

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

Présenté par : MAHMOUDI Djahida

Sujet

Etude expérimentale et numérique des performances du béton et de la chape développés à la base de la diatomite algérienne pour améliorer l'isolation thermique des bâtiments.

Soutenu publiquement, le **19 / 06 /2022**, devant le jury composé de :

M.GUELLIL Hocine	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M. SELADJI Chakib	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M.HACHEMI Housseem	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mme.SAIB Hind	MAA	Univ. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Avant tout, je remercie le Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volenté et surtout la santé durant toutes ces années d'études.

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de mémoire, **M.SELADJI Chakib** et **M.HACHEMI Housseem**. Je les remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

*Mes vifs remerciements à **M. GUELLIL Hocine** qui m'a fait l'honneur de présider le jury et aussi **Mme. SAIB Hind** qui m'a fait l'honneur d'examiner et d'évaluer ce modeste travail. Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont soutenu et aidé de près ou de loin durant ce travail : mes amis et collègues.*

*Enfin un grand merci à **ma mère** et **mon père** (Que Dieu ait son âme et l'amène au paradis), pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel, à la fois moral et économique, qui m'a permis de réaliser les études que je voulais et par conséquent ce mémoire.*



Dédicace

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon père disparu trop tôt. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.

*À ma très **chère mère**, ainsi qu'à mes frères **Abdallah** et **Azzedine** et ma sœur **Fatima** et sa petite famille.*

*À toute ma famille, **MAHMOUDI** et **KEBIR**.*

À tous mes amis,

À toute personne qui m'a encouragé ou aidé au long de mon parcours académique.



ملخص

يعد دمج المواد الخاملة المبتكرة مع مواد البناء طريقة لتقليل استهلاك الطاقة وضمان مستوى عالٍ من الراحة الداخلية للمبنى. على المستوى الوطني، يتبين أن قطاع البناء في الجزائر هو أكثر القطاعات كثافة في استخدام الطاقة. يعتبر البوليسترين من أكثر المواد استخدامًا في قطاع البناء السكني والتجاري في الجزائر. بينما يحتوي الأخير على الدوديكان الحلقي السداسي البروم (HBCD)، والذي يعتبر من الملوثات العضوية الثابتة. الغرض من أطروحتنا هو دراسة إمكانية استخدام مادة جديدة للتحكم في الرطوبة تعتمد على الدياتوميت لتطوير ذراع التسوية والخرسانة في العزل الحراري للمبنى. من ناحية أخرى، فإن الدياتومايت مادة طبيعية وبيئية وفيرة للغاية في الجزائر، حيث يتميز بناقلية حرارية منخفضة ومسامية عالية جدًا. تم إجراء دراسة مقارنة تجريبية ورقمية لتحسين العزل الحراري للمبنى. تجرى التجارب في مخبر جامعة تلمسان باستخدام أشكال مختلفة من الدياتوميت (مسحوق ومحفور) ونخلط هذه الأشكال مع الخرسانة وذراع التسوية الذي تم تحليله بكاميرا الأشعة تحت الحمراء TESTO. من ناحية أخرى، يتم حل نموذج رقمي مناسب ثنائي الأبعاد باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM). أظهرت نتائج الدراستين (العديدية والتجريبية) توافق جيد وأن الخطأ النسبي لا يتجاوز 3.6% تسمح لنا النتائج التي تم الحصول عليها باستنتاج أن استخدام الدياتومايت على شكل حصى يعتبر من أفضل الحلول لتطوير الخرسانة وذراع التسوية في الجانب الحراري. تظهر المقارنة بين الأشكال المختلفة للدياتوميت أن الدياتوميت على شكل حصى في الخرسانة و ذراع التسوية ساهم في تقليل درجة الحرارة بشكل جيد مقارنة باستعمال الدياتوميت على شكل مسحوق.

كلمات مفتاحية: خرسانة؛ ذراع التسوية؛ الدياتوميت؛ COMSOL MULTIPHYISICS

Résumé

L'intégration des matériaux passifs innovants dans les enveloppes de bâtiment est un moyen pour réduire la consommation d'énergie et d'assurer un niveau élevé le confort intérieur de l'habitat. A l'échelle nationale, il est constaté que le secteur du bâtiment en Algérie est le secteur le plus énergivore. Le polystyrène est l'un des matériaux le plus utilisé dans le secteur des constructions résidentielle et commerciale, alors que ce dernier contient de l'hexabromocyclododecane (HBCD), qu'est considéré comme un matériau persistant organique polluant.

Le but de notre mémoire est d'étudier la possibilité d'utiliser un nouveau matériau de contrôle de l'humidité à base de la diatomite pour développer la chape et le béton dans l'isolation hygrothermique de la construction. D'autre part, la diatomite est un matériau naturel et environnemental très abondant en Algérie, car elle se caractérise par une faible conductivité thermique et une porosité très élevée. Une étude comparative expérimentale et numérique est réalisée pour améliorer l'isolation hygrothermique du bâtiment. Les expériences sont réalisées au laboratoire de l'Université de Tlemcen en utilisant différentes formes de diatomite (poudre et gravée) mélangés avec du béton sous forme de chape. Cette dernière est analysée avec la caméra infrarouge TESTO. D'autre part, un modèle numérique 2D approprié est résolu en utilisant la méthode des éléments finis (FEM). Les résultats des deux études (numériques et expérimentales) montrent un bon accord et l'erreur relative ne dépasse pas 3,6%. Les résultats obtenus nous permettent de conclure que l'utilisation de la diatomite sous forme de gravier est considérée comme l'une des meilleures solutions d'un point de vue thermique.

Mots clés : Béton , Chape , Diatomite, COMSOL Multiphysics.

Abstract

The integration of innovative passive materials in building envelopes is a way to reduce energy consumption and ensure a high level of indoor comfort of the habitat. On a national scale, it is noted that the building sector in Algeria is the most energy consuming sector. The polystyrene is considered one of the materials the most used in the sector of the residential and commercial constructions. While the latter contains the hexabromocyclododecane (HBCD), which is considered as a persistent organic polluting material. The purpose of our thesis is to study the possibility of using a new material of moisture control based on diatomite to develop the screed and concrete in the hygrothermal insulation of the construction. On the other hand, diatomite is a natural and environmental material very abundant in Algeria, because it is characterized by a low thermal conductivity and a very high porosity. A comparative experimental and numerical study is conducted to improve the hygrothermal insulation of the building. The experiments are carried out in the laboratory of the University of Tlemcen using different forms of diatomite (powder and etched) and we mix these forms with concrete and screed which were analyzed with the infrared camera TESTO. On the other hand, an appropriate 2D numerical model is solved using the finite element method (FEM). The results of both studies (numerical and experimental) show a good agreement and the relative error does not exceed 3.6%. From the results obtained, we can conclude that the use of diatomite in the form of gravel is considered as one of the best solutions for developing concrete and screed on the thermal side. The comparison between the different forms of diatomite shows that the diatomite in the form of gravel in the concrete and the screed contributed to reducing the temperature well compared to the use of diatomite in the powder form.

Keywords: Concrete; Screed; Diatomite; COMSOL MULTIPHYSICS.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale.....	2
Chapitre 1 Etude bibliographique	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Consommation énergétique et l’enveloppe du bâtiment.....	5
I.3 Humidité	8
I.4 Différents types de problème d’humidité dans les bâtiments	8
I.4.1 Humidité ascensionnelle	8
I.4.2 Humidité de condensation.....	8
I.4.3 Humidité de construction	8
I.5 Principaux 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 :.....	11
I.6.3 Problèmes de santé liés à l’humidité	12
I.7 Grandeurs intrinsèques d’un milieu poreux	12
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	17
I.8.1 Mécanismes de transport d’humidité.....	17
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	21
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.....	24
Conclusion.....	26
Chapitre 2 Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés	27
II.1 Introduction	28
II.2 Béton.....	28
II.2.1 Généralités	29
II.2.2 Composants du béton.....	30
II.2.3 Propriétés du béton	34
II.2.3.1 Propriétés physiques	34
II.3 Chape.....	36
II.3.1 Définition.....	36
II.3.2 Différents types de chapes	37

II.4 Isolation thermique et confort dans les bâtiments	39
II.4.1 Types d'isolation thermique	40
II.4.2 Critères de choix d'un isolant performant	41
II.4.3 Matériaux isolants.....	43
II.5 Diatomite comme matériau de contrôle d'humidité et d'isolation thermique.....	46
II.5.1 Origine et situation géographique.....	46
II.5.2 Définition.....	47
II.5.3 Domaine d'utilisation	47
II.5.4 Caractéristiques physiques et chimiques de la diatomite	48
II.5.5 Classification des kieselguhrs d'après KARPOV	50
II.5.6 Analyse microstructurale	50
Conclusion.....	51
Chapitre 3 Modélisation mathématique et positionnement du problème physique	52
III.1 Introduction	53
III.2 Description et fonctionnement du protocole expérimental	53
III.2.1 Présentation du dispositif expérimental :	53
III.2.2 Procédure expérimentale	56
III.3 Modélisation mathématique	60
III.3.1 Hypothèses du modèle.....	60
III.3.2 Equations gouvernantes de transfert couplé de chaleur et d'humidité	60
III.3.2.1 Transfert d'humidité	61
III.3.2.2 Transfert de chaleur	62
III.3.2.3 Conditions aux limites	62
III.4 Résolution numérique.....	63
III.4.1 Méthode des éléments finis	64
III.4.1.1 Grandes lignes de la méthode	64
III.4.1.2 Choix de maillage	66
III.4.1.3 Forme Conservative des équations de conservation	68
III.4.2 Description de l'étude.....	68

Conclusion.....	72
Chapitre 4 Résultats et interprétations	73
IV.1 Introduction.....	74
IV.2 Résultats et interprétations	74
IV.2.1 Comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus des différentes configurations de béton	74
IV.2.2 Comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus des différentes configurations de la chape.....	75
IV.2.3 Validation numérique :.....	75
IV.2.4 Effet de remplacer le mortier par la chape de diatomite 450g sur l'environnement intérieur	78
IV.2.5 Effet de remplacer le mur de brique par un mur de la chape de diatomite 450g sur l'environnement intérieur.....	79
Conclusion.....	81
Conclusion générale	83
Références	86

Liste des figures

Figure I.1 : Répartition énergétique finale par secteur d'activité [APRUE ,2019],[3]	6
Figure I.2 : Construction résidentielle dans le projet de logement social Algérienne [18].....	6
Figure I.3 : Structure de la consommation finale d'énergie par produits [Bilan énergétique national 2018].....	7
Figure I.4 : Exemples de dégradations causées par l'humidité (Zhong and Braun, 2008)	10
Figure I.5 : Plages d'humidité favorable à la croissance de polluants (Roulet, 2004).....	11
Figure I.6 : Les pertes thermiques du corps humaines [10].	12
Figure I.7 : Schéma d'un milieu poreux.....	13
Figure I.8 : Différents types de pores : a- pore isolé, b- pore aveugle, c- pore interconnecté (Malvault, 2013).....	14
Figure I.9 : 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.10 : Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en humidité dans les pores. [5].....	19
Figure I.11 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore.	19
Figure I.12 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore.	20
Figure I.13 : Sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment [10].....	23
Figure I.14 : Types de contact possibles entre deux matériaux (VP. De Freitas et al, 1996).	25
Figure II.1 : La pâte du béton.....	28
Figure II.2 : Les compositions du béton	29
Figure II.3 : La description sommaire de de la fabrication du ciment.	32
Figure II.4 : Les étapes de fabrication du ciment.....	32
Figure II.5 : Répartition des déperditions thermiques dans une habitation.	40
Figure II.6 : Répartition des déperditions thermiques dans une habitation.	41
Figure II.7 : Laine de roche.....	44
Figure II. 8 : Laine de verre.	44
Figure II. 9 : Laine de bois.....	45
Figure II.10 : Ouate de cellulose.....	45
Figure II.11 : Carte géologique de la région ouest avec les principaux gisements.....	46

Figure II. 12 : Site de dépôt de Sig (Algérie).....	47
Figure II. 13 : MEB de diatomite brute (a) et calcinée (b). J. Zheng et al, (2017) [25].....	48
Figure II.14 : Contenu d'adsorption et de désorption de diatomite brute et calcinée, [25].	49
Figure II.15 : Microstructure de la diatomite [28].	51
Figure III.1 : Banc expérimental de l'isolation thermique.....	54
Figure III.2 : La résistance thermique.....	55
Figure III.3 : Régulateur de température.	55
Figure III.4 : Caméra thermique TESTO.....	56
Figure III.5 : Les différents panneaux du béton : (a) béton ordinaire, (b) béton/diatomite (poudre 200g), (c)béton/diatomite (gravier 200g), (d) béton/diatomite (poudre 357g), (e) béton/ diatomite (gravier306g).....	57
Figure III.6 : Les différents panneaux de la chape : (a) chape ordinaire, (b) chape/diatomite (gravier 200g), (c)chape/diatomite (gravier 450g).....	57
Figure III.7 : TESTO logiciel de la caméra thermique.	58
Figure III.8 : Photos représentent les différentes étapes de l'expérience.	59
Figure III.9 : Les panneaux fabriqués en béton mélangé avec la diatomite.	59
Figure III.10 : Profile de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents [32].	60
Figure III.11 :Interface du logiciel COMSOL Multiphysics.	64
Figure III.12 : Trapézoïdale de Fourier de p-élément.....	66
Figure III.13 : Élément quadrilatère courbe.....	66
Figure III.14 : Élément coque quadrilatère à 8 nœuds de contrainte assumée hybride.	67
Figure III.15 : Maillage avec éléments triangulaires dans la méthode des éléments finis alpha alternatif (A α FEM).....	67
Figure III.16 : Géométrie en 2D du panneau en béton sur logiciel COMSOL Multiphysics.	69
Figure III.17 : Géométrie en 2D du panneau de la chape sur logiciel COMSOL Multiphysics.....	69
Figure III.18 : Vue axonométrique du béton et de la chape respectivement avec conditions aux limites expérimentales.	70
Figure III.19 : Etude numérique dans un mur en brique.....	71
Figure III.20 : Etude numérique dans un mur préparé avec la chape.	71
Figure III.21 : Le nombre d'éléments de volume.	71
Figure III.22 : Test de maillage	72

Figure IV.1: Evolution temporelle de la température de la face extérieure de béton.	74
Figure IV.2: Evolution temporelle de la température de la face extérieure de la chape.	75
Figure IV.3 : Résultats de simulation de béton ordinaire.....	76
Figure IV.4 : Résultats de simulation de béton/diatomite gravier.	77
Figure IV.5 : Résultats de simulation de béton/diatomite poudre.....	77
Figure IV.6 : Résultats de simulation de la chape ordinaire.	78
Figure IV.7 : Résultats de simulation de la chape/ diatomite gravier.	78
Figure IV.8 : La variation de la température (a) et de l'humidité relative (b) à la surface interne, (15 -19 Aout 2021) à Tlemcen.	79
Figure IV.9 : La variation de la température (a) et de l'humidité relative (b) à la surface interne des murs, (15 -19 Aout 2021) à Tlemcen.....	81

Liste des tableaux

Tableau I.1: Consommation nationale par agrégat (Source : Ministre de l'énergie Bilan énergétique).....7

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: Ordre de grandeur des proportions [20].30

Tableau II.2: Compositions chimiques de la diatomite Algérienne brute et calciné, [27].49

Tableau II.3: Analyse physique chimique de la diatomite naturelle Algérienne, [26]50

Tableau II.4: Classification du kieselguhr selon les normes Russe (KARPOV, 1979).50

Tableau III.1: Propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés.70

Nomenclature

Lettres latines

V_p	Volume des pores	$[m^3]$
V_0	Volume apparent du matériau	$[m^3]$
V_s	Volume solide	$[m^3]$
m	Echantillon humide	$[kg]$
m_0	Masse de l'échantillon sec	$[kg]$
v	Volume de l'échantillon	$[m^3]$
u	Teneur en eau massique de l'échantillon humide	$[kg/kg]$
K_{eff}	Perméabilité effective du matériau	$[m^2]$
P_g	Pression totale de gaz	$[Pa]$
P_l	Pression totale de l'eau liquide	$[Pa]$
U_{cap}	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)	
$K_{r,i}$	Perméabilité relative à la phase i	
K_i	Perméabilité intrinsèque	$[m^2]$
P_C	Pression capillaire	$[Pa]$
R	Constante du gaz parfait	$[J/(K.mol)]$
M_W	Masse molaire de l'eau	$[kg/mol]$
S_h	Source de chaleur due à la condensation ou à l'évaporation	$[J/(s.m^3)]$
$h_{l,v}$	Chaleur latente du changement de phase	$[J/kg]$
j_v	Densité de flux de la diffusion de la vapeur d'eau	$[kg/s.m^2]$
Se	Rayonnement à la surface extérieure de la paroi	$[W/m^2]$

Nomenclature

S_{dir}	Rayonnement direct	[W/m ²]
S_{dif}	Rayonnement direct et diffus	[W/m ²]
T_{sol}	Température à la surface du sol	[K]
T_{ciel}	Température du ciel	[K]
F	Facteur de forme	
h_c	Coefficients d'échange massique	[kg/(m ² .K)]
h_m	Coefficient d'échange massique	[kg/(m ² .s.pa)]
Q_{conv}	Flux convectif thermique	[J/(m ² .s)]
H_{conv}	Flux convectif massique	[kg/(m ² .s)]
$P_{v,air}$	Pression de vapeur d'eau de l'air (extérieur ou intérieur)	[Pa]
$P_{v,surf}$	Pression de vapeur de la surface de la paroi (extérieur ou intérieur)	[Pa]
$J_{I,pluie\ infiltrée}$	Infiltration de la pluie	[kg/(m ² .s)]
J_l	Flux d'eau liquide arrivant sur la paroi	[kg/(m ² .s)]
Cp	Chaleur spécifique	[J/(kg.K)]
$\overrightarrow{dQ_{cond}}$	Flux de chaleur élémentaire traversant une surface ds	[W]
$\overrightarrow{q_{cond}}$	Densité de flux de chaleur	[W/m ²]
p_v	Pression de vapeur	[Pa]
$p_{v,sat}$	Pression de vapeur saturante	[Pa]
H_s	Enthalpie du matériau poreux	[J/m ³]
$R_{hydrique}$	Résistance hydrique	[m ² .s/kg]
$J_{interface}$	Densité du flux hydrique à l'interface	[kg/(m ² .s)]
$R_{thermique}$	Résistance thermique	[m ² .s/kg]
$Q_{interface}$	Densité du flux thermique à l'interface	[W/m ²]
L_f	Chaleur latente de changement de phase	[J/kg]

Nomenclature

T	Temps	[s]
g_v	Diffusion de flux de vapeur	[kg/(m ² .s)]
g_l	Flux liquide	[kg/(m ² .s)]
Q_w	Terme source	[kg/(m ² .s)]
T_{int}	Température intérieure	[°C]
h_{int}	Coefficient de transfert de chaleur intérieur	[W/(m ² .K)]
T_{ini}	Température initiale	[°c]
φ_{ini}	Humidité relative initiale	
P_v	Pression partielle de vapeur d'eau	[Pa]
$P_{v,s}(T)$	Pression de vapeur saturante	[Pa]
D_m	Coefficient de diffusion lié à la masse	[kg/(m.s)]
$T_{a,int}$	Température de l'air à l'intérieur	[K]
$T_{s,ext}$	Température de surface extrême du mur	[K]
$T_{s,int}$	Température de surface interne du mur	[K]
Rb	Résistance de brique	[(m ² .K)/W]
D_T	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 vapeur d'eau	[Pa]
Q_T	Terme source	[w/m ³]
T_∞	Température de ciel	[K]
$h_{a,ext}$	Coefficient de transfert convectif extérieur de l'air	[w/ (m ² /K)]
$h_{a,int}$	Coefficient de transfert convectif intérieur de l'air	[w/ (m ² /K)]
T	Température	[k]
L_v	Enthalpie d'évaporation de l'eau	[J/kg]
ap	Coefficient d'absorptivité aux précipitations	

m	Fraction massique de vapeur d'eau	
Symbole		
ε_{tot}	Porosité totale	
v	Teneur en vapeur	[kg/m ³]
v_{sat}	Teneur en vapeur	[kg/m ³]
$\vec{\sigma p}$	Représente le gradient de pression auquel est soumis le matériau	[Pa/m]
μ	Viscosité dynamique du fluide	[Pa.s]
\vec{V}	Vitesse de filtration d'un fluide	[m/s]
σ	Tension superficielle	
θ	Angle de contact	
τp	Rayon du pore	[m]
ρ_w	Densité de l'eau	[kg/m ³]
ρ	Densité du matériau	[kg/m ³]
λ	Conductivité thermique du milieu poreux	[W/(m.k)]
ε	Emissivité du matériau	
k	Coefficient d'absorption solaire	
$\beta_{s,ext}$	Coefficient de transfert d'humidité	[s/m]
φ_{int}	Humidité relative intérieure	
$\beta_{s,int}$	Coefficient de transfert d'humidité intérieure	[s/m]
λ_a	Conductivité thermique lame d'air	[W/(m.k)]
λ_d	Conductivité thermique de diatomite	[W/(m.k)]
λ_b	Conductivité thermique de brique	[W/(m.k)]
δ	Coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air	[kg/(m.s.Pa)]
W	Teneur en eau	[kg/m ³]

φ	Humidité relative	
δp	Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de construction	[kg/(m.s.Pa)]
$\beta_{s,ext}$	Coefficient de transfert de vapeur sur la surface externe	[s/m]
$\beta_{s,int}$	Coefficient de transfert de vapeur sur la surface interne	[s/m]
$\Phi_{a,ext}$	Humidité relative de l'air à l'extérieur	
$\Phi_{a,int}$	Humidité relative de l'air à l'intérieur	
$\Phi_{s,ext}$	Humidité relative de surface externe du mur	
$\Phi_{s,int}$	Humidité relative de surface interne du mur	
ξ	Capacité de stockage d'humidité	[kg/m ³]
ρ_s	Densité apparente du matériau de construction sec	[kg/m ³]
W	Teneur en eau	[kg/m ³]
λ_{eff}	Conductivité thermique effective du matériau de construction	[W/(m.k)]
δp	Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de construction	[kg/(m.s.Pa)]
v_a	Vitesse moyenne de l'air intérieur	[m/s]
v_{vent}	Vitesse de vent	[m/s]
γ^ω	Coefficient de diffusion dépendant du scalaire transportée	
S_\emptyset	Terme source relatif à la variable \emptyset	

Introduction générale

Introduction générale

D'après le ministère d'énergie en Algérie 2019, le secteur résidentiel comptait 9.3 % de la consommation d'énergie. Une proportion de 50.6 % de ce pourcentage était consacrée aux matériaux de construction et BTP [1]. 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, on tient compte de l'augmentation de la demande, dans quelques dizaines d'années l'ensemble des réserves prouvées sera épuisé. En effet, nos systèmes de production et de consommation d'énergie doit être changé. 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 ?

La mauvaise isolation de bâtiment laisse échapper la chaleur en hiver et perd rapidement sa fraîcheur en été. Une mauvaise isolation thermique des murs provoque une déperdition jusqu'à 25% de la chaleur du logement, ce chiffre atteignant 30% pour une isolation des combles faible ou inexistante. Grâce à une isolation parfaite, 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% des consommations d'énergie liées au chauffage.

L'interaction entre l'homme et son environnement a été le sujet de nombreuses études traitant du confort thermique. Celui-ci dépend de plusieurs paramètres tels que la température et l'humidité et la fluctuation de ces deux paramètres peut causer des problèmes dans le cadre de confort de vie.

Le transfert de chaleur et d'humidité dans un milieu poreux est l'un des phénomènes physiques les plus étudiés. A partir de la dernière moitié du 20^{ème} siècle, beaucoup des travaux et d'approches ont été réalisées pour modéliser ce phénomène de transfert. Ce type de transfert, qui continue à être toujours un domaine de recherche d'actualité, intervient dans beaucoup de phénomènes naturels et procédés industriels.

Ces transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des milieux poreux se heurtent à de nombreuses difficultés liées particulièrement à l'hétérogénéité de ces milieux et aux problèmes d'interfaces fluide-fluide et fluide-solide. La connaissance approfondie de ce type

de transfert est synonyme d'une meilleure optimisation énergétique de beaucoup de systèmes (centrales thermiques, isolation thermique des bâtiments, échangeurs de chaleur, etc).

Ce présent travail porte sur l'étude d'un transfert couplé de chaleur et d'humidité dans des parois poreuses. L'objectif visé est de voir le comportement thermique, en régime transitoire, de béton et de la chape en utilisant la diatomite comme une matière isolante.

Dans le premier chapitre, nous abordons l'interaction entre les enveloppes du bâtiment et l'environnement. et les problèmes causés par cette interaction, et également des généralités comportant quelques notions et des rappels sur les mécanismes mis en jeu lors des transferts d'humidité dans les milieux poreux ont été présentées dans cette étude.

Le deuxième chapitre de ce mémoire constitue une présentation des matériaux de construction des bâtiments, en particulier les propriétés du béton et de la chape. Par ailleurs, un état de l'art relatif aux connaissances d'un matériau naturelle écologique appelé "diatomite" est élaboré, caractérisé par une forte hygroscopicité et faible conductivité thermique comme isolant performant dans le secteur du bâtiment.

Le troisième chapitre aborde la description détaillée de la méthode utilisée lors des expériences menées à l'université de Tlemcen. il est aussi consacré à la modélisation numérique et les équations gouvernantes du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction poreux. Le code de calcul COMSOL utilisé pour la résolution numérique du problème étudié a été présenté dans ce chapitre.

Dans le dernier chapitre, les différents résultats obtenus de l'expérience et de la simulation numérique sont présentés ainsi que leur discussion.

Enfin, une conclusion générale contient un bilan du travail réalisé dans le cadre de cette étude les perspectives à envisager pour une meilleure utilisation de la diatomite dans les prochains travaux.

Chapitre 1

Etude bibliographique

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 [2].

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) [3].

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] [4]. Ce taux très élevé de la consommation énergétique interpelle les pouvoirs publics qui ont lancé le programme national de l'efficacité énergétique (PNEE) via l'APRUE afin d'agir sur le secteur de la construction et du bâtiment et réduire l'augmentation de la consommation énergétique.

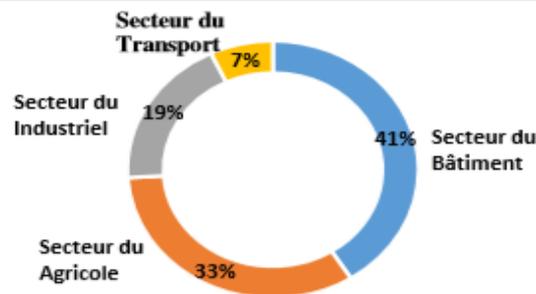


Figure I.1 : Répartition énergétique finale par secteur d'activité [APRUE ,2019],[4]

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 [5].



Figure I.2 : Construction résidentielle dans le projet de logement social Algérienne [18]

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 :

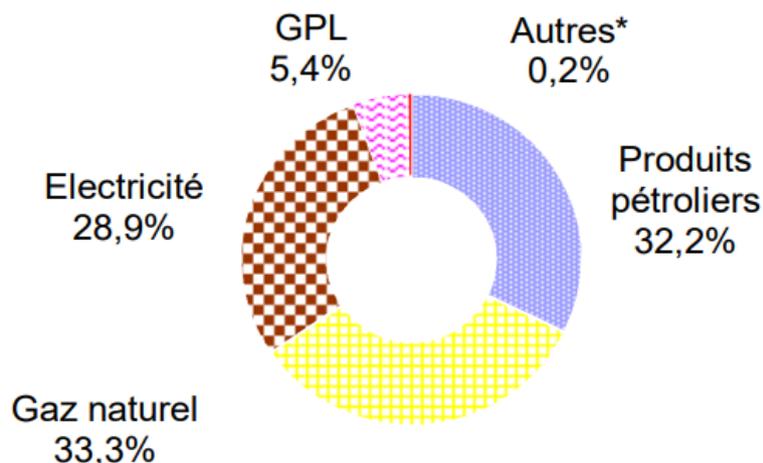


Figure I.3 : Structure de la consommation finale d'énergie par produits [Bilan énergétique national 2018].

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]	Evolution	
			Quantité	%
Produits pétroliers	15338	15517	179	1.2
Gaz naturel	13655	16024	2369	17.4
Electricité	13270	13926	656	4.9
GPL	2335	2588	253	10.8

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

L'augmentation de la consommation de gaz naturel par un taux de 17.4 % est expliquée par les besoins croissants des clients de Sonelgaz, notamment ceux du secteur des ménages, et où le nombre totale d'abonnés a atteint 5.6 millions en 2018, soit plus de 400 mille nouveaux clients [1].

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 :

I.4.1 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.

I.4.2 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.

I.4.3 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 Principaux désordres causés par l'humidité dans le bâtiment

L'enveloppe d'un bâtiment présente le siège des transferts de chaleur, d'air et d'humidité qui influencent le climat interne du bâtiment. L'humidité a une action directe sur cette enveloppe du bâtiment. En effet, un excès d'humidité dans un environnement peut affecter directement les performances énergétiques. De plus l'humidité représente la source d'apparition de plusieurs pathologies au niveau de la paroi, et la cause majeure de dégradation des bâtiments. Les désordres apparaissent lorsque des valeurs importantes des teneurs en eau sont atteintes dans les matériaux de construction. Cette eau peut avoir plusieurs origines. Elle peut provenir de l'extérieur du bâtiment telle que les pluies, les neiges et les remontées capillaires, ou à des apports d'eau découlant du bâtiment lui-même et des sources liées aux usagers. Les différents désordres causés par l'humidité dans le bâtiment peuvent être classés en quatre catégories en fonction du rôle de l'humidité [8]

I.5.1 Altérations dues à l'action propre de l'humidité

Le transfert d'humidité à travers la paroi entraîne la modification des propriétés thermophysiques des matériaux. Ce changement des caractéristiques des matériaux de construction peut altérer ses performances et provoquer sa dégradation. Lorsqu'un matériau est placé dans un milieu à hygrométrie élevée, ses pores se remplissent d'avantage d'eau par adsorption, et exercent des pressions capillaires sur la matrice solide. Ces pressions fragilisent le matériau provoquant des variations dimensionnelles (gonflement et retrait) et peuvent causer des désordres. De plus, la résistance mécanique du matériau baisse et sa conductivité thermique augmente. En effet, l'air qui constitue un mauvais conducteur de l'énergie est remplacé par l'eau et les déperditions thermiques à travers les parois deviennent plus importantes.

I.5.2 Altérations dont l'humidité est le vecteur

L'humidité est transportée à travers les pores d'un matériau poreux et subit des variations dynamiques de manière continue. Cette migration d'humidité peut provoquer la dégradation du matériau poreux par l'action du gel. De plus, l'humidité constitue le vecteur de transport des agents agressifs (tels que les chlorures et les sulfates) qui peut provoquer le désordre tel que la cristallisation internes des sels en exerçant des contraintes sur la matrice poreuse.

I.5.3 Altérations se développant en milieu humide

Ces pathologies surviennent dans un environnement à forte teneur en humidité, et dépendent directement du niveau d'humidité présente dans le milieu. Une teneur en humidité importante peut provoquer la corrosion des composants métalliques du bâtiment, ainsi que

l'apparition des moisissures, bactéries, algues, lichens. Ces derniers engendrent plusieurs détériorations des constructions, et qui constituent un risque important sur la santé des occupants en raison de la sédimentation et la propagation des agents pathogènes.

I.5.4 Dégradation des ambiances intérieures

L'humidité est un élément important pour la qualité des ambiances intérieures des bâtiments. Elle peut avoir une action directe sur le bien-être des occupants en étant un paramètre clé du confort hygrothermique. En effet, dans une ambiance présentant un inconfort hygrothermique, des difficultés respiratoires des occupants ont été observées [9]. L'humidité peut également agir indirectement sur la qualité de l'air intérieur en favorisant le développement d'agents nocifs ayant un effet sur la santé de l'homme, et qui peuvent provoquer des réactions allergiques.



Détérioration du plafond



Apparition de moisissures



Corrosions des aciers



Fissurations

Figure I.4 : 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%.

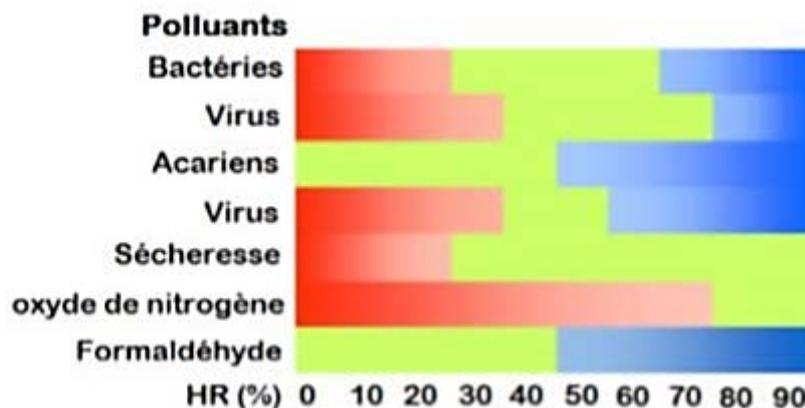


Figure I.5 : Plages d'humidité favorable à la croissance de polluants (Roulet, 2004)

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 ...) [10].

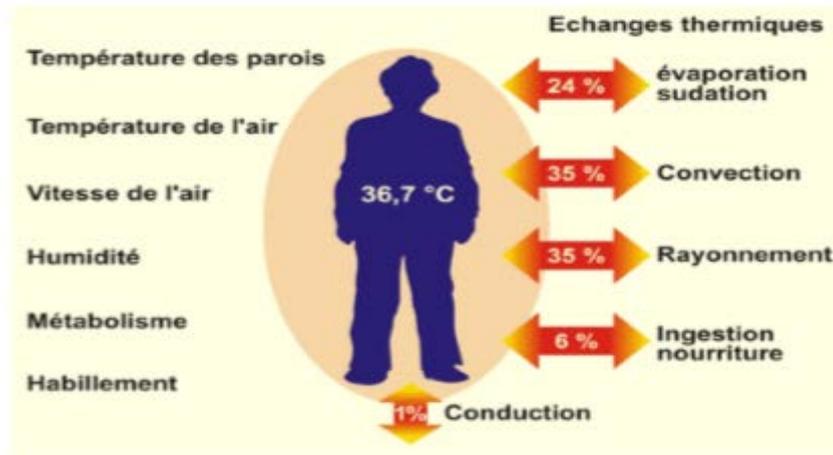


Figure I.6 : Les pertes thermiques du corps humaines [10].

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 larmoiement des yeux ;
- Sécher, la toux sèche ;
- Gorge irritée ;
- Irritation du nez et de la gorge ;
- Essoufflement ;
- Irritation de la peau ;
- Problèmes d'humeur. [6]

1.7 Grandeurs intrinsèques d'un milieu poreux

Un milieu poreux est composé d'une matrice solide et d'un ensemble de pores qui peuvent être occupés par un ou plusieurs fluides sous forme liquide ou gazeuse .La présence des vides rend le milieu hétérogène et anisotrope, et donc complexe. 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).

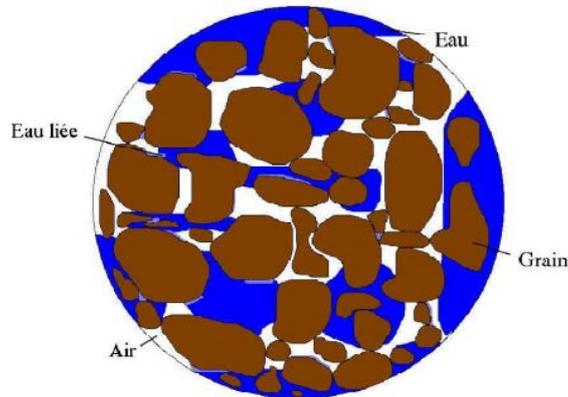


Figure I.7 : Schéma d'un milieu poreux

1.7.1 Porosité

La porosité est définie comme le rapport entre les volumes occupés par les pores (phases liquide et gazeuse) et le volume total (équation 1.1). Ce paramètre décrit la géométrie interne du matériau. Cependant, vu la nature micro structurale complexe des matériaux de construction, il existe dans le matériau des pores isolés inaccessibles qui n'ont pas une influence sur les phénomènes de transferts notamment le transfert d'humidité. La notion de la porosité ouverte est introduite, qui prend uniquement en considération les pores accessibles.

$$\varepsilon_p = \frac{V_p}{V_{tot}} \quad (1.1)$$

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.8).

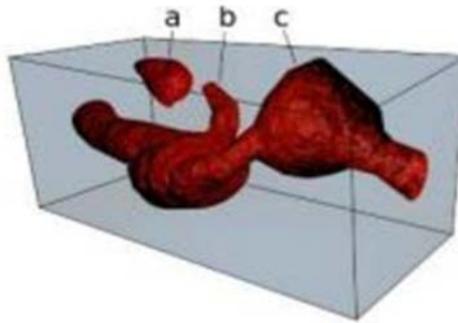


Figure I.8 : Différents types de pores : a- pore isolé, b- pore aveugle, c- pore interconnecté (Malvault, 2013).

La porosité ouverte ε , rassemble les deux premières catégories de pores précités. Dans le cas du béton, la proportion volumique de pores isolés est négligeable et ε peut être considérée comme égale à ε_{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 $\varphi(\%)$:

$$RH = \varphi = \frac{V}{V_{sat}} = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (1.2)$$

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

$$P_{v,sat} = e^{23.5771 - \frac{4042.9}{T-87.58}} \quad (1.3)$$

Ou T la température en [K].

I.7.3 Teneur en eau et degré de saturation

La teneur en humidité peut être donnée en masse u [kg/kg] ou en volume w [kg/m³] :

$$U = \frac{m-m_0}{m_0} \quad (1.4)$$

$$W = \frac{m-m_0}{V} \quad (1.5)$$

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 :

$$S_{cap} = \frac{U}{U_{cap}} \quad (1.6)$$

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) :

$$\vec{V} = - \frac{K_{eff}}{\mu} \sigma \vec{p} \quad (1.7)$$

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

$$K_{eff,i} = K_i \cdot K_{r,i} \quad (1.8)$$

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.

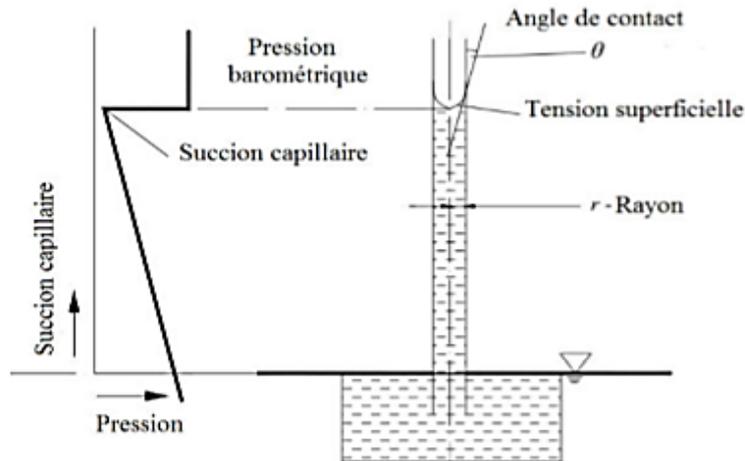


Figure I.9 : Vue schématique de la colonne d'eau (à gauche) et des conditions de pression (à droite) dans un capillaire cylindrique (HM. Künzl, 1995)

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

$$P_c = P_g - P_l \quad (1.9)$$

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

$$P_c = P_g - P_l = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (1.10)$$

La relation entre l'humidité relative de l'air et la pression capillaire dans les pores qui sont soumis à une condensation capillaire est donnée par l'équation de Kelvin :

$$P_c = \frac{R.T\rho_w}{M_w} \ln\left(\frac{V}{V_s}\right) \quad (1.11)$$

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) [11]

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 soret	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). [6]

La figure I.9 illustre ces différents processus de transport d'humidité au niveau microscopique de la taille des pores pour différents teneurs en humidité du matériau. A faible humidité relative, le flux d'humidité est une diffusion de vapeur due à un gradient de concentration de vapeur (stade 1). Lorsque l'humidité relative augmente, l'adsorbat au niveau des pores de la paroi s'épaissit, ce qui devrait réduire un peu la surface disponible des pores pour la diffusion de vapeur d'eau (stade 2). Lorsque l'HR augmente, une condensation capillaire se produit dans les pores les plus étroits (stade 3). L'humidité coule maintenant sous forme d'une série de diffusion de vapeur et succion de liquide. Eventuellement, les chemins

d'écoulement des liquides se développent pour remplir la partie majeure du système poreux (stade 4) (LO. Nilsson, 2003) [12]

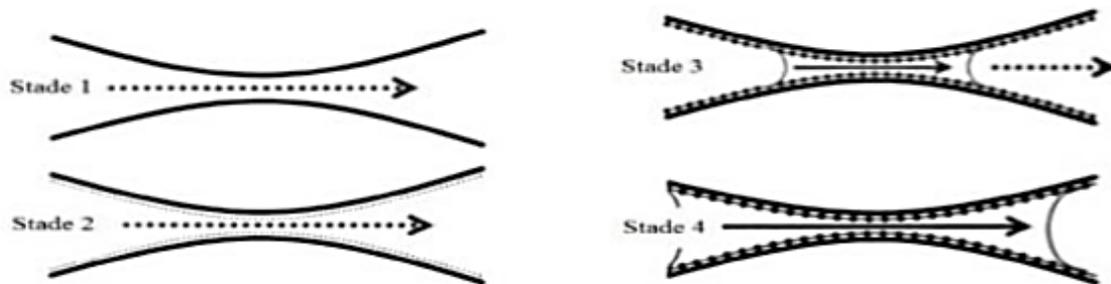


Figure I.10 : Différents processus de transport d'humidité, en fonction de la teneur en humidité dans les pores. [6]

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) [13]. 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].

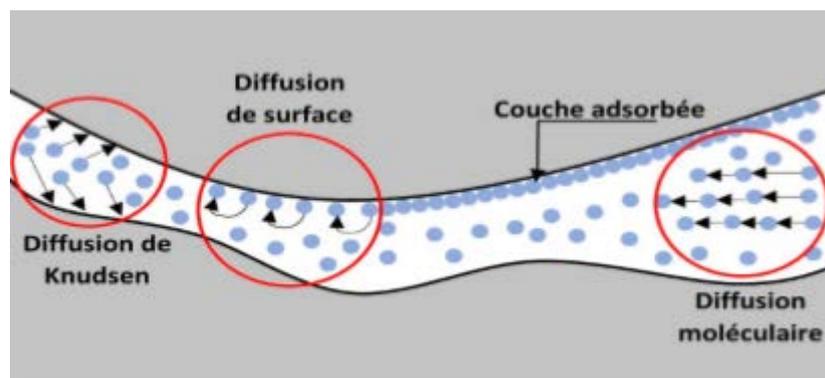


Figure I.11 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore.

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

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 13). 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.12

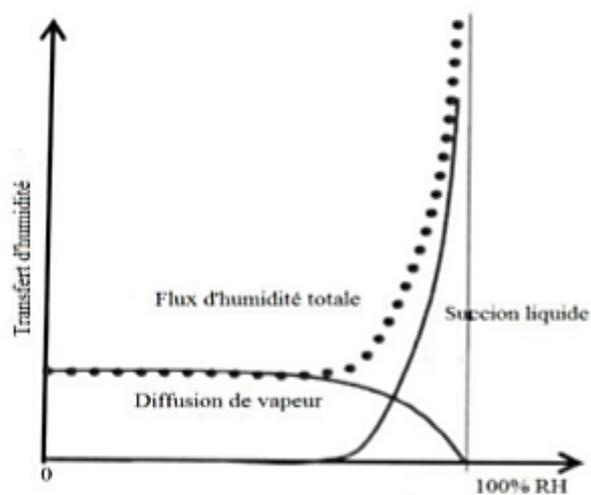


Figure I.12 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore.

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 :

$$H_s = \rho \cdot C_p \cdot T \quad (1.12)$$

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 $\overrightarrow{dQ_{cond}}$ traversant une surface ds est proportionnel au gradient de la température T .

$$\overrightarrow{dQ_{cond}} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T) \cdot ds = \overrightarrow{q_{cond}} \cdot ds \quad (1.13)$$

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 :

$$S_h = h_{l,v} \cdot \nabla j_p \quad (1.14)$$

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 où le milieu poreux est considéré comme un milieu homogène, cette supposition permet d'établir les équations de transferts hygrothermiques à partir des principes fondamentaux de la thermodynamique (JF. Daïan, 2013). Les bilans énergétique et massique sont exprimés à l'aide de paramètres de transfert mesurables (Température, teneur en eau, pression de vapeur....) et des coefficients liés explicitement aux propriétés macroscopiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique, perméabilité à la vapeur d'eau,...) déterminés expérimentalement.[Y. Ferroukhi 2015] [6].

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.13 résume les phénomènes se déroulant aux interfaces intérieure et extérieure de la paroi.

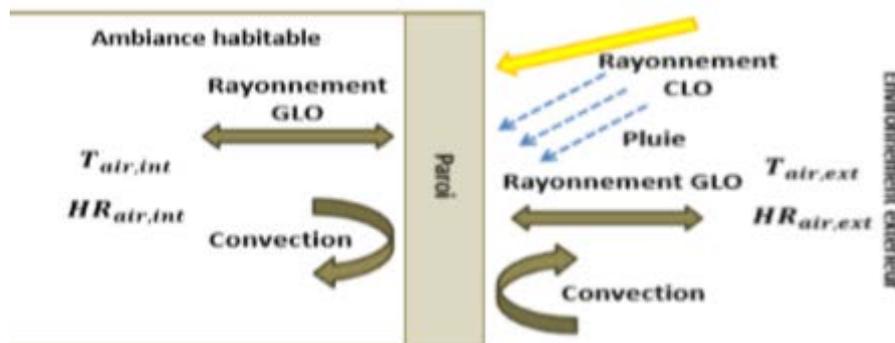


Figure I.13 : Sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment [10].

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) [14].

$$S_e = K(S_{dir} + S_{dif}) + \sigma \cdot \epsilon \cdot [F_{sol}(T_{sol}^4 - T_e^4) + F_{ciel}(T_{ciel}^4 - T_e^4)] \quad (1.15)$$

Le rayonnement direct et diffus ; obtenus à partir des données météo. Un appareil de mesure de la trajectoire des rayons solaire (R. Kittler, 1981) [15] 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) [16]. Pour le calcul de la température du ciel, plusieurs modèles ont été proposés qui donnent généralement des résultats similaires (H. Janssen, 2002) [16]. Pour notre cas n'a utilisé le modèle suivant [A.I.N. Korti, 2016] [17] :

$$T_{ciel} = 0.0552(T_e)^{1.5} \quad (1.16)$$

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 :

$$Q_{conv} = hc(T_{air} - T_{surf}) \quad (1.17)$$

$$H_{conv} = hm(P_{V,air} - P_{V,surf}) \quad (1.18)$$

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 :

$$J_{l,pluie \text{ in filitée}} = a_p J_{l,pluie} \quad (1.19)$$

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

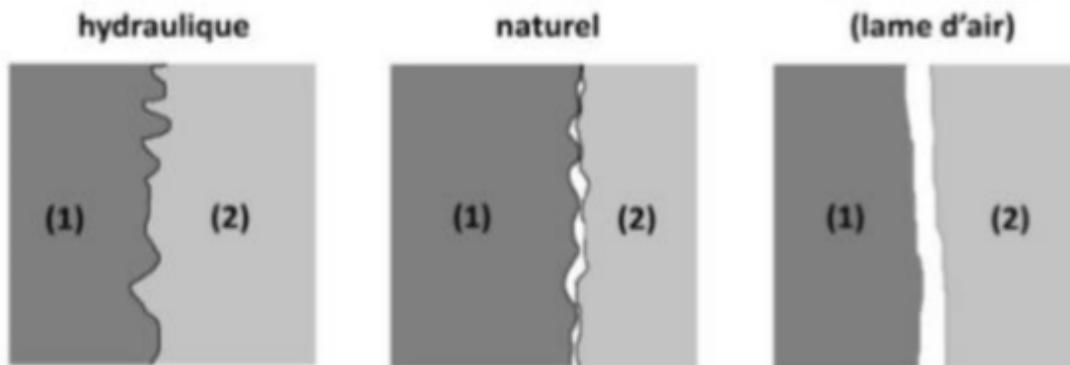


Figure I.14 : Types de contact possibles entre deux matériaux (VP. De Freitas et al, 1996).

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

$$T_{1 \text{ interface}} = T_{2 \text{ interface}}$$

$$P_{V,1 \text{ interface}} = P_{V,2 \text{ interface}}$$

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.

$$J_{\text{interface}} = - \frac{HR_{1 \text{ interface}} - HR_{2 \text{ interface}}}{R_{\text{hydrique}}} \quad (1.20)$$

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).

$$Q_{\text{interface}} = - \frac{T_{1 \text{ interface}} - T_{2 \text{ interface}}}{R_{\text{thermique}}} \quad (1.21)$$

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 [6].

Conclusion

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

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

L'utilisation 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

Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

II.1 Introduction

L'industrie et les bâtiments représentent aujourd'hui plus de 50 % de la consommation d'énergie. Le prix de plus en plus croissant de l'énergie, la conscience environnementale et la compétition des produits et services exigent une utilisation rationnelle de l'énergie.

Plus de 45% de la chaleur des maisons et des bâtiments publics échappe par les murs, sols, fenêtres, combles perdus etc [43] ... ainsi, avec les coûts croissants de l'énergie et la sensibilisation de l'environnement, l'accent est plus que jamais mis sur les moyens d'économiser l'énergie dans tous les types de bâtiments résidentiels, commerciaux et publics . Les exigences d'isolation thermique minimales pour l'efficacité énergétique des nouveaux bâtiments sont progressivement serrées.

Dans ce chapitre, nous commençons de présenter l'un des matériaux de construction des bâtiments : le béton et ses compositions et aussi ses propriétés, et rappeler la nécessité de l'isolation thermique tout en respectant les qualités environnementales des bâtiments. Par la suite on présentera les différents critères de choix d'un isolant performant. Nous attirons aussi l'attention sur la possibilité d'utiliser un matériau naturelle écologique appelé "Diatomite ", caractérisé par une forte hygroscopicité et faible conductivité thermique comme isolant hygrothermique dans le secteur du bâtiment.

II.2 Béton

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière off shore.[19]



Figure II.1 : La pâte du béton.

II.2.1 Généralités

Le béton est probablement le plus ancien matériau composite. Il est fabriqué à partir d'un mélange intime de ciment, de granulats, de fines et d'ultrafines, d'adjuvants et d'eau. Ces constituants sont dosés, en fonction de leurs propriétés propres, de manière à obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique lui-même fabriqué avec des minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle.

Le béton se compose de granulats (sables, graviers, cailloux) 'collés' entre eux par un liant hydraulique : le ciment. Lorsque le ciment se trouve en présence d'eau, il fait prise, puis durcit progressivement. Un béton hydraulique est constitué :

- d'une pâte pure (ciment + eau),
- d'un mélange granulaire,
- de produits additionnels (adjuvants, additions minérales, ...). On désigne habituellement sous le vocable :
- de matrice ou de mortier : le mélange (liant + eau + sable),
- de squelette solide ou de squelette granulaire : le mélange des granulats.[20]

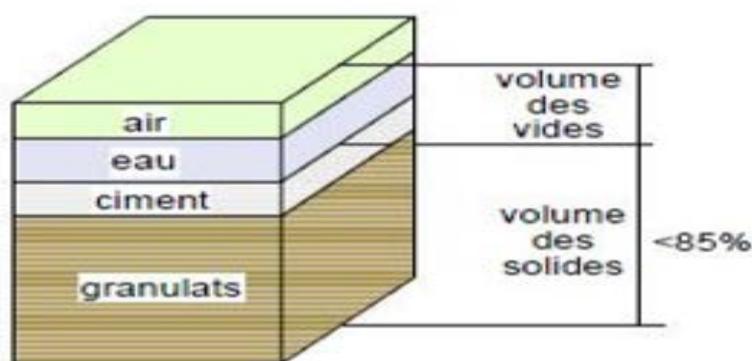


Figure II.2 : Les compositions du béton.

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

	eau	air	ciment	granulats
volume	14% - 22%	1% - 6%	7% - 14%	60% - 78%
poids	5% - 9%	/	9% - 18%	63% - 85%

Tableau II. 1: Ordre de grandeur des proportions [20].

II.2.2 Composants du béton

Le terme « béton » recèle une ambiguïté. Le matériau doit en effet être considéré sous deux formes :

Le béton frais, mélange homogène de matières premières solides en suspension dans l'eau : c'est l'état dans lequel il se trouve lors de sa fabrication. Il se trouve en état foisonné dans et à la sortie des appareils assurant l'obtention d'un mélange homogène, et en état compacté dans son coffrage, après mise en place et damage, serrage ou vibration ;

Le béton durci, solide dont les propriétés physiques et mécaniques s'acquièrent au cours des réactions physico-chimiques qui se déroulent entre ses composants à vitesse relativement rapide au début, puis à vitesse fortement décroissante avec le temps.

Le béton est un matériau composite ; ses propriétés dépendent de la nature et de la qualité de ses composants mais aussi de leurs proportions relatives. S'agissant des propriétés, il convient de distinguer celles qui concernent le béton frais et le béton durci.

Matières premières

A titre d'exemple, la composition pondérale d'un béton courant, c'est-à-dire le poids des différents composants permettant de fabriquer 1 m³ de béton durci, est la suivante : granulats, 1 800 kg ; ciment, 350 kg ; eau, 180 kg ; à quoi s'ajoutent éventuellement quelques 10 à 20 kg d'adjuvants. Quel que soit le béton, il est fabriqué avec du ciment, des granulats, de l'eau, des adjuvants. Les granulats peuvent inclure des fillers et, éventuellement, des ultrafines [19].

Ciment

Les Romains connaissaient déjà le secret de la production d'un matériau hydraulique dense et durable en mélangeant de la chaux avec des matériaux d'origine volcanique pour former un

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

liant qui a des propriétés, très semblable à celles qu'on retrouve dans la pâte du ciment hydratée.

Toutefois, les connaissances des Romains furent perdues après les invasions des barbares et ne furent retrouvées qu'à la fin de 18e siècle. L'invention du ciment est attribuée à un maçon Anglais du nom de Joseph Aspdin et date de 1824. Le nom de portland est dû au fait que la couleur du béton obtenu ressemble à une roche d'excellente qualité extraite de la presqu'île de calcaire de Portland, situé à l'ouest de l'Île of Wight. Son importation au Canada remonte à 1889 dans des barils en bois.

Le ciment Portland:

- Est une poudre sèche ayant des particules très fines
- forme une pâte au contact de l'eau (liant hydraulique)
- Réagit pour former des produits d'hydratation
- colle
- Enrobe tous les granulats ensemble
- Durci pour former une masse solide

Production du ciment

Pour fabriquer du ciment Portland, on fait cuire à température très élevée (1450°C), dans un four rotatif, un mélange de pierre calcaire broyée et d'argile (ou de matériaux similaires). La pierre calcaire fournit la chaux, et l'argile fournit principalement la silice et l'alumine. Le produit obtenu à la sortie du four s'appelle clinker. Le ciment Portland est ensuite fabriqué en ajoutant au clinker pulvérisé (grosseur des particules varie à peu près entre 1 et 80µm) une faible quantité (5%) de gypse. La description sommaire de la fabrication du ciment est illustrée dans la figure II.3.



Figure II.3 : La description sommaire de de la fabrication du ciment.

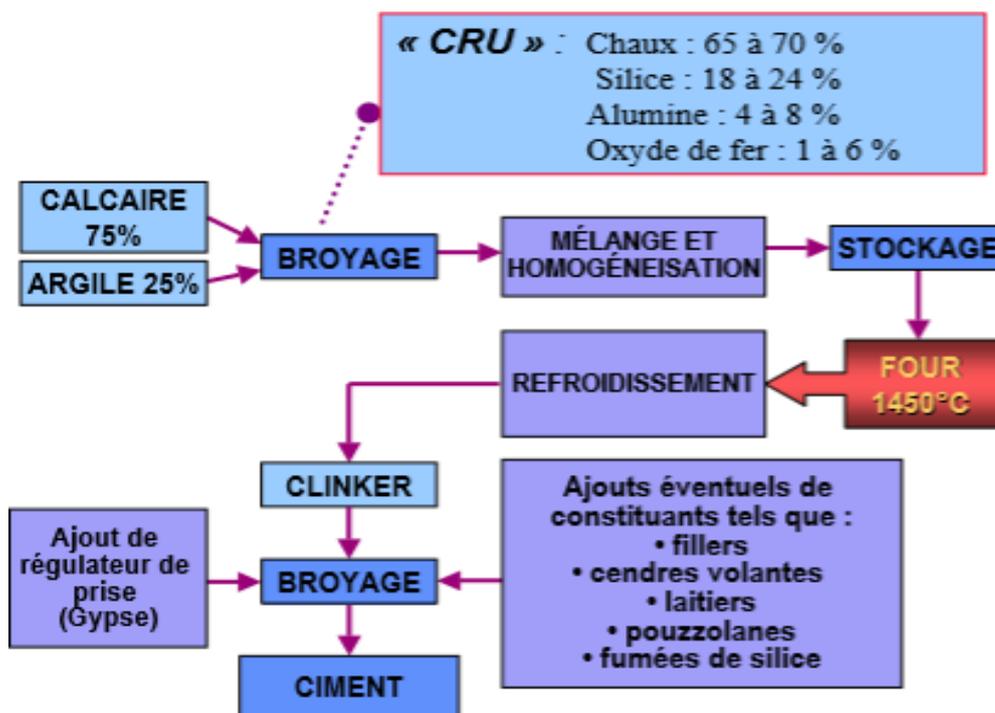


Figure II. 4 : Les étapes de fabrication du ciment.

Granulats

Les granulats rocheux sont constitués par les sables, les gravillons et les cailloux. Ils forment le squelette du béton. Les granulats sont d'origine détritique, sédimentaire, métamorphique ou éruptive. On distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et les granulats concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière. Ils sont classés en fonction des dimensions de leurs grains. La courbe granulométrique représente la distribution en pourcentage des poids des matériaux passant dans des tamis et passoires de dimensions normalisées. Par convention, on appelle sables les grains de dimensions comprises entre 0,08 mm et 5 mm, gravillons ceux dont les dimensions sont comprises entre 5 et 25 mm et cailloux ceux dont les dimensions sont supérieures à 25 mm. Pour les ouvrages courants, les granulats n'incluent que des sables et des gravillons. Les granulats doivent être propres et chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Ils doivent répondre à certaines exigences de forme, de texture de surface, de résistance à la compression, de résistance à l'abrasion, de porosité et de tenue au gel.

Fillers

Les fillers sont obtenus par broyage ou pulvérisation de certaines roches telles que les calcaires, les kieselguhrs ou les bentonites. Ils ont une finesse comparable à celle du ciment.

Ultrafines

Les ultrafines sont des particules de très faibles dimensions. Leur dimension caractéristique est de l'ordre de 50 à 100 nm, soit 1000 à 500 fois moins que celle des grains de ciment. Additionnées en quantités de l'ordre de 5 à 10 % du poids de ciment, elles améliorent considérablement les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons. Elles sont utilisées pour la fabrication des bétons à hautes et à très hautes performances. Les fumées de silice, sous-produits de l'industrie électrométallurgique, sont les ultrafines les plus couramment employées à ce jour. Elles contiennent entre 70 et 95 % d'oxyde de silicium SiO_2 sous forme de microsphères d'un diamètre de l'ordre de 20 à 50 nm.

Eau

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours le

gâchage à l'eau de mer est à éviter. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale.

Adjuvants

Les principaux adjuvants sont :

- les plastifiants et fluidifiants réducteurs d'eau, qui remplissent deux fonctions : ils permettent, d'une part, d'obtenir des bétons frais à consistance fluide et même liquide ; à maniabilité donnée, ils offrent, d'autre part, la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton frais. Ce sont des résines mélamines ou des naphthalènes sulfonates. Leur action s'exerce par défloculation et dispersion par répulsion électrostatique des grains de ciment en solution dans l'eau, et leur durée d'activité n'excède pas 1 ou 2 heures ;
- les retardateurs de prise du ciment, qui prolongent la durée pratique d'utilisation du béton frais. Ce sont généralement des sucres ou des lignosulfonates. Ils sont utiles pour le transport du béton sur de grandes distances ou pour sa mise en place par pompage, particulièrement par temps chaud ;
- les accélérateurs de prise et de durcissement, qui permettent, pour les premiers, la réalisation de scellements ou d'étanchements et, pour les seconds, une acquisition plus rapide de résistance du béton durci ;
- les entraîneurs d'air, qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégels successifs en favorisant la formation de micro-bulles d'air réparties de façon homogène.

L'influence des adjuvants peut varier sensiblement en fonction de la nature et de la composition du ciment ; des problèmes de compatibilité peuvent apparaître entre adjuvants et ciments.[19]

II.2.3 Propriétés du béton

II.2.3.1 Propriétés physiques

On distingue, un peu arbitrairement, les propriétés physiques des propriétés mécaniques des bétons. Elles procèdent toutes, en fait, de leur degré de porosité. - Poids volumique : il varie entre 23 et 24 KN/m^3 pour les bétons ordinaires. La présence d'armatures dans le béton armé ou précontraint conduit à prendre en compte dans les calculs un poids volumique de 25 KN/m^3 (2.500 kg/m^3) pour les bétons courants.

Imperméabilité

Le béton est d'autant plus imperméable que la porosité est plus faible.

Les bétons dont le rapport E/C est inférieur à 0,40 sont pratiquement imperméables à l'eau : leur perméabilité ne peut plus être mesurée.

Résistance aux agents agressifs

Les bétons compacts et à porosité réduite offrent une grande résistance aux effets corrosifs de divers agents agressifs. Ils présentent, en particulier, une excellente tenue vis-à-vis des effets corrosifs de l'eau de mer.

Tenue au feu

La résistance du béton aux incendies est excellente.

Durabilité

Les diverses propriétés physiques des bétons lui confèrent une grande durabilité. Réalisées correctement, selon les règles de l'art, les structures en béton conservent donc leur aptitude au service pendant toute leur durée de vie prévue, sans nécessiter de coûteuses réparations. [19]

II.2.3.2 Propriétés mécaniques

On ne considère ici que les propriétés prises en compte par l'ingénieur de génie civil. De ce point de vue, un béton est défini par les caractères suivants :

Résistance à la compression

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours F_{c28} . En France, par convention, la résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les bétons courants ont une résistance de 20 à 30 MPa, ceux de qualité atteignent 40 à 50 MPa, et les bétons à hautes performances peuvent dépasser 100 MPa.

Résistance à la traction

La résistance à la traction est environ égale au 1/10 de la résistance à la compression.

Coefficient de dilatation

La valeur du coefficient de dilatation linéaire est généralement prise égale à 1.10^5 . En fait, cette valeur s'étend de $0,8. 10^5$ (Béton à granulats calcaires) à $1,2. 10^5$ (Béton à granulats siliceux).

Propriétés rhéologiques

Tous les matériaux, et, entre autres, le béton, sont, à des degrés divers, visco-élastiques. Le facteur temps intervient donc dans leur comportement et dans la formulation de leurs déformations. Il faut donc distinguer les déformations instantanées des déformations différées qui se produisent au cours du temps. Ceci est particulièrement vrai pour le béton, dont la résistance s'accroît asymptotiquement avec le temps, au fur et à mesure que se complète l'hydratation du ciment.

Retrait

Le béton est l'objet de retrait, c'est-à-dire d'une réduction dimensionnelle, en l'absence de chargement, due essentiellement à l'évaporation de l'eau excédentaire interne. Pour l'ingénieur, le retrait est une déformation différée se produisant en l'absence de charge. Il croît avec le temps, pour tendre après quelques années vers une limite qui dépend notamment de la composition du béton, des dosages en ciment et en eau, de l'épaisseur des pièces et de l'humidité relative de l'atmosphère environnante. Dans les conditions climatiques françaises, le retrait unitaire total est de l'ordre de $2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-4}$. C'est entre autres l'existence du retrait qui justifie la création de joints dans les structures.

Fluage

Le fluage du béton est le processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable. Il est fonction notamment des caractéristiques et de l'âge du béton lors du chargement, de l'épaisseur de l'élément, de l'hygrométrie environnante et du temps. Le fluage est un phénomène complexe, constaté mais non encore bien compris. Il serait lié à des effets de migration d'eau dans les pores et les capillaires de la matrice, ainsi qu'à un processus de réaménagement de la structure des cristaux hydratés du liant.

II.3 Chape

II.3.1 Définition

Une chape est une couche de mortier à base de liant hydraulique (ciment par exemple). Elle peut être renforcée par un treillis soudé en fonction du type et de la destination. Cependant elle n'est pas structurelle. Elle complète le gros œuvre (ex : dallage ou plancher béton) sur lequel elle repose soit directement, soit avec interposition d'une couche intermédiaire de désolidarisation ou d'isolation.

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

Elle est destinée soit à rester brute, soit à être recouverte par un revêtement (carrelage, parquet flottant ou collé, sol souple, résine...) suivant la destination du local.

Rôles

Elle assure la finition de la dalle : mise à niveau, profil (forme de pente éventuelle) et régularité de surface.

- Elle sert de support aux revêtements de sol ou aux revêtements d'étanchéité.
- Elle transmet les charges au support, compte tenu de la couche intermédiaire éventuelle (ex : isolant). Pour cela elle doit être suffisamment résistante.
- Le cas échéant, elle participe à l'isolation acoustique et/ou thermique des locaux.

Une chape est un ouvrage constitué de mortier (généralement un mortier à base de ciment-sable-eau). A la différence d'une dalle qui est constituée de béton (mélange de gravier-ciment- sable-eau).

La chape n'est pas structurelle. Elle assure la finition d'une dalle et servira de support pour poser un revêtement de sol (chape carrelage), tandis que, la plupart du temps, la dalle en béton est armée et constitue un élément de structure dans une construction.

Les termes couramment utilisés de chape béton ou chape de béton sont donc abusifs. Il est plus approprié de parler d'une chape de mortier et d'une dalle de béton.

II.3.2 Différents types de chapes

L'exécution des chapes destinées aux bâtiments d'usage courant (tels que logements, bureaux, boutiques, bâtiments scolaires, etc...)

En fonction de leur conception et de leur mode de réalisation, on distingue :

- les chapes adhérentes, qui sont rapportées ou incorporées ;
- les chapes désolidarisées ;
- les chapes flottantes.

Chapes rapportées adhérentes

La chape est coulée directement sur le support en béton durci (dalle) en y étant liaisonnée par adhérence.

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

Dans ce cas, l'isolant ne peut pas être placé entre le mortier et le support et doit donc être mise en place en dessous du support.

Elles peuvent être mises en œuvre dans les locaux à sollicitations faibles (ex : locaux d'habitation, bureaux, boutiques, salles de classe), modérées (ex : galeries commerciales) et dans les cuisines collectives.



Chapes incorporées adhérentes

Elle est constituée d'un mortier très fin, et est appliquée avant que le béton du support (dalle) n'ait fait sa prise.

Cette technique, qui nécessite de couler la chape sur le béton encore frais, est réalisée par des maçons professionnels car elle demande un véritable savoir-faire.

Elle est majoritairement utilisée dans le cas de surfaces très sollicitées tels que les dallages industriels.

Chapes désolidarisées

Elle est désolidarisée de son support par l'intermédiaire d'une couche de désolidarisation (film polyane ou lit de sable) placée entre la dalle et le mortier.

Cette couche permet d'éviter le contact et l'adhérence entre les deux, et ainsi de limiter la fissuration du mortier.

Elles peuvent être réalisées dans les locaux à sollicitations faibles, modérées et dans les cuisines collectives.



Chapes flottantes

- Elles sont destinées à répartir la pression des charges exercées sur la surface.
- Elles sont entièrement désolidarisées des parois verticales et de leur support.

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

- Elles sont posées sur une couche d'isolation thermique et/ou phonique, et sont réalisées uniquement dans les locaux à sollicitations faibles.

Cette technique est également utilisée lorsqu'on veut faire une chape sur plancher chauffant, pour enrober les tuyaux de chauffage du sol.



Temps de séchage d'une chape ciment

Pour les locaux à faibles sollicitations (cas des locaux d'habitation), il est possible de remarcher sur la surface après un temps de séchage de 3 jours (circulation piétonne de chantier, objets lourds exclus). La mise en service normale pouvant se faire après 5 jours.[21]

II.4 Isolation thermique et confort dans les bâtiments

L'objectif de l'étude de la qualité environnementale des bâtiments est de limiter leurs impacts sur l'environnement extérieur et de créer un environnement intérieur convenable. Le concept de développement durable s'applique à la fois aux domaines écologique, économique et socio-culturel. Dans le secteur du bâtiment, l'enjeu environnemental est de maîtriser les consommations des ressources et de limiter les pollutions; l'enjeu social est d'apporter confort, santé et sécurité aux occupants tout en créant de l'emploi et en veillant à la sécurité des travailleurs; l'enjeu économique repose sur la facture énergétique et sur le coût global d'un bâtiment.

Durant toutes les phases de sa vie (construction, utilisation, réhabilitation et destruction), un bâtiment affecte fortement l'environnement à travers l'utilisation de ressources naturelles (roches, bois, eau...) et d'énergie (processus de construction, transport, chauffage, éclairage) d'où la nécessité de l'isolation thermique des bâtiments afin d'optimiser la consommation énergétique. L'isolation thermique introduite par les différents éléments de l'enveloppe de bâtiment constitue un important critère de performance énergétique. Elle permet de réduire les déperditions de chaleur, de réaliser des économies de chauffage, de limiter les émissions de gaz à effet de serre, et de bénéficier d'un meilleur confort de vie [22].

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

Une grande partie de déperdition de chaleur se faisant par les toits (environ 30%) et les murs (environ 25%), par conséquent une bonne isolation thermique de l'enveloppe permet de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments de plus de 60% (figure II.5).

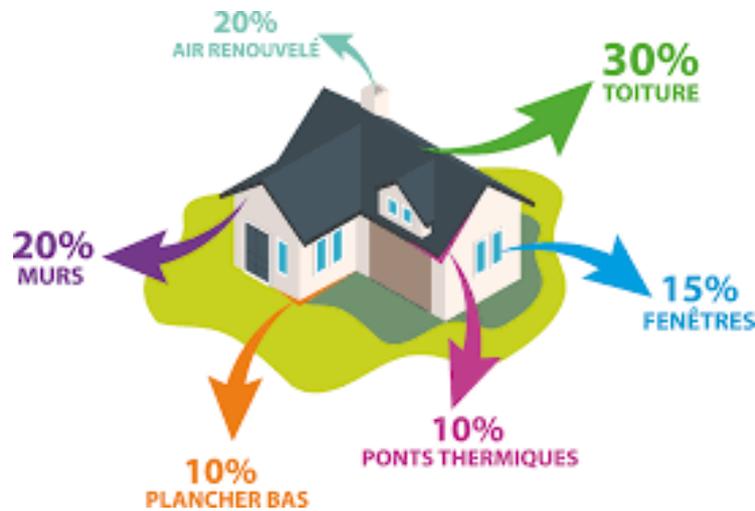


Figure II. 5 : Répartition des déperditions thermiques dans une habitation.

II.4.1 Types d'isolation thermique

Il existe trois types d'isolation des parois :

Isolation intérieure

C'est la plus répandue. Elle est facile à mettre en œuvre. Elle laisse le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire, par contre elle conduit à une réduction de l'espace intérieur et à la présence des ponts thermiques qui restent à traiter.

Isolation extérieure

Elle a l'avantage de mieux isoler en éliminant les ponts thermiques (figure II.6), de protéger globalement la structure du bâtiment, de ne pas diminuer la surface intérieure de l'habitation. Néanmoins elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens. En outre elle nécessite une protection contre les intempéries, par conséquent elle est plus coûteuse.

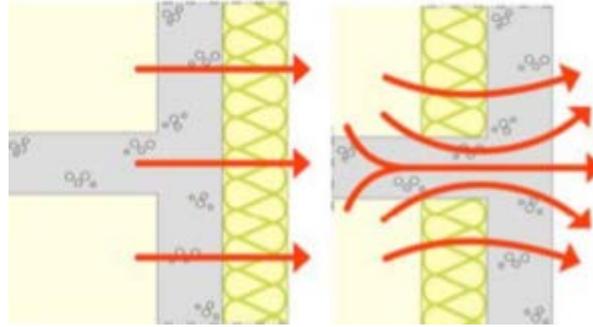


Figure II.6 : Répartition des déperditions thermiques dans une habitation.

Isolation intégrée au matériau porteur

Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure, béton cellulaire, béton de chanvre, béton allégé, etc. Elle est généralement utilisée en construction neuve. Elle est performante et durable.

II.4.2 Critères de choix d'un isolant performant

Un isolant performant doit répondre à un cahier de charge qui impose des critères hygrothermiques (faible épaisseur, bonne réaction à l'humidité et bonne inertie thermique) ainsi que d'autres critères acoustiques et économiques. L'isolant doit être aussi adapté et être mis en œuvre de façon simple et efficace.

Critères hygrothermiques

Épaisseur minimale

La surface habitable à une valeur précieuse, l'épaisseur devient donc un indicateur primordial dans le choix de l'isolant.

A titre d'exemple, l'isolation par l'intérieur d'une maison de 100 m^2 (10 x 10) sans mitoyenneté par 10 cm d'isolant aboutit à une perte de 4 m^2 . Or l'épaisseur de l'isolant dépend de 2 facteurs, la résistance finale recherchée et la conductivité thermique de l'isolant, comme le montre la formule ci-dessous :

$$e_{isolant} = (R_{finale} - R_{initiale}) \cdot \lambda_{isol}$$

Pour une résistance thermique fixée, l'isolant le plus mince est donc celui qui a la plus faible conductivité; or, parmi les isolants thermiques de types fibreux, les conductivités

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

thermiques des matériaux à l'état sec sont très voisines [0,035 à 0,045W/m.K], ce qui réduit l'importance de ce critère par rapport aux autres critères dans le choix du matériau isolant [23].

Inertie thermique

Un système d'isolation par l'intérieur rend la masse thermique du mur existant inaccessible aux échanges avec l'intérieur; en effet, ce sont les premiers centimètres de matériaux qui ont le plus d'effet sur l'inertie. En diminuant l'inertie des locaux, le risque de surchauffe augmente. La réduction de l'inertie peut être atténuée en étant attentif à garder la masse thermique des parois intérieures accessibles, en choisissant judicieusement les matériaux et en adaptant la stratégie de ventilation : sur-ventilation durant la nuit et ouverture des fenêtres permettant de rafraîchir la température ambiante et de conserver l'air frais pendant la journée.

Dans les cas où l'occupation est continue et où l'on cherche à garantir une température homogène, il est utile de valoriser la masse thermique des parois intérieures, comme les dalles lourdes ou les murs intérieurs en maçonnerie, pour garantir un niveau d'inertie suffisant au local malgré la pose d'une isolation par l'intérieur. Les parois exposées au rayonnement direct du soleil sont celles qui ont le plus d'impact à ce niveau-là : le sol près des fenêtres, les cloisons intérieures directement exposées...

Le choix des matériaux peut avoir un effet important sur l'inertie thermique des locaux. Selon leur capacité thermique, leur effusivité et leur diffusivité, les matériaux ont des comportements différents face au rayonnement solaire et à la chaleur. L'inertie d'un local peut être améliorée en privilégiant des isolants et les finitions dont la diffusivité est basse et l'effusivité relativement élevée.

Autres critères Performances acoustiques

Lorsqu'un son est émis, une onde acoustique se propage dans l'air jusqu'à atteindre un obstacle. Lorsque cette onde incidente rentre en contact avec un matériau, deux ondes sont créées : une onde réfléchie qui se propage dans le même milieu que l'onde incidente, une onde transmise qui traverse le matériau de part en part. Un traitement acoustique est une démarche qui va influencer soit sur l'onde transmise, soit sur l'onde réfléchie de façon à améliorer l'acoustique d'un local.

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

L'isolation acoustique vise à limiter la transmission des sons d'un matériau à un autre. Cette isolation est généralement réalisée par des matériaux de forte densité car leur inertie fait qu'ils sont plus difficilement mis en mouvement par les ondes acoustiques. Ils génèrent donc moins d'ondes transmises par vibrations.

On peut également limiter la transmission du son en imperméabilisant la surface du matériau. Les ondes sont alors réfléchies et renvoyées vers la source émettrice. Les matériaux peu perméables sont donc de bons isolants, dans le sens où ils empêchent la transmission du son entre deux pièces contiguës. Cependant, les ondes réfléchies viennent perturber l'intelligibilité du discours dans le local, en créant des interférences.

Parmi les isolants thermiques connus sur le marché il existe des matériaux qui ont un intérêt acoustique et d'autres dont les performances acoustiques sont faibles. Parmi les meilleurs isolants acoustiques on cite la laine de verre, la laine de roche, la laine de mouton, la ouate de cellulose, la laine de chanvre, la laine de lin et le polyester recyclé.

Prix

Le prix est par mille critères les plus importants dans le choix de l'isolant. Ce facteur fluctue en fonction du temps selon les conditions du marché. La comparaison des prix est délicate; l'unité de référence pour la comparaison doit être choisie judicieusement : certains utilisent le volume, d'autres la masse, d'autres fixent une résistance cible à atteindre et comparent les prix du m^2 d'isolant. Il est à noter que les coûts des travaux s'ajoutent aux prix des isolants, donc il faut prendre ce critère en considération puisque certains isolants moins chers que d'autres nécessitent des travaux de mise en œuvre plus importants et donc des coûts supplémentaires.

II.4.3 Matériaux isolants

Laine de roche

La laine de roche est un matériau isolant minéral, fabriqué à partir du basalte, une roche volcanique. Le basalte est fondu à très haute température. Ensuite, cette roche en fusion est changée en fibres grâce à des roues qui tournent rapidement. Ces fibres sont liées ensemble à l'aide d'huile ou de résine, pour former les rouleaux ou les panneaux de laine de roche utilisés en isolation des murs, les toitures.



Figure II. 7 : Laine de roche

Laine de verre

La laine de verre est composée d'air et d'un réseau de fibres de verre enchevêtrées. Ces fibres forment un réseau de cellules microscopiques qui limite la circulation du fluide à travers la matrice solide. De cette manière la convection dans l'air est limitée. La conductivité de l'air emprisonnée dans ces cellules se rapproche de la faible conductivité thermique de l'air immobile : $\lambda_{air}=0.0262\text{W/m.K}$. La conductivité thermique globale de la laine de verre ne peut donc être inférieure à la conductivité thermique du gaz qu'elle enferme.



Figure II. 8 : Laine de verre.

Laine de bois

La laine de bois est issue des isolants végétaux, elle se présente principalement sous forme de panneaux flexible sous emi-rigides, mais également en vrac. Les panneaux de laine de bois sont obtenus grâce à des fibres de bois qui sont déchiquetées mélangées avec un liant (polyester ou autre) et passées au four afin d'assurer le collage. Les panneaux sont alors traités

(feu, moisissures). Ces panneaux sont généralement utilisés pour isoler les murs et toitures [24].



Figure II. 9 : Laine de bois

Ouate de cellulose

La ouate de cellulose est issue du recyclage du papier et se trouve sous forme de panneaux, rouleaux, elle est parmi les matériaux d'isolation présentant les meilleures performances environnementales avec le moindre coût. Cet isolant est fabriqué à partir du recyclage de papier journaux. Le papier sélectionné est broyé pour obtenir de toutes petites particules, elle subit ensuite un traitement ignifuge, anti-fongique et anti-nuisibles (insectes et rongeurs). Elle est ensuite compactée au maximum pour faciliter son transport et son stockage. Elle a alors un aspect floconneux.



Figure II.10 : Ouate de cellulose.

II.5 Diatomite comme matériau de contrôle d'humidité et d'isolation thermique

II.5.1 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.

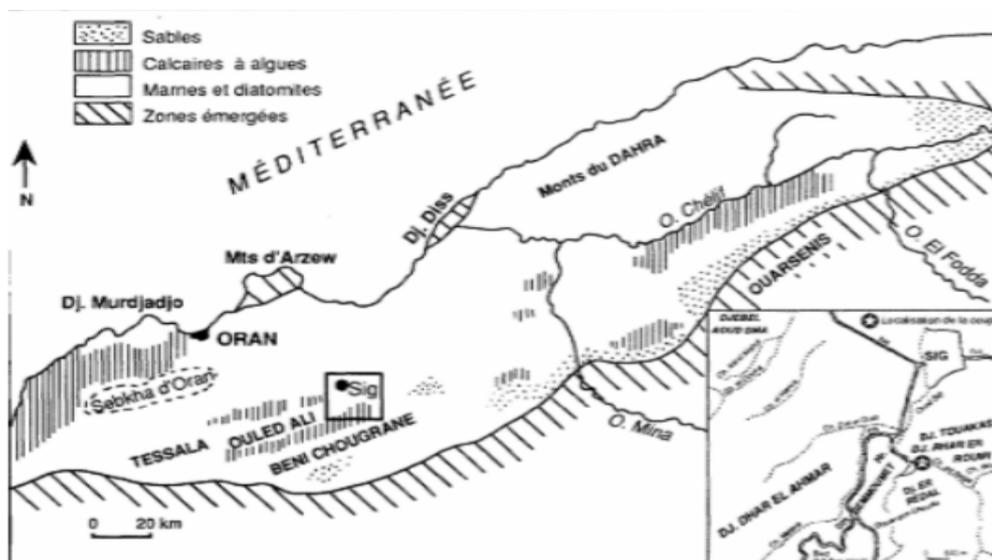


Figure II.11 : Carte géologique de la région ouest avec les principaux gisements.

II.5.2 Définition

La diatomite appelée aussi terre à diatomées et kieselguhr est une roche sédimentaire légère constituée de coquilles fortement poreuses. Les diatomées sont des microorganismes unicellulaires de type algue de taille généralement comprise entre 10 et 15 μm , 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. 12 : Site de dépôt de Sig (Algérie).

II.5.3 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 conductivité 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.5.4 Caractéristiques physiques et chimiques de la diatomite

La figure II.13 montre des micrographies de diatomites brutes et calcinées prises au microscope électronique à balayage (MEB) par J. Zheng et al, (2017) [25].

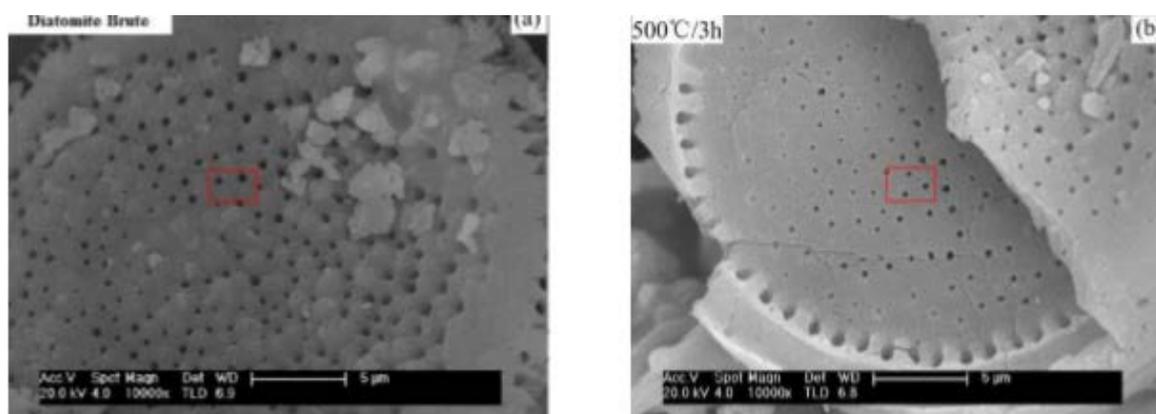


Figure II. 13 : MEB de diatomite brute (a) et calcinée (b). J. Zheng et al, (2017) [25].

Comme le montre la figure II.13 (a), la diatomite brute présente une structure en plaque ronde avec une taille et une distribution des pores uniformes. Elle se trouve sur la figure II.13 (b), la morphologie des micropores de la diatomite se modifie après une calcination à 500 ° C pendant 3 h. Les pores deviennent plus petits et le nombre de petits pores augmente. Le diamètre minimal des pores peut atteindre environ 50 nm. De plus, des fissures se trouvent à la surface de la diatomite. La diatomite présentant des pores petits et denses après calcination peut améliorer les performances de contrôle de l'humidité de la diatomite.

Une comparaison des performances d'adsorption et de désorption entre diatomite brute et diatomite calcinée selon l'étude de J. Zheng et al, (2017) sont montrés dans la figure II.14

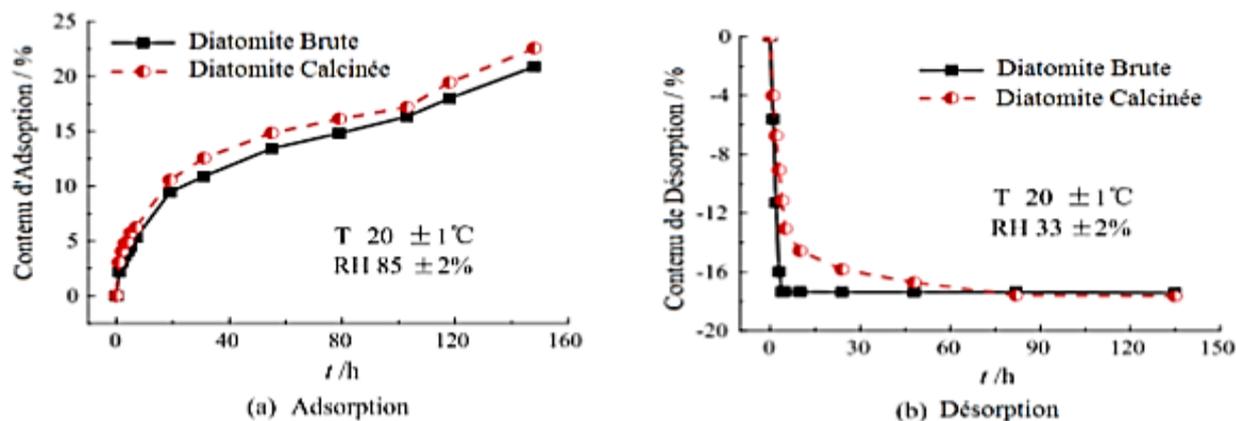


Figure II.14 : Contenu d'adsorption et de désorption de diatomite brute et calcinée, [25].

Il est évident que la teneur en adsorption de la diatomite calcinée est supérieure à celle de la diatomite brute, ce qui montre que la diatomite calcinée a une capacité supérieure à réguler et à contrôler l'humidité relative à l'intérieur des bâtiments. Cette capacité est attribuée au fait que les petits pores denses peuvent fournir des forces capillaires plus élevées. Pendant ce temps, la diatomite calcinée présente une vitesse plus lente pour libérer l'excès d'humidité, car les petits pores denses favorisent la rétention d'eau. La vitesse de désorption lente et uniforme peut créer un environnement intérieur plus confortable pour les habitants. Par conséquent, la calcination peut améliorer les performances d'adsorption et de désorption de diatomite. S. Benayache et al, (2018) [27] ont montré que la composition chimique de la diatomite Algérienne révèle que la silice (SiO_2), l'oxyde de calcium (CaO) et le corindon (Al_2O_3) sont les principaux composants, tandis que la diatomite calcinée à une température de $1100\text{ }^\circ\text{C}$ pendant 02 heures présente une teneur en silice plus élevée comme indiqué dans le tableau II.2.

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

Tableau II. 2: Compositions chimiques de la diatomite Algérienne brute et calciné, [27].

B. Hamdi et al, (2013) [26] à étudié la possibilité d'utiliser la diatomite Algérienne comme un matériau d'isolation thermique, les résultats de leur étude à montrer que le produit naturel est essentiellement composé de silice avec CaO comme impureté principale (19%) qui contamine la surface de cette matière première (tableau II.2). L'analyse physique chimique de ce dernier à indiquer que la diatomite à une porosité très élevée, peut atteindre 72% (tableau II.3).

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

Tableau II. 3: Analyse physique chimique de la diatomite naturelle Algérienne, [26]

II.5.5 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 [28]

Composants	1ere qualité	2eme qualité	3eme qualité
SiO_2	80%	62%	51%
CaO	9%	11%	17%
H2O pas plus de	25%	-	-
Poids volumique (t/m^3)	0.73	-	-

Tableau II. 4: Classification du kieselguhr selon les normes Russe (KARPOV, 1979).

II.5.6 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.15). En raison de cette porosité qui lui octroie une forte perméabilité [29], 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

Chapitre 2 : Isolation thermique et les matériaux de construction étudiés

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.

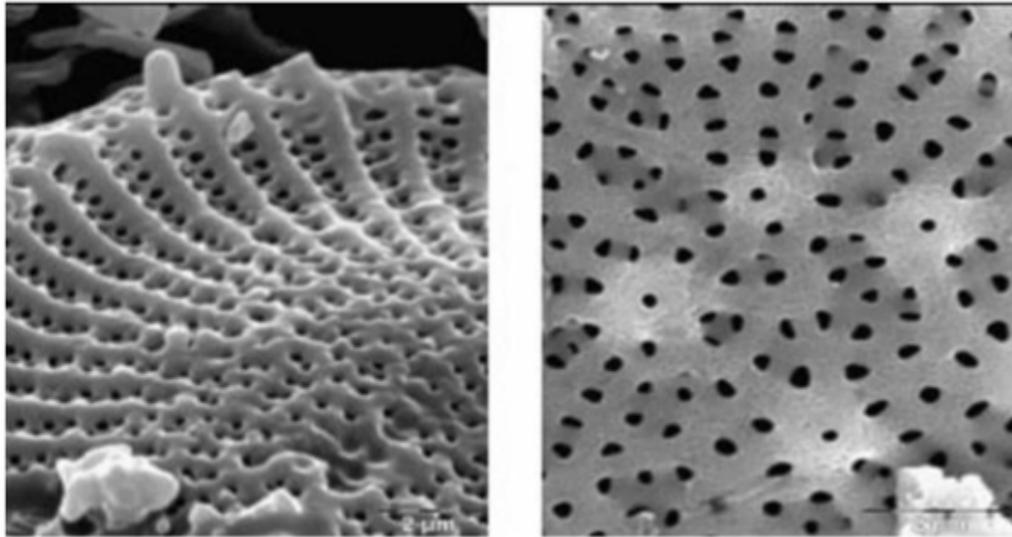


Figure II.15 : Microstructure de la diatomite [28].

Conclusion

L'isolation thermique des bâtiments permet de limiter le gaspillage énergétique. En effet, cette technique permet de réduire la consommation d'énergie que ce soit pour alimenter le chauffage ou la climatisation. Dès lors, l'isolation thermique permet de réduire les factures d'énergie et donc de réaliser des économies, mais aussi de réduire l'émission des gaz à effet de serre.

Dans Cette étude on a dressé une synthèse de connaissances des caractéristiques de différents matériaux de construction étudiés. La connaissance des caractéristiques de ces matériaux, est très nécessaires pour pouvoir définir leur comportement vis-à-vis des phénomènes physiques mis en jeu. Ainsi qu'à travers ce chapitre nous avons étudié la possibilité d'utiliser la diatomite comme un isolant dans le secteur des bâtiments.

Chapitre 3

**Modélisation mathématique et
positionnement du problème physique**

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

III.1 Introduction

Un bâtiment est le siège de différentes sollicitations dynamiques venant de l'extérieur (le rayonnement solaire, la pluie et la température) ou de l'intérieur (les différents systèmes de chauffage et de ventilation ainsi que les habitants eux même qui représentent une source de chaleur et d'humidité). sous ces multiples sollicitations, l'enveloppe est soumise, alors, à des échanges et à des interactions à la fois complexes et simultanées de flux de chaleur et de masse (d'air et d'humidité).

Afin d'assurer une bonne conception, il faut prendre en considération le comportement hygrothermique des composants du bâtiment. L'isolation est un point important de la thermique du bâtiment. L'isolation sert à diminuer les échanges de chaleur entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur,

Ce chapitre est dédié à la description de notre étude expérimentale, le déroulement de cette dernière a été effectué au niveau de l'université d'Abou Baker Belkaid Tlemcen afin de voir et analyser l'effet de l'isolant proposé pour cet essai.

Nous avons ensuite décrit les différentes étapes qu'il faut suivre dans la simulation numérique afin de résoudre numériquement un problème physique qui est régi par des équations aux dérivées partielles.

III.2 Description et fonctionnement du protocole expérimental

La lutte contre le gaspillage d'énergie dans les bâtiments passe par l'isolation thermique, et comme Le secteur habitat représente une part importante de la consommation énergétique dans l'Algérie, on a mentionné dans le chapitre précédent la possibilité d'utiliser la diatomite comme un isolant performant et aussi il peut être une solution pratique à ce problème.

Pour vérifier cette hypothèse et son efficacité dans ce domaine nous avons réalisé un protocole expérimental dans un laboratoire à l'université d'Abou Baker Belkaid Tlemcen, on a inclus la diatomite algérienne dans la pâte du béton et de la chape sous forme de poudre et de gravier.

III.2.1 Présentation du dispositif expérimental :

L'installation expérimentale (figure III.1) est destinée à étudier le comportement thermique des panneaux fabriqués en béton mélangé avec la diatomite. Elle est constituée de :

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique



Figure III. 1 : Banc expérimental de l'isolation thermique.

Matériels utilisés

Pour le fonctionnement du banc d'essai réalisé, plusieurs matériels ont été exploités pour assurer la démarche de cette expérience ainsi que l'instrumentation des mesures :

Laine de roche

C'est un isolant certifié pour un usage dans le bâtiment tant pour l'isolation thermique. On a le définit précédemment dans le deuxième chapitre.

Résistance thermique

La résistance thermique variable fonctionnant à courant alternatif, permet de chauffer le côté intérieur des panneaux.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique



Figure III. 2 : La résistance thermique.

Régulateur de la température

Un régulateur de température est un dispositif permettant le réglage de la température. Il est alimenté par une sonde de température et possède une sortie connectée à un dispositif de commande, par exemple un système de chauffage ou de ventilation. Afin de pouvoir réguler la température de manière efficace et exacte, sans nécessiter une intervention importante de l'opérateur, le système de régulation de température est fondé sur un régulateur qui est alimenté par un thermocouple, par exemple, à l'aide d'un capteur de température. Il compare la température réelle à la température de régulation désirée, ou la consigne, et fournit une sortie à un élément de commande. Le régulateur de température est une partie du système de contrôle complet, et l'ensemble du système doit être analysé lors de la sélection du régulateur de température correspondant. [30]



Figure III. 3 : Régulateur de température.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

Caméra thermique

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

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

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



Figure III. 4: Caméra thermique TESTO.

III.2.2 Procédure expérimentale

Les expériences ont été menées sur cinq panneaux de béton ($25 \times 25 \times 5\text{cm}$) (figure III.6) et pour savoir l'effet de la diatomite dans l'isolation thermique, chaque panneau a une structure différente de l'autre :

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

- Un panneau fabriqué avec le béton ordinaire (sable, ciment, gravier 6/16, eau).
- Deux panneaux préparés de la même composition (béton mélangé à du gravier de diatomée (6/16)) avec des quantités différentes de 200g et 306g.
- Deux panneaux de béton mélangés avec des quantités différentes de la poudre de diatomite (200g et 357g).

Pour la chape, on a préparé quatre échantillons de chape différents ($25 \times 25 \times 3\text{cm}$) (figure III.7)

- une chape ordinaire (sable, ciment, gravier 4/8, eau).
- deux chapes mélangés avec des quantités différentes de la diatomite sous forme gravier (4/8) (200g et 450g).



Figure III. 5: Les différents panneaux du béton : (a) béton ordinaire, (b) béton/diatomite (poudre 200g), (c) béton/diatomite (gravier 200g), (d) béton/diatomite (poudre 357g), (e) béton/ diatomite (gravier306g).



Figure III. 6: Les différents panneaux de la chape : (a) chape ordinaire, (b) chape/diatomite (gravier 200g), (c) chape/diatomite (gravier 450g).

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

Les cinq côtés des différents panneaux ont été isolés avec de la laine de roche. Le côté intérieur du panneau contient une résistance en silicone sous forme de serpentins de 4m le long et 5 mm d'épaisseur comme le montre la figure III.2, Sa température est fixée à 60 °C à l'aide d'un contrôleur de température (Xmtd-4000).

Ces panneaux sont exposés à un courant d'air latéral, les conditions ambiantes (température, humidité) ont été mesurées à l'aide des capteurs. Et en ce qui concerne la prise de température de côté extérieur des panneaux, on la prendait à l'aide d'une caméra thermique TESTO en réglant l'émissivité de panneau, le pas de temps était de 10 minutes pendant 2 heures et demi-heure pour le béton et seulement 2 heures pour la chape, puis on copie les photos sur l'ordinateur et lire plusieurs paramètres comme la température moyenne des panneaux avec le logiciel TESTO comme le montre la figure III.7

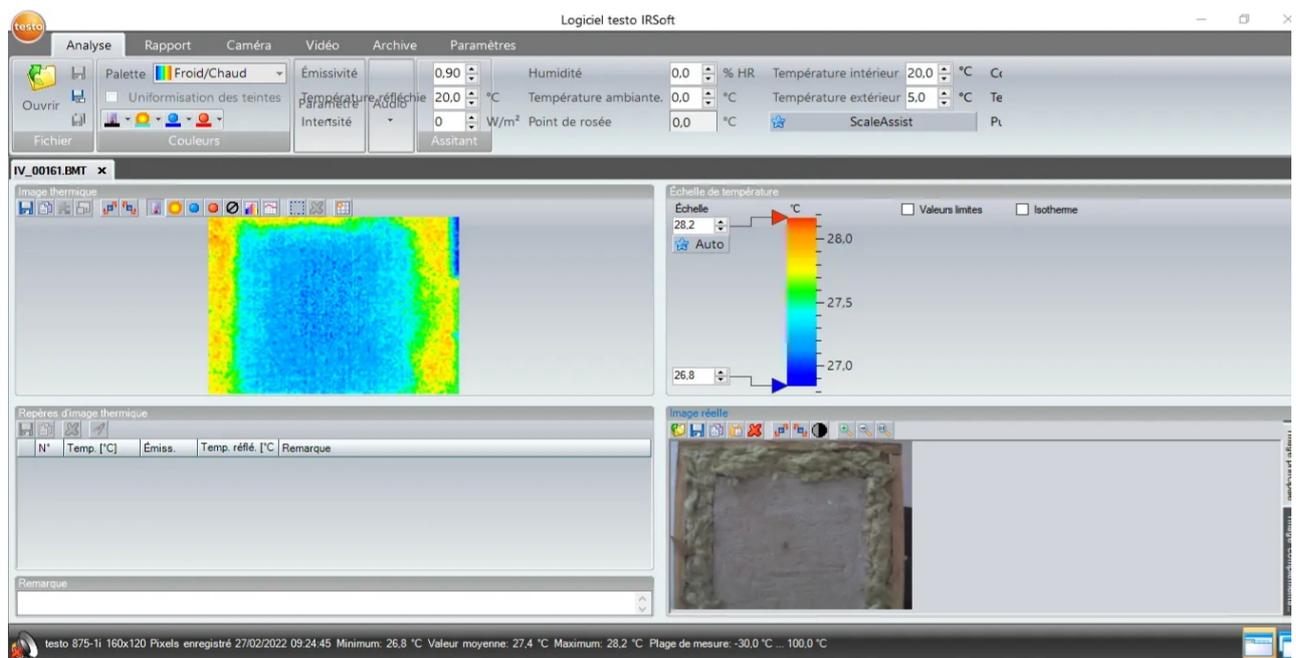


Figure III. 7: TESTO logiciel de la caméra thermique.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

Voici un diaporama succinct des étapes de cette expérience :



Figure III. 8 : Photos représentent les différentes étapes de l'expérience.



Figure III. 9: Les panneaux fabriqués en béton mélangé avec la diatomite.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

III.3 Modélisation mathématique

Un modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité basé sur le travail d'HM. Künzle (1995) [31], est établi pour décrire le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans une paroi. Nous considérons la température et l'humidité relative comme des moteurs potentiels régissant le transfert de chaleur et d'humidité, assurant la continuité des variables à l'interface entre les couches. L'humidité relative est un paramètre continu permettant de qualifier la qualité des ambiances habitables, par contre la teneur en humidité est un variable d'état dépend de la nature microstructurale du matériau, ce qui engendre des problèmes de discontinuité comme illustré dans la figure III.10.

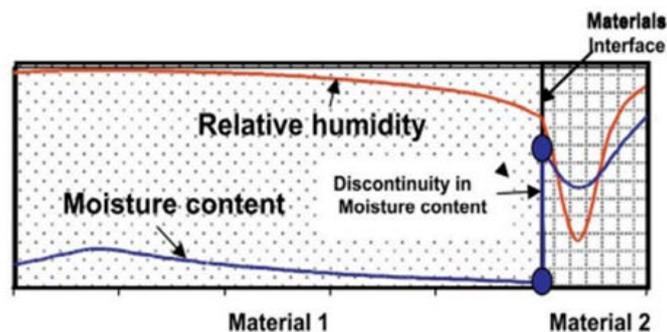


Figure III. 10: Profil de l'humidité relative et de la teneur en eau à l'interface de deux matériaux différents [32].

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 thermophysiques retenus sont ceux de l'eau pure) ;
- L'air sec et la vapeur d'eau sont des gaz parfaits et incompressibles ;
- Les effets de la réaction chimique, de l'hystérésis, de la déformation, et de la gravité ne sont pas pris en compte.

III.3.2 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

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

dérivées partielles en imposant l'équilibre de masse et d'énergie dans un élément infinitésimal de volume :

Transfert d'humidité

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

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

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 :

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

La teneur en eau, w [kg/m^3] peut être exprimée en fonction de l'humidité relative. La pression partielle de vapeur d'eau saturée dans l'air a la forme :

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

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

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

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 :

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

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

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

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

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

$$g_V = -\delta_p \nabla P_V = g_V = -\frac{\delta}{\mu} \nabla P_V = -\delta_p \nabla P_{V,S}(T) \nabla \varphi - \delta_p \varphi \frac{dP_{V,S}(T)}{dT} \nabla T \quad (\text{III.7})$$

La conduction liquide est décrite par la densité du flux liquide [kg/(m² .s)] sous la forme:

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

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

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

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

Transfert de chaleur

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

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

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

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

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

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

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 côté extérieur est donnée par :

$$(D_w \cdot \xi + \delta_p \cdot P_{V,S}(T)) \nabla \varphi + \delta_p \cdot \varphi \cdot \frac{\partial P_{V,S}(T)}{\partial T} \cdot \nabla T = \beta_{s,ex} (\phi_{a,ext} \cdot P_{V,S}(T_{a,ext}) \phi \cdot P_{V,S}(T)) \quad (\text{III.15})$$

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

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

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 :

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

$$\begin{aligned} & \lambda_{eff} \nabla T + L_v \cdot \delta_p \cdot P_{v,s}(T) \cdot \nabla \varphi = \\ & h_{a,int} \cdot (T_{a,int} - T_{s,int}) + \beta_{s,int} L_v (\phi_{a,int} \cdot P_{v,s}(T_{a,int}) - \phi_{s,int} \cdot P_{v,s}(T_{s,int})) \end{aligned} \quad (\text{III.18})$$

Les coefficients de transfert de chaleur par convection pour le vent, l'air intérieur et la température du ciel se trouvent comme :

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

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

$$T_\infty = 0.0552 \cdot (T_{a,ext})^{1.5} \quad (\text{III.21})[6]$$

III.4 Résolution numérique

La résolution des équations aux dérivées partielles décrivant le transfert couplé de chaleur et de masse ne peut pas toujours se faire analytiquement. Par conséquent, l'approche numérique qui consiste à transformer ces équations sous forme d'un système algébrique est indispensable. Beaucoup de code ont été développés dans le but de résoudre numériquement ce type de problème. Le code de calcul COMSOL qui devenu aujourd'hui un outil fiable et éprouvé, du fait de sa large utilisation dans le domaine de transferts de chaleur et de mécanique, a été choisi pour faire cette étude numérique.

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses équations physiques et

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. L'utilisateur définit ses couplages en sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - choisir la ou les équations physiques, définir la géométrie, les propriétés des 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 multicouche. 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 [6].

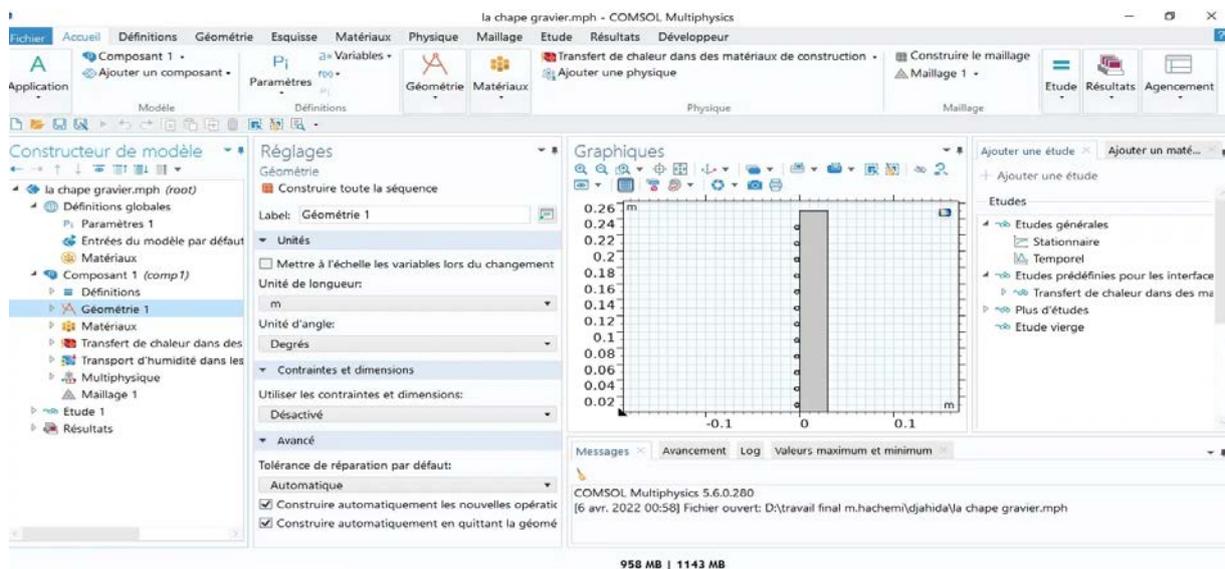


Figure III. 11 : Interface du logiciel COMSOL Multiphysics.

III.4.1 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 [34].

III.4.1.1 Grandes lignes de la méthode

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

- **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 [35].

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

III.4.1.2 Choix de maillage

En 2003 A.Y.T. Leung, Zhu Bin, Jian jin Zheng, Hao Yang, 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.

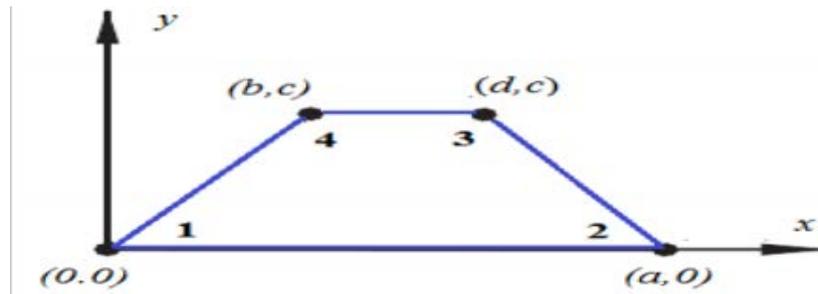


Figure III. 12: Trapézoïdale de Fourier de p-élément.

En 2006, les auteurs Yeon Seok Choo, Noori Choi Chai Lee, ont proposé des éléments plans tétragonaux triangulaires élastiques linéaires flexibles, précis et robustes, avec l'introduction de degrés de liberté de rotation supplémentaires. Ils montrent que les rotations supplémentaires augmentent la précision et la qualité de la durabilité de l'élément développé. Les travaux de recherche de A. Houmat 2006, ont été consacrés à l'étude de la version trigonométrique de la méthode des éléments finis est basée sur l'élément quadrilatère courbe. Ce facteur a été développé et appliqué à l'analyse des vibrations libres de structures membranaires de forme arbitraire. Il a calculé les valeurs de fréquence pour les arcs ouverts et fermés à l'aide de maillages quadrilatéraux courbes et a montré une convergence rapide et une grande précision en utilisant cette méthode. Ces valeurs sont très précises et peuvent être comparées à d'autres techniques de calcul.

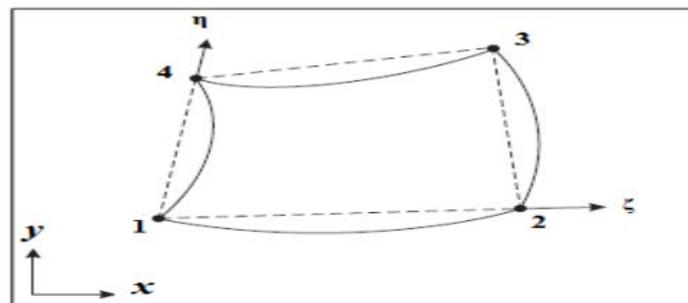


Figure III. 13: Élément quadrilatère courbe.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

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

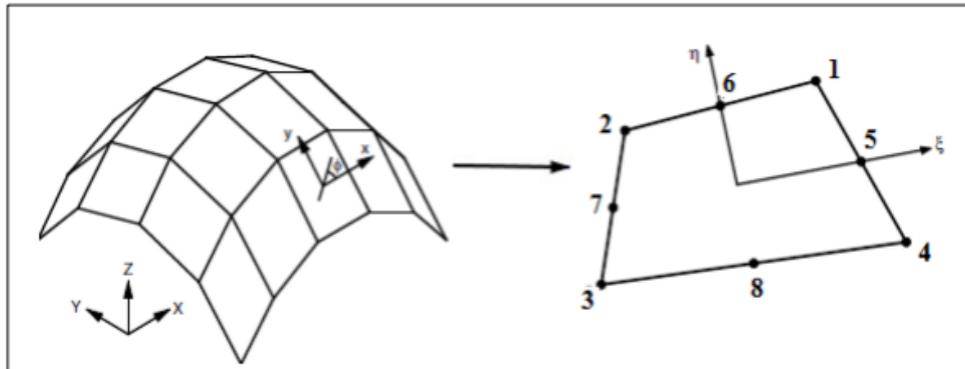


Figure III. 14: Éléments coque quadrilatère à 8 nœuds de contrainte assumée hybride.

en 2009 N.Nguyen-Thanha, et tous, ont utilisé la méthode alternative finie alpha pour analyser les vibrations libres et les structures en utilisant des maillages avec des éléments triangulaires [36].

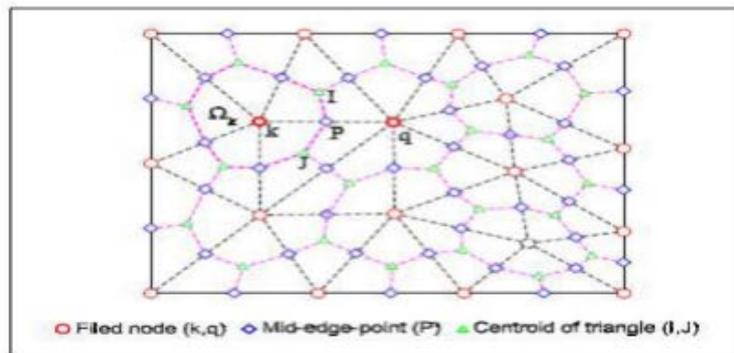


Figure III. 15 : Maillage avec éléments triangulaires dans la méthode des éléments finis alpha alternatif (A α FEM).

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

➤ Les résultats numériques de l'A α FEM 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

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

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'analyse 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.4.1.3 Forme Conservative des équations de conservation

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

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

- I. terme transitoire.
- II. terme de transport par convection de ϕ .
- III. terme diffusion de ϕ .
- IV. terme source.

L'équation différentielle générale dans un écoulement 2D instationnaire, incompressible est la suivante :

$$\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\Delta \phi}{\Delta x} + \frac{\Delta \phi}{\Delta y} + \dots \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \omega \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \omega \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S \phi$$

ϕ Une des variables suivantes $1, u, v, k, \varepsilon$ et T [37].

III.4.2 Description de l'étude

Elle se résume en deux parties :

La construction du panneau

En utilisant le constructeur d'objet, lui donner la hauteur largeur de la géométrie étudié, puis choisir sa matière de matériau de construction. Une fois que la géométrie a été créée, il faut définir les propriétés nécessaires et les conditions aux limites.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

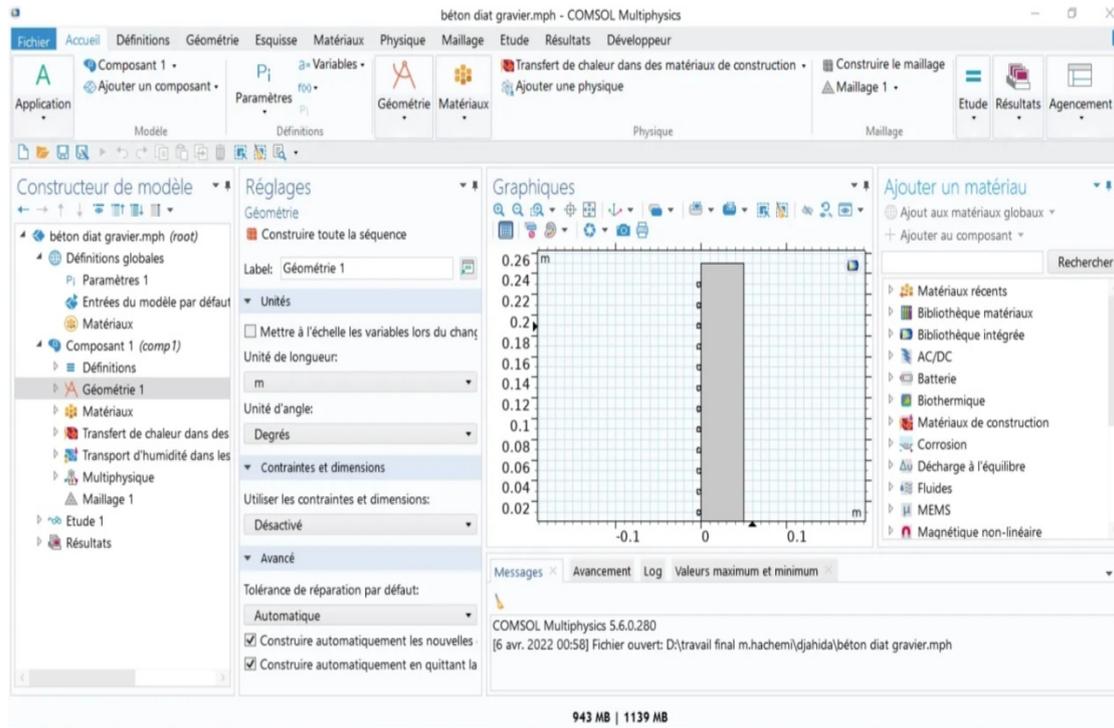


Figure III. 16 : Géométrie en 2D du panneau en béton sur logiciel COMSOL Multiphysics.

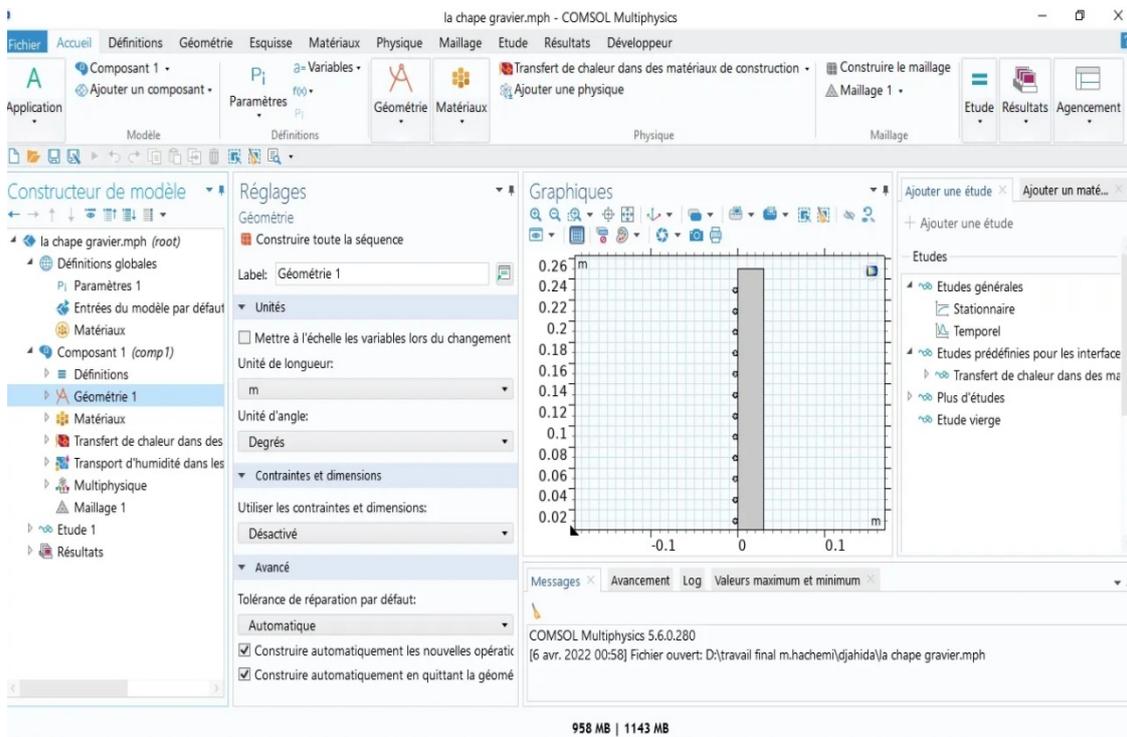


Figure III. 17 : Géométrie en 2D du panneau de la chape sur logiciel COMSOL Multiphysics.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

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

propriétés	λ [W/(m.K)]	ρ_s [kg/m ³]	C_p [J/(kg. K)]	$\delta \times 10^{-10}$ [s]
Diatomite (gravier(38,39))	0.1	320	1436.5	0.295
Diatomite (poudre(38,39))	0.7	320	1436.5	0.295
Béton[40]	1.4	2510	1209.07	0.0385
Chape[41]	1.04	2350	1209.07	0.385
béton/DP 367g	1.26	2100	1252.13	0.0872
béton/DG 306g	1.18	2150	1247.6	0.0821
chape/DG 450g	0.758	1813.3	1277.25	0.115
mortier	1.4	1810	840	0.0385
Air[42]	0.026	1.23	1006.43	5.62
Brique[42]	0.682	1600	840	0.26

Tableau III. 1: Propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés.

Condition aux limites

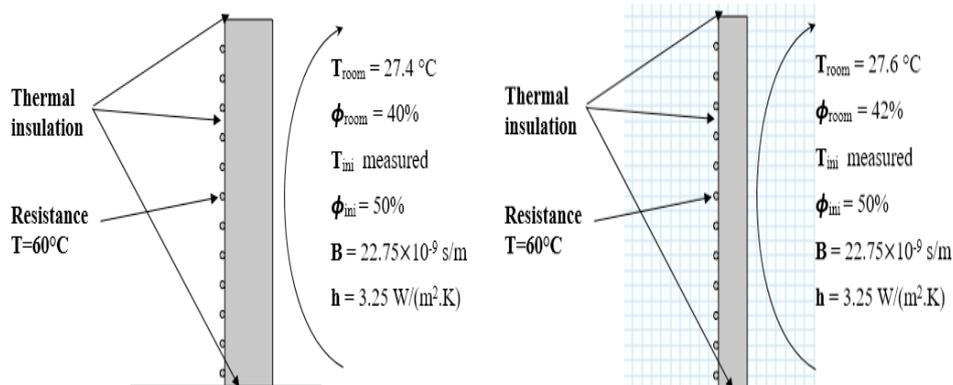


Figure III. 18 : Vue axonométrique du béton et de la chape respectivement avec conditions aux limites expérimentales.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

Et pour l'étude réelle

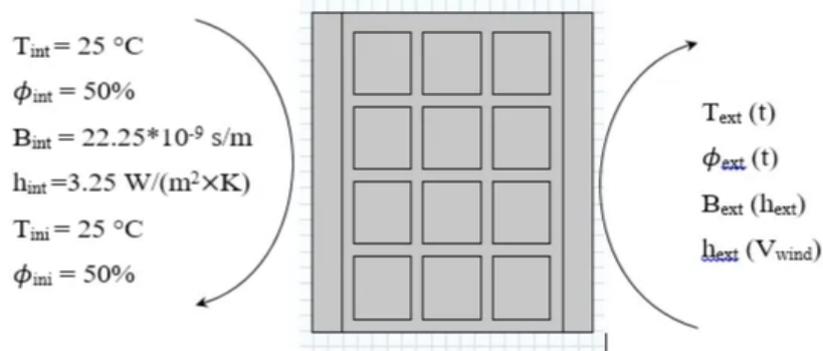


Figure III. 19 : Etude numérique dans un mur en brique.

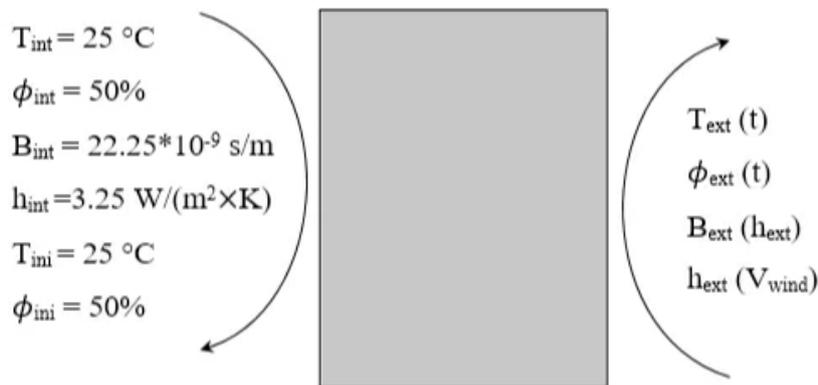


Figure III. 20 : Etude numérique dans un mur préparé avec la chape.

Test de maillage

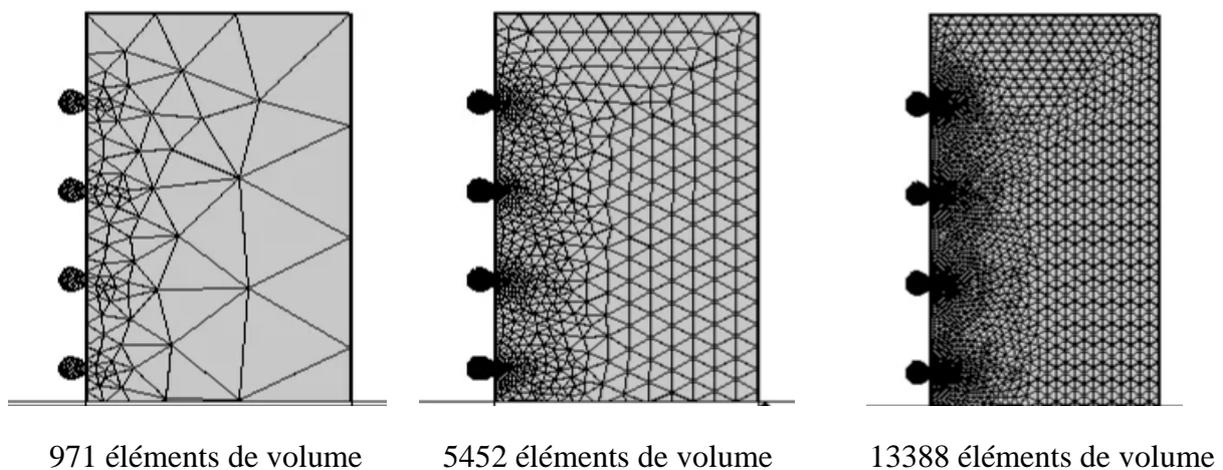


Figure III. 21 : Le nombre d'éléments de volume.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et positionnement du problème physique

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 13388, 5452, 971 (figure III.21). La température est choisie à titre de comparaison, Voir Figure (III.22). On constate que le meilleur maillage est le deuxième pour une rapidité de calcul.

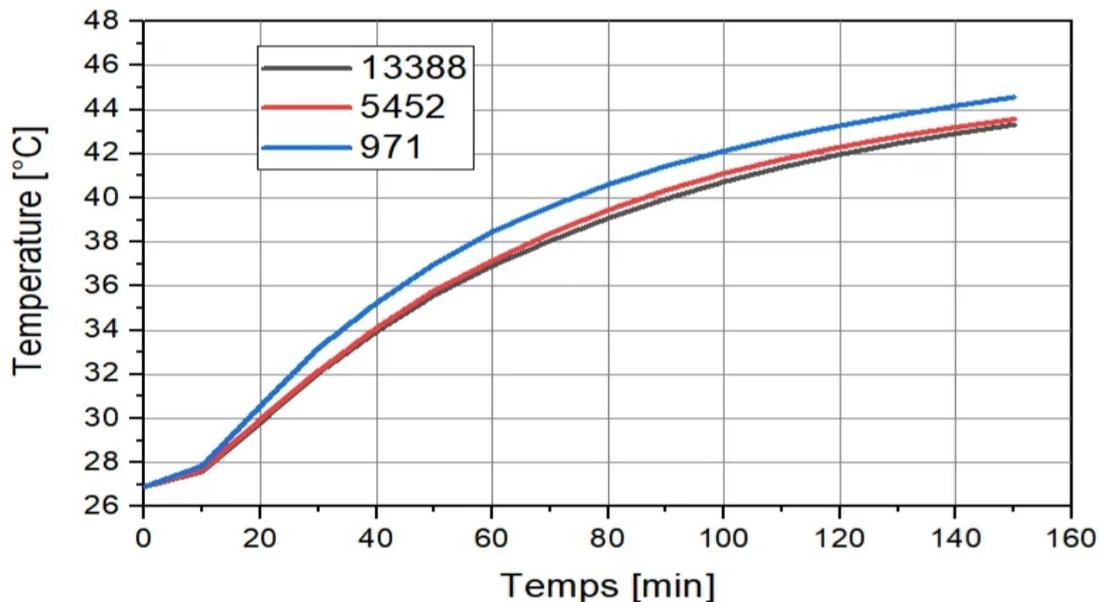


Figure III. 22: Test de maillage

Conclusion

L'étude expérimentale a été mise en place au laboratoire de l'université de Tlemcen dans le but d'étudier le comportement thermique de plusieurs configurations de béton et de la chape. L'évolution des transferts thermiques au niveau des échantillons a été suivie tout au long de l'expérience, et le contrôle rigoureux des conditions aux limites imposées également vérifié.

Dans ce chapitre, une modélisation mathématique phénoménologique issue du travail de Künzl [31] du transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction a été présentée en détail. Ce modèle est largement utilisé considérant la température et l'humidité relative comme des moteurs potentiels du transfert hygrothermique, pour assurer la continuité du transfert entre les couches des matériaux. Nous avons vu aussi dans ce chapitre une généralité sur le calcul numérique et ses étapes utilisés pour la résolution numérique. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats obtenus et leurs interprétations.

Chapitre 4

Résultats et interprétations

IV.1 Introduction

Dans cette étude, on s'intéresse au problème du transfert couplé d'humidité et de chaleur à travers des panneaux poreuse homogènes. Afin de voir l'influence de la constitution du ces derniers sur leurs comportement thermique en régime transitoire, nous avons considéré plusieurs configurations (Figure III.5 et Figure III.6).

Afin d'illustrer l'impact de la structure des panneaux du béton et de la chape sur leur comportement thermique, on s'intéresse à la variation, en fonction du temps, des températures au niveau des faces extérieures de chaque panneau, le travail concernera plusieurs cas de préparation du béton et de la chape à l'aide de la diatomite comme un isolant avec différentes quantités et formes.

IV.2 Résultats et interprétations

Les résultats obtenus dans cette application sont donnés dans les figures suivantes :

IV.2.1 Comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus des différentes configurations de béton

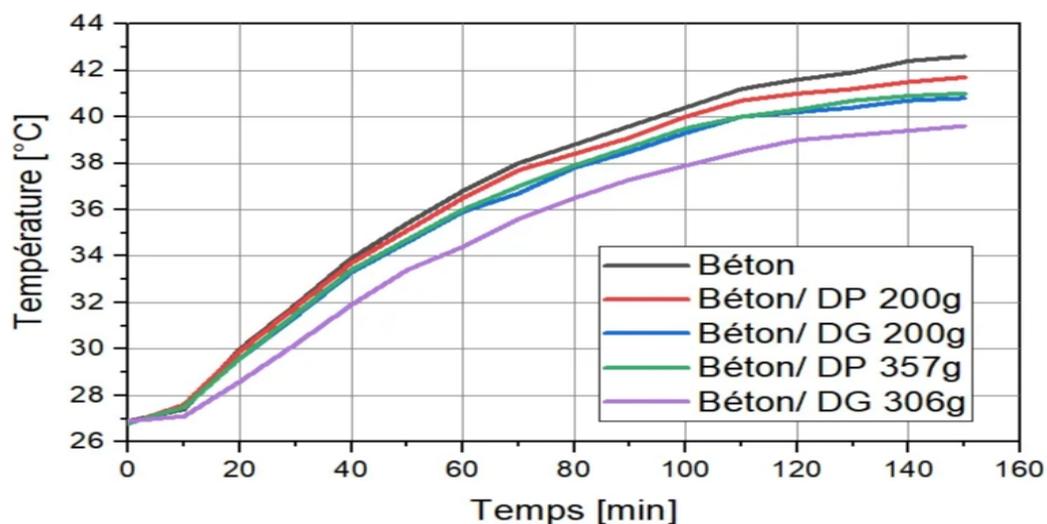


Figure IV. 1: Evolution temporelle de la température de la face extérieure de béton.

D'après la figure IV.1 qui représente la variation de la température du coté extérieur des panneaux de béton en fonction du temps, on remarque qu'à partir de $t=10$ min l'écart de température de cette face entre les différentes configurations en présence et en absence de l'isolant commence à augmenter légèrement en régime transitoire. Les valeurs obtenus nous ont montré que la meilleure configuration ayant diminué le transfert de chaleur c'est le béton mélangé avec de la diatomite sous forme gravier (306 g), l'écart de température entre cette

configuration et celle de la configuration ordinaire (un béton diatomite) est augmenté pour atteindre un maximum de $\Delta T_f = 3^\circ\text{C}$ après 150 minutes : Cet écart dû à la haute porosité de la diatomite sous forme gravier et sa faible conductivité thermique. D'un autre côté, la quantité de cette dernière influe sur la différence de température qui se voit augmenter dans le mélange en améliorant ainsi. Il est à constater que la forme de cette matière a un grand impact car quand on a la diatomite sous forme poudre dans le mélange, nous remarquons que l'isolation thermique est diminuée à cause de la diminution d'ensemble des pores, qui provoque par la suite une augmentation de la valeur de la conductivité thermique.

IV.2.2 Comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus des différentes configurations de la chape

Dans le présent cas, une étude est entreprise sur la possibilité d'améliorer les performances thermiques des bâtiments anciens et nouveaux, ceci à l'aide d'une chape préparée à base d'un mélange qui contient la diatomite sous forme gravier avec des différentes quantités.

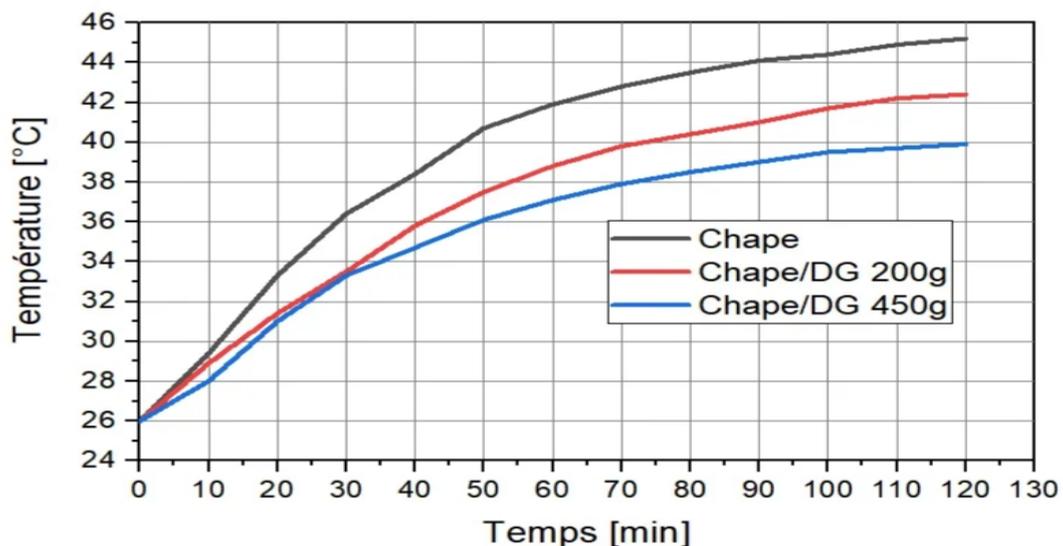


Figure IV. 2 : Evolution temporelle de la température de la face extérieure de la chape.

D'après les résultats obtenus dans la figure IV.2, la diatomite sous forme gravier a un effet remarquable dans la chape. L'écart de température entre le panneau fabriqué en mortier simple et celui préparé avec de la diatomite sous forme gravier (450g) atteint 5.3°C . Toutefois cet écart reste supérieur comparativement à celui enregistré entre la chape ordinaire et la chape préparée avec les 200g de la diatomite sous forme gravier. Les mêmes conclusions établies précédemment sont constatées à savoir une relation inversement proportionnelle entre le transfert de chaleur et la quantité de diatomite utilisée.

IV.2.3 Validation numérique :

Lors de cette étape, une comparaison entre deux résultats : celui d'une simulation à l'aide des résultats du COMSOL et celui de l'expérience menée, caractérisée par la température moyenne atteinte du côté extérieur des panneaux (mesurée à l'aide d'une caméra thermique).

Cas 1. Validation des différentes configurations de béton.

Pour cette comparaison, 03 configurations du béton ont été effectuées afin de les valider numériquement (béton ordinaire, un béton préparé avec 357 g de la diatomite sous forme poudre et un béton fabriqué à la base d'une quantité de 306 g de la diatomite sous forme gravier), les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

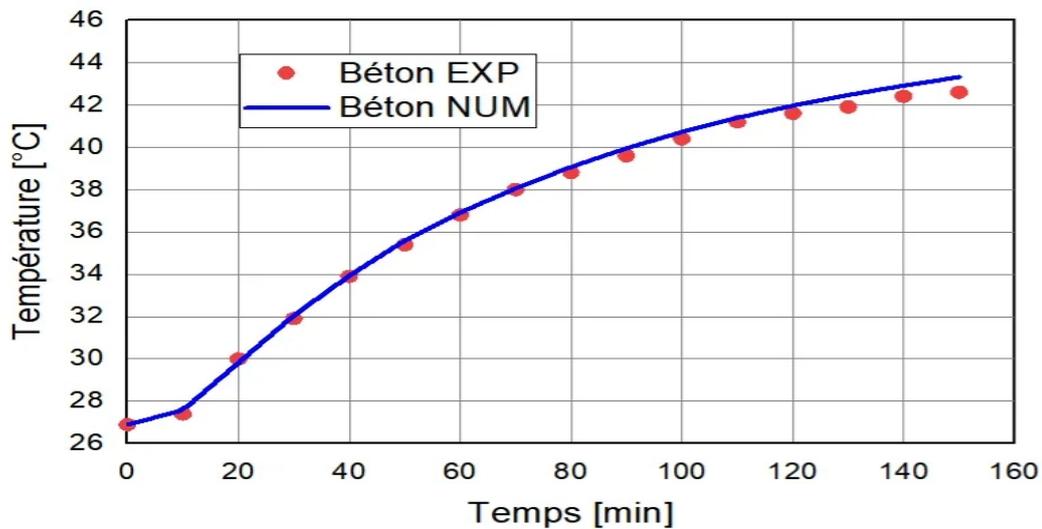


Figure IV. 3 : Résultats de simulation de béton ordinaire.

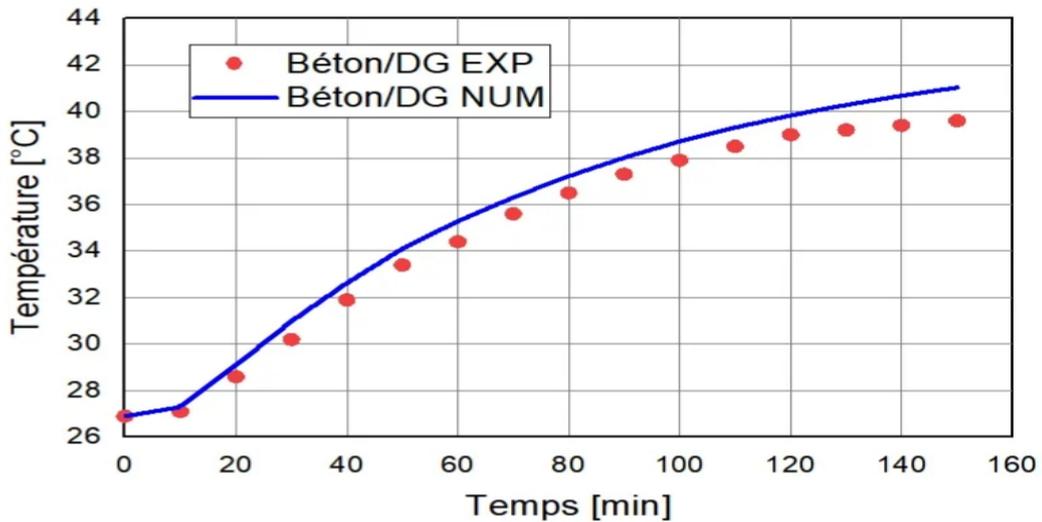


Figure IV. 4 : Résultats de simulation de béton/diatomite gravier.

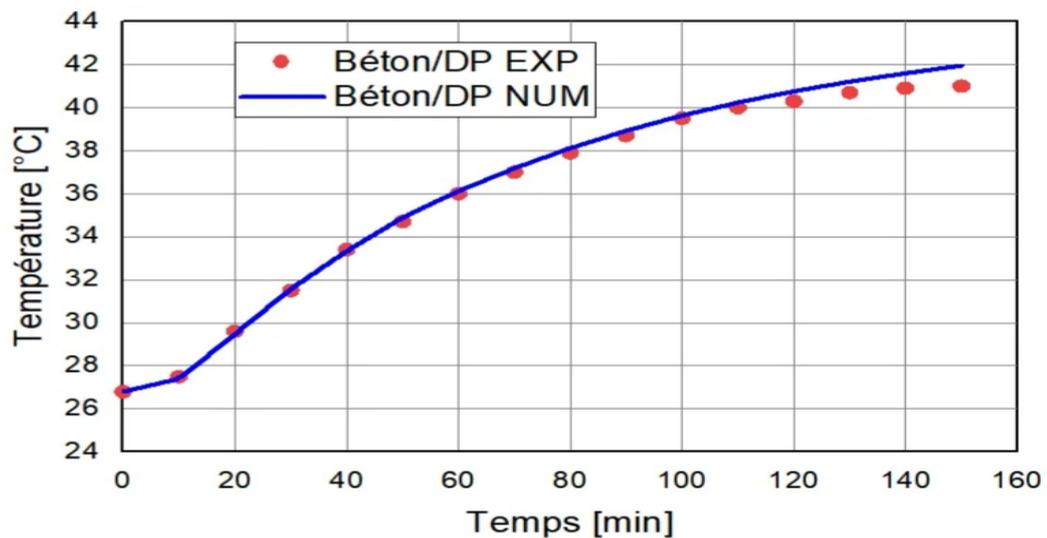


Figure IV. 5 : Résultats de simulation de béton/diatomite poudre.

Les figures IV.3, IV.4, IV.5 montrent que les résultats expérimentaux et numériques sont cohérents et montrent un bon accord. En effet, la différence de température entre les deux résultats ne dépasse pas 1,7% pour le béton ordinaire et 2,3% pour le béton mélangé avec de la poudre de la diatomite et 3,6% pour le béton mélangé à du gravier de la diatomite.

Cas 2. Validation des différentes configurations de la chape.

Dans cette deuxième analyse de validation. Nous avons choisi deux formes de chapes pour valider numériquement ses résultats (chape ordinaire, chape mélangée avec 450g de diatomite sous forme de gravier).

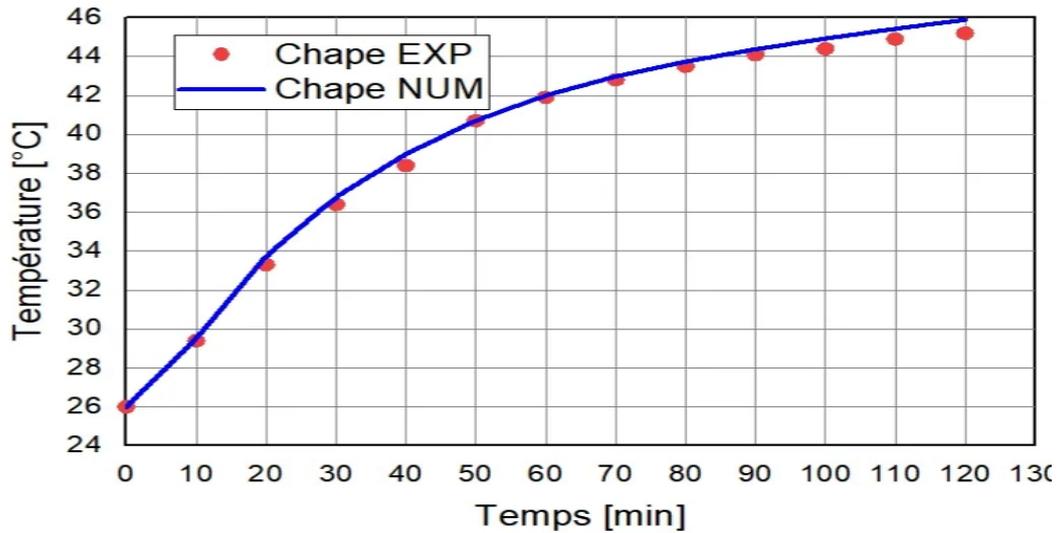


Figure IV. 6 : Résultats de simulation de la chape ordinaire.

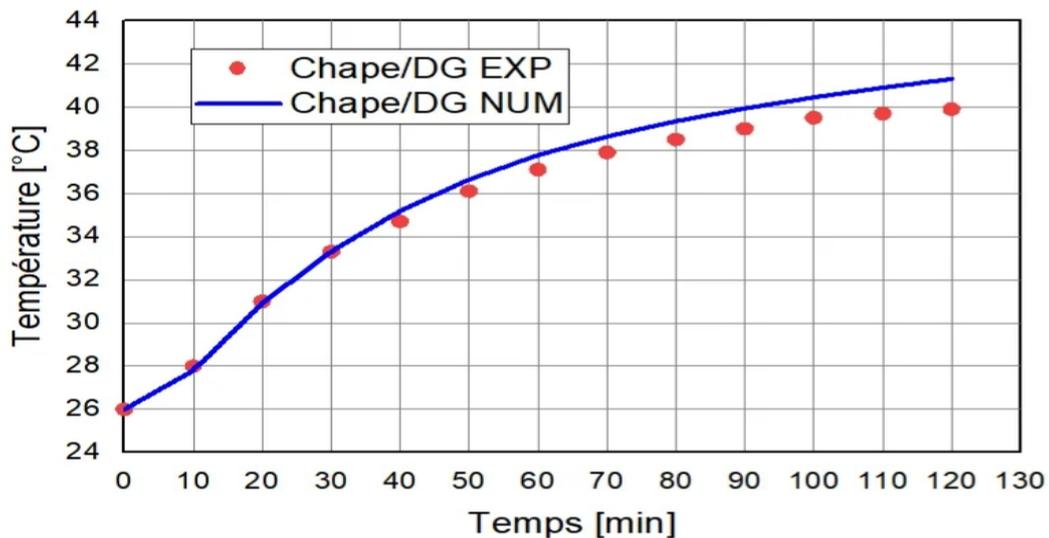


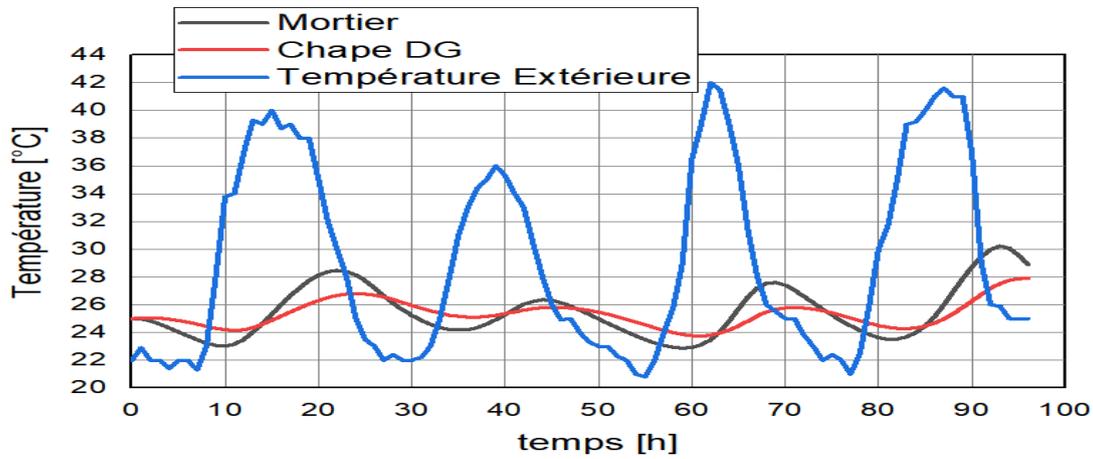
Figure IV. 7 : Résultats de simulation de la chape/ diatomite gravier.

D'après les figures IV.6, IV.7 un bon accord est montré entre les deux résultats (expérimental et numérique) avec des erreurs relatives de 1.55% pour la chape ordinaire et 3.5% pour la chape avec 450g de gravier de diatomite.

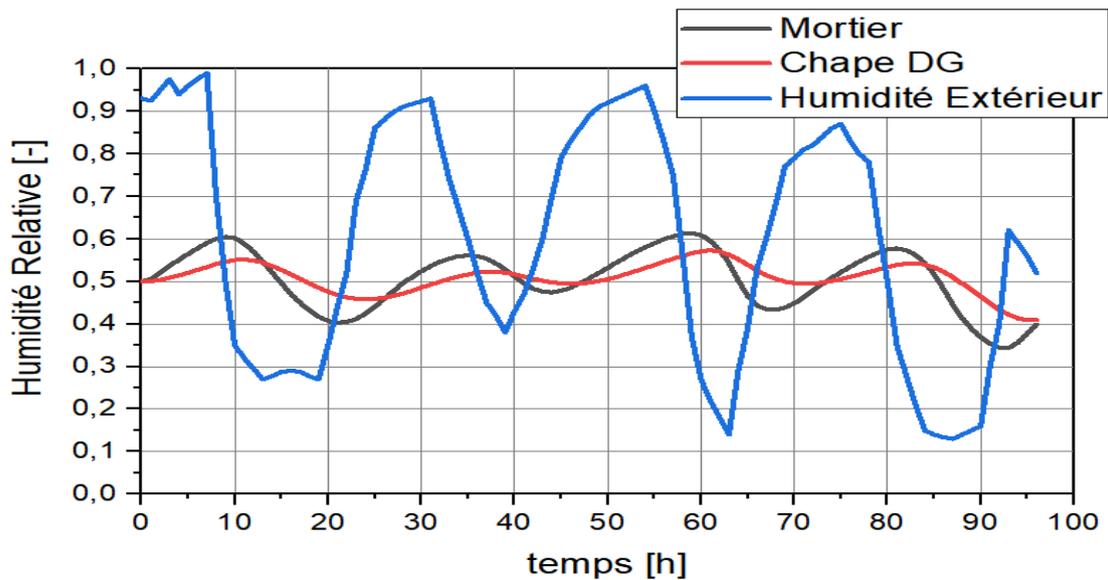
IV.2.4 Effet de remplacer le mortier par la chape de diatomite 450g sur l'environnement intérieur

Après avoir l'effet remarquable de la diatomite sous forme gravier sur l'amélioration de performance hygrothermique de béton et la chape. Cette partie est consacrée à étudier l'effet de remplacement du mortier par la chape/diatomite dans un mur par des simulations numériques sur l'environnement intérieur (figure IV.8). La ville de Tlemcen est sélectionnée à

travers des conditions météorologiques aux limites appropriées [41]. La période du 15 à 19 août 2021 est choisie pour le calcul numérique.



(a)



(b)

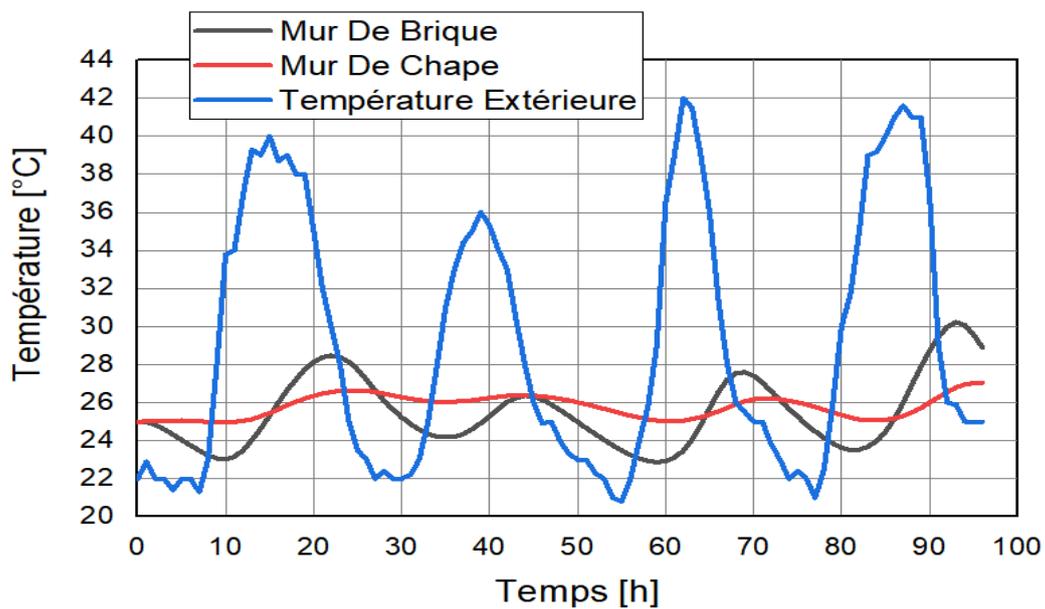
Figure IV. 8 : La variation de la température (a) et de l'humidité relative (b) à la surface interne, (15 -19 Aout 2021) à Tlemcen.

Comme il est présenté sur la figure IV.9.a, la température extérieure varie entre 21 [°C] et 42 [°C] pendant 24 heures. On peut voir que la température intérieure pendant la nuit ainsi que la journée pour le cas de la chape mélangée avec la diatomite a tendance à être très stable à celle du mortier sans isolation. Il démontre que l'utilisation de la diatomite sous forme gravier améliore l'isolation thermique des bâtiments. La figure IV.9.b montre les profils d'humidité

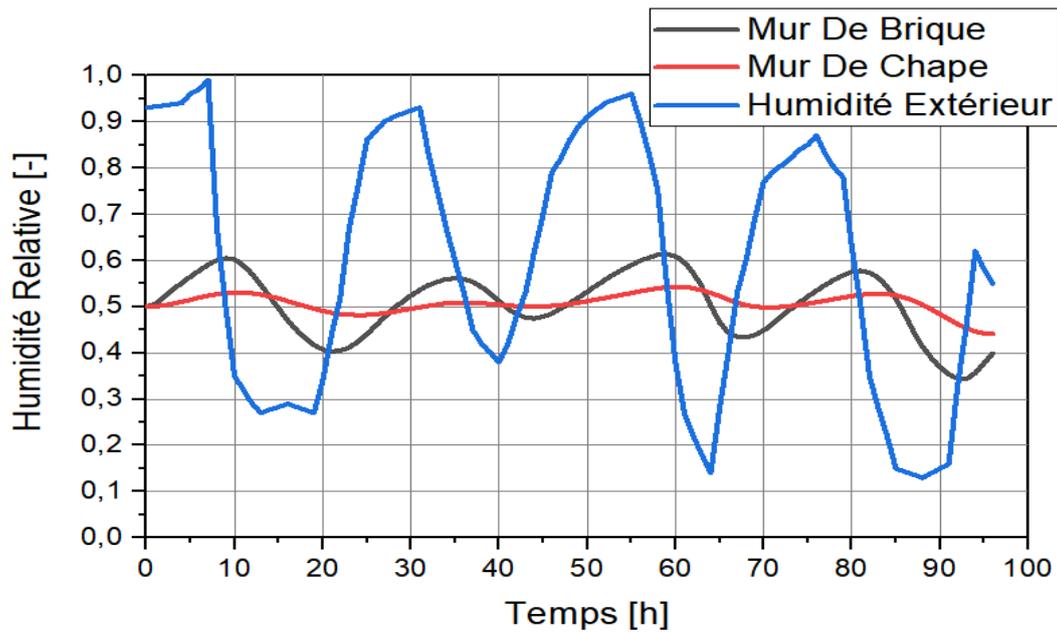
relative intérieure simulés pour le climat de Tlemcen. L'humidité relative extérieure de la région de Tlemcen varie entre 13% et 98 %, avec une moyenne de 63%. L'humidité relative à la surface intérieure pour la chape/diatomite est stable à celle du mortier, cela signifie que la diatomite peut modérer la fluctuation de l'humidité intérieure.

IV.2.5 Effet de remplacer le mur de brique par un mur de la chape de diatomite 450g sur l'environnement intérieur.

Cette partie est consacrée à étudier l'effet de remplacer le mur de brique par un mur de la chape de diatomite par des simulations numériques sur l'environnement intérieur (figure IV.9).



(a)



(b)

Figure IV. 9 : La variation de la température (a) et de l'humidité relative (b) à la surface interne des murs, (15 -19 Aout 2021) à Tlemcen.

Comme présenté sur la figure IV.9.a, la température intérieure pendant la nuit et la journée pour le cas d'un mur avec chape mélangé avec la diatomite a tendance à être très stable en comparaison avec celle du mur réalisé en brique. Il en ressort que l'utilisation de la diatomite sous forme gravier améliore l'isolation thermique des bâtiments. La figure IV.9.b montre les profils de l'humidité relative intérieure simulés pour le climat de Tlemcen. L'humidité relative extérieure de la région de Tlemcen varie entre 13% et 98 %, avec une moyenne de 63%. L'humidité relative à la surface intérieure pour le mur de la chape/diatomite est stable comparée à celle du mur en brique, cela signifie que la diatomite peut modérer la fluctuation de l'humidité intérieure.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons étudié le développement du béton et de chape à base de diatomite sous forme de gravier et de poudre pour améliorer l'isolation thermique des bâtiments neufs et anciens. Les résultats montrent que la diatomite a une grande capacité pour réduire les fluctuations de température, et le flux de chaleur total. L'effet optimal du béton et de la chape a été obtenu lors de l'utilisation de la diatomite sous forme de gravier. Les résultats numériques et expérimentaux obtenus en laboratoire ont montré un bon accord, prouvant que le modèle mathématique est suffisamment robuste. Les résultats des simulations numériques qui consacrés pour analyser l'effet de remplacer le mortier par la chape/diatomite et le mur de brique par le mur de la chape/diatomite montrent que cet effet est très important sur les fluctuations de la température et de l'humidité relative.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le choix des matériaux de construction de l'enveloppe représente un enjeu considérable pour la réduction des consommations énergétiques dans le secteur de bâtiment. Généralement, les matériaux utilisés dans le domaine de la construction sont des milieux poreux, Ces sollicitations hydriques peuvent provoquer une diminution des performances thermiques de l'enveloppe et modifier considérablement ses propriétés thermo-physiques. De plus, elles sont souvent combinées aux sollicitations thermiques, qui contribuent à provoquer d'autres problèmes tels que le risque de condensation dû à la baisse de la température, et conditionnent par conséquent ses propriétés d'utilisation et sa durabilité.

Lors de notre étude consacrée à l'isolation thermique des bâtiments, plusieurs configurations utilisant de la diatomite dans la pâte de béton et de la chape ont été entreprises. Différentes expériences avec différentes formes et quantités ont été réalisées, ceci afin de constater les effets sur la consommation énergétique en minimisant les fluctuations de la température et de l'humidité dans l'environnement intérieur des bâtiments.

Cette étude contribue à l'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux qui font l'objet de plusieurs études. Ce type de transferts intéresse de nombreux phénomènes et procédés industriels à l'exemple des centrales thermiques, isolation des bâtiments, centrales nucléaires, etc. Ce modèle a été développé avec le logiciel COMSOL.

Le code de calcul COMSOL, basé sur la méthode des éléments finis, a permis de résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles régissant ce transfert couplé de chaleur et d'humidité, en régime transitoire.

Pour confirmer la validité de ce dernier, une étude numérique a été réalisée. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les résultats analytiques et numériques.

Plusieurs configurations ont été traitées et analysées :

- Cas 1 : le choix des configurations du béton (béton ordinaire, un béton préparé avec la diatomite sous forme de poudre, un béton contenant une quantité de la diatomite sous forme de gravier) pour les valider numériquement.
- Cas 2 : une comparaison entre la chape ordinaire et une chape préparée avec la diatomite sous forme de gravier.

- Cas 3 : étude réelle pour montrer l'effet de remplacement du mortier par la chape de diatomite 450 g sur l'environnement intérieur.
- Cas 4 : étude réelle pour tester la possibilité de remplacer le mur de brique par un mur de la chape de diatomite 450g sur l'environnement intérieur.

Par conséquent, les résultats obtenus de cette étude nous ont montré que :

- La diatomite sous forme de gravier a un grand effet sur l'isolation par rapport à la diatomite sous forme de poudre.
- L'utilisation d'une quantité importante de cette matière a un effet positif sur le processus d'isolation.
- La présence de la diatomite parmi les composants de la préparation de la chape a permis d'obtenir des résultats impressionnants.

Enfin, l'étude présentée dans ce travail ouvre des perspectives de développement en s'intéressant à :

- L'expérience c'est la seule solution pour confirmer les résultats numériques.
- Proposition des nouvelles configurations avec de différentes quantités de la diatomite.
- Une analyse complète des matériaux de construction, les aspects de génie civil doivent nécessairement compléter les études thermiques.

Références

- [1] Bilan énergétique national, 2018, <http://www.energy.gov.dz>
- [2] 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
- [3] H. Hens, Final report, volume 1: Task 1: Modelling, IEA Annex 24 Hamtie, 1996.
- [4] [http://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier consommateur denergie-en-algerie 05/03/2020](http://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-denergie-en-algerie-05/03/2020).
- [5]: <http://capouest.info/2019/12/17/accelerer-laffichage-des-listes-des-beneficiaires/05/03/2020>.
- [6] 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 3^{ème} Cycle En : Génie mécanique Energétique et thermique appliquée.
- [7] <https://www.humidite-expert.be/problemes-d-humidite> 05/03/2020
- [8] J. Berger, Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle. Thèse de doctorat génie civil et sciences de l'habitat, Université de Grenoble, 2014.
- [9] I.Berger,S.Tasca-Guernouti,M.Woloszyn,B.Catherine,L'humidité dans les bâtiments : Pathologies et paramètres gouvernants. 55-64,2012.
- [10] Mohammed Yacine Ferroukhi. Modélisation des transferts thermo-hydroaérouliques dans les enveloppes de bâtiments : ´évaluation des désordres causes par l'humidité. Génie civil. Université de La Rochelle, 2015. Français.
- [11] 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
- [12] LO. Nilsson, Moisture mechanics in building materials and building components, PhD course, Lund Institute of Technology, Sweden, 2003.
- [13] CR. Pedersen, Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions, Ph.D. Thesis (Report no.214), Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1990

- [14] H. Janssen, B. Blocken, J. Carmeliet, Conservative modeling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *Heat and Mass Transfer*, 2007a, 50, 1128–1140
- [15] 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.
- [16] H. Janssen, The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, *Genie en Genie 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.
- [17] 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
- [18] <https://www.aps.dz/economie/112394-plf-2021-nouveau-programme-de-logements-avec-45-000-logements-et-130-000-aides> 05/11/ 2020
- [19] L. PLISKIN, Le béton. Author : PLISKIN, Lucien. Publisher : Centre de recherche sur la culture technique, Neuilly-sur-Seine (FRA), 1992.
- [20] https://www.univ-bouira.dz/ar/wp-content/uploads/2018/12/Chapitre-1-le-b%C3%A9ton-et-ses-composants-_1_.pdf. 2018/12
- [21] <https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/quest-ce-quune-chape/> © Béton Direct 2017-2022
- [22] A.CHIKHI, Etude du Comportement Thermo-Hydrique des Parois des Bâtiments. Influence des Effets de l'Etat Hygrothermique et des Propriétés Thermo-Physiques, thèse de doctorat en génie climatique, 2016.
- [23] E.SASSINE, Analyse typologique et thermique des maisons anciennes de LILLE. Etude expérimentale et numérique des parois verticale. thèse de doctorat Université Dartois.
- [24] L.M.Thieblesson, Élaboration et caractérisation de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcées. thèse de doctorat en génie civil, 2018.
- [25] J. Zheng, J. Shi, Q. Ma, X. Dai, Z. Chen, Experimental study on humidity control performance of diatomite-based building materials, *Applied Thermal Engineering* 114 (2017) 450–456
- [26] B. Hamdi and S. Hamdi, Thermal Properties of Algerian Diatomite, Study of the Possibility to Its Use in the Thermal Insulation, *International Congress on Energy*

- Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2013), Proceedings, Antalya, Turkey, 9-12 October 2013.
- [27] S. Benayache, S. Alleg, A. Mebrek, J. J. Suñol, Thermal and microstructural properties of paraffin/diatomite composite, *Vacuum* 157 (2018) 136–144
- [28] 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
- [29] Vasconcelos et al ; Permeability of diatomite layers processed by different colloidal techniques ; *J. of the Eur. Ceram. Soc.* 20, pp201-207, (2000)
- [30] <https://www.clim34.fr/blog/decouvrir-la-technique/les-differents-types-de-regulateurs-de-temperature-et-leur-fonctionnement.html> 3 juil. 2019
- [31] 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).
- [32] 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.
- [33] <http://blogs.paysmellois.org/terrecrue/public/materiaux.pdf> 23/04/2020.
- [34] <http://thesis.univ-biskra.dz/2294/4/Chapitre/2002.pdf> 28/04/2020.
- [35] http://univ.encyeducation.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06_lessons_gcmethodes_elements_finis.pdf 29/04/2020.
- [36] HACHEMI Houssem ,BOUCHETA Ilyes Contribution à l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments par l'utilisation de la diatomite et paraffine. UNIVERSITÉ DE TLEMCEM FACULTÉ DE TECHNOLOGIE DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE Mémoire présenté Pour l'obtention du diplôme de MASTER En Mécanique Option : ENERGETIQUE .
- [37] 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.

- [38] Y. Fraine, C. Seladji, A. Aït-Mokhtar, Effect of microencapsulation phase change material and diatomite composite filling on hygrothermal performance of sintered hollow bricks, *Building and Environment* 154 (2019) 145–154 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.036>.
- [39] Data sheet of the Algerian diatomite (the city of sig) October 2008.
- [40] B. Belhadj , M. Bederina, Z. Makhloufia, A. Goullieux , M. Quéneudec, Study of the thermal performances of an exterior wall of barley straw sand concrete in an arid environment, *Energy and Buildings* 87 (2015) 166–175 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.034>.
- [41] <https://www.hobeninternational.com/perlite/insulation/floor>. 17/02/2022
- [42] A. Bouchair, Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation, *Building and Environment*. 43 (2008) 1603–1618.
- [40] <https://www.actifc.com/isolation-thermique-batiment>
- [41] <https://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle/60531/aout/2021/tlemcen-zenata.html>