T_{\text{ext}}$  et  $HR_{\text{ext}} = 90\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures.

#### Interprétations des résultats saison froide :

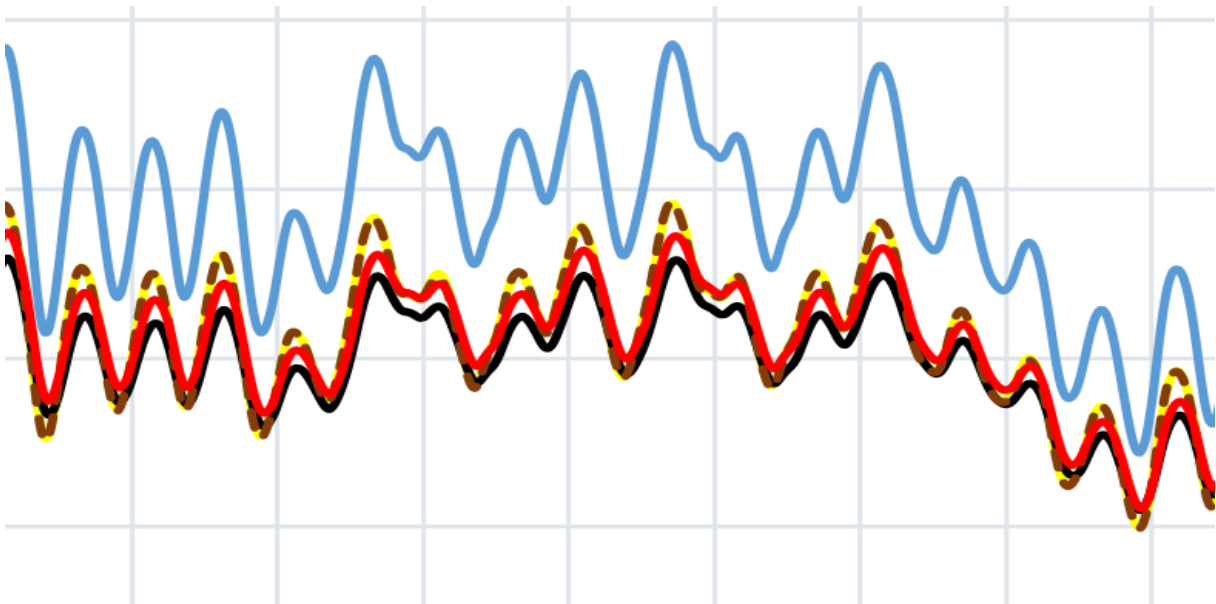


Figure IV.14 : Résultat d'humidité intérieur de la saison froid avec humidité extérieur de 10%.

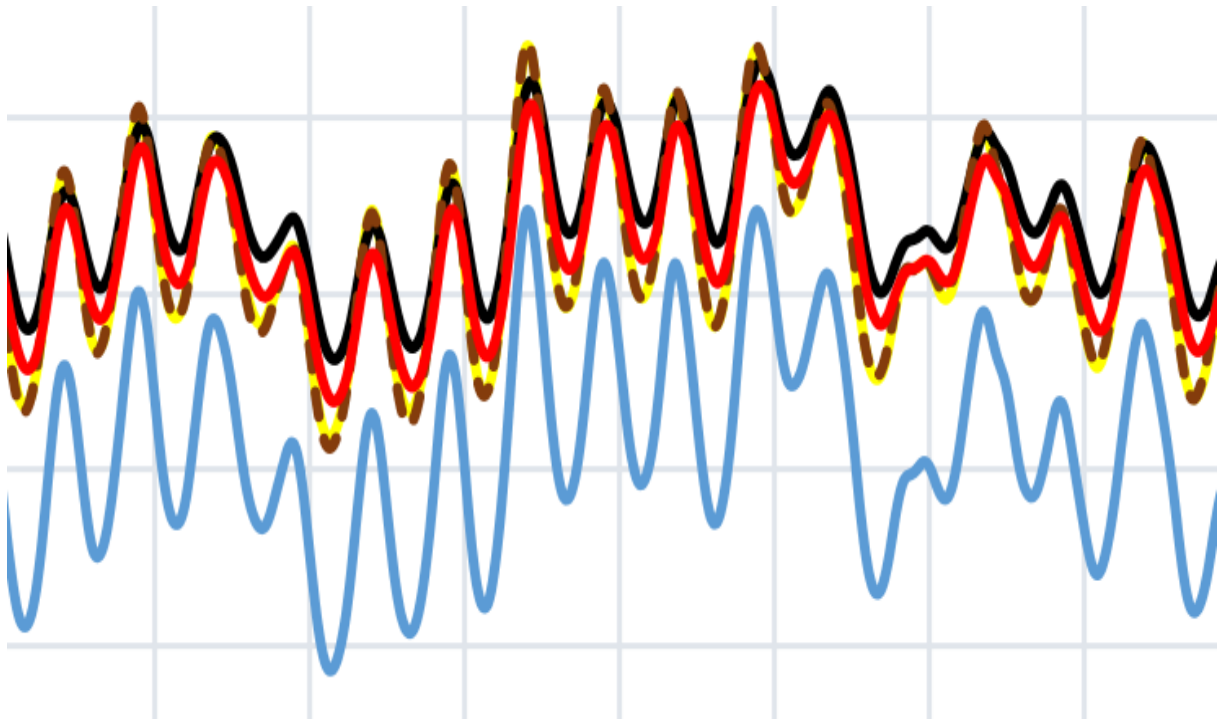


Figure IV.15 : Résultat de température intérieur de la saison froide avec humidité extérieure de 10%.

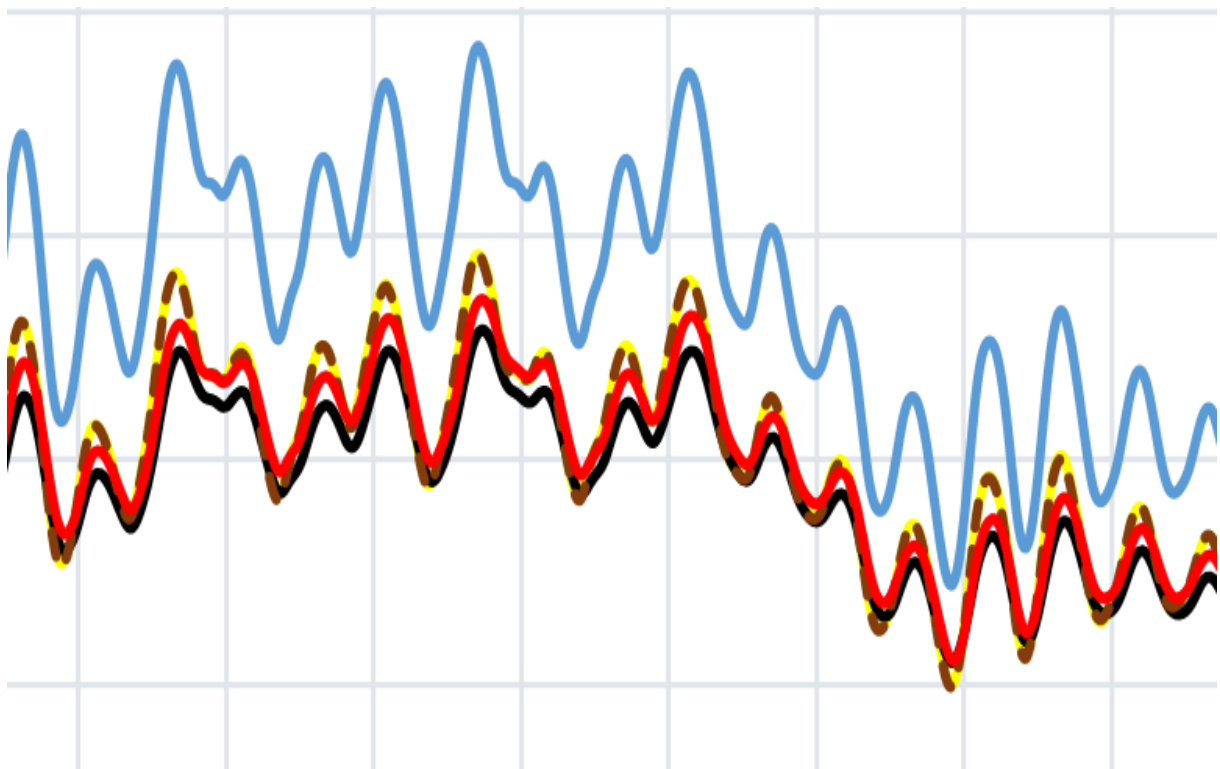


Figure IV.16 : Résultat d'humidité intérieur de la saison froid avec humidité extérieur de 90%.

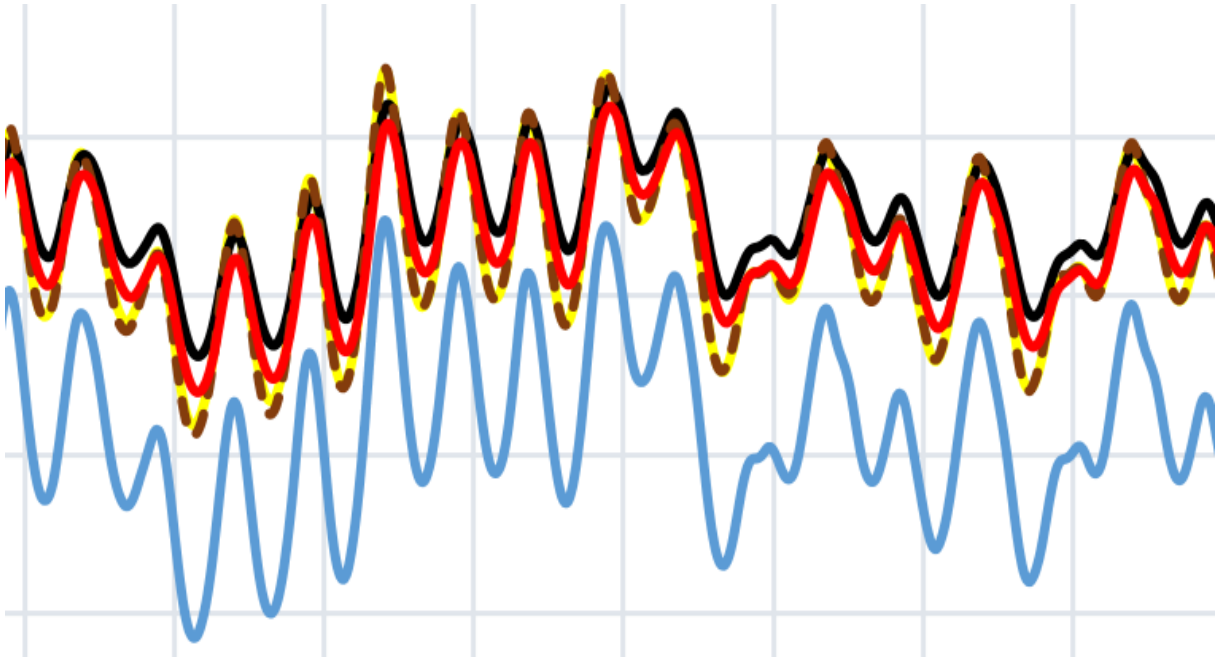


Figure IV.17 : Résultat de température intérieure de la saison froide avec humidité extérieure de 90%.

D'après les résultats obtenus (humidité à l'extérieur 10% ou 90%) on remarque que :

- ✓ Les fluctuations de température et d'humidité relative intérieures avec isolation extérieure de diatomite et la diatomite+paraffine est presque la même (différence maximale 2.4%). L'utilisation d'une plaque de diatomite à l'extérieur nous donne des résultats proches au confort puis diatomite+paraffine dans l'intérieur. L'humidité ne dépasse pas le 0.6 dans tous les jours.
- ✓ Les fluctuations de température et d'humidité relative intérieures avec isolation intérieure de diatomite et la diatomite+paraffine est presque la même. L'utilisation d'une plaque de diatomite ensuite diatomite+paraffine à l'intérieure nous donne le deuxième résultat proche au confort intérieur. On a remarqué que l'humidité relative ne dépasse pas le 0.6 sauf les jours très froids qui atteignent 0.605.
- ✓ Les fluctuations de température et d'humidité relative de mortier nous donnent des résultats loin de confort dans l'intérieur. On a remarqué que l'humidité relative est supérieure à 0,6 dans plusieurs cas. Elle atteint 0,656.

### Explications :

#### Diatomite seule ou diatomite + paraffine ?

La diatomite seule nous donne la température proche au confort intérieur puis diatomite +paraffine, puis mortier dans la saison chaude et froide avec une humidité

extérieure 10% et 90%, car la conductivité thermique de la diatomite seule est petite 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 W/(m.K)) avec une paraffine de conductivité thermique 0.2 W/(m.K). Or, malgré l'amélioration de la capacité thermique de diatomite ( $C_p$ ), cela n'est pas suffisant. Du côté économique on utilise la diatomite seule est plus rentable qu'avec la paraffine, cela revient cher.

### Diatomite à l'extérieur ou à l'intérieur ?

Les résultats obtenus par la diatomite seule à l'extérieur sont proches du confort qu'à l'intérieur dans les régions chaudes et froides avec une humidité extérieure de 10% et 90%, car la plaque de diatomite contient une conductivité thermique faible et ne permet pas le passage de la chaleur depuis le début.

### Humidité

Pour l'humidité on remarque aussi que la diatomite seule à l'extérieur donne des résultats proches au confort intérieur, car la température intérieure est basse dans la saison chaude et grande dans la saison froide, c'est-à-dire la pression de vapeur saturée est basse dans la saison chaude et grande dans la saison froide  $\varphi = \frac{P_v}{P_{v,s}(T)}$ .

### IV-4-2 cas n° 02

L'influence d'utiliser une plaque de diatomite à l'extérieur sur les paramètres hygrothermiques pour les deux murs (mur en brique et mur en parpaing) afin de trouver la meilleure isolation. Nous avons considéré la température comme paramètre variable et une humidité relative constante de 10% et 90%.

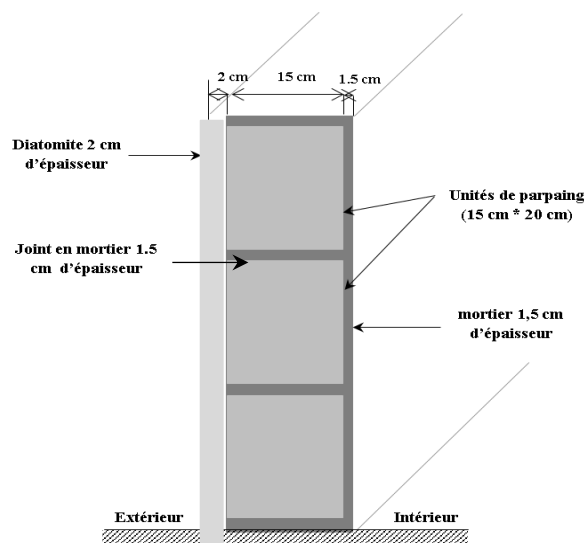


Figure IV.18 : Vue axonométrique d'un mur typique en parpaing.

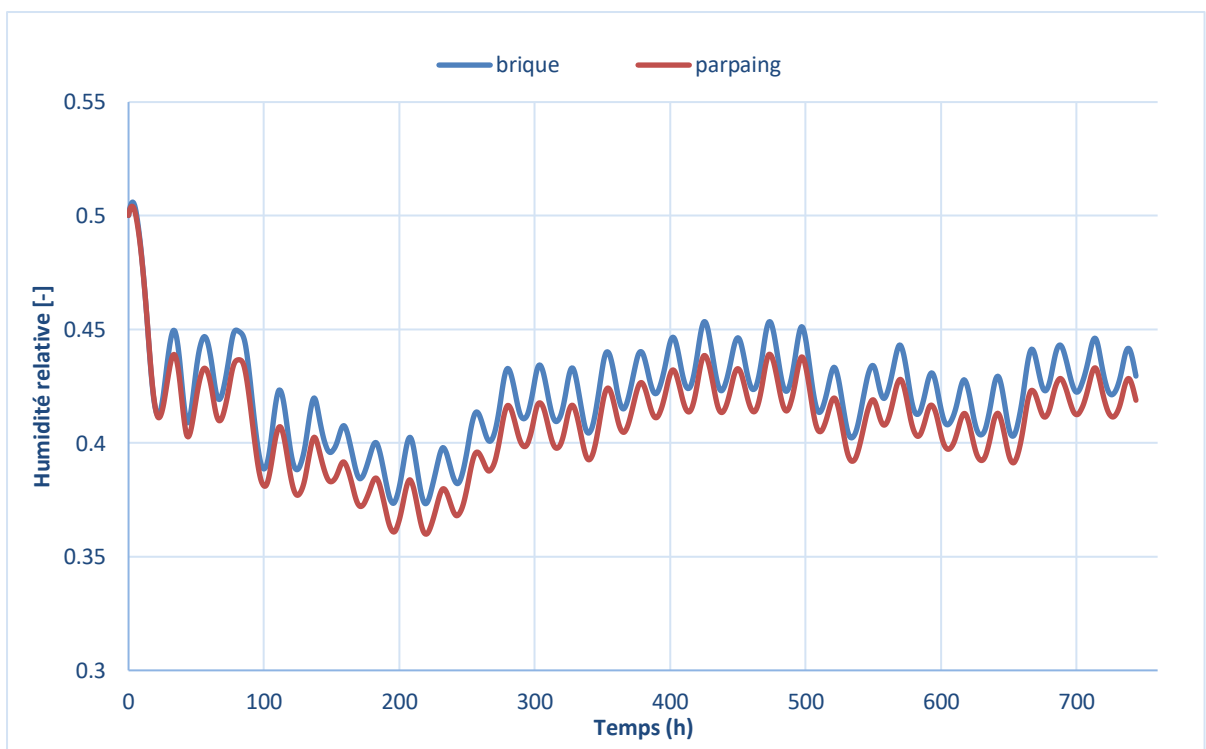
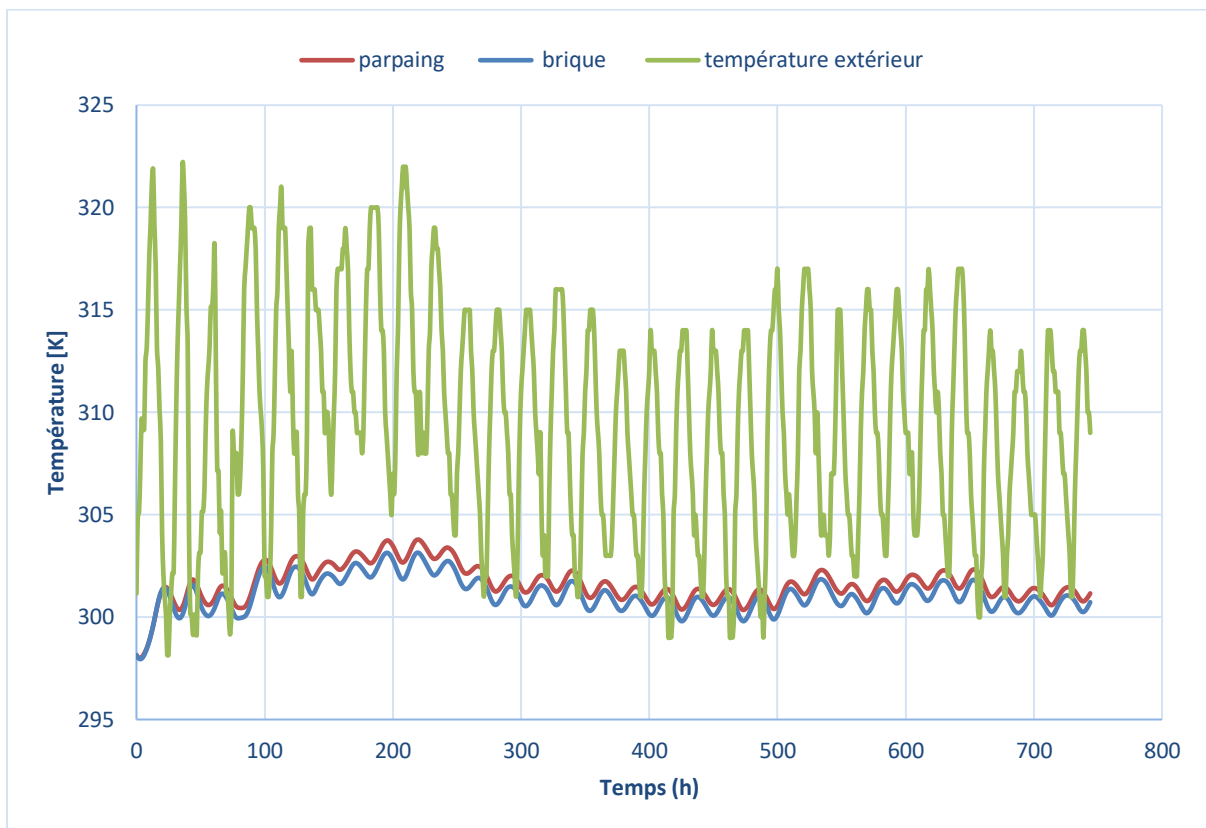


Figure IV.19 : Influence des conditions extérieures saison chaude ( $T_{\text{ext}}$  et  $HR_{\text{ext}} = 10\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures de brique et parpaing.

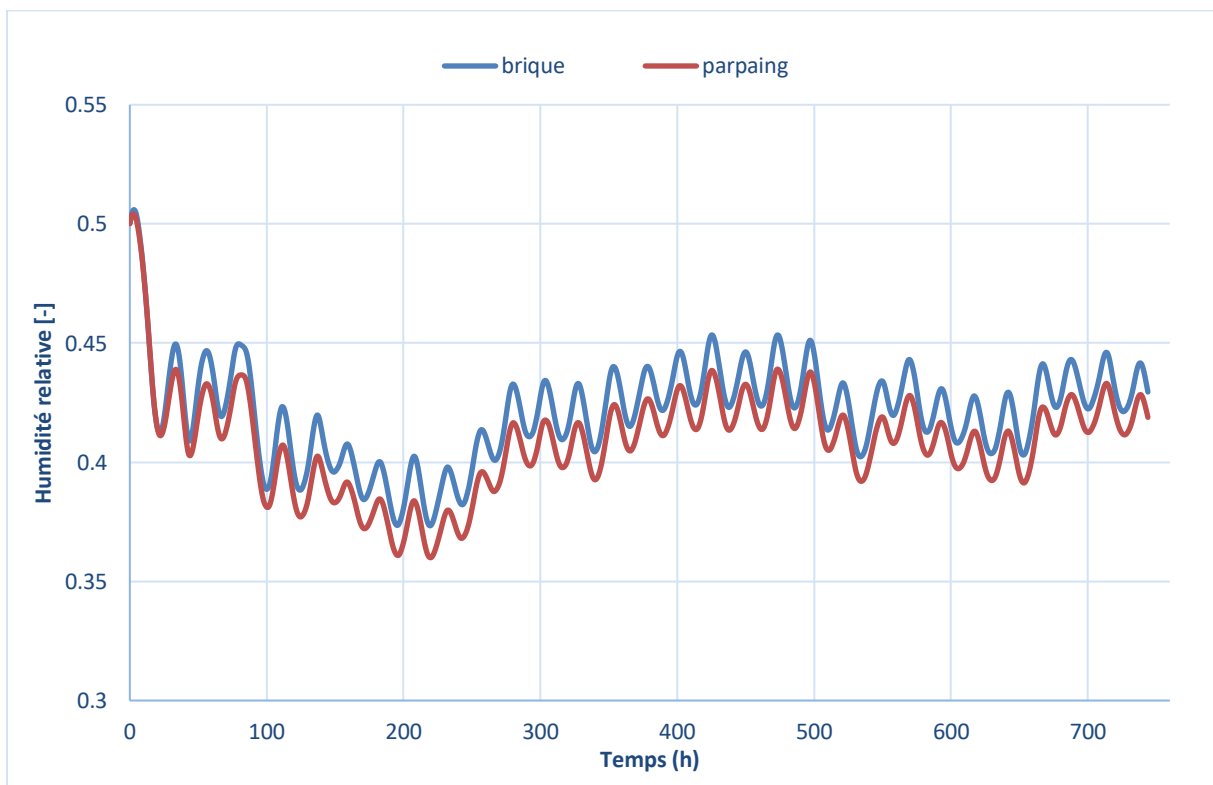
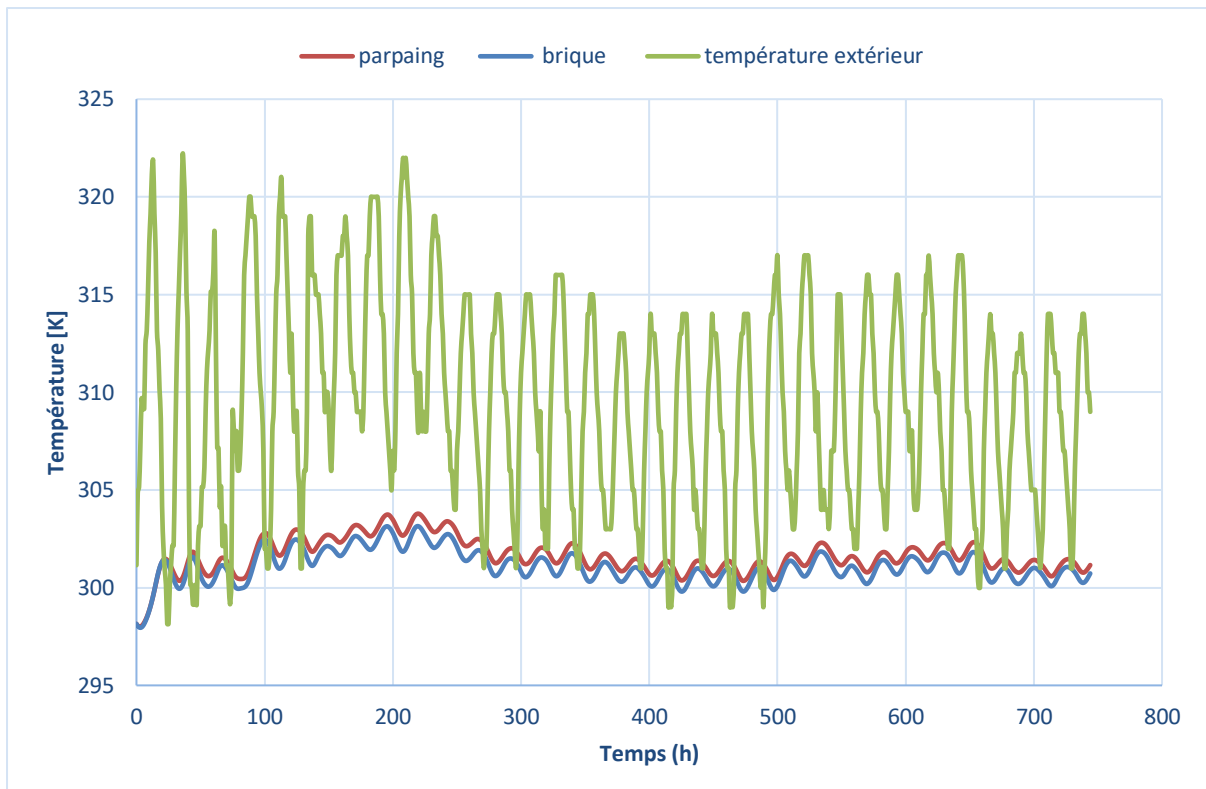


Figure IV.20 : Influence des conditions extérieures saison chaude ( $T_{\text{ext}}$  et  $HR_{\text{ext}} = 90\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures de brique et parpaing.



### Interprétation :

- ✓ Les fluctuations de température et d'humidité relative dans le mur en brique est proche du confort intérieur que le mur avec parpaing dans les deux cas d'humidité à l'extérieur à savoir 10% et 90%.

### Explication :

$$x1=0 \text{ m} \quad y1= 0.085 \text{ m} \quad z1=0.085 \text{ m}$$

$$x2=0.17 \text{ m} \quad y2=0.085 \text{ m} \quad z2=0.085 \text{ m}$$

Calcul de la résistance :

$$\text{➤ } R_b = \frac{e_b \cdot n_b}{\lambda_b} + \frac{e_a \cdot n_a}{\lambda_a} = \frac{0.006345 \cdot 4}{0.778} + \frac{0.04154 \cdot 3}{0.228} = 0.579 \text{ (K} \cdot \text{m}^2\text{)}/\text{W}$$

$$\text{➤ } R_p = \frac{e_p \cdot n_p}{\lambda_p} + \frac{e_{ap}}{\lambda_{ap}} = \frac{0.02 \cdot 2}{1.05} + \frac{0.11}{0.28} = 0.431 \text{ (K} \cdot \text{m}^2\text{)}/\text{W}$$

La résistance de brique est supérieure à celle de parpaing donc les résultats de brique est meilleure que le parpaing.

### IV-4-3 cas n° 03

Les performances hygrothermiques été comparées et analysées par l'influence d'utiliser une plaque de diatomite à l'extérieur dans la brique et le parpaing avec des cavités remplies par la diatomite dans le brique et dans le parpaing. Nous avons gardé les mêmes conditions aux limites que celles utilisées dans le cas n°02.

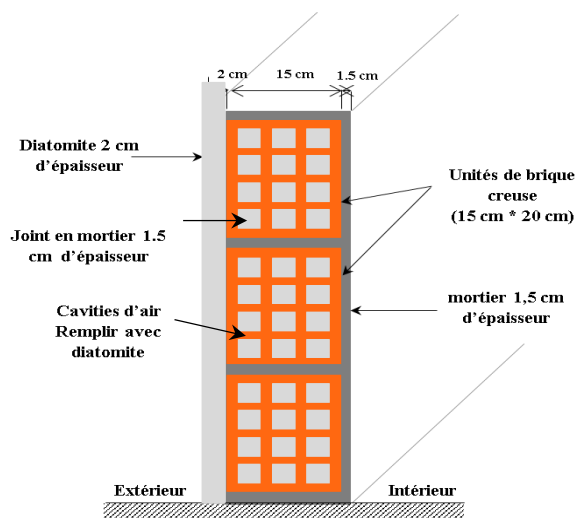


Figure IV.21 : Vue axonométrique d'un mur typique en brique avec isolation extérieure et dans les cavités d'air.

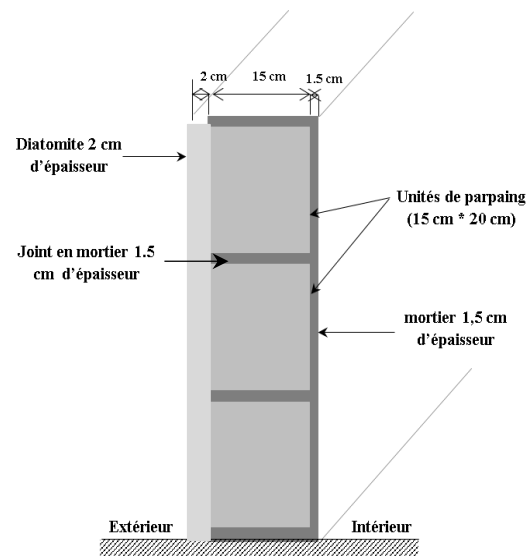


Figure IV.22 : Vue axonométrique d'un mur typique en parpaing avec isolation extérieure et dans les cavités d'air.

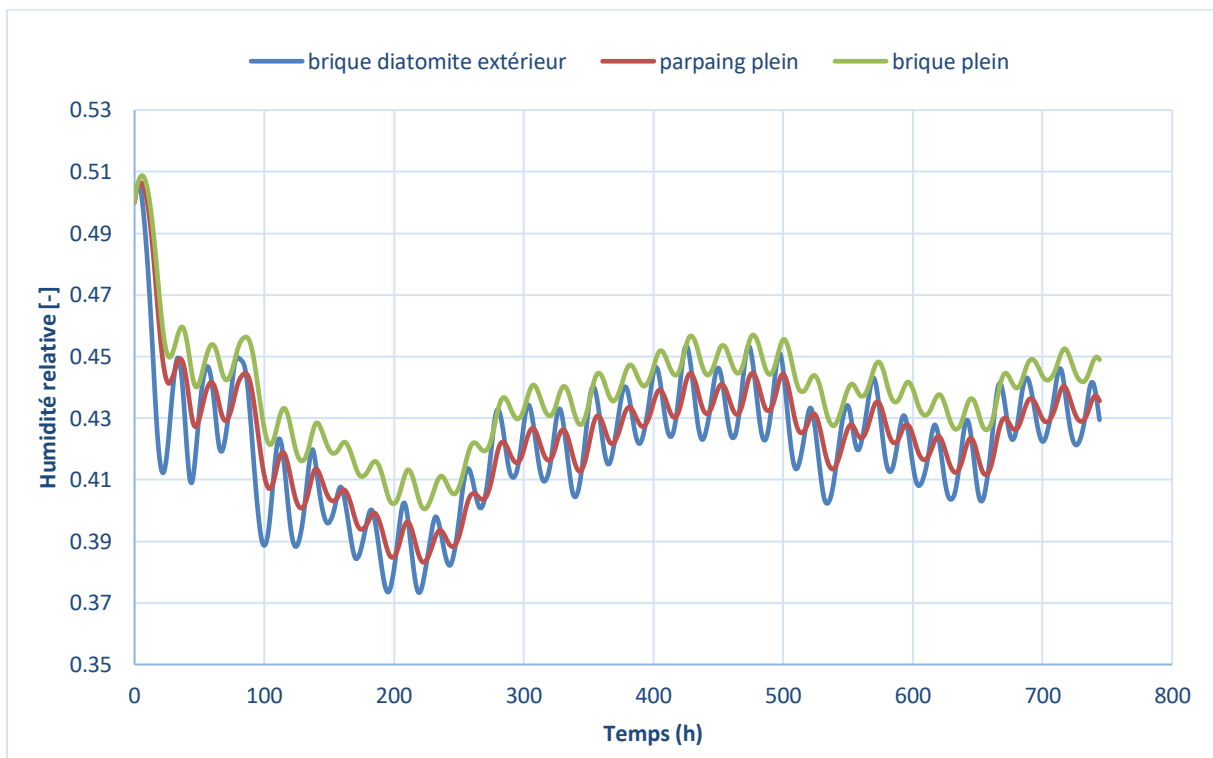
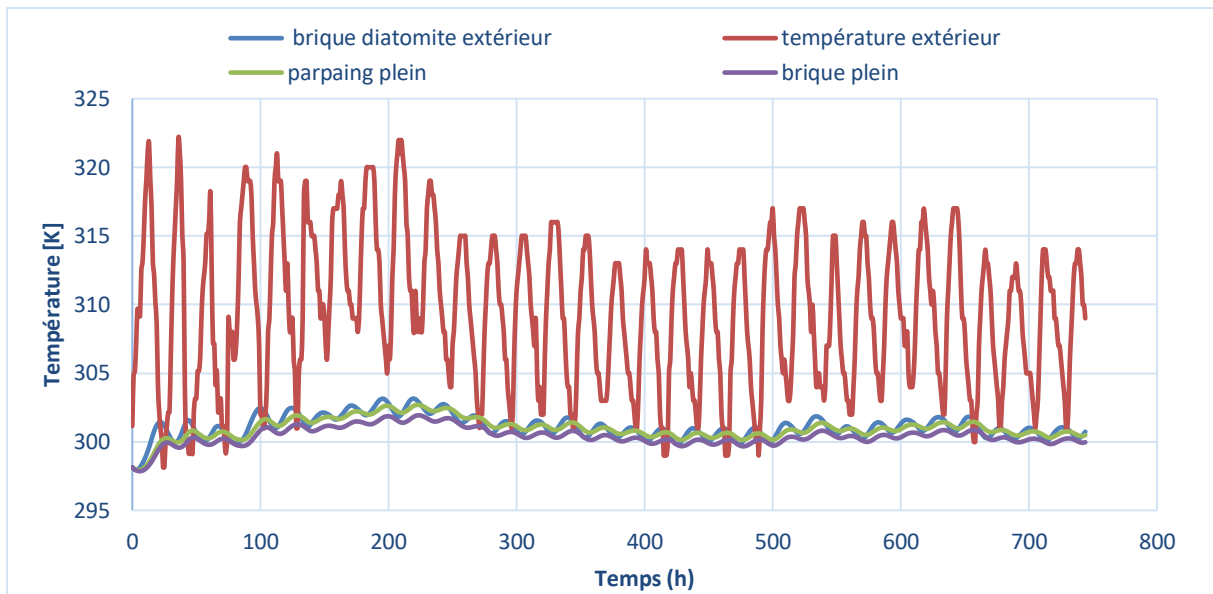


Figure IV.23 : Influence des conditions extérieures saison chaude ( $T_{\text{ext}}$  et  $HR_{\text{ext}} = 10\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures de brique plein, parpaing plein et brique vide.

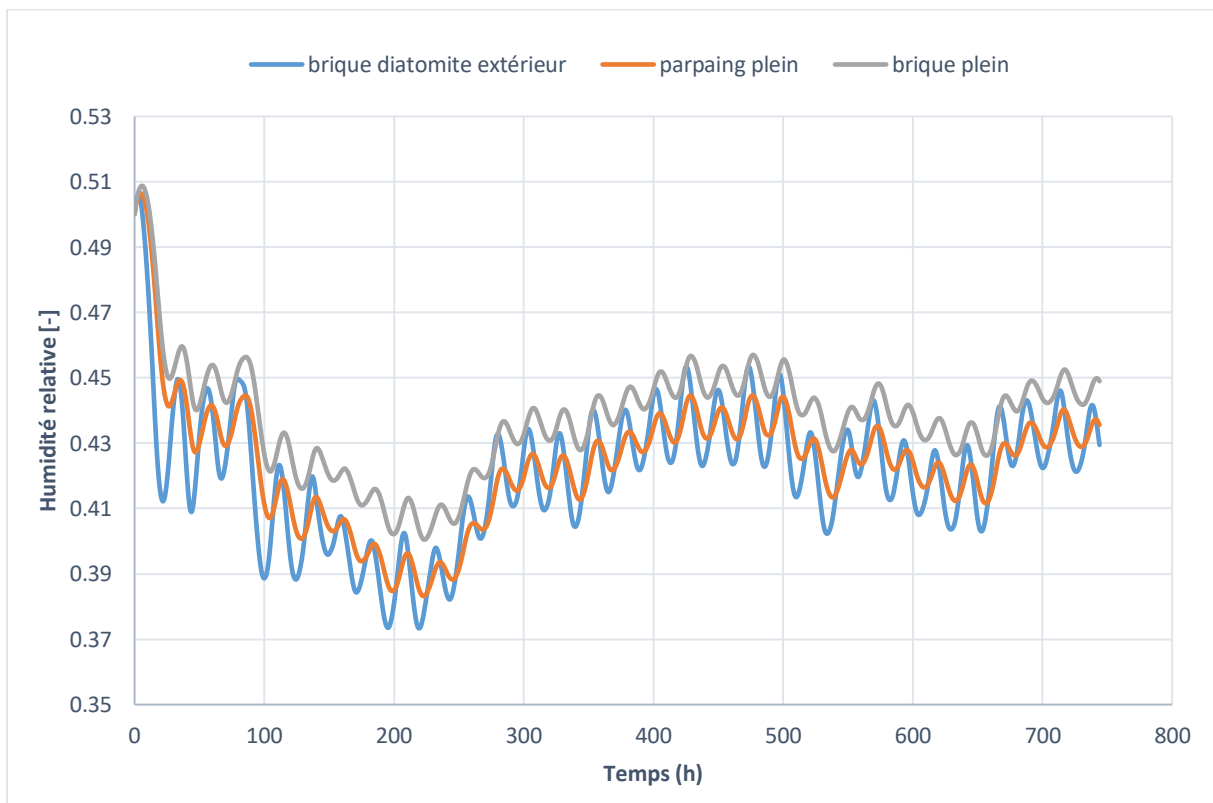
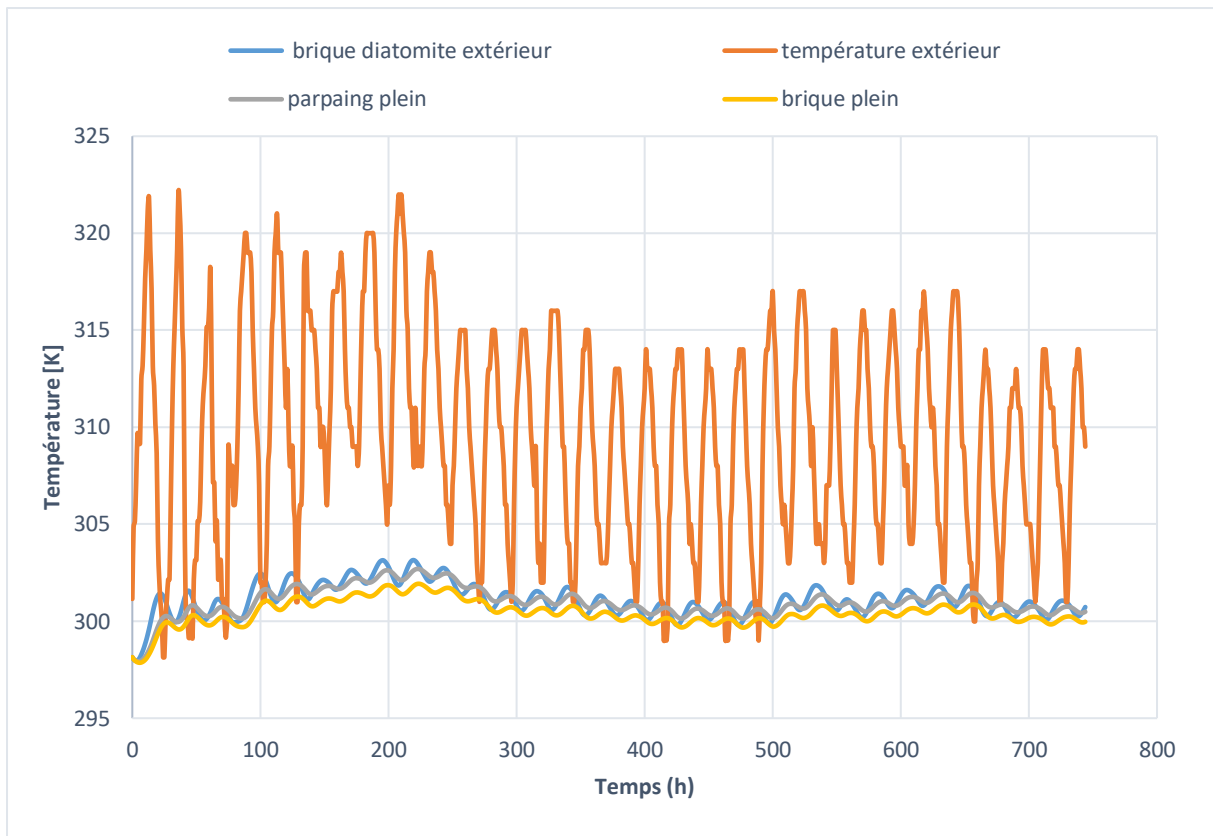


Figure IV.24 : Influence des conditions extérieures saison chaude ( $T_{\text{ext}}$  et  $HR_{\text{ext}} = 90\%$ ) sur la variation temporelle de températures et humidité intérieures de brique plein, parpaing plein et brique vide.

**Interprétation :**

- ✓ Les fluctuations de température et d'humidité relative du mur en brique plein + la plaque de diatomite extérieure donnent des résultats proches au confort intérieur que ceux du mur avec parpaing plein+ plaque, et cela dans les deux humidités extérieures 10% et 90%.

**Explication :**

$$x1=0 \text{ m} \quad y1= 0.085 \text{ m} \quad z1=0.085 \text{ m}$$

$$x2=0.17 \text{ m} \quad y2=0.085 \text{ m} \quad z2=0.085 \text{ m}$$

Calcul de la résistance :

$$\text{➤ } R_b = \frac{e_b \cdot n_b}{\lambda_b} + \frac{e_a \cdot n_a}{\lambda_a} = \frac{0.006345 \cdot 4}{0.778} + \frac{0.04154 \cdot 3}{0.228} = 0.579 \text{ (K} \cdot \text{m}^2\text{)}/\text{W}$$

$$\text{➤ } R_{bp} = \frac{e_b \cdot n_b}{\lambda_b} + \frac{e_d \cdot n_d}{\lambda_d} = \frac{0.006345 \cdot 4}{0.778} + \frac{0.04154 \cdot 3}{0.1} = 1.28 \text{ (K} \cdot \text{m}^2\text{)}/\text{W}$$

$$\text{➤ } R_{pp} = \frac{e_p \cdot n_p}{\lambda_p} + \frac{e_d \cdot n_d}{\lambda_d} = \frac{0.02 \cdot 2}{1.05} + \frac{0.11}{0.1} = 1.138 \text{ (K} \cdot \text{m}^2\text{)}/\text{W}$$

La résistance de la brique pleine est supérieure à celle de parpaing plein, donc les résultats de brique pleine sont meilleurs que ceux du parpaing plein et les résultats du parpaing plein sont meilleurs que ceux de la brique vide.

**IV-5 Conclusion :**

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

On peut conclure 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 ne donne aucun effet pour l'isolation, pour cela il faut bien choisir la paraffine selon les conditions de la région considérée.

Ensuite, la comparaison entre le 1<sup>ier</sup> cas et le deuxième cas montre que l'isolation par une plaque à l'extérieur donne une meilleure isolation que ce soit dans la saison chaude ou froide et avec une humidité extérieure de 10% et 90%.

Enfin, les résultats du 3<sup>ème</sup> cas montrent que l'utilisation d'une plaque isolante à l'extérieur avec un taux de remplissage de 100% en diatomite dans la brique est plus mieux que ceux de la configuration avec le parpaing.

---

# Conclusion générale

---

Dans un monde où les besoins énergétiques augmentent jour après jour en utilisant des sources épuisables, c'est le temps de prendre conscience de la manière la plus efficace d'améliorer les ambiances intérieures en réduisant les impacts énergétiques et environnementaux liés à une forte consommation d'énergie. 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 en améliorant les ambiances intérieures afin de résoudre les problèmes d'étanchéité liée à la conception et à la réalisation des constructions. Donc, L'isolation thermique est l'une des solutions essentielles et premières à considérer dans l'efficacité énergétique du bâtiment [44].

La principale solution passive est de traiter l'enveloppe, 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. [45]

Notre étude répondre à la question de l'isolation thermique par l'utilisation de la diatomite et la diatomite mélangée avec la paraffine (MCHCP) comme une solution qui peut réduire la consommation énergétique en minimisant les fluctuations de la température et de l'humidité dans l'environnement intérieur.

Le modèle utiliser dans ce travail est un modèle de transfère couplé de chaleur et l'humidité pour analyser la performance hygrothermique d'un mur multicouche, isolé par des différentes configurations et données climatiques. Ce modèle a été développé et intégré dans le logiciel COMSOL.

Pour confirmer la validité de ce dernier. Une validation numérique a été réalisée contre des tests benchmarks. Le résultat obtenu montre une bonne concordance entre la solution analytique et numérique.

Plusieurs configurations ont été traité et analysé :

- Cas 1 : Utilisation d'une plaque de diatomite seule et diatomite avec paraffine (2 cm) sur la face intérieure et extérieure.
- Cas 2 : Utilisation d'une plaque de diatomite (2 cm) au côté extérieure dans la brique et dans le parpaing.
- Cas 3 : Une nouvelle configuration semble au deuxième cas avec des cavités remplit de la diatomite.

Les solutions trouvées des simulations numériques et les comparaisons entre plusieurs cas montre que :

- ✓ L'utilisation d'une plaque de diatomite seule extérieure donne des bons résultats.
- ✓ L'utilisation de la brique + plaque de diatomite extérieure mieux que le parpaing+ plaque de diatomite extérieure.
- ✓ La meilleure configuration c'est celle de la brique pleine avec isolation extérieure.
- ✓ On peut utiliser le parpaing plein de diatomite dans les toitures car sa résistance augmente de 2,6 fois.

Enfin, nous espérons dans un prochain avenir de développer le présent travail par :

- Une expérience qui pourra confirmer les résultats numériques.
- Proposition des nouvelles configurations (un mélange de ciment + sable+ poudre de diatomite pour le mortier).
- Pour traiter un problème du thermique de bâtiment d'une manière détailler l'étude énergétique avec les matériaux de construction doit être combinait avec une étude de génie civil.

---

## Références

---

- [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-premier-consommateur-denergie-en-algerie> 05/03/2020.
- [4] : <http://capouest.info/2019/12/17/accelerer-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-hydro-aérauliques 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 a changement de phase (MCP), En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en architecture, UNIVERSITE MOULOU

MAMMERRI 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-hygroscopic material, Energy and Building. 86 (2015) 1–6.

[30] : [https://centrecfs.wordpress.com/2016/10/27/le-polystyrene-est-une-veritable-bombe-a-retardement/?fbclid=IwAR0UI\\_bzy2Im0-gg3GJamfK8yPZYuEHRIBBdib\\_XhUtrHGSzulilPtz9kFY](https://centrecfs.wordpress.com/2016/10/27/le-polystyrene-est-une-veritable-bombe-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 MERADI<sup>1</sup>, L. ATOUI<sup>2</sup>, A. Balaska<sup>1</sup>, S. BOUHOUCHE<sup>1</sup>.  
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] : HM. Künzle, Simultaneous heat and moisture transport in building components.  
One and two dimensional calculation using simple parameters. Dissertation, university  
Stuttgart, Germany, (1995) (ISBN 3-8167-4103-7).
- [38] : 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.
- [39] : <http://thesis.univ-biskra.dz/2294/4/Chapitre%2002.pdf> 28/04/2020.
- [40] : [http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06\\_lessons\\_gc-  
methodes\\_elements\\_finis.pdf](http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06_lessons_gc-methodes_elements_finis.pdf) 29/04/2020.
- [41] : 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.
- [42] C.E. Hagentoft, A.S. Kalagasidis, B. Adl-Zarrabi, Assessment method of  
numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building  
components : benchmarks for one-dimensional cases, J. Therm. Envelope Build. Sci.  
27(4) (2004) 327–352.
- [43]: [https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/oran-  
1111/#:~:text=Le%20climat%20de%20Oran%20est%20dit%20temp%C3%A9r%C3%A9%20chaud.&text=Selon%20la%20classification%20de%20K%C3%B6ppen,mm%20de%20pluie%20par%20an.](https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/oran-1111/#:~:text=Le%20climat%20de%20Oran%20est%20dit%20temp%C3%A9r%C3%A9%20chaud.&text=Selon%20la%20classification%20de%20K%C3%B6ppen,mm%20de%20pluie%20par%20an.) 20/06/2020
- [44] : [http://thesis.univ-biskra.dz/2971/1/M%C3%A9moire\\_26\\_2017.pdf](http://thesis.univ-biskra.dz/2971/1/M%C3%A9moire_26_2017.pdf) 01/08/2020.
- [45] : [http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/167/4/Etude-Theorique-et-  
Experimentale-de-lIsolation-ThermiqueInterieure-dune-Piece-dun-Habitat-dans-la-  
region-de-Ghardaia.pdf](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/167/4/Etude-Theorique-et-Experimentale-de-lIsolation-ThermiqueInterieure-dune-Piece-dun-Habitat-dans-la-region-de-Ghardaia.pdf) 01/08/2020.