



UNIVERSITE IBN ZOHR
ECOLE NATIONALE DES SCIENCES
APPLIQUEES – AGADIR

N°Ordre: **DR02/2008**

THESE

Présentée à l'ENSA d'Agadir pour obtenir Le grade de :

Docteur

UFR : Energie et environnement

Spécialité : Energétique et Matériaux

**CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DES MATERIAUX
ET MODELISATION DES TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR
A TRAVERS UN BATIMENT**

Par :

Lahcen BOUKHATTEM

Soutenue le 28/07/08 devant la commission d'examen:

A. Mir	PES	ENSA AGADIR	Président
M. ASBIK	PES	FST ERRACHIDIA	Rapporteur
J. CHAOUFI	PES	FS AGADIR	Rapporteur
T.MEDIOUNI	PES	ENSA AGADIR	Examineur
H.HAMDI	PES	FS MARRAKECH	Examineur
A. BENDOU	PES	ENCG AGADIR	Directeur de thèse

REMERCIEMENT

C'est un plaisir de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette thèse. En premier lieu, je voudrais exprimer mes remerciements les plus sincères à mon Directeur de thèse, Monsieur Abdelaziz BENDOU Professeur de l'enseignement supérieur et Directeur de l'école nationale de commerce et de gestion d'Agadir, avec qui j'ai eu le plaisir de travailler pendant mon DESA et mon doctorat. Sa confiance et ses suggestions pertinentes m'ont énormément aidé à la réalisation de ce travail.

Je voudrais aussi remercier Monsieur A. MIR Professeur de l'enseignement supérieur, Directeur de l'École Nationale des Sciences Appliquées et responsable de l'UFR Energie et Environnement. Je lui présente mes vifs remerciements pour l'intérêt qu'il avait bien voulu porter à ce travail. Je le remercie également pour ses conseils, sa disponibilité, ses observations et enfin pour son grand savoir scientifique qui a été précieux pour ma formation.

Je remercie également Monsieur R. MIR, professeur habilité à l'école nationale des sciences appliquées. Je le remercie profondément pour l'aide qu'il m'a offerte pour réaliser ce travail.

Il m'est agréable de remercier Monsieur H. ELIHSSINI, professeur habilité à l'école supérieure de technologie d'Agadir, pour l'intérêt qu'il a apporté à ce travail et son aide.

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements à Monsieur Jamal CHAOUFI, professeur de la Faculté des Sciences d'Agadir, qui m'a fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail.

Je remercie également le Professeur Mohamed ASBIK, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia, qui a bien voulu juger ce travail. Veuillez accepter ma reconnaissance pour l'intérêt que vous avez porté à cette thèse.

Je suis extrêmement sensible à l'honneur que m'a fait Madame Touria MEDIOUNI, Professeur à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir, en acceptant d'être parmi les membres du jury de la soutenance.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma haute considération à Monsieur Hassan HAMDI, Professeur à la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech, qui a bien accepté d'être membre du jury de la soutenance malgré ses nombreuses préoccupations.

Je remercie aussi tous les collègues, de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir, et toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ce travail.

En définitive, une pensée particulière va à ma chère mère et mon cher père et ma chère femme qui m'ont soutenu avec patience durant l'élaboration de ce travail. Merci.

Finalement, j'aimerais dédier ce travail à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont donné le support moral et affectif si importants pour la réalisation de cette thèse.

AVANT PROPOS

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire d'Ingénierie des Précédés de l'Energie et de l'Environnement de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir sous la direction de Monsieur A. Bendou, Professeur de l'Enseignement supérieur et Directeur de l'Ecole Nationale de Commerce et de Gestion d'Agadir.

L'étude faite a donné lieu aux publications et communications suivantes:

PUBLICATIONS

CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DU MORTIER A BASE DU CIMENT ET DE SABLE

L.Boukhattem, R.Mir, M.Kourchi, A. Bendou.

Revue Internationale d'Héliotechnique Energie et Environnement - N° 36 (2007) 03-12.

SIMULATION ET OPTIMISATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR ENTRE UN BATIMENT COMPLETEMENT ENTERRE ET LE SOL

L.Boukhattem, A. Bendou, R.Mir, M.Kourchi.

Revue Internationale d'Héliotechnique Energie et Environnement - N° 36 (2007) 30-42.

THERMOPHYSICAL CHARACTERIZATION, ACCORDING TO THE WATER CONTENT, OF SOIL TAKEN FROM DIFFERENT SITES OF THE AREA OF AGADIR

L.Boukhattem, A. Bendou, R.Mir, M.Kourchi.

Energy and building (Submitted).

SIMULATION NUMERIQUE DES TRANSFERTS DE CHALEUR COUPLES PAR CONDUCTION CONVECTION ET RAYONNEMENT A TRAVERS UN BATIMENT

L.Boukhattem, A. Bendou, R.Mir, M.Kourchi.

Compte rendu de physique (Soumis).

COMMUNICATIONS

CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

L.Boukhattem, R.Mir, A. Bendou.

7^{ème} Congrès de Mécanique Avril (2005) Vol. II, Casablanca, Maroc, 320-322.

SUPERVISION DE LA CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE D'UN MATERIAU

L.Boukhattem, R.Mir, A. Bendou.

Premières Journées de Télécommunications d'Electronique et Electrotechnique, Mai (2006), Oujda, Maroc, 110-112.

MODELLING OF HEAT CONVERTERS IN THE BURIED BUILDING FILLED ON ITS INNER WALLS BY A LAYER OF MORTAR

L.Boukhattem, R.Mir, M.Kourchi, A.Bendou.

The International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics December 17-19, 2006 (Tunisia). Abstract Proceedings, P-36.

 SIMULATION BIDIMENSIONNELLE DU TRANSFERT D'ENERGIE ENTRE UN BATIMENT SEMI-ENTERRE ET LE SOL EN REGIME VARIABLE

L.Boukhattem, R.Mir, M.Kourchi, A. Bendou.

8^{ème} congrès de mécanique 17-20 Avril (2007) Volume II, 258-260.

 ETUDE DES TRANSFERTS DE CHALEUR COUPLES ET AU SEIN D'UN BATIMENT EN CONFIGURATION BIDIMENSIONNELLE

L.Boukhattem, A. Bendou, R.Mir, M.Kourchi.

Congrès International Complex'2K7, Energie et Environnement, Agadir 19-20 Octobre (2007), 267-272.

 CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE, EN FONCTION DE LA TENEUR VOLUMIQUE EN EAU, DU SABLE

L.Boukhattem, A. Bendou, R.Mir, M.Kourchi.

JNPT08, faculté des sciences et techniques de Settat, 23 Avril 2008, 47-51.

 THERMOPHYSICAL CHARACTERIZATION, ACCORDING TO THE WATER CONTENT, OF SILTY SOILS OF AGADIR AREA

L.Boukhattem, A. Bendou, R.Mir, M.Kourchi.

ICAMEM, Tunisia 2008 (accepted).

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	vi
NOMENCLATURE	xi
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 INTRODUCTION.....	5
I.2 BATIMENT: ETAT DE L'ART ET DEVELOPPEMENT	6
I.2.1 Historique.....	6
I.2.2 Contraintes liées au changement de mode de construction	7
I.2.2.1 Contraintes mécaniques	7
I.2.2.2 Contraintes liées au confort	7
I.2.2.3 Contraintes acoustiques	7
I.2.2.4 Contraintes liées au coût	8
I.2.2.5 Cadre juridique	8
I.2.3 Caractéristiques intrinsèques des matériaux de construction.....	8
I.2.4 Réponse des bâtiments aux différentes excitations et contraintes	9
I.2.5 Caractérisation thermophysique	9
I.2.6 Réponse d'un bâtiment aux différentes excitations thermiques	10

I.3 COMPORTEMENT THERMIQUE DES BATIMENTS EN CONTACT AVEC LE SOL.....	10
I.3.1 Plancher sur terre - plein	10
I.3.2 Bâtiment semi - enterré	14
I.3.3 Bâtiment complètement enterré	15
I.4 TRANSFERTS DE CHALEUR COUPLES À TRAVERS UN BATIMENT	17
I.5 METHODES DE MESURE DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES	21
I.5.1 Méthode du fil chaud	24
I.5.2 Méthode du plan chaud	25
I.5.3 Méthode flash.....	26
I.5.4 Méthode du Hot Disk.....	27
I.5.5 Méthode de la plaque chaude gardée	28
I.5.6 Méthode fréquentielle	30
I.5.7 Méthode Angström	31
I.5.8 Méthode des boîtes	32
I.6 CONCLUSION	34

Chapitre II

Caractérisation thermophysique du mortier et des sols limoneux de la région d'Agadir

II.1 INTRODUCTION.....	35
II.2 DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE UTILISE ET PRINCIPE DE MESURE	36
II.2.1 Description de l'appareillage utilisé.....	36
II.2.1.1 Capacité isotherme A.....	38
II.2.1.2 Deux boîtes B1 et B2.....	38
II.2.1.3 Echantillon E	38
II.2.1.4 Capteurs de température PT100	39
II.2.1.5 Acquisition des données	39
II.2.2 Principe de mesure.....	40

II.2.2.1 Mesure de la conductivité thermique (λ)	40
II.2.2.2 Mesure de la diffusivité thermique (α)	42
II.2.2.3 Calcul de la chaleur massique (C_p)	45
II.2.2.4 Calcul de l'effusivité thermique (E_f)	45
II.3 RESULTATS ET INTERPRETATION.....	46
II.3.1 Etalonnage et fiabilité des mesures	46
II.3.2 Mortier	46
II.3.2.1 Effet de la granulométrie	47
II.3.2.2 Effet du dosage	50
II.3.3 Sol limoneux.....	53
II.3.3.1 Classification géotechnique des sols étudiés	55
II.3.3.2 Masse volumique	58
II.3.3.3 Conductivité thermique	59
II.3.3.4 Diffusivité thermique.....	60
II.3.3.5 Chaleur massique.....	62
II.3.3.6 Effusivité thermique	64
II.4 CONCLUSION.....	66

Chapitre III

Simulation et optimisation des transferts de chaleur entre le sol et les deux types de bâtiments: complètement enterré et semi-enterré

III.1 INTRODUCTION ET POSITION DU PROBLEME.....	67
III.2 METHODE DE RESOLUTION.....	68
III.2.1 Discrétisation des équations de conduction	69
III.2.1.1 Température implicite en x:.....	69
III.2.1.2 Température implicite en y:.....	69
III.3 CONFIGURATION DES DEUX TYPES DE BATIMENTS: COMPLETEMENT ENTERRE ET SEMI – ENTERRE	70

III.3.1 Configuration du bâtiment complètement enterré.....	70
III.3.2 Configuration du bâtiment semi - enterré	72
III.4 FORMULATION MATHEMATIQUE ET CONDITIONS AUX LIMITES	74
III.4.1 Bâtiment complètement enterré	74
III.4.2 Bâtiment semi - enterré	75
III.4.3 Flux total échangé entre les deux bâtiments et le sol	76
III.5 RESULTATS ET INTERPRETATION	79
III.5.1 Validation du modèle	79
III.5.2 Bâtiment complètement enterré	82
III.5.2.1 Effet de la granulométrie du sable.....	82
III.5.2.2 Effet du dosage du ciment.....	82
III.5.2.3 Effet de l'épaisseur et de la couche d'enduit.....	82
III.5.3 Bâtiment semi - enterré	88
III.5.3.1 Effet de la granulométrie du sable.....	88
III.5.3.2 Effet du dosage du ciment.....	88
III.6 CONCLUSION	91

Chapitre IV

Modélisation numérique des transferts de chaleur couplés à travers un bâtiment sur terre pleine

IV.1 INTRODUCTION.....	92
IV.2 CONFIGURATION DU BATIMENT ETUDIE	93
IV.3 MODELE MATHEMATIQUE	94
IV.3.1 Equation de continuité	94
IV.3.2 Equations du mouvement.....	94
IV.3.3 Equation de l'énergie	95
IV.3.4 Equation de conduction de chaleur	95
IV.3.5 Hypothèses simplificatrices	96
IV.4 FORMULATION ADIMENSIONNELLE DES EQUATIONS ET CONDITIONS AUX LIMITES	97

IV.4.1 Conditions aux limites	98
IV.4.2 Nombre de Nusselt.....	99
IV.4.3 Flux de chaleur moyen	100
IV.5 METHODE DE RESOLUTION	101
IV.5.1 Méthode de volume de contrôle	101
IV.5.1.1 Principe de la méthode	101
IV.5.1.2 Discrétisation des équations en volumes finis	102
IV.5.1.3 Algorithme SIMPLER	105
IV.5.1.4 Equation de correction de pression	106
IV.5.2 Méthode de sous relaxation.....	108
IV.5.3 Critère de convergence.....	109
IV.5.4 Caractérisation du régime permanent	109
IV.5.5 Algorithme de calcul	110
IV.6 VALIDATION DU MODELE.....	110
IV.7 RESULTATS ET DISCUSSION	112
IV.7.1 Lignes de courant et isothermes.....	112
IV.7.2 Transfert d'énergie	113
IV.7.3 Effet du rayonnement.....	118
IV.7.4 Effet du rapport de températures γ	120
IV.8 CONCLUSION.....	123
CONCLUSION GENERALE	124
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	128

NOMENCLATURE

a	demi-largeur du plancher	m
b	profondeur du plafond.....	m
c	profondeur du plancher	m
d	profondeur de la nappe phréatique	m
dF	facteur de forme entre les éléments de surface	
d_s	diamètre du sable	m
dS	élément d'une surface	m
e	épaisseur de l'échantillon	m
E	éclairement d'une surface	$W.m^{-2}$
E_f	effusivité thermique	$J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$
e_m	épaisseur de la couche du mortier	m
e_M	épaisseur du mur	m
e_p	épaisseur du plancher	m
J	radiosité	$W.m^{-2}$
J'	radiosité adimensionnelle.....	
h	coefficient d'échange convectif	$W.m^{-2}.K^{-1}$
H_M	hauteur du mur	m
L	demi-largeur du sol perturbé	m
Nk	rapport des conductivités thermiques.....	

Nr	nombre adimensionnel du rayonnement	
$\overline{Nu}$	nombre de Nusselt moyen sur la paroi chaude du bâtiment	
NX	nombre total de nœuds selon la direction horizontale.....	
NY	nombre total de nœuds selon la direction verticale.....	
p	pression	Pa
P	pression adimensionnelle	
Pr	nombre de Prandtl	
q	puissance émise par la résistance chauffante	W
$\overline{Q}$	flux de chaleur moyen adimensionnel	
qr_k	densité surfacique du flux radiatif net échangé par la paroi k du bâtiment.....	$W.m^{-2}$
Q_{rk}	flux de chaleur radiatif adimensionnel	
r	position sur la paroi du bâtiment.....	m
r'	position adimensionnelle associée à r	
R	résistance chauffante	Ω
Ra	nombre de Rayleigh	
S	aire de la surface de l'échantillon perpendiculaire au flux de chaleur.....	m^2
T	température.....	$^{\circ}C$
u, v	composantes de la vitesse selon les directions x et y	$m.s^{-1}$
U, V	composantes adimensionnelles de la vitesse.....	
V	tension aux bornes de la résistance chauffante	Volt
x, y	coordonnées cartésiennes.....	m
X, Y	coordonnées cartésiennes adimensionnelles	

SYMBOLES GRECS

α	diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
β	coefficient volumétrique d'expansion thermique	K^{-1}
χ	coefficient de déperdition thermique	$W.^{\circ}C^{-1}$
ε	émissivité des surfaces intérieures du bâtiment	
φ	densité de flux de chaleur par unité de longueur	$W.m^{-1}$

γ	rapport des températures	
η	coordonnée adimensionnelle à l'interface fluide – solide	
λ	conductivité thermique.....	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
μ	viscosité dynamique du fluide	$\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
ν	viscosité cinématique	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
θ	température adimensionnelle	
ρ	masse volumique.....	Kg.m^{-3}
σ	constante de Stefan-Boltzman.....	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
τ	temps adimensionnel.....	
ψ	fonction de courant adimensionnelle	
Δt	pas de temps	s

INDICES

a	.....	air
amb	.....	ambiante
B	.....	boite
C	.....	face chaude
con	.....	convection
exp	.....	expérimental
F	.....	face froide
i	.....	intérieur
m	.....	mortier
M	.....	mur
litt	.....	littérature
p	.....	plancher
r	.....	radiatif
s	.....	sol
t	.....	toit
Tot	.....	total
w	.....	nappe phréatique

INTRODUCTION GENERALE

Le souci d'économie d'énergie et le besoin du confort thermique approprié constituent les principales raisons justifiant l'intérêt porté à l'étude du bâtiment. En effet, des études menées en relation avec ce genre de souci font qu'un nombre croissant de chercheurs se penchent sur le problème de l'utilisation rationnelle de l'énergie ainsi que sur celui du confort thermique. Ces problèmes sont très vastes et complexes car ils dépendent de beaucoup de paramètres tels que:

- ✓ La nature des matériaux utilisés;
- ✓ L'interaction bâtiment - sol;
- ✓ Le couplage des différents modes de transferts d'énergie.

Quant à la nature des matériaux, la détermination des propriétés thermophysiques usuelles telle que la conductivité et la diffusivité thermique contribue à une meilleure connaissance du comportement thermique des matériaux utilisés dans un grand nombre de domaines à savoir, domaine de génie civil, construction et isolation, industrie, agriculture, et aussi dans le domaine de poterie, pharmaceutique etc. Ces matériaux sont, le béton, le mortier, les différents matériaux d'isolation thermique et le sol.

Le sol, qui est répandu partout dans le monde et utilisé quotidiennement par l'homme, est un matériau qui est lié fortement à l'eau. Cependant, la plupart des études

disponibles dans la littérature assimilent ce dernier à un milieu homogène. Cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée à cause de la variation du taux d'humidité dans ce matériau en fonction de sa profondeur. En conséquence, la détermination des caractéristiques des matériaux dépend fortement de sa teneur en eau et rend difficile l'estimation de ces caractéristiques par des modèles simples. Ainsi le moyen efficace permettant de caractériser ces matériaux se fait par le biais de l'expérience. D'autre part, la simulation numérique des transferts d'énergie couplés entre un bâtiment et le sol se base sur l'estimation des différentes propriétés thermophysiques des parois ou du sol qui entoure le bâtiment par des grandeurs constantes. Ces études considèrent aussi que la température intérieure du local est constante en négligeant l'effet du rayonnement entre les parois intérieures du local ainsi que la convection naturelle.

Pour faire une étude fine du comportement thermique d'un bâtiment, le couplage par trois modes du transfert de chaleur à savoir : transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement est nécessaire. Par ailleurs, des travaux qui tiennent compte de ce couplage intime d'énergie dans un habitat sont rares. La plupart, des travaux ayant traité ce genre de problèmes se limitent à l'étude des effets de la conduction ou du rayonnement sur la convection naturelle dans une cavité carrée ou rectangulaire différentiellement chauffée.

Dans ce contexte, il est intéressant d'étudier le comportement d'un bâtiment soumis à des excitations thermiques en présence de couplages sol - bâtiment et différentes modes de transferts en se basant sur des caractéristiques réelles déterminées expérimentalement.

Cette thèse se compose de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, de ce travail, nous présentons une étude bibliographique du comportement thermique des différents habitats, rencontrés en pratique, en contact avec le sol. Ces configurations sont: plancher sur terre-plein, bâtiment semi - enterré et complètement enterré. En suite, nous exposons une investigation faite, par les différents auteurs, sur les transferts de chaleur couplés par convection, conduction

et/ou rayonnement. En fin, nous présentons une revue bibliographique sur les différentes méthodes employées dans la littérature pour la détermination des propriétés thermophysiques des matériaux. Le principe de mesure de ces méthodes est également détaillé.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux. Ces résultats sont exposés en deux parties:

- La première partie, de ce chapitre, concerne la caractérisation thermophysique d'un matériau qui est à la base de la majorité des travaux de maçonnerie. Il s'agit du mortier qui est un mélange de sable, d'eau et de liant (ciment). L'effet de la granulométrie du sable ainsi que le dosage du ciment dans le mélange font l'objet de cette étude.

- La deuxième partie, du même chapitre, fait l'objet d'une étude de la détermination des propriétés thermophysiques, en fonction de la teneur volumique en eau, du sol prélevé des différents sites de la région d'Agadir au Maroc. Ces matériaux sont: limon silteux, limon beige, limon calcaire et le sable. Ces sols limoneux ont été identifiés selon la classification LCP (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

Le troisième chapitre, est consacré à une étude des transferts de chaleur couplés entre le sol et les deux types de bâtiments: complètement enterré et semi enterré. Les surfaces intérieures des parois des cellules bidimensionnelles étudiées sont colmatées à chaque fois par une couche du mortier qui est à base du ciment et de sable avec différentes granulométries du sable et pour différents dosages du ciment. La méthode implicite aux directions alternées (ADI) est choisie pour résoudre les équations régissant la conduction d'énergie dans le sol et les parois solides du bâtiment.

Dans le quatrième chapitre de cette thèse, nous présentons une étude numérique des transferts thermiques couplés par conduction, convection naturelle et rayonnement à travers un bâtiment sur terre – plein. Les transferts de chaleur sont supposés bidimensionnels et l'écoulement d'air dans l'habitat est laminaire. Les équations qui régissent chaque mode de transfert de chaleur sont discrétisées par la méthode des

volumes de contrôle et sont résolues simultanément en utilisant l'algorithme SIMPLEC. Les résultats sont présentés en terme de lignes de courant, isothermes, flux de chaleur vertical, flux de chaleur horizontal et flux radiatifs le long de la surface chaude et froide du bâtiment. Les distributions de ces flux sont présentées pour différent nombre de Rayleigh. Les effets du nombre de rayonnement et le rapport de températures sur le nombre du Nusselt et le flux de chaleur global traversant le bâtiment sont également discutés dans ce quatrième chapitre.

À la fin de ce manuscrit, une conclusion générale contient un bilan des résultats obtenus. Enfin, les perspectives de ce travail sont présentées.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 INTRODUCTION

Ce premier chapitre présente une étude préliminaire sur l'état de l'art et développement du bâtiment et une étude bibliographique des différentes recherches, présentées dans la littérature, de l'évaluation des bilans thermiques des bâtiments en contact avec le sol, des transferts de chaleur couplés par convection, conduction et/ou rayonnement ainsi que de la caractérisation thermophysique des matériaux. Ces différentes investigations bibliographiques sont présentées en trois principaux paragraphes:

Le deuxième paragraphe présente de nombreuses études menées par des chercheurs portant sur le comportement thermique des différents habitats, rencontrés en pratique, en contact avec le sol. Ces configurations sont: planchers sur terre - plein, bâtiment semi - enterré et complètement enterré.

Les différentes études faites sur le transfert de chaleur couplé par convection, conduction, et/ou rayonnement sont discutées dans le troisième paragraphe de ce chapitre.

Dans le dernier paragraphe du présent chapitre, nous présentons une revue bibliographique sur les différentes méthodes employées dans la littérature pour la détermination des propriétés thermophysiques des matériaux. Le principe de mesure de ces méthodes est également détaillé.

I.2 BATIMENT: ETAT DE L'ART ET DEVELOPPEMENT

I.2.1 Historique

Les premières maisons dures de l'humanité ont été des cavernes naturelles creusées par l'eau et le vent dans des falaises de roche, de composite sableux ou la terre - argile. Lorsqu'une caverne n'était pas assez profonde, nos ancêtres, procédant par imitation, ont tenté de construire des avancées de caverne en utilisant le matériau disponible sur place, par exemple la terre - argile. La technique la plus simple consiste à réaliser des boules de terre - argile humidifiée que l'on empile en les tassant. Souvent la forme naturelle d'une grotte est celle de la voûte nubienne et les hommes se sont mis à imiter cette forme. En parallèle se sont développées les huttes à base de branchages et, là aussi, on en vient aussi facilement à la forme nubienne. Ces matériaux, qui ont été utilisés dans la construction depuis des millénaires, ont, peu à peu, été remplacés par des matériaux de construction plus ou moins résistants. En effet, les Grecs, aux alentours du IV^{ème} siècle avant J.C, avaient découvert que certaines terres d'origine volcanique, mélangées à la chaux éteinte, formaient des mortiers qui pouvaient durcir même dans des conditions de forte humidité et aller jusqu'à résister à l'eau. En suite, les gens ont pu découvrir des matériaux modernes et résistants, construisant ainsi des bâtiments répandus sur une superficie assez large.

Pour aménager l'espace d'un bâtiment, l'homme a muté l'habitat social, qui avait été caractérisé par de grands ensembles construits dans un contexte de forte pénurie de logements, vers des petits habitats en plusieurs étages collectifs pour un meilleur confort et qualité de vie et d'organiser le cadre de vie des villes et du milieu rural.

Aujourd'hui, les gens pensent à une construction durable qui consiste à limiter l'impact des bâtiments sur l'environnement et les hommes tout en leur garantissant une qualité supérieure en matière d'esthétique, de durabilité et de résistance en intégrant des sources d'énergies renouvelables lors de la conception du bâtiment. Cette conception prend en compte tout le cycle de vie des ouvrages, du choix des produits initiaux jusqu'à leur démolition et leur recyclage dans l'objectif de préserver les ressources naturelles. Améliorer l'inertie thermique des bâtiments pour réduire les factures de chauffage et de climatisation ainsi que les émissions de CO₂, contrôler le vieillissement des ouvrages, et pour les populations les plus démunies, concevoir des logements à faible coût pour améliorer les conditions de vie.

I.2.2 Contraintes liées au changement de mode de construction

I.2.2.1 Contraintes mécaniques

Parmi les principaux facteurs qui poussait l'homme au cours de l'histoire à changer la façon de construction d'un habitat et à la substitution des anciens matériaux (argile) par d'autres plus résistants (béton armé), c'est le problème d'effondrement des bâtiments qui se produit chaque jour à cause de la résistance qu'ils n'avaient pas pour supporter une telles charges qui leur ont été imposées.

I.2.2.2 Contraintes liées au confort

Le confort n'entraîne pas de gêne, l'inconfort entraîne une gêne sans pour autant présenter un risque pour la santé. Certaines circonstances défavorables peuvent aggraver cette situation: locaux confinés sans ventilation, sans toiture, exposition sans protection aux rayonnement solaire, absence d'éclairage naturel. Ces mauvaises conditions inadéquates dans un bâtiment peuvent entraîner l'insatisfaction et l'inconfort des employés, réduire leur rendement au travail, et accroître l'absentéisme. Ces mauvaises conditions peuvent également affecter la santé des occupants et causer des malaises physiques, comme des maux de tête, des irritations du nez, de la gorge, des yeux et de la peau, des nausées et de la somnolence. Les effets biologiques de la lumière naturelle sur l'homme sont très importants. Aujourd'hui, nous savons que la variation quotidienne de la lumière naturelle joue un rôle de synchronisation de nos rythmes « internes » aux cycles diurnes et saisonniers. La lumière excite la sécrétion de certaines hormones, par une voie distincte du chemin visuel.

I.2.2.3 Contraintes acoustiques

Jusqu'à nos jours, le bruit présente une forte nuisance aux habitants soit dans le milieu rural ou bien le milieu urbain. Dans le milieu rural, ce problème provient des différentes sources à savoir la nuisance due au changement du climat qui produit ainsi une vitesse élevée du vent, l'orage, la pluie et aussi la nuisance due à l'hurllement des animaux. En plus de ces sources, les habitants du milieu urbain souffrent des différentes sortes de bruit provenant de la circulation automobile, appareils de chauffage, de ventilation et de climatisation.

I.2.2.4 Contraintes liées au coût

Le choix des matériaux et composants du bâtiment ainsi que leur utilisation ne peuvent pas se baser sur les seules considérations pratiques et économiques mais doit aujourd'hui aussi intégrer les considérations énergétiques et la rareté des matières premières. En effet, la préparation de quelques matériaux de construction à partir de la matière première qui est devenue rare nécessite beaucoup d'énergie, pris en compte le transport et vu que les principales sources d'énergies, non – renouvelables, sont dérivées des hydrocarbures tels que le pétrole, le gaz naturel et les huiles (leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine), et la consommation intensive, d'où les risques d'épuisement actuels. En ce qui concerne l'énergie nucléaire, les gisements d'uranium sont limités. Ces différentes raisons ont provoqué la croissance du coût d'énergie et celui des matériaux de construction.

1.2.2.5 Cadre juridique

Construire est un acte risqué : un défaut de conception ou de construction peut avoir des conséquences graves sur la solidité d'un ouvrage, sur la sécurité de ses futurs occupants ou encore sur sa performance thermique, acoustique ou sur sa résistance aux séismes. A cet effet, aujourd'hui, les organismes d'inspection et de contrôle sont mis en place pour assurer la vérification de la conformité des objets (ouvrages, installation ou appareils) à des données préétablies (règlements, stipulations normatives ou contractuelles) pour s'assurer du respect des exigences requises par les réglementations applicables, les spécifications des codes de construction, des normes, des cahiers des charges et des règles de l'art lors de la conception, fonctionnement ou de la maintenance des objets soumis à l'inspection.

I.2.3 Caractéristiques intrinsèques des matériaux de construction

Les différentes contraintes, qui sont dues aux changements de mode de construction des bâtiments, ont mené les chercheurs à se focaliser sur la connaissance des différentes propriétés intrinsèques d'un matériau. Parmi ces caractéristiques intrinsèques, on trouve:

- ✚ Les caractéristiques mécaniques représentatives telles que la résistance mécanique en compression et en traction et les déformations élastique, plastique et visqueuse.
- ✚ Les caractéristiques acoustiques à savoir: la perméabilité, la porosité et le coefficient d'absorption.

- ✚ les caractéristiques thermophysiques qui sont: la conductivité thermique la diffusivité thermique la chaleur massique ainsi que l'effusivité thermique.

1.2.4 Réponse des bâtiments aux différentes excitations et contraintes

En parallèle aux différentes contraintes dues aux changements de mode de construction des bâtiments, les différents chercheurs se sont intéressés à l'amélioration des performances d'un habitat par une étude fine du comportement de ce dernier qui est soumis aux différentes excitations à savoir: mécaniques, acoustiques et thermiques. Cette étude est faite expérimentalement ou numériquement.

- ✚ Dans le cas du comportement mécanique d'un bâtiment, les études s'intéressent à la relation entre les contraintes et déformations d'une structure de ce bâtiment afin de dimensionner la structure de ce dernier suivant un critère de résistance ou de déplacement admissible.

- ✚ L'étude relative à la limitation des effets sonores, intérieurs ou extérieurs, dans les bâtiments a attiré l'attention de différents chercheurs. Cette étude concerne la connaissance de la réponse du bâtiment aux ondes acoustiques ou bien celles de pression.

- ✚ L'étude de la réponse d'un bâtiment aux différentes excitations thermiques intéresse un nombre croissant de chercheurs. Cette étude est très vaste et complexe car elle dépend de:

- La forme et le type des bâtiments;
- Les systèmes de captation et de récupération d'énergie;
- La nature des matériaux utilisés;
- L'interaction bâtiment - sol;
- Le couplage des différents modes de transfert d'énergie.

Dans le présent travail, notre étude est focalisée sur la détermination des caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction et l'étude du comportement d'un bâtiment soumis aux différentes excitations thermiques.

1.2.5 Caractérisation thermophysique

La détermination des propriétés thermophysiques usuelles tel que la conductivité et la diffusivité thermique contribue à une meilleure connaissance du comportement thermique des matériaux utilisés dans un grand nombre de domaines à savoir, domaine de génie civil, construction et isolation, industriel, agriculture, et aussi dans le domaine de poterie,

pharmaceutique etc. Ces matériaux sont, le béton, le mortier, les différents matériaux d'isolation thermique et le sol.

I.2.6 Réponse d'un bâtiment aux différentes excitations thermiques

L'étude du comportement thermique d'un bâtiment, soumis à des excitations thermiques, a attiré l'attention de plusieurs chercheurs durant cette dernière décennie. En effet, la conception des enveloppes des bâtiments qui sont en contact avec le sol ainsi que l'analyse des transferts de chaleur par les différents modes à travers ces derniers s'intègrent dans une démarche de maîtrise de l'énergie et constituent de ce fait un enjeu capital pour l'économie d'énergie. Elles nécessitent la connaissance des réponses d'un bâtiment aux différentes excitations thermiques et doivent permettre d'éviter le recours à des dispositifs de chauffage ou de refroidissement coûteux. Cette conception et analyse permettent alors de limiter l'impact de la production d'énergie sur l'environnement. Dans ce cadre, quelques auteurs ont démontré qu'il est nécessaire de recourir à des solutions dites passives, dont le principe d'action utilise les moyens naturels. Ainsi, la nécessité de connaître profondément les phénomènes physiques auxquels est soumis un bâtiment. L'investigation faite sur les différentes configurations des bâtiments en contact avec le sol est présentée dans le paragraphe suivant.

I.3 COMPORTEMENT THERMIQUE DES BATIMENTS EN CONTACT AVEC LE SOL

L'étude du comportement thermique des bâtiments en contact avec le sol a été traitée dans plusieurs configurations: plancher sur terre-plein, bâtiment semi - enterré et complètement enterré. Ces différentes configurations sont illustrées respectivement sur la figure 1.1, la figure 1.2 et la figure 1.3. Dans ce paragraphe, nous présentons quelques travaux exposés dans la littérature étudiant le transfert d'énergie à travers ces trois configurations. Cette investigation a été faite dans le but d'acquérir une meilleure connaissance du comportement thermique de n'importe quel sorte de bâtiment.

I.3.1 Plancher sur terre - plein

Le problème du couplage thermique entre un plancher sur terre - plein et le sol a été largement discuté par plusieurs auteurs. Dans cette optique, *Sangho Choi et Moncef Krarti* [1] ont étudié le cas d'un plancher sur terre - plein, ils ont calculé l'énergie perdue par ce dernier

et la distribution des isothermes au sein du sol en considérant que le profil de la température de l'air intérieur est non uniforme. Les profils des températures étudiés sont: profil exponentiel, linéaire et échelon. La méthode adoptée est celle nommée ITPE (technique semi – analytique de l'Estimation du Profil de Température Interzone).

Pour tenir compte des variations en fonction du temps des échanges d'énergie entre cette configuration et le sol, *A.Abdelaki* [2] a étudié le comportement thermique d'un plancher sur terre - plein en adoptant trois méthodes: méthode analytique (ITPE), méthode convolutive (fonctions de transfert bidimensionnelles) et méthode implicite des différences finies. Ces trois procédures sont expliquées à l'analyse du comportement thermique de plusieurs configurations, "sol+plancher" dans deux climats typiques (froid et chaud). Il a également testé les effets de la conductivité thermique du plancher et de l'isolation de la surface de ce dernier sur les échanges de chaleur entre le plancher en question et le sol.

La solution, par la technique ITPE, d'un plancher sur terre - plein a une marche a été présentée par *S. Choi et M. Krarti* [3]. Ces derniers ont testé les effets de plusieurs paramètres sur la distribution des isothermes au sein de la structure et sur la perte d'énergie totale du plancher. Ces paramètres concernent la longueur du plancher isolé, profondeur d'isolation verticale le long de la surface de la marche du sol, distance entre le plancher et la même marche et la profondeur de la marche étudiée. Les résultats obtenus montrent que les isothermes et l'énergie totale perdue par la fondation ne sont pas influencées par la présence de cette marche. Ces mêmes résultats ont montré que l'énergie totale perdue par le plancher peut être réduite significativement en plaçant l'isolant directement le long de la surface de ce dernier au lieu de le placer le long du mur de la marche.

En plus de l'étude dynamique, *M. Krarti* [4] a testé également l'effet de la variation des propriétés thermophysiques du sol sur le transfert de chaleur conductif du plancher isolé horizontalement, sur la variation annuelle du champ de température et sur la perte/ gain d'énergie du plancher. Le champ de température et l'énergie perdue par ce dernier sont présentés, en régime variable, pour les deux conditions d'hiver et d'été. Les résultats ont montré que la faible conductivité thermique du sol qui est en contact avec le périmètre du plancher résulte généralement une réduction de l'amplitude annuelle d'énergie perdue par ce dernier.

Le transfert de chaleur entre le sol et un plancher massif qui peut être chauffé ou refroidi a été étudié par *P. Chuangchid et M. Krarti* [5] en deux régimes stationnaire et variable. Les

isothermes au sein du couple plancher - sol et la perte/ ou gain d'énergie mensuelle du plancher ont été déterminées sous l'effet d'isolation de ce dernier qui est à chaque fois chauffé ou refroidi. Les résultats trouvés ont montré que l'isolation thermique de la dalle étudiée a un effet considérable sur le champ de température du sol et l'énergie perdue par le plancher.

Récemment, *A. Al-Anzi et M. Krarti* [6-7] ont appliqué une nouvelle technique, nommée Local/ Global (L-G), pour résoudre le problème des transferts de chaleur couplés entre un bâtiment et le sol. En particulier, l'étude des transferts de chaleur du plancher sur terre-plein en contact avec le sol. Cette nouvelle méthode consiste à combiner deux techniques, analytique et numérique. La méthode analytique est utilisée pour la résolution du problème du transfert de chaleur au sein du domaine global. Par contre la technique numérique (méthode des différences finies) est utilisée pour obtenir la solution du transfert de chaleur au sein du domaine local en incluant les détails des fondations qui sont ignorés par le modèle global. La méthode (L-G) peut être efficace pour l'évaluation des transferts de chaleur en régime transitoire des fondations d'un plancher sur terre – plein.

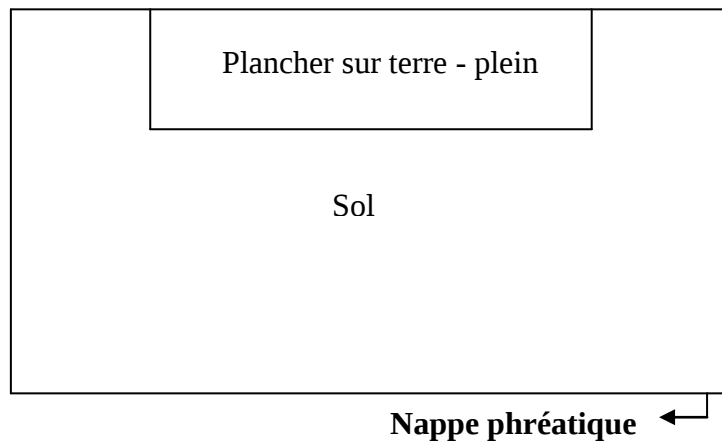


Figure 1.1 Plancher sur terre - plein.

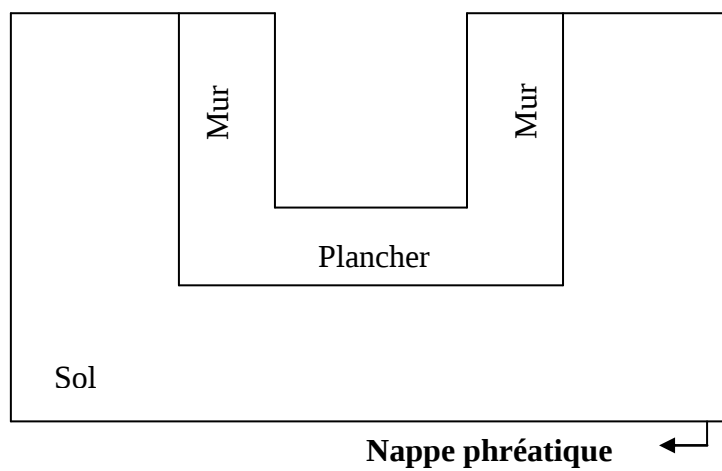


Figure 1.2 Bâtiment semi - enterré

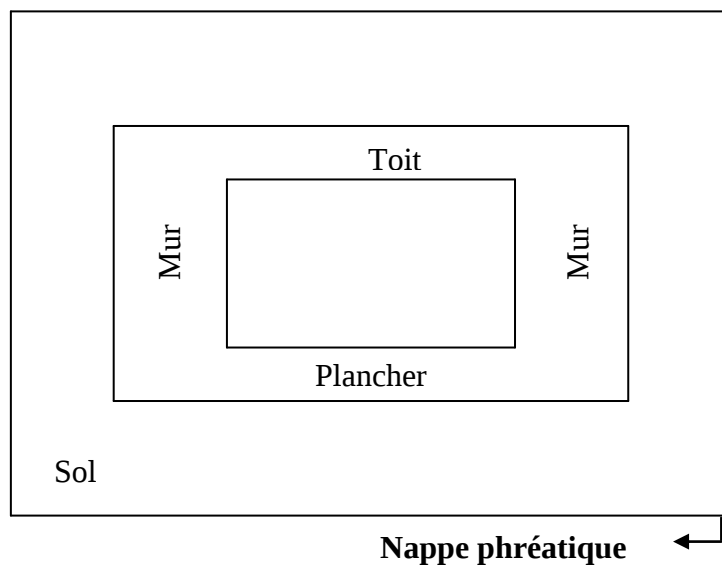


Figure 1.3 Bâtiment enterré.

I.3.2 Bâtiment semi - enterré

Un intérêt particulier a été porté par les thermiciens de l'habitat aux bâtiments semi - enterrés. En effet, dans des conditions climatiques chaudes (en été) et froides (en hiver) le confort thermique des habitants est mieux réalisé, lorsque la surface de contact entre le bâtiment et le sol est élevée. Dans ce contexte, *S. Amjad* [8] a appliqué la méthode des fonctions de transfert et la méthode des fonctions de transfert multicouches à la résolution du problème du couplage thermique entre un bâtiment semi - enterré et le sol. Elle a également adapté ces deux méthodes à l'étude des transferts d'énergie entre le sol et les trois structures à savoir: plancher sur terre - plein, bâtiment semi - enterré et bâtiment complètement enterré [9]. Cette technique a été étudiée pour prédire le transfert de chaleur entre le sol et les trois configurations en question.

Dans l'objectif d'étudier l'effet de la conductivité thermique des matériaux de construction sur l'état d'équilibre d'une enveloppe enterrée d'un bâtiment, *Yanping Yuan et al.* [10] ont étudié trois sections enterrées d'un bâtiment construites avec différents matériaux. Ils ont calculé le flux de chaleur échangé entre la section du bâtiment enterrée et le sol et ils ont également calculé la température moyenne de la même section. Ces deux grandeurs sont obtenues en fonction de la température de l'air intérieur du local qui est supposée constante pour chaque calcul. L'étude faite, en fonction de la conductivité thermique, a montré que les échanges (perte/ou gain) de chaleur entre l'enveloppe enterrée du bâtiment et le sol peuvent atteindre 27.8%.

Une étude du transfert de chaleur entre un bâtiment semi - enterré, dont les faces extérieures sont isolées (les deux faces extérieures des deux murs et celle du plancher), et le sol a été menée par *M. Krarti* [11]. Cette étude porte en fait sur l'optimisation de l'isolation des faces extérieures de la structure rectangulaire qui sont maintenues à chaque fois à un flux constant. Le résultat trouvé a montré que pour minimiser les pertes de chaleur entre le bâtiment en question et le sol, l'épaisseur de l'isolant doit être non uniforme le long des surfaces extérieures du bâtiment. Le seul inconvénient de cette procédure est dû principalement au coût de l'installation de l'isolation des surfaces de l'habitat étudié qui est élevé.

I.3.3 Bâtiment complètement enterré

Le bâtiment complètement enterré a été étudié par plusieurs chercheurs en raison du confort thermique qu'il peut présenter et la réduction de la consommation de l'énergie due au couplage fort entre ce bâtiment et le sol. Parmi les recherches faites dans ce sens, il y a celle de *S. Amjad* [12]. Cette dernière a adopté la méthode des fonctions de transfert bidimensionnelles et sous - structurations au calcul des échanges de chaleur entre les cavités complètement enterrées et le sol. La validation de ces deux méthodes a été réalisée en confrontant leurs résultats à ceux de la méthode ADI.

Dans le même contexte, *S. Choi et M. Krarti* [13] ont appliqué la méthode analytique (ITPE) à l'optimisation de l'isolation thermique le long des faces extérieures, qui sont maintenues à chaque fois à un flux constant, d'un bâtiment complètement enterré. Les résultats trouvés, en régime permanent, ont montré que pour minimiser les pertes de chaleur entre le bâtiment en question et le sol, l'épaisseur de l'isolant doit être non uniforme le long des surfaces extérieures de la structure (figure 1.4). En effet, une étude comparative, entre la distribution de l'isolement thermique uniforme et non uniforme, a prouvé qu'avec cette optimisation de l'isolation thermique, l'énergie récupérée peut atteindre jusqu'à 35%. Le seul inconvénient de cette procédure est dû principalement au coût de l'installation de l'isolation des faces extérieures du bâtiment étudié qui est élevé.

Shen et Ramsey [14] ont présenté une méthode semi - analytique simplifiée pour le calcul des transferts thermiques à travers des cellules enterrées. *Krarti* [15] a également adopté la méthode ITPE (Estimation du Profil de Température Interzone) au calcul des échanges thermiques entre les structures enterrées et le sol.

Les distributions de température en régime permanent et au sein du système "bâtiment - sol" ont été déterminées par *M. Krarti* [16] et par *S. Amjad* [17] en adoptant la méthode analytique (ITPE) et la méthode ADI respectivement. La performance de ces bâtiments dans ce genre d'utilisation a été antérieurement prouvée par *Eckert* [18].

La majorité de ces travaux assimilent la température intérieure du local constante en négligeant l'effet du rayonnement entre les parois intérieures du local ainsi que la convection naturelle à l'intérieur de celui-ci. Pour faire une étude fine du comportement thermique d'un bâtiment, le couplage par trois modes du transfert de chaleur à savoir : transfert de chaleur par

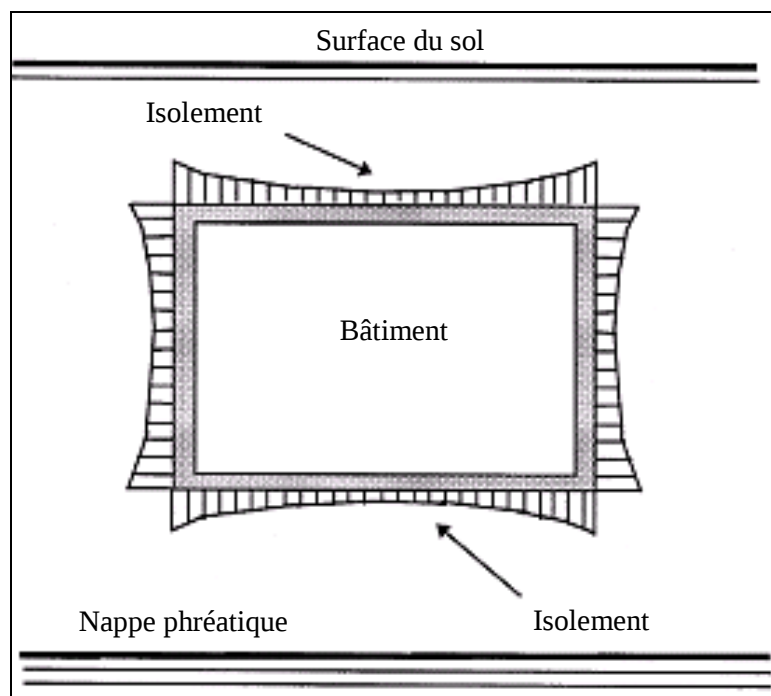


Figure.1.4 Bâtiment complètement enterré.

conduction, convection et rayonnement est nécessaire. On outre, des travaux qui tiennent compte de ce couplage intime d'énergie dans un habitat sont rares. La plupart des travaux, présentés dans le paragraphe suivant, ayant traité ce genre de problèmes sont restreints à l'étude des effets de la conduction ou du rayonnement sur la convection naturelle dans une cavité carrée ou rectangulaire différentiellement chauffée.

I.4 TRANSFERTS DE CHALEUR COUPLES À TRAVERS UN BATIMENT

L'étude du couplage convection naturelle, conduction et/ou rayonnement a connu des progrès considérables dans le domaine des bâtiments en faisant ainsi l'objet de nombreuses investigations. En outre, quelques études disponibles dans la littérature sont restreintes au couplage simple, (convection, conduction ou rayonnement). En vue de cela, *Larson et Viskanta* [19] et *Lage et al.* [20] ont étudié l'influence des échanges radiatifs entre les parois intérieures d'une cavité sur la convection naturelle. Les effets de la conduction dans une paroi de la cavité sur la convection ont été traités par *Koutsoheras et Charters* [21] et par *Kim et Viskanta* [22-23]. Les transferts conductifs dans une partition séparant deux cavités rectangulaires ont été pris en compte dans l'étude de la convection naturelle effectuée par *Tsan- Hui Hsu et So-Yenn Tsai* [24]. D'autres travaux disponibles dans la littérature, dans le même domaine, sont restreints à des études simples. En effet, *Costa* [25] a travaillé sur une cavité carrée avec deux parois conductrices horizontales. *Ouardi* [26] a également étudié le comportement d'un habitat dans le climat de Marrakech.

Sans tenir compte de la convection naturelle et des échanges radiatifs entre les parois intérieures du local, *D. Khaine et ses co-auteurs* [27] ont évalué les réponses du local en régime dynamique à des sollicitations indicielles et harmoniques des températures extérieures. Cette étude a été faite en élaborant un modèle mathématique basé sur la théorie des fonctions de Green pour la mise en évidence de l'inertie thermique du local à partir de la résolution de l'équation de propagation de la chaleur dans le mur et de l'équation du bilan thermique de l'air intérieur du local. Récemment, *H. Wanga et al.* [28] ont développé un code numérique pour le couplage, juste, de la convection naturelle en cavité avec le rayonnement de surfaces et des études sont menées pour une cavité carrée remplie d'air dont les quatre parois ont la même émissivité.

Une étude numérique détaillée qui tient compte à la fois des transferts thermiques conductif, convectif et radiatif dans des structures alvéolaires bidimensionnelles a été présentée par *Abdelbaki* [29]. Parmi, les effets ayant été examinés dans cette étude, il y avait celui du nombre d'alvéoles dans les deux directions de transfert de chaleur. Les travaux [29-31], du même auteur, ont porté sur l'étude des transferts thermiques couplés dans des parois alvéolaires verticales formées par des briques creuses en terre cuite utilisées dans la construction des murs verticaux des bâtiments. Ces travaux, basés sur des modèles de simulation détaillés, ont mené à la détermination de coefficients de transfert de chaleur à travers les murs alvéolaires verticaux du bâtiment. Il s'agit, en fait, des coefficients d'échange global de chaleur en régime permanent et des coefficients de la fonction de transfert en régime variable.

La suite de l'étude précédente a été étendue par *T. Ait-taleb et ses coauteurs* [32-36] aux cas des hourdis pour construire des planchers. Ceci a nécessité la résolution du problème du couplage entre les trois modes de transfert de chaleur dans une structure alvéolaire avec un chauffage vertical. Les deux situations suivantes ont été envisagées : chauffage par le bas ou chauffage par le haut. Le même auteur a procédé également à la détermination, en régime stationnaire, des conductances thermiques globales spécifiques aux hourdis, la détermination des coefficients de la fonction de transfert (CFT) pour les hourdis et la simulation numériquement des transferts thermiques couplés par conduction, convection et rayonnement en régime transitoire à travers la structure étudiée chauffée verticalement par des excitations thermiques réelles. Les flux obtenus sont utilisés pour l'identification des coefficients (CFT) empiriques qui ne peuvent pas être générés par les méthodes analytiques des fonctions de transfert.

Tadrari et H. El harfi [37-38] se sont intéressés à l'étude fine en régime permanent bidimensionnel du coulage convection naturelle – rayonnement – conduction dans un mur trombe non ventilé soumis à un flux solaire.

Récemment, *Boukandil* [39-40] a étudié numériquement les transferts thermiques couplés par convection naturelle, conduction et rayonnement dans une cavité verticale ayant des parois alvéolaires. Les résultats de simulation sont présentés pour différents rapports de forme de la cavité centrale et différents écarts de température entre les faces verticales de la structure isotherme.

Une investigation sur le nombre de Rayleigh critique au dessous duquel le régime laminaire est encore établi varie d'un auteur à l'autre dans le cas de la convection naturelle au sein d'une cavité carrée dont ses parois verticales sont différentiellement chauffées. En effet, pour une cavité carrée différentiellement chauffée, le nombre de Rayleigh critique qui sépare le régime laminaire et le régime turbulent est de l'ordre de 10^{10} selon *Chien* [41]. *Jones and Launder* [42] ont considéré que le régime laminaire, dans la même structure et pour les mêmes conditions aux limites, est de l'ordre de 10^{11} . Le nombre de Rayleigh critique adopté par *R. A. W. M. HENKES et al.* [43] est de l'ordre de 10^9 .

La transition du régime laminaire au régime turbulent a été observée par *Bohn et al.* [44] pour un nombre de Rayleigh de l'ordre de 10^{10} dans le cas d'une étude expérimentale de la convection naturelle au sein d'une cavité cubique dont les parois verticales sont différentiellement chauffées. Une investigation expérimentale de la convection naturelle au sein d'une cavité cubique à grand nombre de Rayleigh a été réalisée par *A. T. Kirkpatrick et M. Bohn* [45].

Y.S. Tian, T.G. Karayiannis [46] ont comparé leurs résultats de la distribution de température adimensionnelle, à mi - hauteur de la paroi gauche de la cavité carrée, à ceux de la modélisation numérique obtenus par *Lankhorst* [47]. Cette comparaison a été effectuée en régime laminaire dont le nombre de Rayleigh varie de 10^6 jusqu'à 10^{10} . Les parois verticales de cette cavité sont différentiellement chauffées par contre les parois horizontales sont adiabatiques.

Le transfert de chaleur au sein du bâtiment étudié (figure 1.5) se fait par convection naturelle à l'intérieur de la cavité, par rayonnement entre les faces internes de celle-ci et par conduction dans les différentes parois solides. Ces trois modes de transfert de chaleur sont intimement liés. Par conséquent, l'étude fine du comportement thermique de l'habitat fait appel à la résolution simultanée des équations complexes traduisant les différents mécanismes. Cette étude fait l'objet du quatrième chapitre de ce travail.

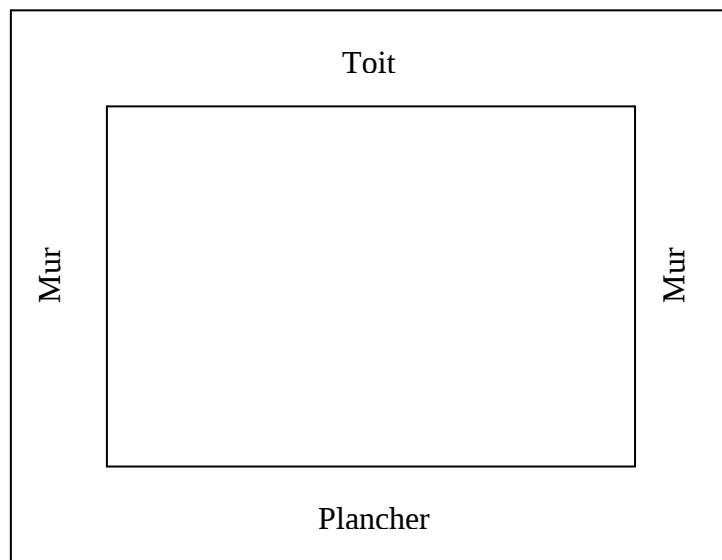


Figure 1.5 bâtiment sur terre-plein.

Pour faire une étude fine du comportement thermique d'un bâtiment, la connaissance des grandeurs thermophysiques des différentes structures de l'habitat étudié ainsi que celles du sol qui entoure ce dernier est importante. En outre, d'après cette étude bibliographique du comportement thermique d'un bâtiment, une remarque importante a été observée. En effet, la majorité de ces travaux numériques, du comportement thermique d'un bâtiment, assimilent les différentes propriétés thermophysiques des parois ou du sol qui entoure l'habitat à des constantes. Dans ce qui suit, nous présentons des investigations faites sur la caractérisation thermophysique des différents matériaux par différentes méthodes.

I.5 METHODES DE MESURE DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES

Des avancées importantes sont apparues récemment dans le domaine des techniques expérimentales des mesures des propriétés thermophysiques. Pour accéder à cette mesure, il est généralement nécessaire de recourir à des techniques d'excitation fondées sur la méthodologie suivante. Une des faces (parfois tout l'échantillon) de l'échantillon à étudier est soumise à un flux thermique d'une durée dépendant de la nature du milieu étudié. Un suivi de l'évolution de la température en fonction du temps permet alors de déduire les propriétés thermophysiques. La relation liant la variation de la température et l'évolution du temps dépend du modèle et méthode utilisés par différents auteurs pour identifier ces propriétés thermophysiques de n'importe quel matériau.

En effet, la caractérisation thermophysique des liquides et des pâtes, en utilisant la technique flash, a été adoptée par *J. Blumm et al.* [48]. *Wilson Nunes dos Santos* [49] a employé la méthode flash laser pour déterminer la diffusivité thermique des polymères. *M. Lachi et A. Degiovanni* [50] ont bâti un modèle de mesure de température de surface par contact en régime transitoire. Ce modèle permet de déterminer l'influence de l'erreur de mesure de température par le capteur lors d'une identification de la diffusivité thermique par la méthode flash.

L'amélioration de mesure de la chaleur spécifique et la conductivité thermique par la méthode flash a été faite par *Seog-Kwang Kim et Yong-Jin Kim* [51]. Les propriétés thermophysiques de quelques métaux, soit à l'état solide ou liquide, ont été mesurées par *S. Min et al.* [52] en utilisant un nouveau système flash laser.

Dans le même sens, *A. Degiovanni et al.* [53] ont appliqué trois techniques pour mesurer la diffusivité longitudinale de matériaux anisotropes, il s'agit de:

- la méthode flash bidirectionnelle avec mesure locale de deux températures par contact;
- la méthode de l'ailette avec mesure locale ou non de deux températures par contact ou sans contact;
- la méthode flash bidirectionnelle avec mesure du champ de température par camera infrarouge et traitement par transformées intégrales.

La mesure de la diffusivité thermique des matériaux de remplissage dentaire par la méthode Angström a été réalisée par *Jerzy Bodzenta et al.* [54]. La même grandeur a été identifiée par la même méthode, Angström, d'un composite époxy durant son séchage par *H.H. Friis-Pedersen et al.* [55]. Les résultats de mesure trouvés ont montré que la diffusivité thermique de ce composite croît durant le séchage.

Par la méthode hot disk, *Saleh A. et Al-Ajlan* [56] ont procédé à la mesure des propriétés thermophysiques des matériaux d'isolation utilisés par les fabricants locaux Saoudite. Dans cette étude, l'effet de la température et celui de la masse volumique sur la conductivité thermique ont été examinés.

Alors que la majorité des méthodes nécessitent une excitation, la méthode fréquentielle utilisée par *O. Carpentier et al.* [57] est passive et n'exploite que des signaux naturels. Ces mêmes auteurs ont pu caractériser, in situ, deux types de sols: argileux et sableux.

La mesure de la conductivité thermique d'un milieu granulaire soumis à des contraintes mécaniques a été réalisée par *M. Filali* [58]. Ce même auteur a également détaillé plusieurs méthodes et modèles permettant la détermination des propriétés thermophysiques des différents matériaux.

N. Lamkharou et al. [59] ont fait une étude de la caractérisation thermophysique de la terre extraite de la région de Larache au nord du Maroc où le mode de mise en oeuvre traditionnel dominant est "l'adobe". Ils ont montré, d'après cette étude, que les paramètres thermiques évoluent considérablement avec la teneur en eau pour la terre crue (0 % de ciment) et la terre stabilisée au ciment (de 4 à 10 %).

L'influence de l'humidité sur les propriétés thermophysiques de certains matériaux locaux liège, plâtre et brique creuse a été réalisée par *A.EL Bakkouri* [60-61]. Les résultats ont

montré que l'humidité modifie considérablement la conductivité thermique de ces matériaux. L'incorporation des fibres dans le plâtre améliore également son pouvoir d'isolation.

Ce même auteur a fait une étude de la caractérisation thermophysique du béton allégé avec le liège ou avec des grignons d'olive [62]. Il s'est intéressé tout particulièrement à l'influence de l'humidité sur la conductivité thermique et l'influence du liège et des grignons d'olive, intégrés dans le béton lors de son gâchage, sur la même grandeur. Le béton utilisé pour cette étude est un béton léger constitué du sable et du ciment. Les résultats ont prouvé que la présence de l'humidité, au sein d'un matériau, modifie considérablement ses performances, notamment ses caractéristiques thermophysiques. Les résultats ont montré aussi que le liège est plus isolant que le béton allégé avec les grignons d'olive. Ceci s'explique par une porosité fermée très grande dans les granulats du liège que dans les grignons d'olive, favorisant ainsi l'existence d'une quantité d'air importante au sein du matériau compact; d'où la diminution de sa conductivité thermique apparente.

Récemment, une étude expérimentale a été effectuée par *P.S. Ngohe-Ekam et al.* [63] pour déterminer les propriétés thermophysiques du bois tropical. Cinq espèces du bois de l'Afrique central ont été choisies. Les influences de la teneur d'humidité et la coupure, soit axiale ou transversale, sur les propriétés thermophysiques ont été examinées. Ces chercheurs ont constaté que la conductivité thermique et l'effusivité thermique croissent et la diffusivité thermique décroît en fonction de la teneur en eau.

La caractérisation thermophysique du polystyrène expansé a été faite par *L. boukhattem* [64].

La méthode que nous avons utilisée, dans ce travail, pour la mesure des propriétés thermophysiques a été mise au point au Laboratoire d'Ingénierie des Procédés de l'Energie et de l'Environnement. Elle se caractérise par un temps d'expérimentation beaucoup moins long. Cette méthode a fait l'objet de plusieurs publications et porte le nom la "méthode des boîtes".

Dans ce même paragraphe, on présente un aperçu général sur quelques méthodes et leur principe permettant la détermination des propriétés thermophysiques des matériaux. Parmi ces méthodes, on trouve:

I.5.1 Méthode du fil chaud

La méthode du fil chaud permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif. La sonde, constituée du fil résistif et du thermocouple dans un support isolant en kapton, est positionnée entre deux blocs du matériau à étudier pour les matériaux solides et dans une enceinte fermée pour les gaz et les liquides. Le fil est relié à une alimentation électrique qui lui fournit un échelon de puissance. La mesure consiste à relever au cours du temps soit l'élévation de température soit la variation de résistance électrique, du fil (figure 1.6).

Dans le cadre d'une modélisation simple du phénomène, le fil est considéré infiniment long produisant une densité source de chaleur radiale, appliquée à l'instant initial. L'énergie est supposée dissipée uniquement par conduction. L'échantillon est de dimensions infinies et ses propriétés thermophysiques sont constantes. L'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques s'écrit :

$$\left(\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

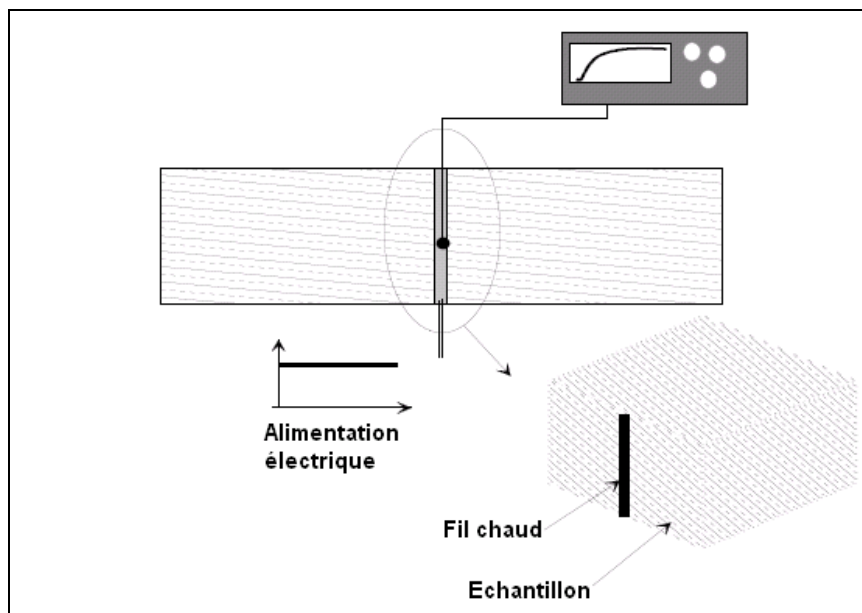


Figure 1.6 Dispositif expérimental du fil chaud.

Les conditions aux limites sont:

$$r = 0 \quad -\lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = Q$$

$$r \rightarrow \infty \quad T(r,t) = T_0$$

Les conditions initiales sont:

$$\text{➤ } t = 0 \quad T(r,0) = T_0$$

Il vient la solution suivante:

$$T(r,t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (1.2)$$

Où E_1 est la fonction exponentielle intégrale.

Pour des petites valeurs de $\frac{r^2}{4\alpha t}$, le développement de E_1 au voisinage de r_0 donne :

$$T(r,t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right) + \frac{r_0^2}{4\alpha t} + \dots \right] \quad (1.3)$$

Aux temps longs il vient :

$$T(r,t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4\alpha}{r_0^2 C}\right) \quad (1.4)$$

Le thermogramme, aux temps longs, est une droite en fonction du logarithme du temps, dont la pente est inversement proportionnelle à la conductivité thermique. Cette dernière est ainsi estimée grâce à une simple régression linéaire.

I.5.2 Méthode du plan chaud

La méthode du plan chaud est une extension de la méthode du fil chaud à une géométrie plane. Elle permet d'identifier l'effusivité thermique d'un matériau. Le principe de fonctionnement est basé sur le fait qu'un flux de chaleur uniforme est imposé à l'interface de deux échantillons symétriques de section quelconque et d'extension infinie dans la direction perpendiculaire à l'interface. Ceci est réalisé par la mise en place d'un élément chauffant

mince occupant toute la section de l'interface. Les échantillons sont assimilables à un milieu infini si le rapport de leur longueur à l'épaisseur de l'élément chauffant est supérieur à 20. Par ailleurs, les faces latérales des deux échantillons sont isolées et le transfert peut être considéré comme unidirectionnel. La réponse en température au cours du temps est mesurée dans le plan du chauffage par un thermocouple. Le comportement asymptotique aux temps longs est proportionnel à la racine carrée du temps, le coefficient de proportionnalité étant directement lié à l'effusivité des échantillons. Le comportement aux temps courts est influencé par l'inertie thermique de la sonde (élément chauffant + thermocouple) et par la résistance de contact sonde - milieu.

I.5.3 Méthode flash

Le principe de base initial de la méthode flash est le suivant : un échantillon, de forme cylindrique à faces parallèles initialement isotherme, est soumis sur l'une de ses faces (dite face avant) à une impulsion thermique de courte durée et uniforme sur la surface irradiée. La mesure de la réponse en température de l'échantillon sur la face opposée au flash (dite face arrière) permet d'identifier la diffusivité thermique du matériau. Cette méthode ne nous permet d'avoir que la diffusivité d'un matériau.

Cette méthode, flash, a été tendue à une méthode nommée nouveau système flash laser "NETZSCH LFA 457 MicroFlash" qui est la somme des dernières technologies utilisées dans les systèmes flash laser. Ce nouveau système peut mesurer des propriétés thermophysiques à savoir: la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique. Le laser a un pulse de longueur 330 us et un pulse d'énergie qui peut atteindre 15 J/pulse (figure 1.7). Cet instrument compact permet des mesures allant de -125°C à 1100°C utilisant deux fours différents et interchangeable par l'utilisateur (-125°C- 500°C ou 25°C - 1100°C). Le design étanche au vide permet des tests sous des atmosphères définies ainsi que sous vide. L'instrument peut mesurer, avec un passeur d'échantillons automatique intégré, plusieurs échantillons en même temps. La technologie avancée de capteur infrarouge employé dans ce système permet la mesure de l'évolution de la température sur la surface arrière de l'échantillon, même à des températures de -125°C.

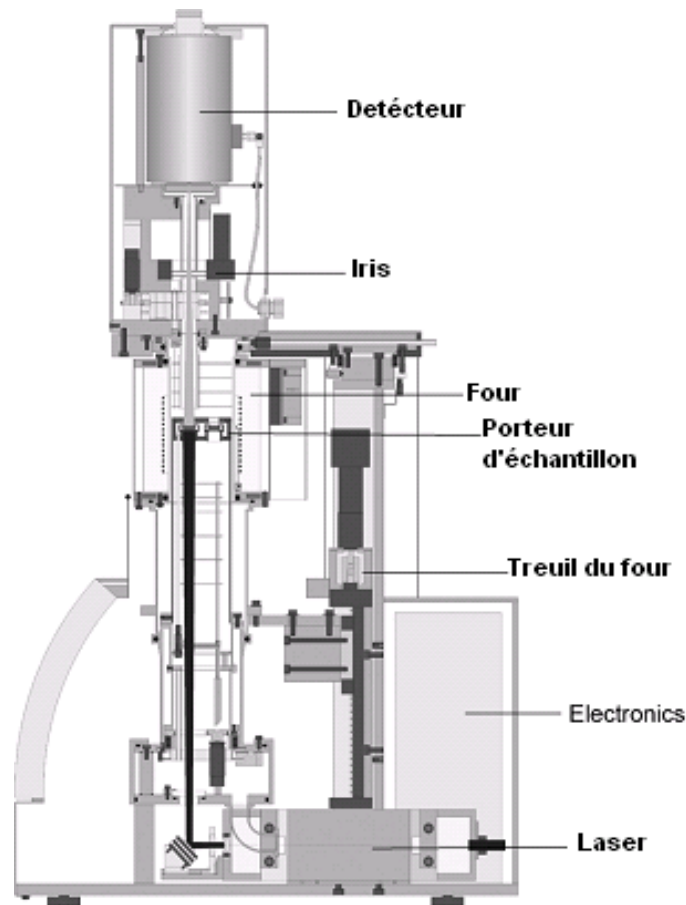


Figure 1.7 Dispositif d'essais NETZSCH LFA 457 MicroFlash.

I.5.4 Méthode du Hot Disk

La mise en oeuvre de la méthode du Hot Disk qui s'intéresse à la mesure des propriétés thermophysiques des matériaux est simple. Une sonde, qui sert de source de chaleur et de capteur de mesure dynamique en enregistrant l'augmentation de la résistance de la sonde (qui correspond à l'augmentation de la température) est constituée d'une double spirale de Nickel de 10 μm d'épaisseur prise en sandwich entre deux feuilles d'isolant Kapton ou Mica suivant la température d'utilisation (figure 1.8). Cette méthode (Hot Disk) consiste à imposer un flux de chaleur uniforme dans un plan séparant deux échantillons symétriques d'extension infinie.

En plus de sa mise en oeuvre qui est simple, la méthode du hot Disk peut mesurer simultanément la conductivité thermique et la diffusivité thermique et donne par déduction la capacité thermique des matériaux. La difficulté qui apparaît lors de l'utilisation de cette méthode est d'avoir d'avance une idée sur les caractéristiques thermophysiques du milieu. En

effet, la connaissance grossière du matériau étudié (géométrie, conductivité thermique) permet de prédire la profondeur de pénétration et ainsi de choisir le type de sonde et la puissance de chauffe.

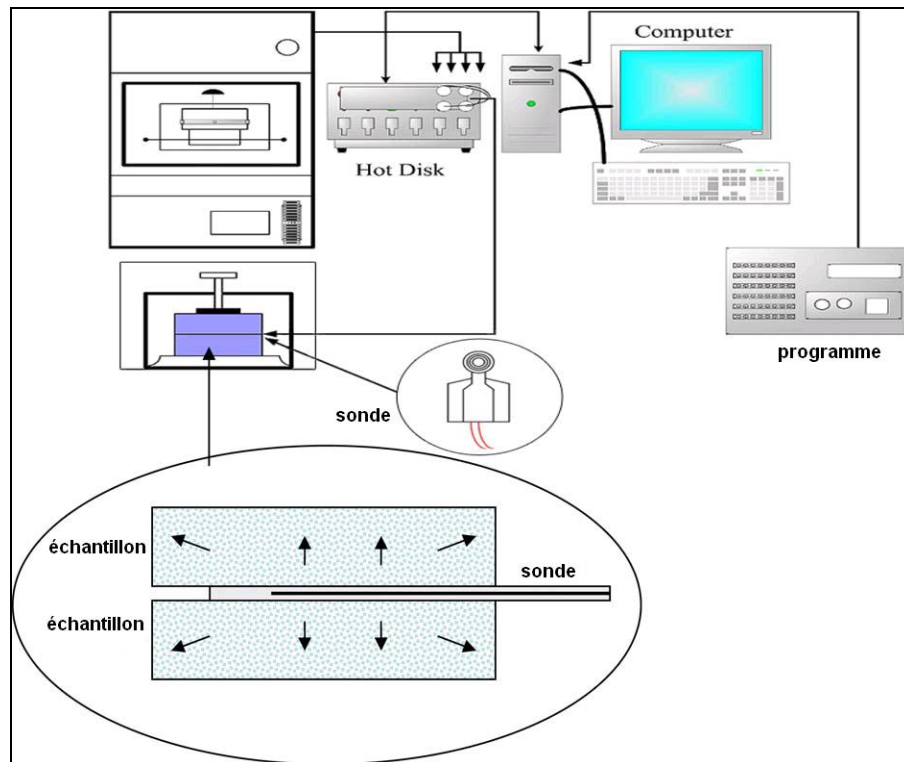


Figure 1.8 Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk.

1.5.5 Méthode de la plaque chaude gardée

Le principe de mesure consiste à placer deux échantillons plans identiques de part et d'autre d'une plaque chauffante (résistance chauffante). Cette dernière est divisée en deux parties qui peuvent être réglées indépendamment l'une de l'autre. Pour assurer le transfert d'énergie unidirectionnel, on constitue ainsi sur chaque échantillon une zone de mesure (la zone centrale) et une zone de garde (qui sera légèrement surchauffée pour éviter les pertes thermiques de la zone de mesure par ses bords). Les faces sont maintenues en contact avec des échangeurs dans lesquels circule un fluide maintenu à température constante. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure 1.9. A l'aide de thermocouples disposés de part et d'autre de l'échantillon étudié, la température est ainsi mesurée.

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisque basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent tel que :

$$T_1 - T_2 = R\phi \quad (1.5)$$

Où : $R = \frac{\lambda e}{S}$

ϕ : Quantité de chaleur par unité de temps créée par effet joule dans la résistance;

e : Epaisseur de l'échantillon;

S : Aire de la surface de mesure;

ΔT : Ecart de température entre les côtés chaud et froid de l'échantillon.

L'inconvénient de cette méthode apparaît dans les temps d'expérimentation qui sont très longs. En effet le régime permanent ne peut être atteint qu'après une durée de 24h.

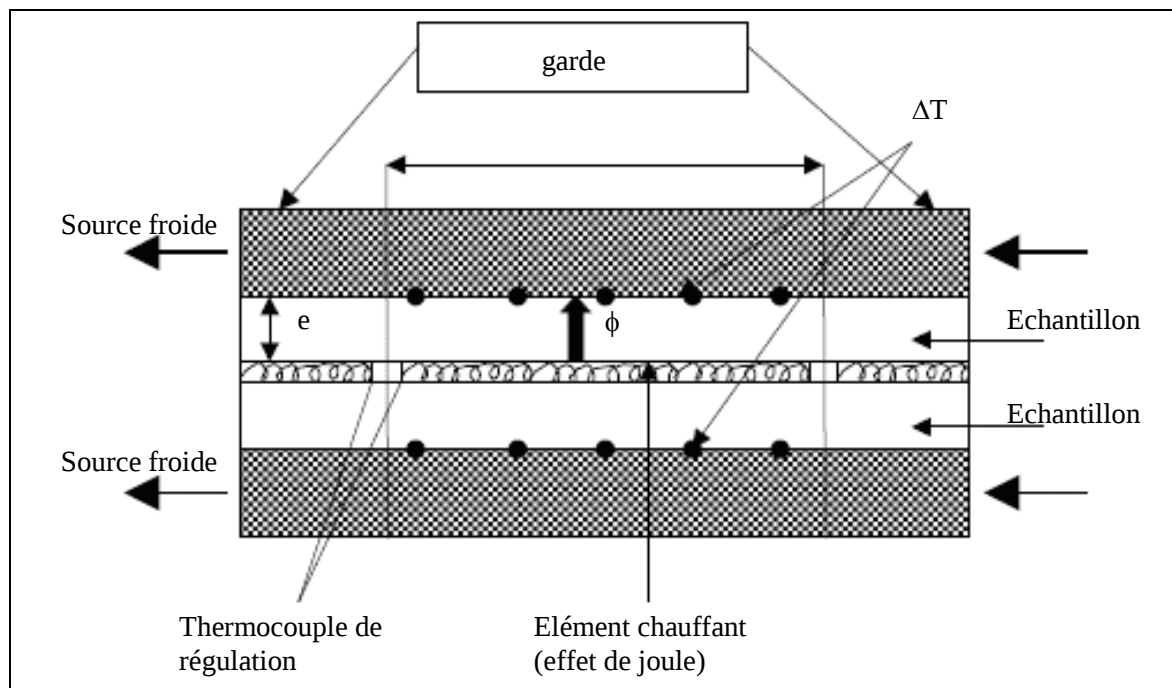


Figure 1.9 Principe de la plaque chaude gardée.

I.5.6 Méthode fréquentielle

La méthode fréquentielle permet de mesurer les propriétés thermophysiques, in situ, du sol. L'instrumentation expérimentale utilisée (figure 1.10) est constituée d'un fluxmètre, qui est sensible aux trois modes de transfert de chaleur (rayonnement, convection et conduction), et deux capteurs de température. Le flux de chaleur mesuré, la température de la surface du sol et celle située au dessous, à quelques centimètres, de la surface du sol étudié sont enregistrés par un enregistreur de données. Ces dernières données sont utilisées dans un système d'inversion en domaine fréquentiel pour déterminer la diffusivité thermique et l'effusivité thermique. La conductivité thermique et la chaleur massique sont également calculées. Cette méthode est passive et moins coûteuse (elle nécessite aucune excitation) et n'exploite que les signaux naturels. Après quelques heures de l'enregistrement, ces signaux naturels permettent d'identifier continuellement les propriétés thermophysiques du sol.

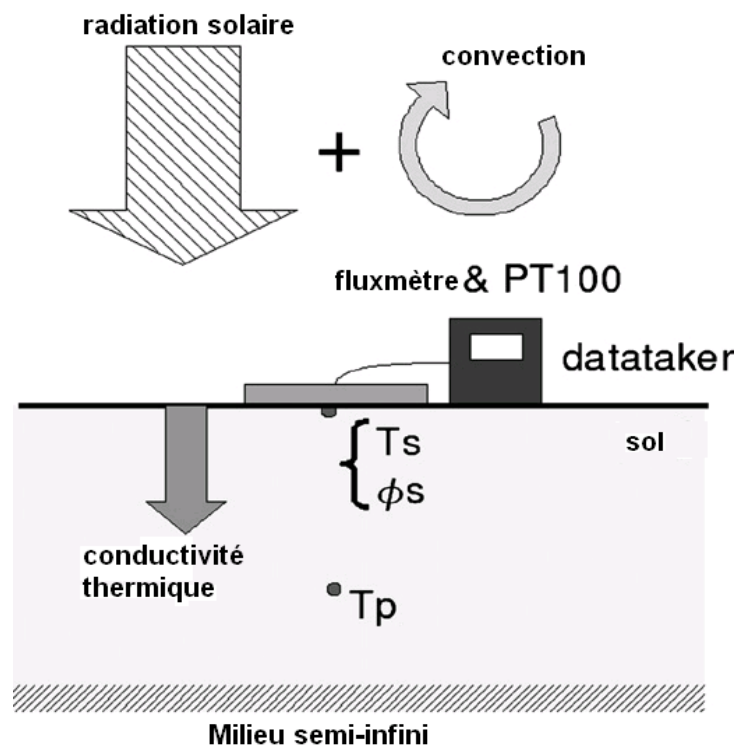


Figure 1.10 Instrumentation de mesure In situ.

I.5.7 Méthode Angström

Le schéma du montage expérimental est présenté sur la figure 1.11. Le dispositif appelé, Peltier de dimension $40 \times 40 \text{ mm}^2$ est porté sur un radiateur. En haut du module de Peltier, un disque mince de cuivre de même diamètre que ceux de l'échantillon à caractériser et d'un thermocouple de type K. Une couche mince de pâte thermiquement conductive est placée entre le dispositif Peltier et le disque de cuivre. L'échantillon à étudier est placé sur ce disque. Le deuxième thermocouple est placé sur la surface supérieure de l'échantillon. Les surfaces latérales et la surface supérieure de l'échantillon sont thermiquement isolées par un polystyrène. Le dispositif Peltier est alimenté par un courant, la source est contrôlée par un générateur de fonction HP33102A (Hewlett-Packard). Le courant sortant de la source est particulièrement sinusoïdal:

$$I = I_m \sin(2\pi ft) \quad (1.6)$$

Où f est la fréquence située dans l'intervalle (10–500) mHz.

Le courant circulant dans la machine Peltier et les températures mesurées par les deux thermocouples sont contrôlés par l'unité d'acquisition Agilent 34970A. Ces trois grandeurs mesurées peuvent être liées par la relation suivante:

$$T_{1,2} = T_0 + \Delta T_{1,2} \sin(2\pi ft - \varphi_{1,2}) \quad (1.7)$$

Où T_0 est la température ambiante.

ΔT_i est l'amplitude de la distribution de température.

φ_i est le déphasage entre le flux de chaleur en $x = 0$ et la distribution de température.

1, 2 sont les indices des thermocouples attachés au disque en cuivre et la surface supérieure de l'échantillon respectivement.

Il s'est adopté que: $\Delta T_1 = B_0(0)$, $\Delta T_2 = B_0(d)$, $\phi_1 = -\phi_2(0)$ et $\phi_1 = -\phi_2(d)$

Après avoir déterminé la fréquence convenable, la diffusivité thermique du matériau étudié peut se déduire, à partir de l'équation (1.8) ou l'équation (1.9) suivantes:

$$\left. \frac{B_0(0)}{B_0(d)} \right|_{\sqrt{\pi f/\alpha} d > 1.5} \approx \frac{1}{2} \exp\left(\sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} d\right) \quad (1.8)$$

$$\left[\varphi(0) - \varphi(d) \right]_{\sqrt{\pi f/\alpha} d > 1.5} \approx \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} d \quad (1.9)$$

L'avantage de cette méthode apparaît dans le pouvoir de faire des mesures sur des échantillons de dimensions faibles.

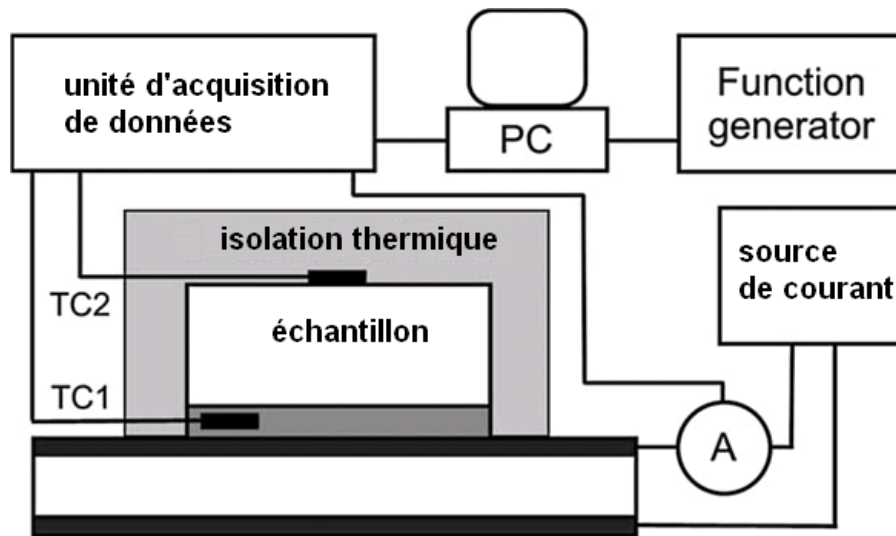


Figure 1.11 Dispositif expérimental de Peltier.

1.5.8 Méthode des boîtes

Le dispositif utilisé au laboratoire est une cellule de mesure conçue spécialement pour déterminer simultanément, par la méthode dite "des boîtes" du régime permanent et transitoire, la conductivité thermique et la diffusivité en peu de temps (environ trois heures) de deux échantillons. Ces deux méthodes du régime permanent et celle du régime transitoire sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique et la diffusivité thermique respectivement. La chaleur massique et l'effusivité thermique, du matériau en question, sont également calculées. Ce dispositif (figure 1.12) s'agit de EI700 qui contient deux boîtes, une pour la conductivité et l'autre pour la diffusivité thermique.



Figure 1.12 Cellule de mesure EI700.

Cette machine peut également mesurer les propriétés thermophysiques des matériaux solides homogènes ou inhomogènes pas trop conducteurs ($\lambda < 3 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$), des matériaux pulvérulents (poudres, granulats et sable) et des liquides.

Le principe de mesure de la conductivité thermique et la diffusivité thermique sont présentés en détail dans le chapitre suivant.

Une fois, la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique (α) et la masse volumique (ρ) de l'échantillon (E) sont connues; La chaleur massique et l'effusivité thermique se déduisent à partir des deux formules $Cp = \lambda.\alpha^{-1}.\rho^{-1}$ et $E_f = \sqrt{\lambda\rho Cp}$ respectivement.

I.6 CONCLUSION

Cette étude bibliographique faite sur les différents travaux relatifs à l'étude des échanges thermiques entre les bâtiments et le sol, les transferts de chaleur couplés par trois modes : conduction, convection et rayonnement ainsi que la détermination expérimentale des propriétés thermophysiques des différents matériaux, nous a permis de déduire les conclusions suivantes:

- ✓ La majorité des chercheurs qui étudient le comportement d'un bâtiment en contact avec le sol assimilent les grandeurs thermophysiques du sol ou les différentes parois de l'habitat à des constantes.
- ✓ L'étude du couplage entre les différents modes de transfert de chaleur à travers un bâtiment est restreinte au couplage entre la conduction ou rayonnement et la convection naturelle dans une cavité carrée ou rectangulaire différentiellement chauffée. Les études disponibles actuellement, traitant ces trois modes, sont restreintes aux structures alvéolaires à savoir les murs et les ourdis constituant le toit ou le plancher d'un bâtiment.
- ✓ La revue bibliographique met clairement en évidence l'abondance de la littérature en étude de la caractérisation thermophysique des matériaux par différentes méthodes. En revanche, nous avons remarqué la rareté d'étude s'intéressant à la détermination des propriétés thermophysiques du mortier bien qu'il présente un intérêt considérable dans de nombreuses applications de maçonnerie que ce soit pour construire, pour enduire, pour assembler les parpaings ou pour réparer. On a également enregistré un manque d'une étude expérimentale des différents sols, en fonction de la teneur volumique en eau, en particulier ceux de la région d'Agadir.

Dans le deuxième chapitre de ce travail, nous présentons une étude expérimentale du mortier à base du ciment et du sable, ainsi que les sols limoneux en fonction de la teneur volumique en eau. La méthode expérimentale adoptée est celle nommée méthode "des boîtes".

Chapitre II

Caractérisation thermophysique du mortier et des sols limoneux de la région d'Agadir

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale de caractérisation thermophysique de quelques matériaux. Dans un premier temps de ce travail, notre choix s'est porté sur le mortier qui est le matériau de construction par excellence. Il est adopté universellement, pour les avantages suivants:

- Il est formé de matériaux naturels primaires largement disponibles à la surface de la terre.
- Il résiste à des environnements corrosifs (comme l'eau de mer), au feu, ...
- Sa mise en œuvre est assez simple.

Ensuite, notre étude expérimentale s'est fixée sur la détermination des propriétés thermophysiques du sol prélevé des différents sites de la région d'Agadir au Maroc. Il s'agit de Dcheira, Aourir, Hay Mohammadi et Founti qui sont connus par des types de sol qui sont respectivement limon silteux, limon beige, limon calcaire et le sable. Ces sols limoneux ont

été identifiés selon la classification LCP (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Les grandeurs physiques, qui caractérisent les matériaux des différents types du sol étudiés, sont liées à la teneur volumique en eau afin d'aider à prévoir les propriétés thermophysiques de la majorité des matériaux étudiés de la région d'Agadir, dès que sa teneur en eau sera connue.

La caractérisation est faite par le dispositif EI700 qui est conçu spécialement pour déterminer simultanément la conductivité thermique et la diffusivité du matériau par la méthode dite "des boîtes" du régime permanent et transitoire. La chaleur massique et l'effusivité thermique, du matériau en question, sont également calculées.

II.2 DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE UTILISÉ ET PRINCIPE DE MESURE

La caractérisation thermophysique des grandeurs mises en jeu, conductivité et diffusivité thermique, peut se faire par un relevé manuel. Cependant ce relevé manuel s'accompagne de certaines erreurs dues à la durée de l'expérience qui est relativement grande (supérieure à 3 heures) et à la mauvaise mesure effectuée manuellement. Pour avoir une caractérisation fiable, nous avons opté pour la supervision de cette installation par le biais d'un pilotage par micro-ordinateur de la chaîne d'acquisition, Agilent 34970A, reliée à la machine EI700 (figure 2.1) en se basant sur le logiciel en langage Visual Basic que nous avons élaboré. Les premières mesures de ces deux grandeurs, conductivité et diffusivité thermique, sont faites sur un échantillon étalon de polystyrène expansé. Les résultats de mesure, de ces deux grandeurs, sont similaires à ceux présentés dans la littérature.

II.2.1 Description de l'appareillage utilisé

Le dispositif expérimental est constitué de: Une capacité isotherme, de deux boites B1 et B2, de l'échantillon E, de capteurs de température PT100 et d'une acquisition des données.

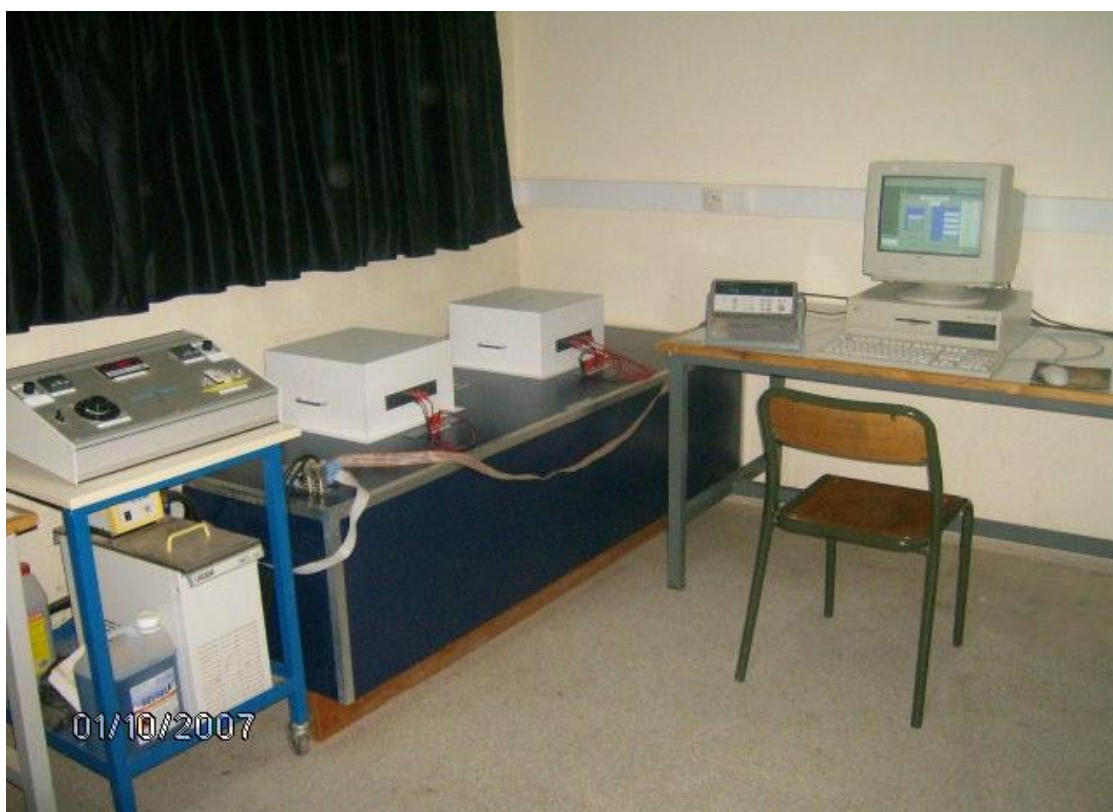


Figure 2.1 Cellule de mesure EI700.

II.2.1.1 Capacité isotherme A

C'est une grande capacité de dimensions internes $(46 \times 93 \times 200) \text{ cm}^3$ jouant le rôle de l'ambiance froide (figure 2.2). Elle est maintenue à une température faible allant jusqu'à -10°C grâce à un échangeur thermique R situé à sa base et alimenté par de l'eau glycolée refroidie par un cryostat K . Cette capacité est isolée de l'ambiance externe par du styrodur.

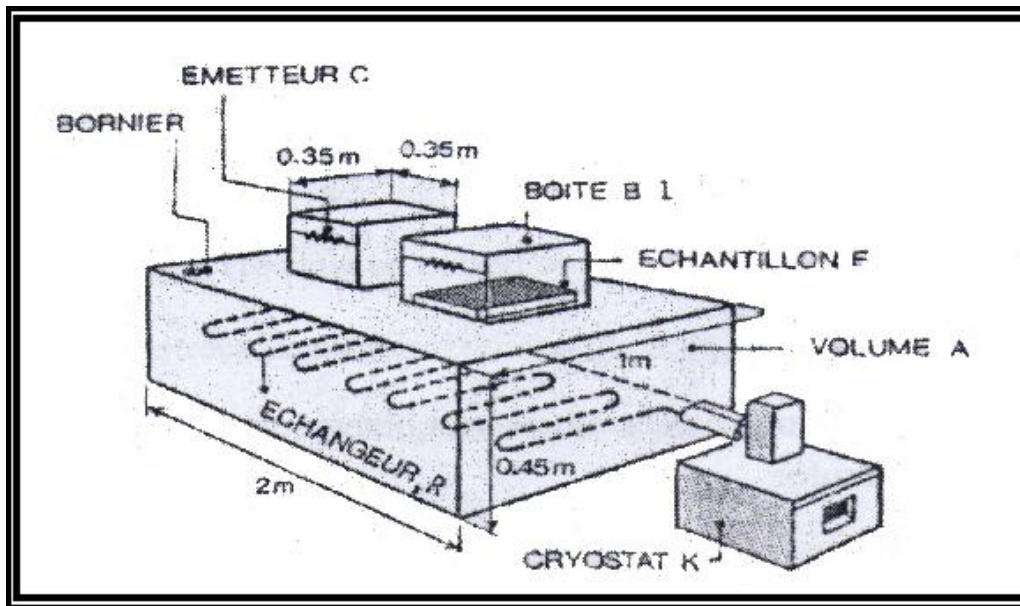


Figure 2.2 Vue générale de la cellule d'essai EI700.

II.2.1.2 Deux boîtes B1 et B2

Les deux boîtes sont identiques, elles permettent de faire deux mesures simultanées. Ce sont deux boîtes en contre-plaqué isolées de l'intérieur par du styrodur et présentant chacune une face ouverte.

II.2.1.3 Echantillon E

Les échantillons à mesurer doivent avoir une forme parallélépipédique $(27 \times 27 \times e) \text{ cm}^3$ dont l'épaisseur est inférieure ou égale à 7 cm. Ils se placent entre la boîte B et la capacité isotherme A de telle sorte que les flux latéraux soient négligeables. Chaque échantillon présente une face froide et une face chaude.

II.2.1.4 Capteurs de température PT100

Les capteurs de température PT100 sont des thermosondes à résistance de platine de mesure de température. Le principe de mesure repose sur la variation de résistance électrique du fil métallique en fonction de la température. Ces fils employés sont à la base de platine ou de nickel. Le platine offre une grande plage de température, et une très bonne linéarité. PT représente le mot platine qui est le matériau principal de la sonde. 100 détermine la valeur ohmique de la sonde à zéro degré centigrade; la PT 100 est donc une résistance qui vaut 100 ohms à une température ambiante de zéro degré centigrade. La résistance de la sonde croît en fonction de l'augmentation de la température ambiante suivant la loi:

$$R = R_0(1 + \beta t) \quad (2.1)$$

β , est le coefficient de température qui vaut $4.10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ et R_0 est la valeur de la résistance à $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le dispositif EI700 contient au totale sept thermosondes:

-  Quatre thermosondes pour la mesure de température de surface.
-  Trois thermosondes pour la mesure de température d'ambiance.

II.2.1.5 Acquisition des données

Les différentes températures sont mesurées à l'aide d'une chaîne d'acquisition de données. Il s'agit de l' Agilent HP 34970A (figure 2.3) qui est une unité d'acquisition de données et de commutations, elle peut être reliée à un dispositif expérimental grâce à ses modules de raccordement externes qui abritent les logements 100, 200 et 300.

On peut utiliser le HP 34970A comme un instrument autonome, on fait le réglage et la lecture à partir de sa face avant, comme on peut aussi effectuer des mesures à distance grâce au raccordement à un micro-ordinateur.

Pour établir la liaison PC - unité, l'interface série (RS 232) est utilisée. Cette interface permet de réaliser une communication entre deux systèmes numériques.

La liaison Agilent – dispositif EI700 consiste à faire une liaison entre les différentes sondes à partir du bornier de la machine et le module (100) de l'Agilent.



Figure.2.3 Agilent 34970A.

II.2.2 Principe de mesure

II.2.2.1 Mesure de la conductivité thermique (λ)

Le principe de mesure de la conductivité thermique d'un matériau est basé sur la réalisation de façon permanente d'un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers l'échantillon placé dans la première boîte, entre la capacité isotherme froide (A) du dispositif et la source de chaleur à flux constant $q = V^2 R^{-1}$ dont l'émission de l'énergie est régulée à l'aide d'un rhéostat (R), on fait en sorte par réglage de l'émission de chaleur, que la température à l'intérieur de la boîte B_1 , T_B soit légèrement supérieure à la température extérieure qui est la température ambiante (figure 2.4). Une fois le régime permanent établi, c'est-à-dire quand les valeurs de températures restent constantes plus d'une demi-heure environ, on prend alors le gradient de température au centre de l'échantillon, la tension de chauffage et on utilise l'expression suivante pour déduire la valeur de la conductivité thermique λ_{exp} [65]:

$$\lambda_{\text{exp}} = \frac{e}{S(T_C - T_F)} (q - \chi(T_B - T_{\text{amb}})) \quad (2.2)$$

L'équation (2.2) tient compte des flux suivants :

Effet joule produit par la résistance chauffante : $q = \frac{V^2}{R}$

Chaleur globale perdue à travers la boîte B_1 : $\chi(T_B - T_{amb})$

Chaleur transférée par conduction à travers l'échantillon : $\frac{\lambda_{exp} S(T_C - T_F)}{e}$

Avec:

T_C : Température chaude de la surface isotherme chaude;

T_F : Température froide de la surface isotherme froide;

T_B : Température à l'intérieur de la boîte;

T_a : Température ambiante;

S : Aire de l'échantillon;

e : Épaisseur de l'échantillon;

q : Puissance émise par la résistance chauffante;

V : Tension aux bornes de la résistance chauffante;

R : Résistance chauffante qui vaut 3680Ω ;

χ : Constante de la cellule, elle permet d'évaluer les pertes latérales dans la boîte.

La constante χ peut être déduite expérimentalement par deux façons différentes:

- ❖ Soit; par utilisation d'un échantillon dont la conductivité est connue, et à l'aide de l'équation (2.2), cette constante peut être déduite facilement.
- ❖ Soit; l'utilisation d'un échantillon inconnu (isolant) et grâce à deux expériences avec deux valeurs de flux différents q_1 et q_2 :

$$\begin{cases} q_1 = \frac{\lambda}{e}(T_{C1} - T_{F1}) \times S + \chi(T_{B1} - T_a) \\ q_2 = \frac{\lambda}{e}(T_{C2} - T_{F2}) \times S + \chi(T_{B2} - T_a) \end{cases} \quad (2.3)$$

La résolution de ces deux équations à deux inconnues (λ et χ) donne la valeur de la constante χ .

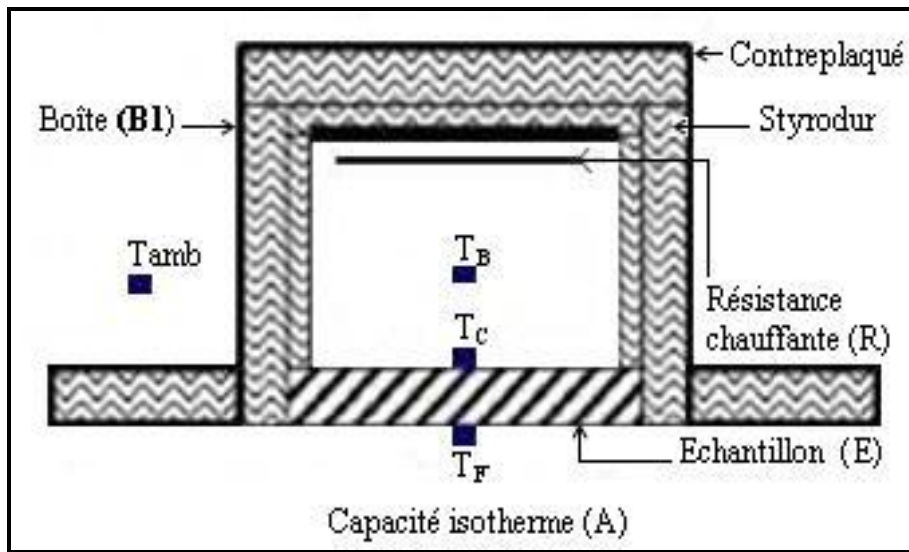


Figure 2.4 Boîte de mesure de la conductivité thermique.

II.2.2.2 Mesure de la diffusivité thermique (α)

Pour la mesure de la diffusivité thermique, la deuxième boîte est éclairée par deux lampes à incandescence de puissances (1000W) jouant le rôle de source impulsionnelle pendant quelques secondes (figure 2.6). On relève sur le thermogramme (figure 2.5) l'élévation de température T_B de l'échantillon en fonction du temps et on repère les points pour lesquels, on a: 1/3, 1/2, 2/3, et 5/6 de la valeur maximale de la température. On cherche alors les valeurs du temps correspondant et on déduit la valeur de la diffusivité thermique du matériau par la moyenne des trois valeurs calculées par les expressions suivantes [65]:

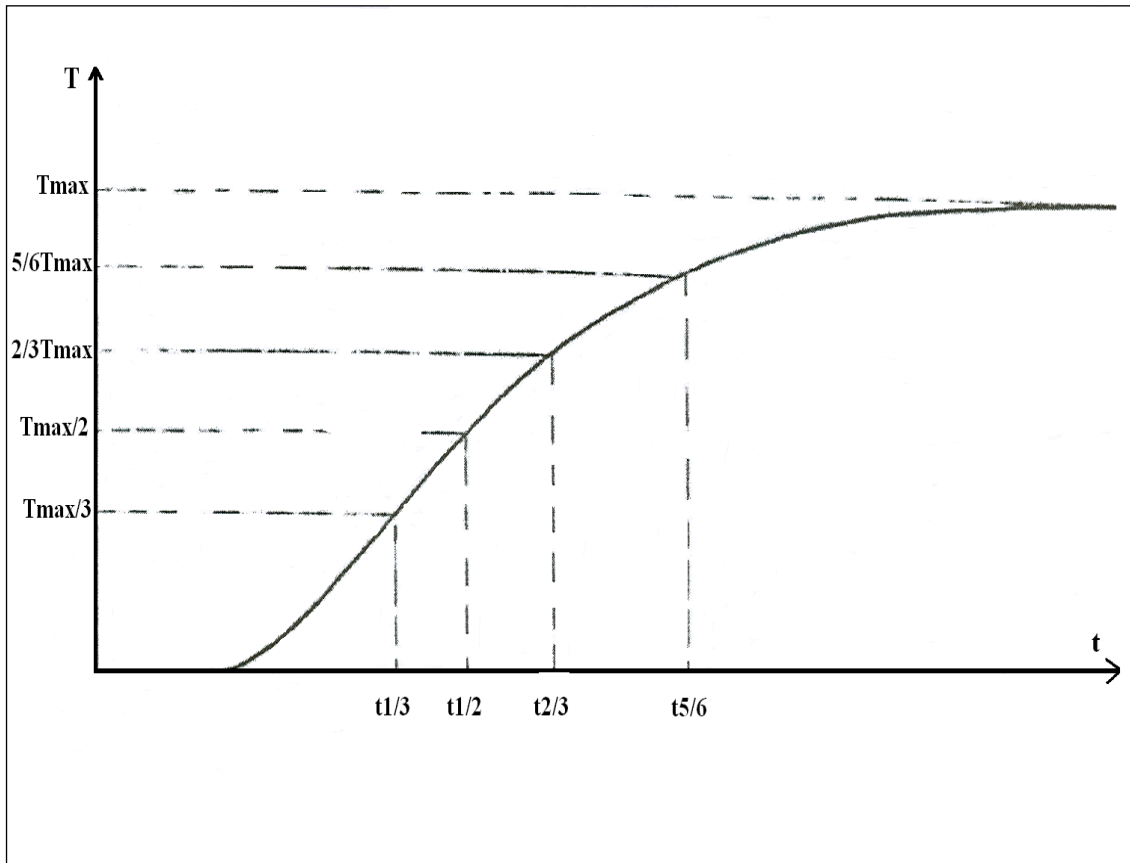


Figure 2.5 Thermogramme de mesure de la diffusivité thermique.

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} [1,15t_{5/6} - 1,25t_{2/3}] \\ \alpha_2 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} [1,15t_{5/6} - 1,25t_{1/2}] \\ \alpha_3 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} [1,15t_{5/6} - 1,25t_{1/3}] \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\alpha_{\text{exp}} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3} \quad (2.5)$$

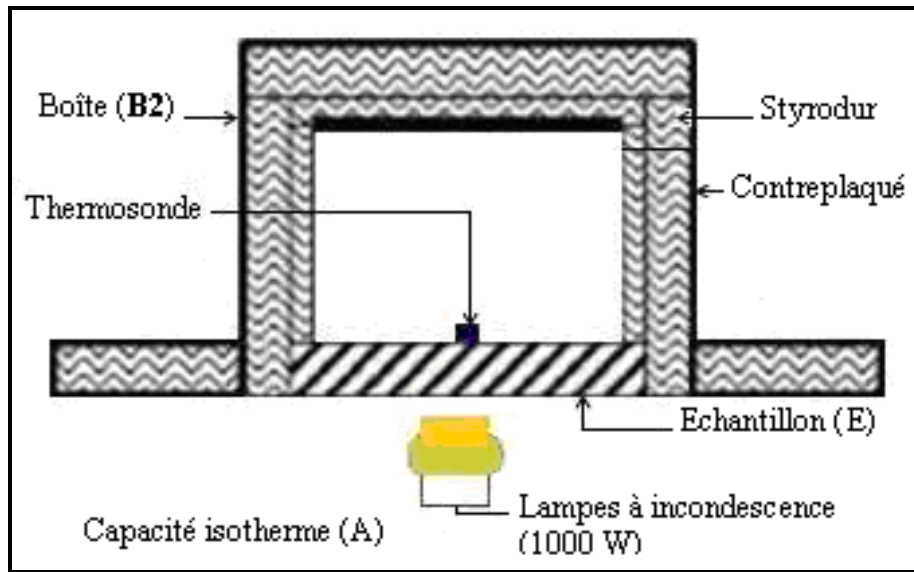


Figure 2.6 Boîte de mesure de la diffusivité thermique.

II.2.2.3 Calcul de la chaleur massique (C_p)

Connaissant la conductivité (λ), la diffusivité (α) et la masse volumique (ρ) de l'échantillon (E), la chaleur massique se déduit à partir de la formule suivante:

$$C_{p \text{ exp}} = \lambda_{\text{exp}} (\rho_{\text{exp}} \alpha_{\text{exp}})^{-1} \quad (2.6)$$

II.2.2.4 Calcul de l'effusivité thermique (E_f)

Sacadura [66] rapporte que si les deux matériaux dont l'un est soumis à une température T_1 et d'effusivité thermique E_{f1} et l'autre est soumis à une température T_2 et d'effusivité thermique E_{f2} et que ces deux matériaux sont mis en contact parfait alors, leur surface de contact aura une température d'équilibre T_{eq} donnée par:

$$T_{eq} = \frac{E_{f1}T_1 + E_{f2}T_2}{E_{f1} + E_{f2}} \quad (2.7)$$

Si E_{f1} est supérieure à E_{f2} , alors la température d'équilibre est plus proche de T_1 . L'effusivité thermique est alors la capacité d'un matériau à imposer sa température à l'autre quand ils sont en contact physique.

Après avoir mesuré expérimentalement la conductivité et la diffusivité thermique, l'effusivité se calcule à partir de la relation suivante:

$$E_{f \text{ exp}} = (\rho_{\text{exp}} \cdot C_{p \text{ exp}} \cdot \lambda_{\text{exp}})^{1/2} \quad (2.8)$$

II.3 RESULTATS ET INTERPRETATION

II.3.1 Etalonnage et fiabilité des mesures

Avant de démarrer notre campagne de mesures expérimentales, nous avons étalonné le dispositif EI700. Ainsi, les premières mesures de conductivité et de diffusivité sont faites sur un échantillon étalon de polystyrène expansé. Les valeurs trouvées sont présentées dans le tableau 2.1. Ces valeurs coïncident très bien avec celles présentées dans la littérature.

λ_{litt} [67]	λ_{exp}	α_{litt} [68]	α_{exp}
0,043	0,04357	$1.77 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$

Tableau 2.1 Valeurs expérimentales et présentées dans la littérature de la conductivité et la diffusivité thermique.

II.3.2 Mortier

La caractérisation thermophysique du mortier, qu'est un mélange de sable, d'eau et du ciment, est réalisée en faisant varier à chaque fois la granulométrie du sable et le dosage du ciment dans le mélange. Cette étude est réalisée après avoir fabriqué, au sein de notre laboratoire, des échantillons de briques parallélépipédiques de dimensions $(27 \times 27 \times 4) \text{ cm}^3$. Ces derniers sont séchés à l'air libre (figure 2.7).



Figure 2.7 Briques à base du ciment et de sable.

II.3.2.1 Effet de la granulométrie

Pour tester l'effet du diamètre de sable sur les propriétés thermophysiques du mortier nous avons choisi quatre diamètres du sable dans le ciment de dosage fixe (50%, pour le ciment et 50%, pour le sable). Le tableau 2.2 présente les différents paramètres du sable à différentes granulométries. L'illustration graphique des résultats obtenus avec ces granulométries pour la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la chaleur massique et l'effusivité thermique est présentée sur les figures (2.8, 2.9, 2.10 et 2.11) respectivement.

Diamètre du sable (mm)	Masse volumique (Kg.m^{-3})	Porosité du sable
0.75	1905,8454	0.3
1.08	1935,8782	0.39
1.25	2011,1368	0.41
2.5	2011,8435	0.48

Tableau 2.2 Caractéristiques du sable en fonction de la granulométrie.

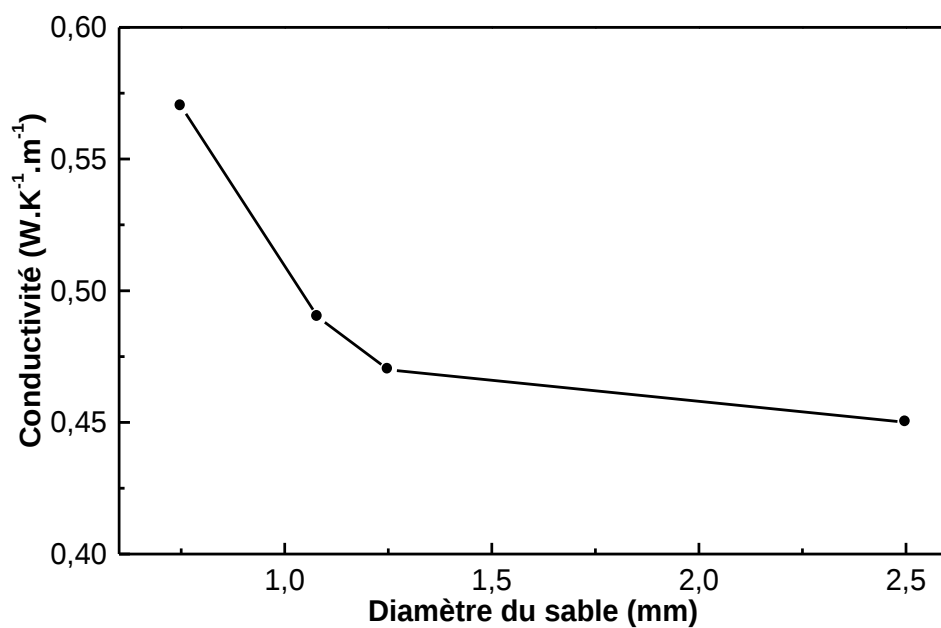


Figure 2.8 Variation de la conductivité thermique en fonction du diamètre du sable.

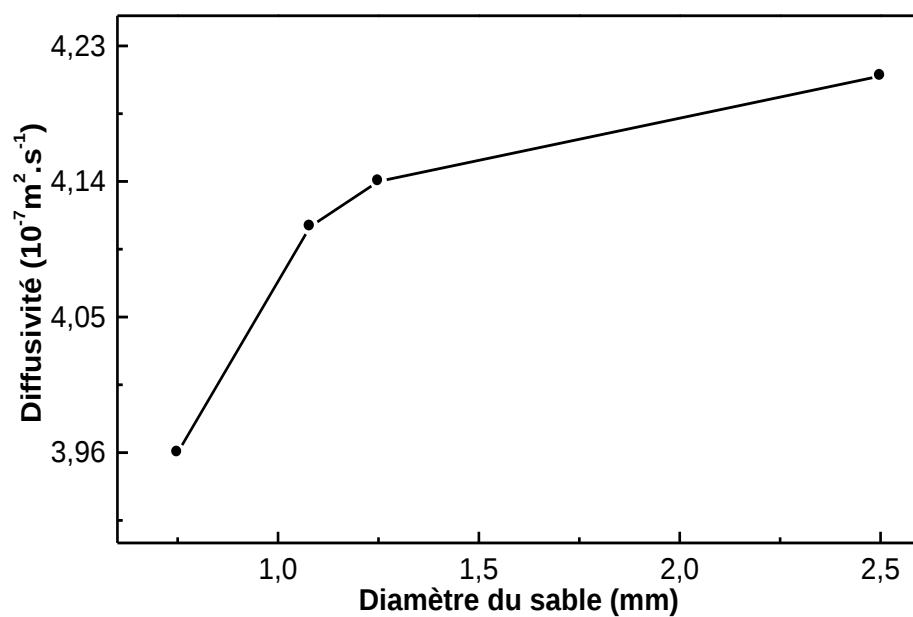


Figure 2.9 Evolution de la diffusivité thermique en fonction du diamètre du sable.

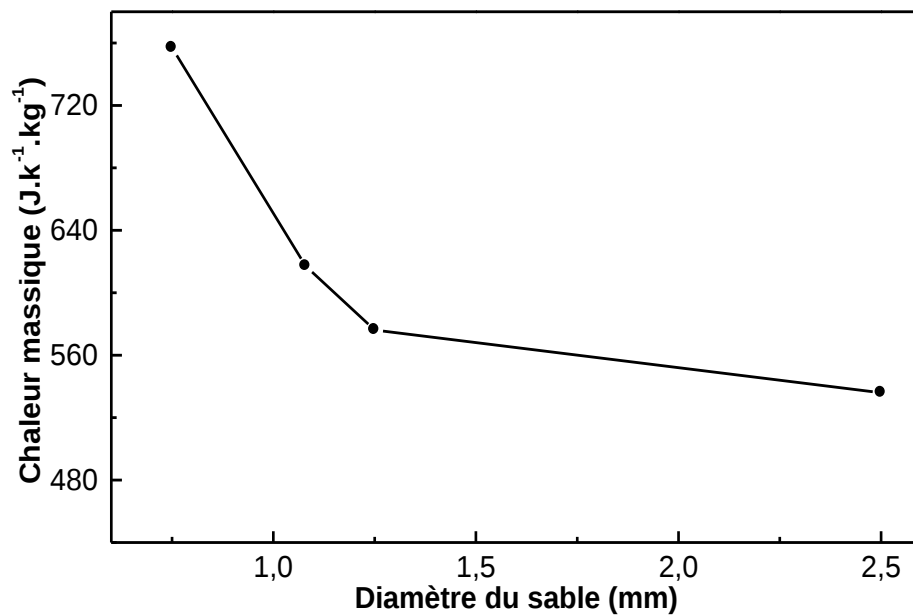


Figure 2.10 Evolution de la chaleur massique en fonction du diamètre du sable.

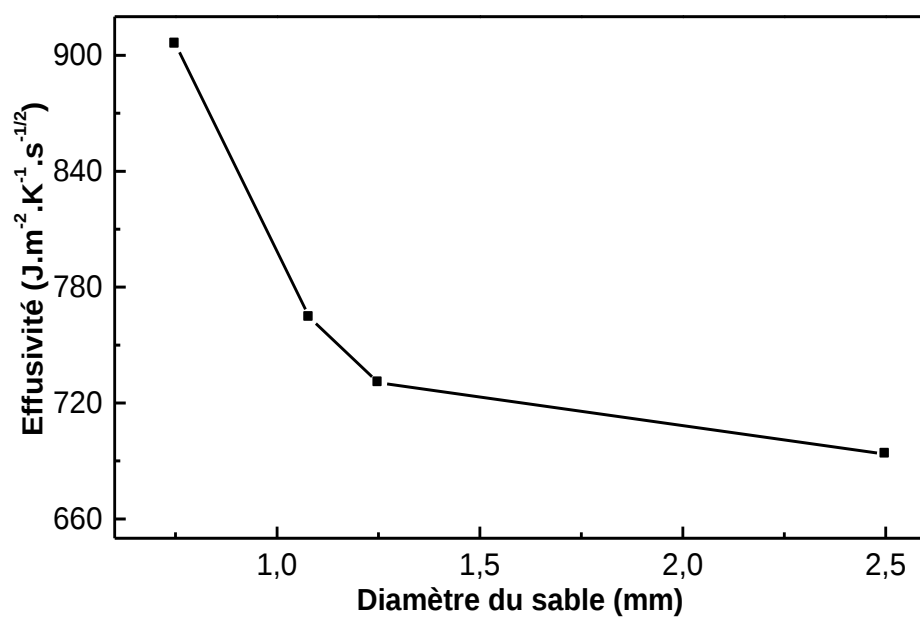


Figure 2.11 Variation de l'effusivité thermique en fonction du diamètre du sable.

Ces résultats montrent que la conductivité thermique du matériau décroît en fonction du diamètre de sable. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation du diamètre du sable s'accompagne d'une augmentation de la porosité du milieu qui engendre un taux d'air important au sein du milieu poreux qui possède une conductivité thermique inférieure à celle de la matrice solide.

De même, la chaleur massique et l'effusivité thermique suivent la même évolution que la conductivité thermique. Par contre on remarque très bien la croissance de la diffusivité thermique en fonction du diamètre du sable.

II.3.2.2 Effet du dosage

Pour avoir l'effet du ciment sur les propriétés thermophysiques du mortier nous avons fait varier le pourcentage du ciment dans le sable de porosité moyenne, ($\varepsilon = 0,39$). Le tableau 2.3 regroupe les différents paramètres de mesures. L'illustration graphique des résultats en fonction du dosage massique du ciment pour la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la chaleur massique et l'effusivité thermique est présentée sur les figures (2.12, 2.13, 2.14 et 2.15) respectivement.

% Sable	% Ciment	Masse volumique (Kg.m^{-3})	Porosité du sable
80	20	1835,180	0.39
67	33	1835,245	0.39
50	50	1935,878	0.39
33	67	1851,079	0.39

Tableau 2.3 Paramètres de mesures.

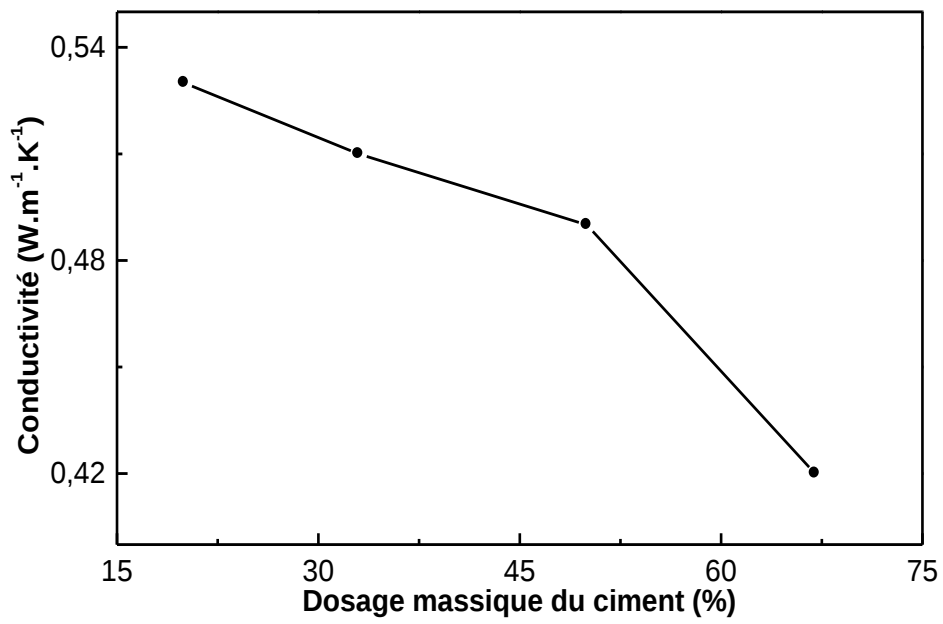


Figure 2.12 Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage du ciment dans le mélange.

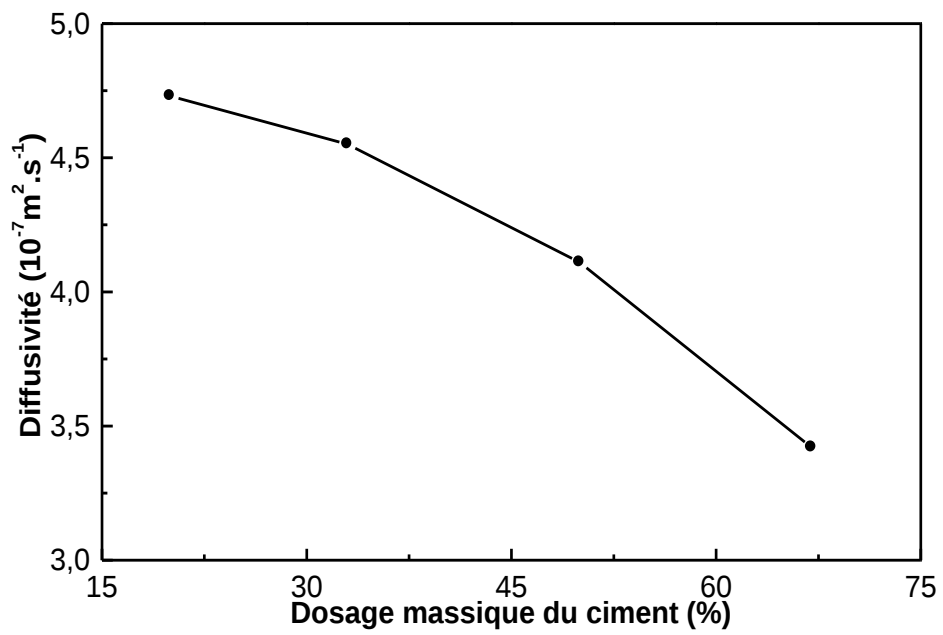


Figure 2.13 Evolution de la diffusivité thermique en fonction du dosage du ciment.

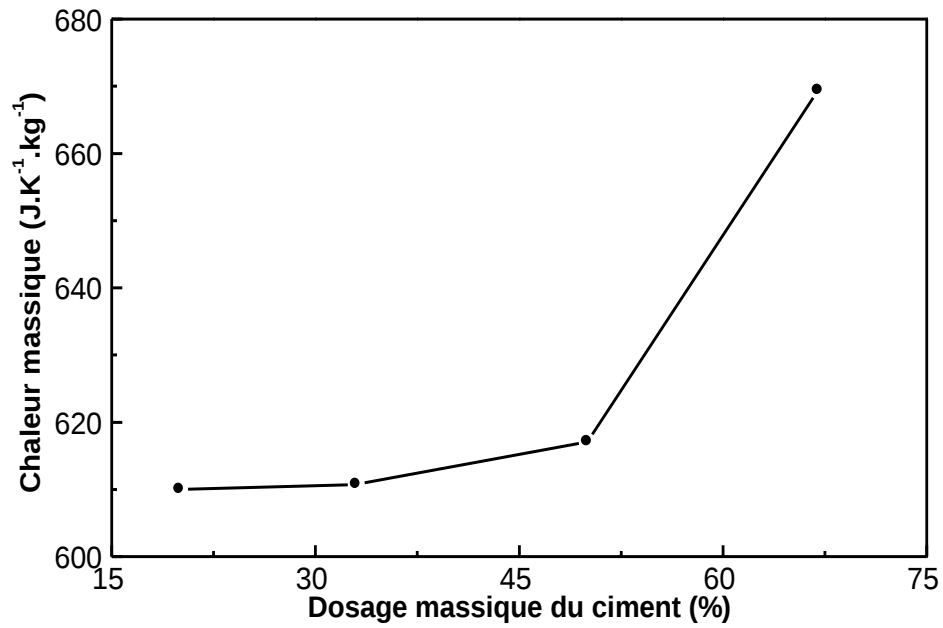


Figure 2.14 Variation de la chaleur massique en fonction du dosage du ciment dans le mélange.

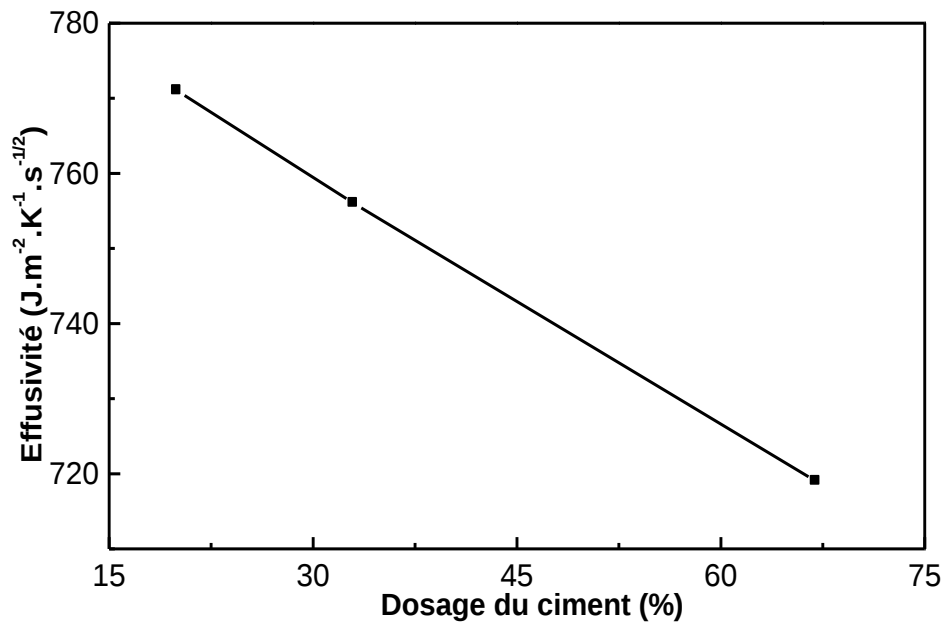


Figure 2.15 Evolution de l'effusivité thermique en fonction du dosage du ciment.

Ces résultats obtenus (figures 2.12, 2.13, 2.14 et 2.15) montrent que la conductivité thermique décroît en fonction de l'augmentation du pourcentage du ciment dans le matériau. Ceci s'explique par le fait que la conductivité thermique du ciment est inférieure à la conductivité thermique du sable. Nous avons constaté aussi, que la diffusivité thermique et l'effusivité thermique du matériau en question évoluent dans le même sens. Par contre la chaleur massique croît en fonction du dosage du ciment.

II.3.3 Sol limoneux

Dans la deuxième partie de ce travail expérimental, notre choix s'est porté sur des sols limoneux qui sont des matériaux naturels répandus sur tous les continents et en particulier dans les pays d'Afrique du Nord. Il s'agit de limon silteux, limon beige, limon calcaire et le sable qui sont prélevés sur des sites de la région d'Agadir au Maroc qui sont respectivement Dcheira, Aourir, Hay Mohammadi et Founti. Ces derniers sont repérés sur la carte (figure 2.16), ci dessous, présentant la région en question. Les résultats sont obtenus pour des teneurs en eau variant de 0% à 25 % pour le limon silteux, limon beige, limon calcaire, et de 0% à 11,11 % pour le sable. Les teneurs maximales de l'eau, de chaque matériau, sont déterminées après les avoir identifiés. Cette identification est faite dans le bureau d'étude L3E d'Agadir au Maroc, en adoptant la classification LCP (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

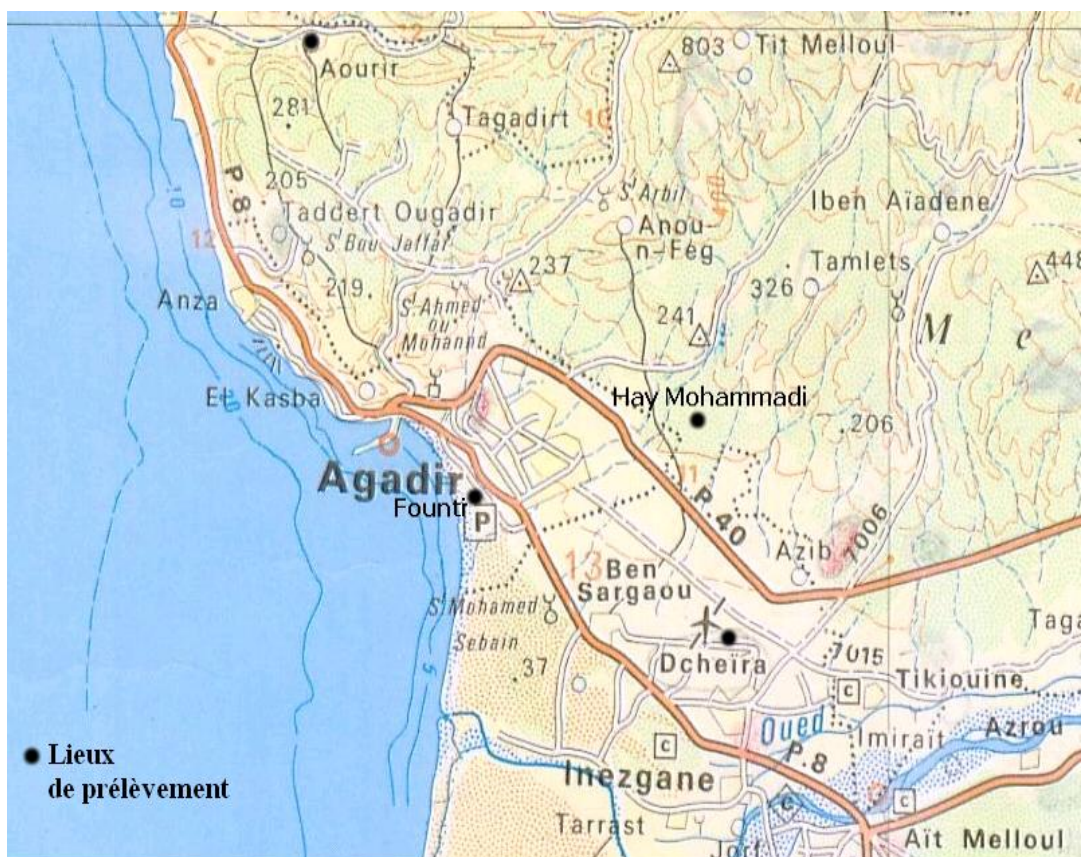


Figure 2.16 Carte représentant la région d'Agadir au Maroc.

Les matériaux à caractériser sont placés dans deux boîtes parallélépipédiques formées d'un cadre étanche en Plexiglas fermé par deux plaques de l'aluminium. Ces deux boîtes, de dimensions $(27 \times 27 \times 4) \text{ cm}^3$ (figure 2.17), sont fabriquées au sein de notre Laboratoire.

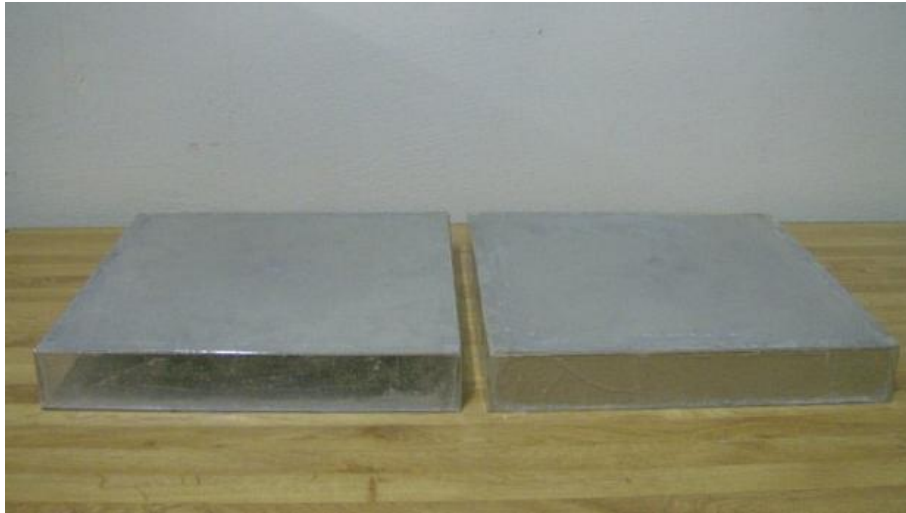


Figure 2.17 Boîtes dans lesquelles sont placés les matériaux étudiés.

II.3.3.1 Classification géotechnique des sols étudiés

La Classification d'un sol consiste à l'identifier, grâce à des mesures quantitatives, et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables. En effet, Il existe de nombreuses classifications, et dans cette étude, on a adopté celle utilisée dans les pays de l'Afrique francophone. Elle a été mise au point en France en 1965 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCP) [69]. Cette dernière appartient à la classification Américaine U.S.C.S (Unified Soil Classification System). Elle s'appuie essentiellement sur les résultats de l'analyse granulométrique, de l'équivalent de sable et des limites d'Atterberg (caractéristique de plasticité et de liquidité).

L'identification des quatre types des sols étudiés (figure 2.18) est faite dans le bureau d'étude L3E (Laboratoire d'Etudes, d'Expertises et d'Essais d'Agadir au Maroc). Les différentes grandeurs obtenues sont présentées dans le tableau 2.4 ci-dessous.



Figure 2.18 Echantillons des sols étudiés : (a) limon silteux, (b) limon beige, (c) limon calcaire et (d) le sable.

L'analyse granulométrique a montré que les sols étudiés sont constitués de grains de différentes tailles. En effet, le limon calcaire, le sable et le limon beige sont formés d'éléments de dimensions inférieures à 0.08 mm, d'éléments de dimensions comprises entre 0.08 et 2 mm et d'éléments de dimensions supérieures à 2 mm. Le limon silteux est constitué de grains de dimensions inférieures à 0.08 mm et de grains de dimensions comprises entre 0.08 et 2 mm. Ces quatre matériaux se situent à des profondeurs et occupent des couches qui sont différentes d'un matériau à l'autre (tableau 2.4).

I_p est l'indice de plasticité, indice qui mesure l'étendue du domaine de plasticité, il est défini comme étant la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité:

$$I_p = W_L - W_p \quad (2.9)$$

W_p est la limite de plasticité, elle est définie comme étant la teneur en eau du sol qui sépare l'état plastique de l'état solide.

W_L est définie également comme étant la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

Ces différentes grandeurs présentées dans le tableau 2.4 ci-dessous permettent de classer les différents types du sol étudié, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires. En effet, le limon beige et limon silteux appartiennent à la famille AP (argile peu plastique), le limon calcaire appartient à la famille GA (grave argileuse) et finalement le sable appartient à la famille Sm-SL (sable mal gradué - sable limoneux). Ces résultats nous permettent de choisir une teneur en eau maximale qui vaut 25% pour les trois premiers matériaux (limon silteux, limon beige et limon calcaire) et 11.11% pour le sable. La limite de plasticité qui vaut 27% pour le limon silteux, 20% pour le limon beige, 37% pour le limon calcaire et une limite de plasticité non défini du sable nous permettent de choisir les teneurs en eau maximales des différents matériaux étudiés, car la teneur en eau naturelle W_{nat} des sols in situ est généralement comprise entre W_L et W_p , très près de W_p [69].

Echantillon	Profondeur (m)	% >50 (mm)	% > 2 (mm)	% < 0.08 (mm)	W_p	W_L	I_p	LPC
Limon calcaire	0.6-2.2	-	42	31	37	53	16	GA
Sable	0.8-3.80	-	24	10	NP	NM	NM	SL-Sm
Limon silteux	0.00-2.80	-	-	65	27	42	15	AP
Limon beige	0.5-1.90	-	7	83	20	33	13	AP

Tableau 2.4 Caractéristiques des différents types des sols étudiés.

II.3.3.2 Masse volumique

Le tableau 2.5 présente les différentes masses volumiques des matériaux étudiés en fonction de la teneur volumique en eau. Ces masses volumiques en question sont calculées après avoir mesuré, dans le laboratoire, la masse de chaque échantillon étudié divisée par le volume de la boîte étanche (figure 2.17).

La teneur en eau s'exprime (notation ω) en %. Elle est définie comme étant le poids d'eau contenu dans un volume V rapporté à l'unité de poids du sol contenu dans le même volume. Son expression est donnée ci-dessous :

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \text{ avec } W_s \text{ est le poids du sol sec obtenu après un séjour de ce dernier dans}$$

une étuve à 105°C durant 24h et W_w est la différence entre le poids du sol initial et celui du sol sec :

$$W_w = W_I - W_s \quad (2.10)$$

Teneur volumique en eau (%)	Masse volumique (Kg.m ⁻³)			
	Limon silteux	Limon beige	Limon calcaire	Sable
0	1327,805756	1227,27273	1413,99793	1536,1355
2,56	-	-	-	1525,80134
5,26	1373,870093	1268,88918	1419,73714	1536,26105
11,11	1428,353134	1325,04017	1484,90229	1670,23574
17,64	1607,771608	1591,70899	1683,68343	-
25	1910,669192	1931,92221	1937,83359	-

Tableau 2.5 Masse volumique des différents types du sol étudié en fonction de la teneur volumique en eau.

II.3.3.3 Conductivité thermique

Les figures 2.19 et 2.20 représentent l'évolution de la conductivité thermique, en fonction de la teneur volumique en eau, des limons (silteux, beige et le calcaire) et du sable respectivement. L'observation de ces résultats obtenus montre que le comportement thermique des matériaux étudiés est fonction de la distribution de l'eau au sein de ces derniers. En effet, à l'état sec où le sol contient l'air qui est emprisonné entre les grains, le transfert de chaleur se fait essentiellement au niveau des points de contact entre les grains formant le matériau. L'augmentation de la teneur en eau qui favorise l'échappement de l'air afin qu'il le remplace (dégagement de l'air du matériau est observé, durant l'expérience, le moment de l'ajout de l'eau) entraîne la formation des ponts thermiques ou ponts de conduction de la chaleur au sein du matériau étudié et sachant que la conductivité thermique de l'eau est supérieure à celle de l'air (la conductivité de l'air est $\lambda = 0.0242 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et celle de l'eau est $\lambda = 0.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$); d'où l'augmentation de la conductivité thermique au fur et à mesure que la teneur en eau du matériau augmente.

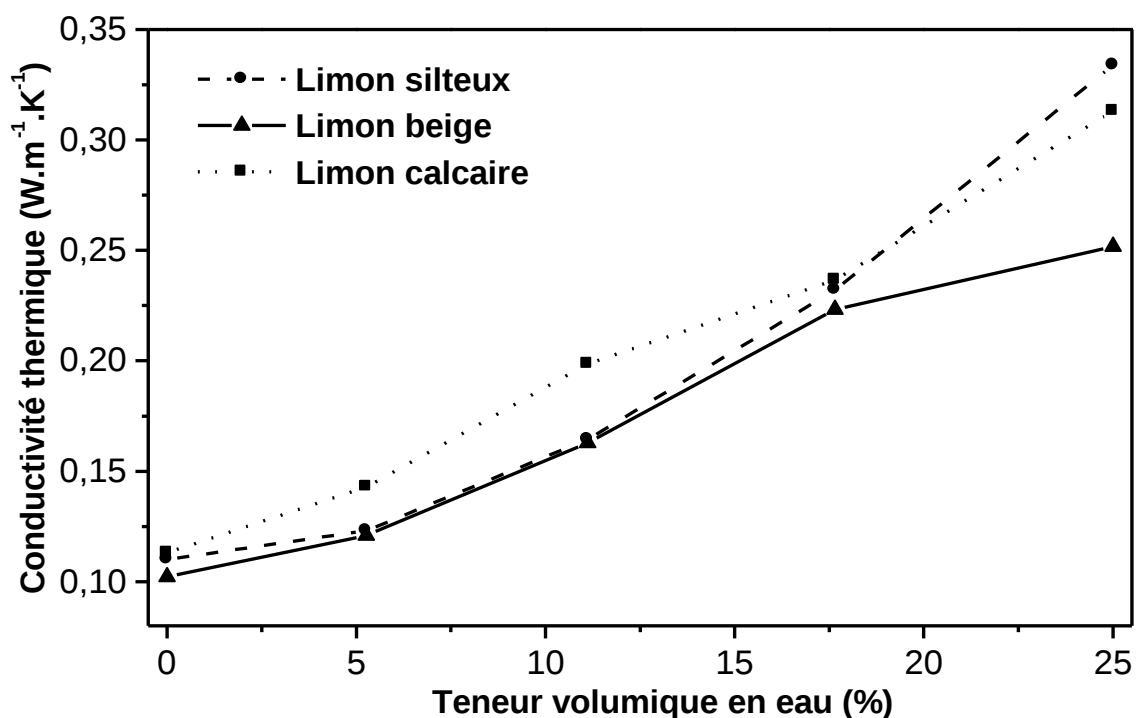


Figure 2.19 Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau de limon silteux, limon beige et limon calcaire.

Le comportement thermique du sable est dû principalement à la teneur en eau qui atteint une valeur maximale correspondant à l'état de saturation ou état de formation de chemins continus, par conséquent la conductivité thermique du même matériau tend à se stabiliser.

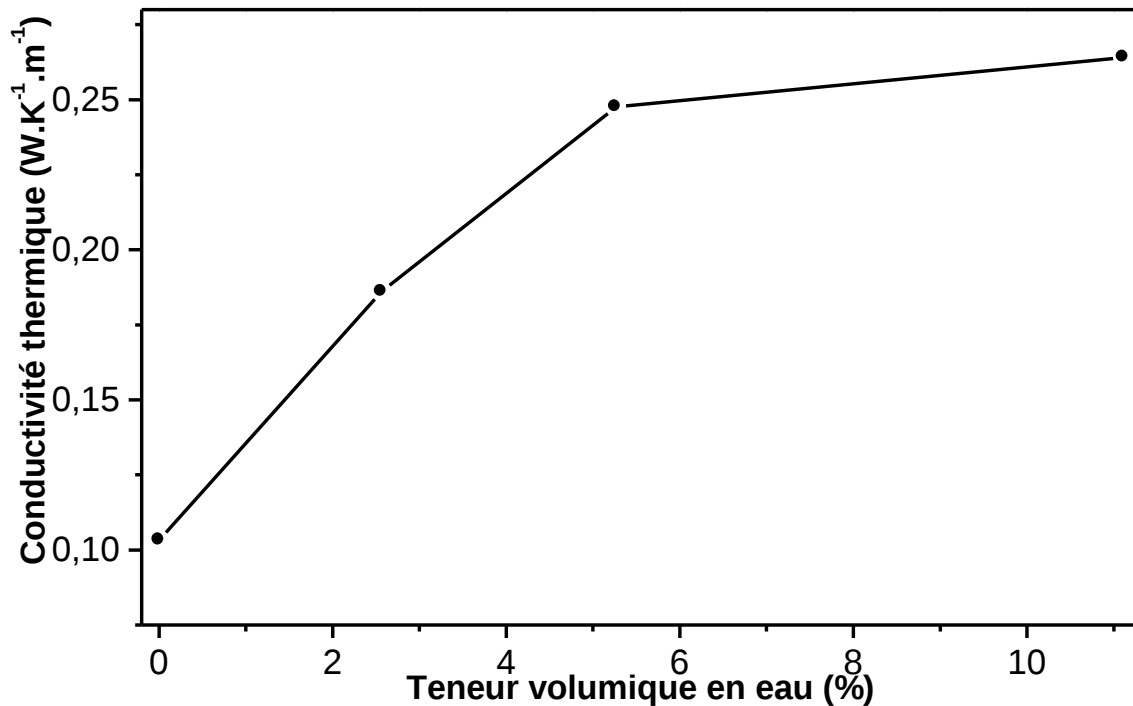


Figure 2.20 Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau du sable.

II.3.3.4 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique des limons et du sable, en fonction de la teneur volumique en eau, est représentée sur les figures 2.21 et 2.22 respectivement. Les résultats obtenus montrent que cette grandeur augmente en fonction de l'eau. La preuve de ces résultats est liée tout simplement à la diffusivité thermique qui est définie comme étant la vitesse à laquelle un matériau peut absorber l'énergie. En effet, lorsqu'on émet pendant quelques secondes une puissance de 1000 W au dessous de l'échantillon, on remarque que le temps de réponse de la thermosonde qui est placée dans l'autre face du même matériau, diminue en fonction de la teneur en eau. Ceci témoigne comment la vitesse de diffusion de l'énergie au sien de

l'échantillon en fonction de l'eau augmente. Et, on a remarqué également d'après l'expérience qu'il y a une forte relation entre les deux grandeurs thermophysiques à savoir la conductivité thermique et la diffusivité thermique, du matériau étudié, qui se mesurent simultanément. Cette forte liaison se voit sur le fait que la croissance de la conductivité thermique facilite la conduction d'énergie, par conséquent, le temps nécessaire pour que cette énergie atteigne l'autre face de l'échantillon diminue en fonction du même liquide étudié. On peut dire que l'eau facilite la diffusion de l'énergie dans le matériau, donc l'augmentation de la diffusivité thermique du milieu en question. Des résultats similaires, pour la diffusivité thermique, ont été observés sur d'autres matériaux à savoir la terre de Larache stabilisée au ciment [59].

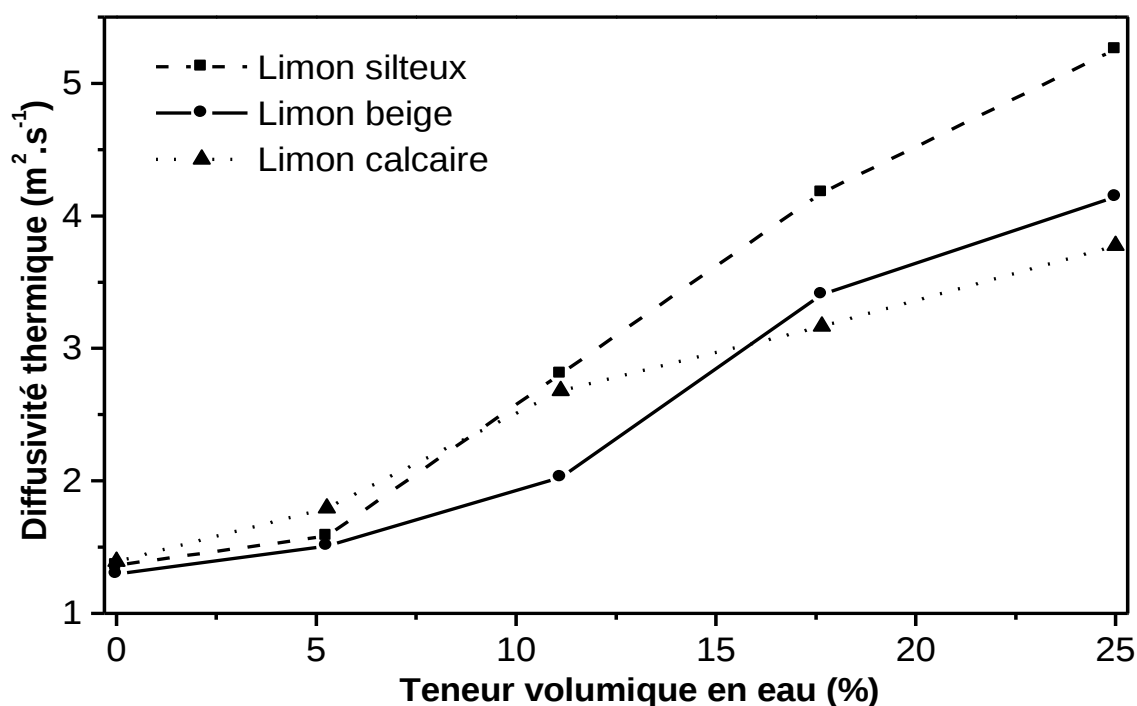


Figure 2.21 Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau de limon silteux, limon beige et limon calcaire.

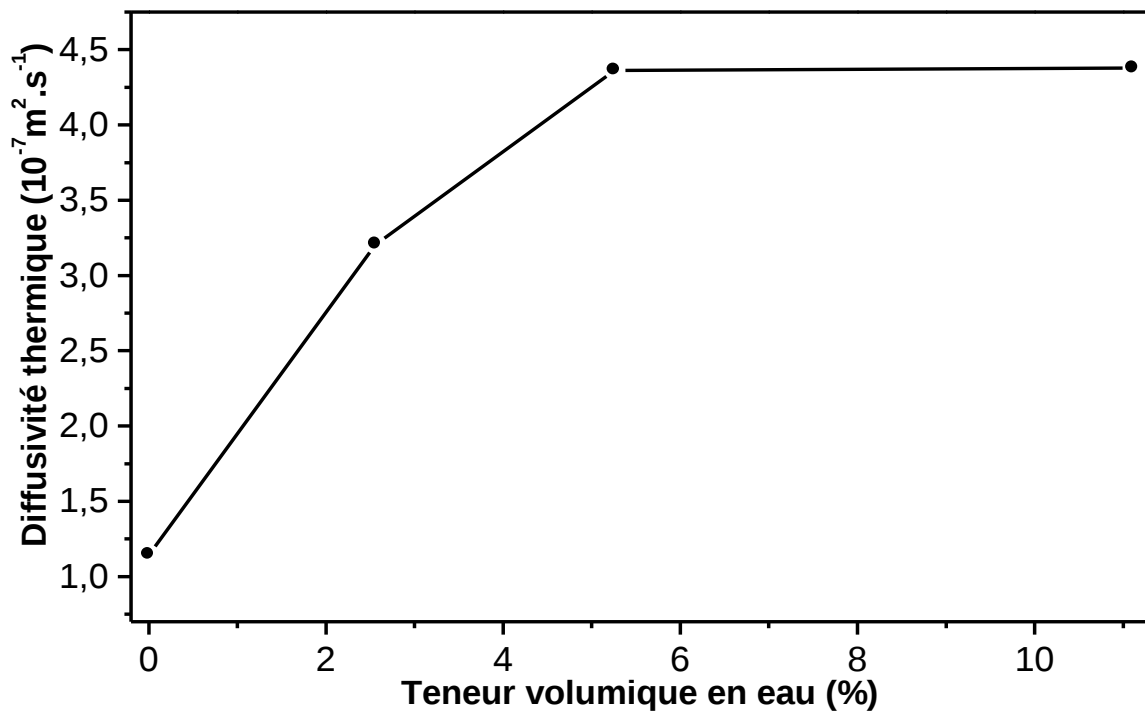


Figure 2.22 Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau du sable.

II.3.3.5 Chaleur massique

Les figures 2.23 et 2.24 représentent la diminution de la chaleur massique, en fonction de la teneur volumique en eau, des limons et le sable respectivement. Ces résultats, de la chaleur massique, obtenus peuvent s'expliquer clairement par la relation $Cp_{\text{exp}} = \frac{\lambda_{\text{exp}}}{\rho_{\text{exp}} \cdot \alpha_{\text{exp}}}$. Cette

dernière qui est inversement proportionnelle aux deux grandeurs qui augmentent en fonction de la teneur en eau, à savoir la diffusivité thermique et la masse volumique, tendent à diminuer la chaleur massique en fonction de l'eau. D'où la quantité d'énergie qu'il faut fournir à un kilogramme, du matériau en question, pour augmenter sa température d'un kelvin diminue, par conséquent la diminution de la chaleur massique (accumulation) en fonction de la teneur volumique en eau.

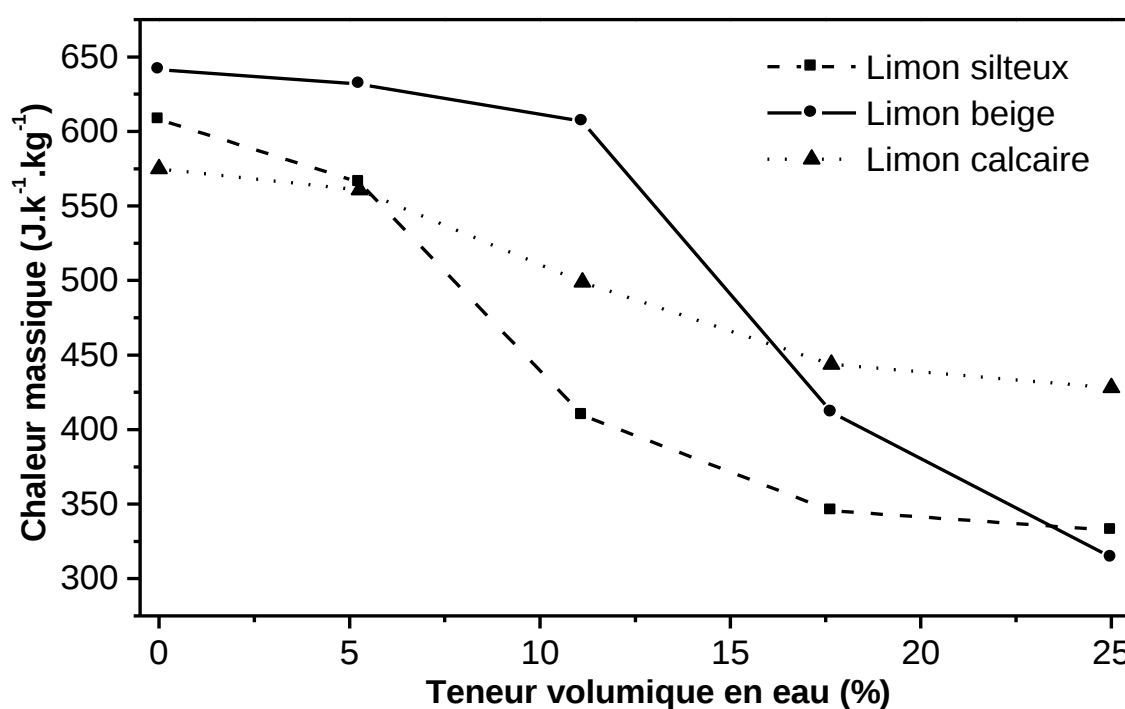


Figure 2.23 Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur volumique en eau de limon silteux, limon beige et limon calcaire.

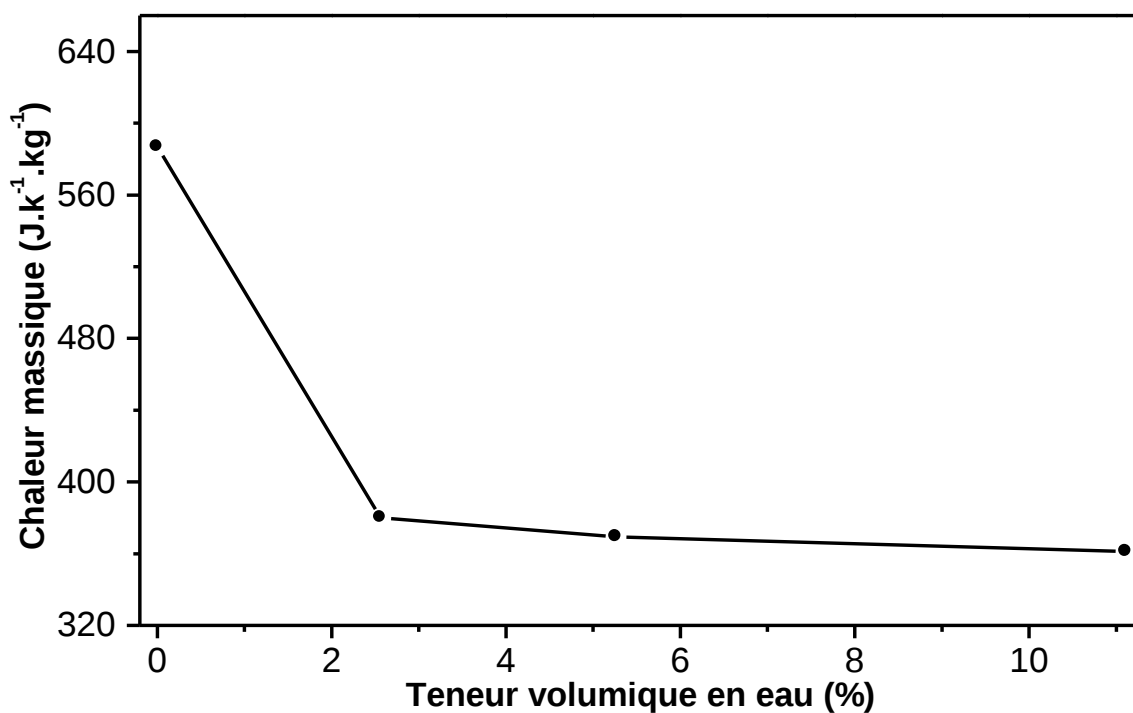


Figure 2.24 Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur volumique en eau du sable.

II.3.3.6 Effusivité thermique

La variation de l'effusivité thermique des limons et du sable en fonction de la teneur volumique en eau est représentée respectivement sur les figures 2.25 et 2.26. Cette grandeur, qui indique la vitesse à laquelle la température de surface d'un matériau varie (c'est à dire plus l'effusivité thermique est élevée, plus la température varie vite, plus le matériau en surface se réchauffe vite) est proportionnelle à la conductivité thermique et la masse volumique de l'échantillon étudié $E_{f\text{ exp}} = (\rho_{\text{exp}} \cdot C_{p\text{ exp}} \cdot \lambda_{\text{exp}})^{1/2}$. En effet, plus la conductivité thermique augmente plus la diffusion de l'énergie se diffuse facilement, par conséquent la température de surface de l'échantillon varie vite d'où l'augmentation de l'effusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau.

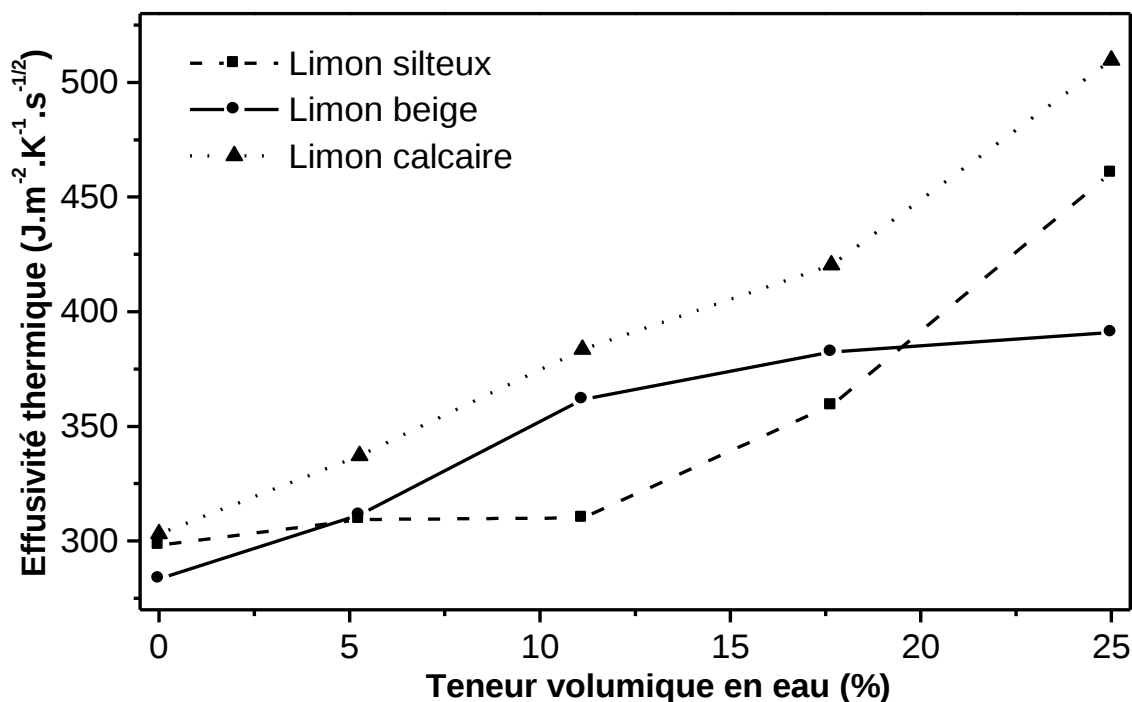


Figure 2.25 Variations de l'effusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau de limon silteux, limon beige et limon calcaire.

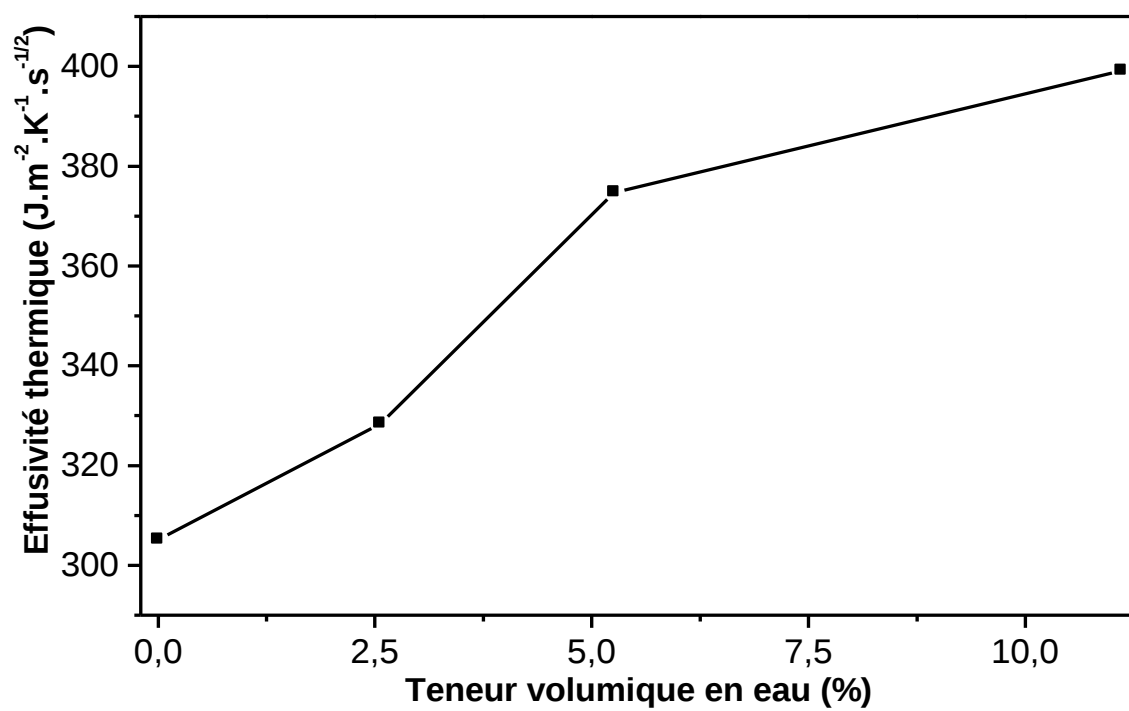


Figure 2.26 Variations de l'effusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau du sable.

II.4 CONCLUSION

A la lumière des résultats expérimentaux obtenus, par la méthode des boîtes du régime permanent et régime transitoire, on peut constater que:

Concernant la caractérisation thermophysique du mortier à base du ciment et du sable nous avons remarqué que la conductivité thermique, la chaleur massique et l'effusivité thermique décroissent en fonction de la granulométrie du sable. Par contre la diffusivité thermique évolue dans le sens opposé. En ce qui concerne le dosage massique du ciment dans le mélange, l'étude a montré que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique décroissent en fonction du pourcentage du ciment dans le matériau. Par contre la chaleur massique décroît en fonction du même matériau dans le mélange.

Concernant la caractérisation thermophysique des sols limoneux prélevés des différents sites de la région d'Agadir: limon silteux, limon beige, limon calcaire et le sable. Les résultats ont montré que les différents matériaux étudiés sont fortement influencés par le pourcentage de l'eau dans le matériau. En effet, la conductivité thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique croissent en fonction de la teneur volumique en eau. En revanche, la chaleur massique évolue dans le sens opposé aux trois grandeurs précédentes.

Les résultats, de ces sols limoneux obtenus, peuvent être considérées comme référence pour savoir les différentes propriétés thermophysiques de la majorité des sols étudiés de la région d'Agadir au Maroc. Il suffit donc de déterminer, par une procédure simple, la teneur volumique en eau du sol étudié.

L'étude expérimentale, du mortier, vaut s'étendre à la simulation numérique des transferts d'énergie entre deux types de bâtiments: complètement enterré et semi – enterré, et le sol dont les parois intérieures de ces bâtiments concernés vont être enduites à chaque fois par une couche du mortier caractérisé expérimentalement. Cette étude fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Simulation et optimisation des transferts de chaleur entre le sol et les deux types de bâtiments: complètement enterré et semi-enterré

III.1 INTRODUCTION ET POSITION DU PROBLEME

Dans le présent chapitre, nous avons présenté une étude des transferts de chaleur entre deux types de bâtiments: complètement enterré et semi - enterré, et le sol en configuration bidimensionnelle. Les parois de la cellule bidimensionnelle étudiée sont enduites à chaque fois par une couche du mortier à base du ciment et de sable avec différentes granulométries du sable et pour différents dosages du ciment. Les équations régissant la conduction d'énergie dans le sol et les parois solides du bâtiment sont résolues par la méthode implicite aux

directions alternées (ADI). L'objectif de cette étude est la détermination de l'effet des caractéristiques du mortier sur les transferts thermiques au sein des deux bâtiments. Les propriétés thermophysiques de ce matériau à savoir : la conductivité thermique la diffusivité thermique, la chaleur massique ainsi que l'effusivité thermique ont été caractérisées expérimentalement par la cellule EI700. Le programme de calcul est d'abord testé sur le cas d'un bâtiment dont les parois intérieures sont dépourvues d'une couche du mortier, les résultats sont confrontés avec ceux obtenus en régime permanent et en régime transitoire présentés dans la littérature.

III.2 METHODE DE RESOLUTION

L'équation gouvernant la conduction en deux dimensions et en régime variable dans le milieu opaque de la cellule et le sol, est déduite de la loi de Fourier suivant :

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.1)$$

Avec:

T , est la température;

ρ , est la masse volumique du milieu opaque;

C_p , sa chaleur spécifique;

λ , est la conductivité thermique de ce milieu.

Cette équation est discrétisée par la méthode des différences finies en utilisant le schéma ADI. Cette méthode consiste à écrire au cours du premier demi-pas du temps $(n+1/2)$ les équations d'évolution de manière implicite dans la direction x , les autres variables apparaissent explicitement. Au cours du second demi-pas du temps $(n+1)$, l'intégration se fait en inversant la direction des termes implicites pour obtenir finalement les fonctions à l'instant $(n+1)$. Pour chaque direction d'intégration, nous obtenons un système tridiagonal dont la résolution est faite par l'algorithme de THOMAS.

III.2.1 Discrétisation des équations de conduction

III.2.1.1 Température implicite en x:

Dans la première étape, les équations de conduction sont discrétisées en utilisant le schéma implicite pour les températures suivant la direction x ; donc le bilan thermique au nœud (i, j) du maillage s'écrit:

$$C_{i,j} \frac{T_{i,j}^* - T_{i,j}^n}{\Delta t / 2} = \frac{T_{i-1,j}^* - T_{i,j}^*}{R_{i,i-1}} + \frac{T_{i+1,j}^* - T_{i,j}^*}{R_{i,i+1}} + \frac{T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n}{R_{j,j-1}} + \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n}{R_{j,j+1}} \quad (3.2)$$

Où $T_{i,j}^n$ représente la valeur de la température à l'instant n , $T_{i,j}^*$ la valeur intermédiaire à l'instant $(n+1/2)$ qui va servir au calcul de la température à l'instant ultérieur $(n+1)$ et Δt est le demi-pas de temps.

$C_{i,j}$ est la capacité thermique de l'élément de volume situé au nœud (i, j) . $R_{i-1,j}$, $R_{i+1,j}$, $R_{i,j-1}$ et $R_{i,j+1}$ sont les résistances thermiques situées respectivement aux nœuds $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$ et $(i, j+1)$.

Après réarrangement, on aboutit à une équation implicite de la forme:

$$A_{i,j}^1 T_{i-1,j}^* + B_{i,j}^1 T_{i,j}^* + C_{i,j}^1 T_{i+1,j}^* = D_{i,j}^1 \quad (3.3)$$

En écrivant cette équation pour tous les nœuds du maillage, on obtient un système tridiagonal dont la résolution se fait en utilisant l'algorithme de THOMAS.

III.2.1.2 Température implicite en y:

Dans la seconde étape, les équations sont discrétisées en utilisant le schéma implicite pour les températures suivant la direction y ; donc le bilan thermique au nœud (i, j) du maillage s'écrit:

$$C_{i,j} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^*}{\Delta t / 2} = \frac{T_{i-1,j}^* - T_{i,j}^*}{R_{i,i-1}} + \frac{T_{i+1,j}^* - T_{i,j}^*}{R_{i,i+1}} + \frac{T_{i,j-1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{R_{j,j-1}} + \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{R_{j,j+1}} \quad (3.4)$$

Après réarrangement, on obtient:

$$A_{i,j}^2 T_{i,j-1}^{n+1} + B_{i,j}^2 T_{i,j}^{n+1} + C_{i,j}^2 T_{i,j+1}^{n+1} = D_{i,j}^2 \quad (3.5)$$

Où $T_{i,j}^{n+1}$ représente la valeur de la température à l'instant $(n+1)$.

De même, en écrivant cette équation (3.5) pour tous les nœuds du maillage, on obtient un système tridiagonal dont la résolution se fait en utilisant l'algorithme de THOMAS.

III.3 CONFIGURATION DES DEUX TYPES DE BATIMENTS: COMPLETEMENT ENTERRE ET SEMI – ENTERRE

Dans le présent paragraphe, nous avons présenté la configuration d'un bâtiment complètement enterré et celle d'un bâtiment semi - enterré en deux dimensions.

III.3.1 Configuration du bâtiment complètement enterré

La configuration bidimensionnelle étudiée est représentée sur la figure 3.1. Il s'agit d'une cavité enterrée dont les dimensions sont similaires à celles utilisées en construction locale au Maroc. Cette cavité comprend un plafond d'épaisseur $e_t = 0.4$ m situé à la profondeur $b = 0.6$ m au-dessous de la surface du sol, un plancher bas d'épaisseur $e_p = 0.4$ m, de largeur $2(a + e_M + e_m) = 6$ m à la profondeur $(c + e_m) = 4$ m et un mur de hauteur $H_M = 3$ m et d'épaisseur $e_M = 0.4$ m. Les parois intérieures de la cellule sont colmatées par une couche d'enduit d'épaisseur $e_m = 2.5$ cm. La distance qui délimite la région perturbée par le local est comprise entre $-L$ et L avec $L = 9$ m.

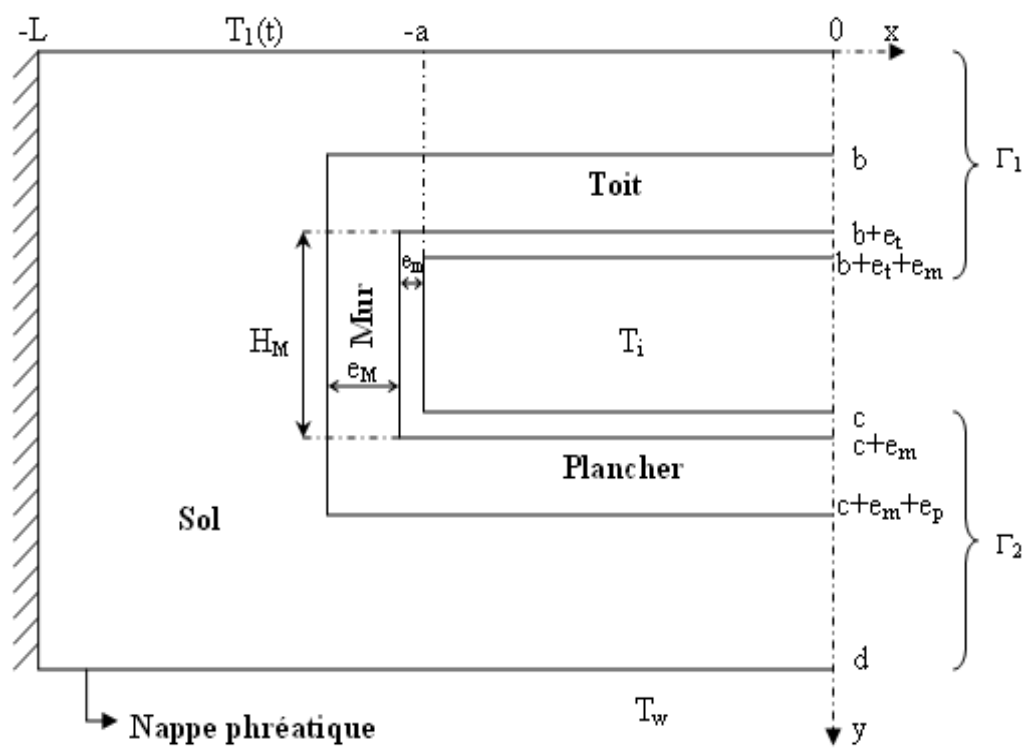


Figure 3.1 Configuration de la cellule enterrée étudiée.

III.3.2 Configuration du bâtiment semi - enterré

La configuration de ce bâtiment étudié est représentée sur la figure 3.2. Il s'agit d'une cavité semi - enterrée ayant un plancher bas d'épaisseur $e_p = 0.4 \text{ m}$ et de largeur $2(a + e_M + e_m) = 6 \text{ m}$. La partie du mur située au-dessous de la surface du sol est de hauteur $H_M = 2.4 \text{ m}$ et d'épaisseur $e_M = 0.4 \text{ m}$. Les parois intérieures de la cellule sont colmatées par une couche d'enduit d'épaisseur $e_m = 2.5 \text{ cm}$. La distance qui délimite la région perturbée par le local est comprise entre $-L$ et L avec $L = 9 \text{ m}$.

Dans les deux cas des configurations étudiées, le coefficient d'échange global h est égal à $8.30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Le sol considéré est un sol homogène d'humidité relative moyenne et de propriétés thermophysiques $\lambda = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\alpha = 6.45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En raison de la symétrie du problème, juste la moitié du domaine est considérée. La simulation par la méthode ADI (méthode Implicite aux Directions Alternées) utilisée est effectuée en régime variable en considérant deux types de climat de Marrakech:

a) Climat chaud caractérisé par la température superficielle du sol donnée par la formule suivante:

$$T_1(t) = 20 + 7 \cos(\omega t) (\text{°C}) \quad (3.6)$$

Avec ω ($\omega = 1.992 \cdot 10^{-7} \text{ rad.s}^{-1}$) représente la fréquence angulaire du cycle annuel. A la profondeur $d = 13 \text{ m}$ au dessous de la surface du sol, on suppose l'existence d'une nappe phréatique à la température $T_w = 20 \text{ °C}$.

b) Climat froid caractérisé également par la température superficielle du sol égale à :

$$T_1(t) = 8 + 7 \cos(\omega t) (\text{°C}) \quad (3.7)$$

On suppose l'existence d'une nappe phréatique à la température $T_w = 10 \text{ °C}$, mais cette fois-ci à une profondeur $d = 6 \text{ m}$ de la surface de la terre.

Dans les deux types de climat, la température de l'air du local est prise constante et égale à $T_i = 20 \text{ °C}$.

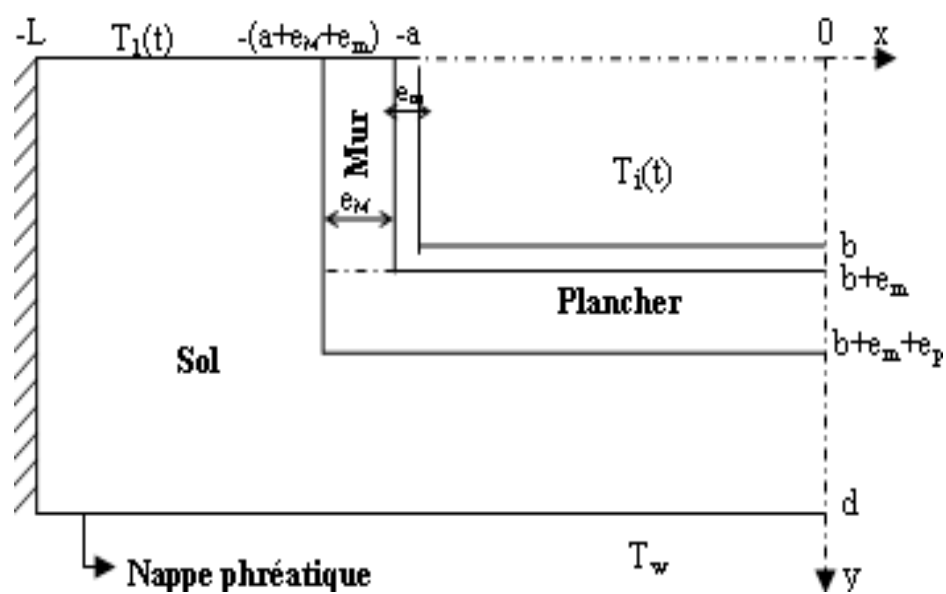


Figure 3.2 Configuration de la cellule semi-enterrée étudiée.

III.4 FORMULATION MATHÉMATIQUE ET CONDITIONS AUX LIMITES

L'équation gouvernant la conduction dans le sol, dans les parois opaques des deux cellules étudiées ainsi que la couche du mortier est donnée par:

$$\frac{\partial T_K}{\partial t}(x, y, t) = \alpha_K \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, y, t) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}(x, y, t) \right] \quad (3.8)$$

Où α_K dépend du milieu considéré. Les conditions aux limites, pour les deux configurations étudiées, sont données comme suit:

III.4.1 Bâtiment complètement enterré

Les conditions aux limites de notre configuration sont:

$$\left. \frac{\partial T_S}{\partial x}(x, y, t) \right|_{x=-L} = 0 \text{ pour } 0 \leq y \leq d \text{ et } \left. \frac{\partial T}{\partial x}(x, y, t) \right|_{x=0} = 0 \text{ sur } \Gamma_1 \text{ et } \Gamma_2$$

$$T_S(x, 0, t) = T_1(t) \text{ et } T_S(x, d, t) = T_w \text{ pour } -L \leq x \leq 0$$

$$-\lambda_m \left. \frac{\partial T_m}{\partial y}(x, y, t) \right|_{y=b+e_t+e_m} = h(T_m(x, b+e_t+e_m, t) - T_i) \text{ pour } -a \leq x \leq 0$$

$$-\lambda_m \left. \frac{\partial T_m}{\partial x}(x, y, t) \right|_{x=-a} = h(T_m(-a, y, t) - T_i) \text{ pour } b+e_t+e_m \leq y \leq c$$

$$-\lambda_m \left. \frac{\partial T_m}{\partial y}(x, y, t) \right|_{y=c} = h(T_m(x, c, t) - T_i) \text{ pour } -a \leq x \leq 0$$

$$T_t(x, b, t) = T_S(x, b, t) \text{ pour } -(a+e_M+e_m) \leq x \leq 0$$

$$T_M(-(a+e_M+e_m), y, t) = T_S(-(a+e_M+e_m), y, t) \text{ pour } b+e_t \leq y \leq c+e_m$$

$$T_P(x, c+e_m+e_p, t) = T_S(x, c+e_m+e_p, t) \text{ pour } -(a+e_M+e_m) \leq x \leq 0$$

$$T_t(-(a+e_M+e_m), y, t) = T_S(-(a+e_M+e_m), y, t) \text{ pour } b \leq y \leq b+e_t$$

$$T_P(-(a+e_M+e_m), y, t) = T_S(-(a+e_M+e_m), y, t) \text{ pour } c+e_m \leq y \leq c+e_m+e_p$$

$$\lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial y}(x, y, t) \Big|_{y=b} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y}(x, y, t) \Big|_{y=b} \quad \text{pour } -(a+e_M+e_m) \leq x \leq 0$$

$$\lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} \quad \text{pour } b+e_t \leq y \leq c+e_m$$

$$\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y}(x, y, t) \Big|_{y=(c+e_m+e_p)} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y}(x, y, t) \Big|_{y=(c+e_m+e_p)} \quad \text{pour } -(a+e_M+e_m) \leq x \leq 0$$

$$\lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} \quad \text{pour } b \leq y \leq b+e_t$$

$$\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} \quad \text{pour } c+e_m \leq y \leq c+e_m+e_p$$

III.4.2 Bâtiment semi - enterré

Les conditions aux limites du bâtiment semi – enterré sont données comme suit:

$$\frac{\partial T_s}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-L} = 0 \quad \text{pour } 0 \leq y \leq d$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=0} = 0 \quad \text{pour } b \leq y \leq d$$

$$T_s(x, 0, t) = T_1(t) \quad \text{pour } -L \leq x \leq -a$$

$$T_s(x, d, t) = T_w \quad \text{pour } -L \leq x \leq 0$$

$$-\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{y=b} = h(T_m(x, b_m, t) - T_i) \quad \text{pour } -a \leq x \leq 0$$

$$-\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-a} = h(T_m(-a, y, t) - T_i) \quad \text{pour } 0 \leq y \leq b$$

$$T_M(-(a+e_M+e_m), y, t) = T_s(-(a+e_M+e_m), y, t) \quad \text{pour } 0 \leq y \leq b+e_m$$

$$T_p(-(a+e_M+e_m), y, t) = T_s(-(a+e_M+e_m), y, t) \quad \text{pour } b+e_m \leq y \leq b+e_m+e_p$$

$$T_p(x, b + e_m + e_p, t) = T_s(x, (b + e_m + e_p), t) \text{ pour } -(a + e_M + e_m) \leq x \leq 0$$

$$\lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} \text{ pour } 0 \leq y \leq b + e_m$$

$$\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{x=-(a+e_M+e_m)} \text{ pour } b + e_m \leq y \leq b + e_m + e_p$$

$$\lambda_p \frac{\partial T_M}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{y=(b+e_M+e_p)} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(x, y, t) \Big|_{y=(b+e_M+e_p)} \text{ pour } -(a + e_M + e_m) \leq x \leq 0$$

Où λ_s , λ_t , λ_M , λ_p et λ_m sont respectivement les conductivités thermiques du sol, du toit, du mûr, du plancher et du mortier.

Pour les conditions initiales, elles ont été choisies de telle façon que leurs effets soient éliminés le plus rapidement possible pendant la simulation numérique.

III.4.3 Flux total échangé entre les deux bâtiments et le sol

Le maillage adopté dans la discrétisation spatiale est non uniforme. Le pas d'espace varie entre 0.025m et 1m ; par contre le pas de temps est fixé à une durée d'une journée ($\Delta t = 86400s$). Ainsi nous désignons, dans le cas d'un bâtiment complètement enterré, par NX_1 , NX_2 , NX_3 et NX_4 les nombres de nœuds situés, suivant la direction x , respectivement dans les intervalles: $[-L, -(a + e_m + e_M)]$, $[-(a + e_m + e_M), -(a + e_m)]$, $[-(a + e_m), -a]$ et $[-a, 0]$. Le nombre total de nœuds dans cette direction est $NX = NX_1 + NX_2 + NX_3 + NX_4$. Nous désignons également par $NY_1, NY_2, NY_3, NY_4, NY_5, NY_6$ et NY_7 les nombres de nœuds situés suivant la direction y , respectivement dans les intervalles: $[c + e_m + e_p, d]$, $[c + e_m, c + e_m + e_p]$, $[c, c + e_m]$, $[b + e_t + e_m, c]$, $[b + e_t, b + e_t + e_m]$, $[b, b + e_t]$ et $[0, b]$. Le nombre total de nœuds dans cette direction est: $NY = NY_1 + NY_2 + NY_3 + NY_4 + NY_5 + NY_6 + NY_7$. Le flux total échangé entre le bâtiment et le sol est la somme des flux de chaleur totaux traversant le toit, le plancher et le mur. Ces derniers sont donnés par les formules suivantes:

$$\begin{cases} \varphi_{mt} = \sum_{K=NX_3+1}^{NX} h S_{mtK} (T_i - T_{mtK}) \\ \varphi_{mM} = \sum_{K=NY_3+1}^{NY_4} h S_{mMK} (T_i - T_{mMK}) \\ \varphi_{mp} = \sum_{K=NX_3+1}^{NX} h S_{mpK} (T_i - T_{mpK}) \end{cases} \quad (3.9)$$

Avec:

S_{mtK} et T_{mtK} sont respectivement l'élément de surface entourant $mtK^{ème}$ nœud de la couche du mortier colmaté sur le toit et la température située dans le même nœud.

S_{mMK} et T_{mMK} sont respectivement l'élément de surface entourant $mMK^{ème}$ nœud de la couche du mortier colmaté sur le mur et la température située dans le même nœud.

S_{mpK} et T_{mpK} sont respectivement l'élément de surface entourant $mpK^{ème}$ nœud de la couche du mortier colmaté sur le plancher et la température située dans le même nœud.

Le flux total par unité de longueur obtenu est le suivant:

$$\varphi_{Tot} = 2\varphi_{mM} + \varphi_{mp} + \varphi_{mt} \quad (3.10)$$

Dans le cas d'un bâtiment semi - enterré, nous désignons par NX_1 , NX_2 , NX_3 et NX_4 les nombres de nœuds situés, suivant la direction x , respectivement dans les intervalles: $[-L, -(a+e_m+e_M)]$, $[-(a+e_m+e_M), -(a+e_m)]$, $[-(a+e_m), -a]$ et $[-a, 0]$. Le nombre total de nœuds dans cette direction est $NX = NX_1 + NX_2 + NX_3 + NX_4$. Nous désignons également par NY_1 , NY_2 , NY_3 et NY_4 les nombres de nœuds situés suivant la direction y , respectivement dans les intervalles: $[b+e_m+e_p, d]$, $[b+e_m, b+e_m+e_p]$, $[b, b+e_m]$ et

$[0, b]$. Le nombre total de nœuds dans cette direction est: $NY = NY_1 + NY_2 + NY_3 + NY_4$. Le flux total échangé entre le bâtiment et le sol est la somme des flux de chaleur totaux traversant le plancher et le mur. Ces derniers sont donnés par les formules suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{mM} = \sum_{K=NY-NY_4+1}^{NY} hS_{mMK} (T_i - T_{mMK}) \\ \varphi_{mp} = \sum_{K=NX-NX_4+1}^{NX} hS_{mpK} (T_i - T_{mpK}) \end{array} \right. \quad (3.11)$$

De même:

S_{mMK} et T_{mMK} sont respectivement l'élément de surface entourant $mMK^{ème}$ nœud de la couche du mortier colmaté sur le mur et la température située dans le même nœud.

S_{mpK} et T_{mpK} sont respectivement l'élément de surface entourant $mpK^{ème}$ nœud de la couche du mortier colmaté sur le plancher et la température située dans le même nœud.

Le flux total par unité de longueur échangé entre le bâtiment semi - enterré et le sol est le suivant:

$$\varphi_{Tot} = 2\varphi_{mM} + \varphi_{mp} \quad (3.12)$$

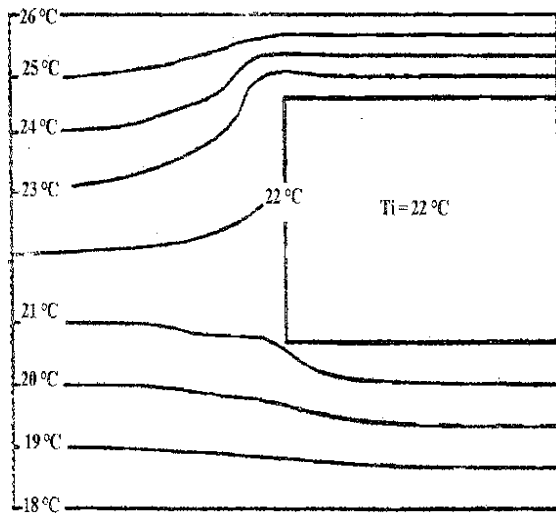
III.5 RESULTATS ET INTERPRETATION

III.5.1 Validation du modèle

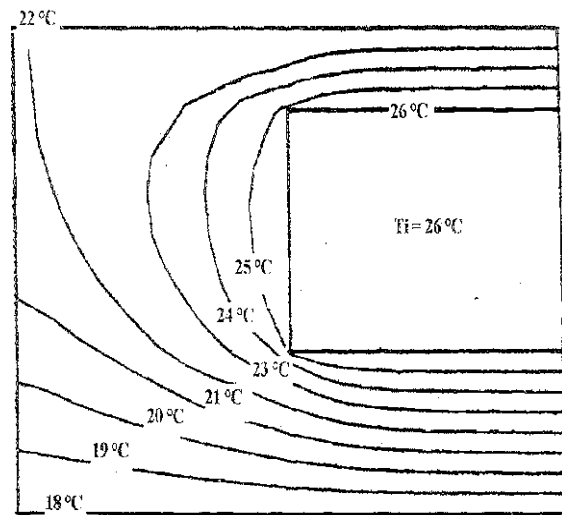
Nous avons confirmé la validité de notre code de simulation développé en utilisant le schéma ADI du régime permanent et régime transitoire. Nous avons supposé que les différentes parois du bâtiment dépourvues d'une couche d'enduit ont les mêmes propriétés thermophysiques (λ, α, h).

a) Pour le régime permanent, nous avons porté sur la figure 3.3 les distributions de température au sein du système «bâtiment enterré - sol» calculées par la méthode ADI et celles obtenues analytiquement par *Krarti* [16] en appliquant la technique ITPE et *Amjad* [17] pour: $T_i = 22^\circ\text{C}$ et $T(t) = 26^\circ\text{C}$ (figure 3.3 (a)) et pour: $T_i = 26^\circ\text{C}$ et $T(t) = 22^\circ\text{C}$ (figure 3.3 (b)); avec $T_w = 18^\circ\text{C}$, $\lambda = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\alpha = 6.45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ et $h = 8.30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. L'examen de ces figures montre que les profils de température calculés par notre code sont similaires à ceux obtenus par *Krarti* [16] et *Amjad* [17].

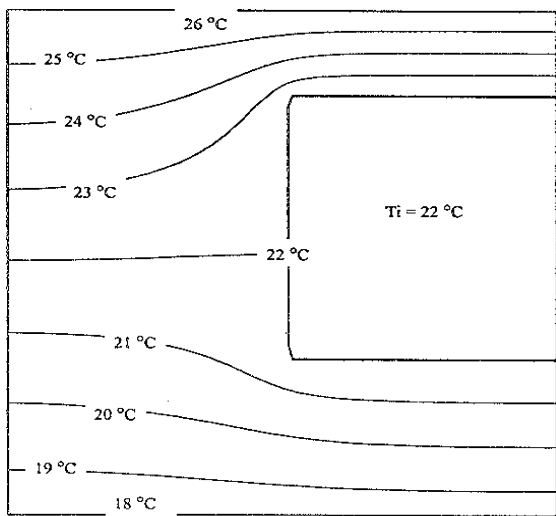
b) Dans le cas du régime périodique établi, les densités de flux sont données par unités de longueur dans la direction supposée infinie et perpendiculaire à la configuration bidimensionnelle étudiée. Pour $\lambda = 1.73 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\alpha = 9.30 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; la figure 3.4 (a) représente les variations annuelles des flux moyens mensuels perdus par la cavité en climat froid. Nous pouvons constater qu'il y a une bonne concordance entre les résultats issus de notre code et ceux obtenus par *S.Amjad* [12]. En effet, l'écart relatif ne dépasse pas 5%. De même, la figure 3.4 (b) représente les variations annuelles des flux moyens mensuels échangés entre la cavité et le sol en climat chaud. Cette figure donne un bon accord entre les résultats illustrés par notre code et ceux de *S.Amjad* [12].



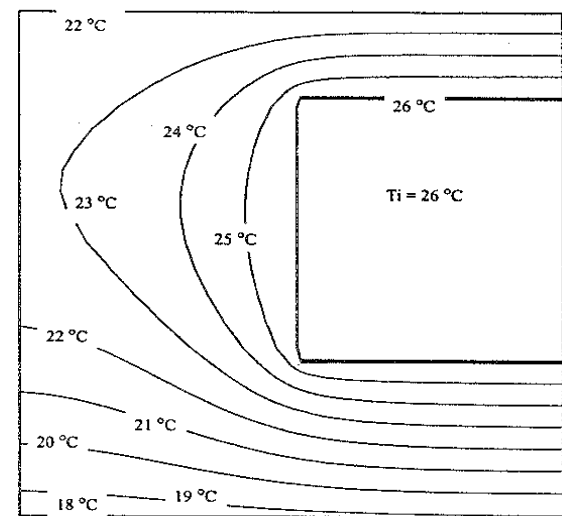
ITPE (Krarti (1987))



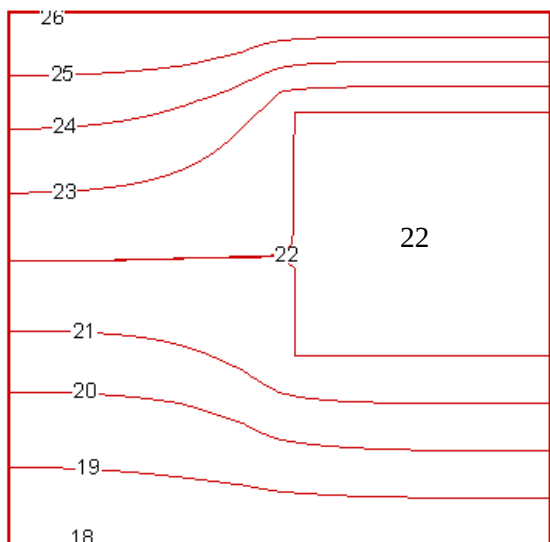
ITPE (Krarti (1987))



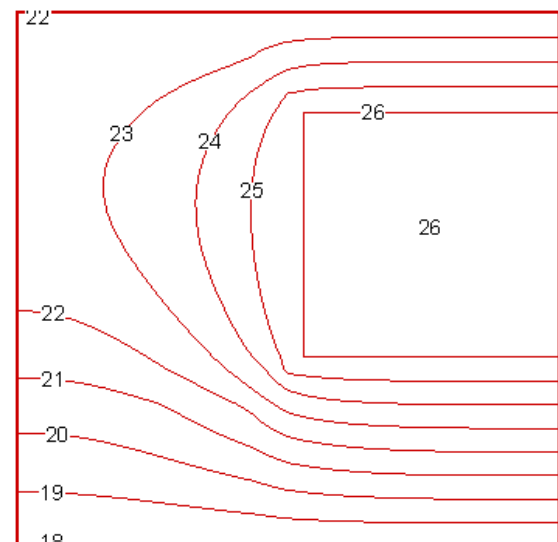
Amjad(2002)



Amjad(2002)



Présent travail

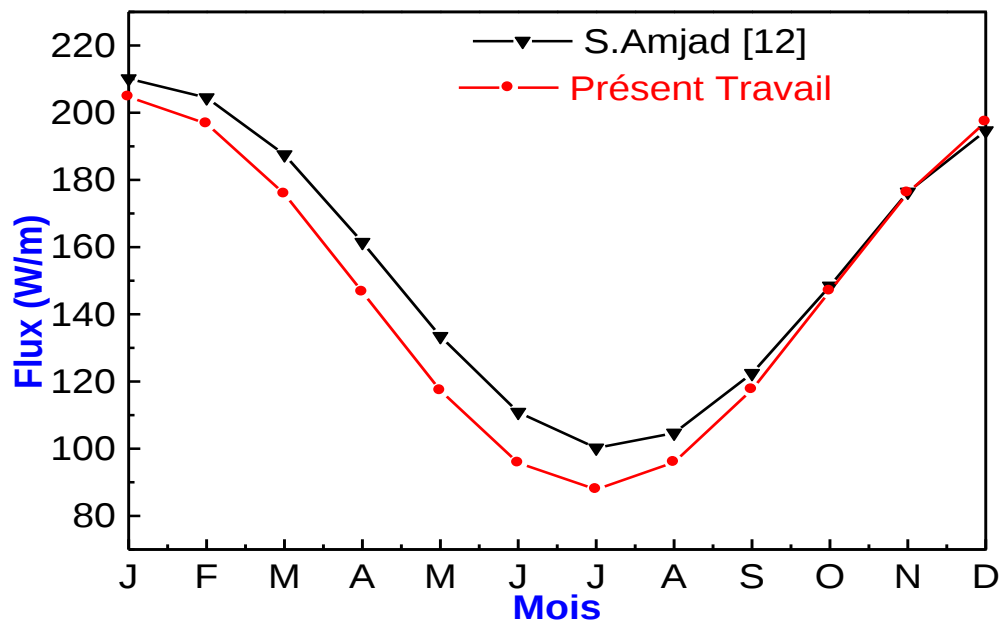


Présent travail

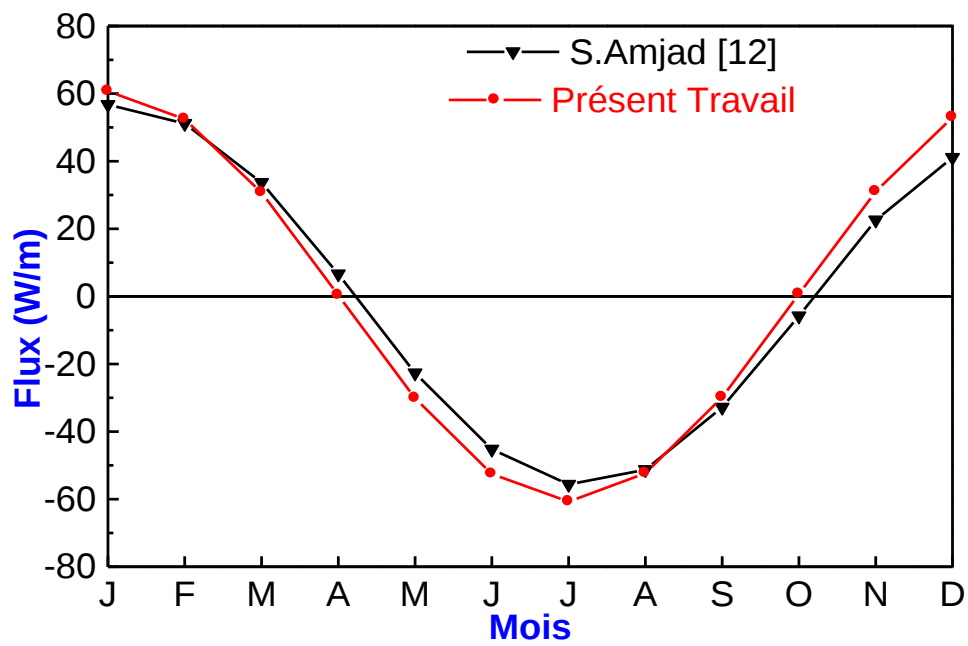
(a)

(b)

Figure 3.3 Distributions des isothermes au voisinage et au sein des parois de la cellule enterrée : (a) $T_i=22^\circ\text{C}$ et $T(t)=26^\circ\text{C}$; (b) $T_i=26^\circ\text{C}$ et $T(t)=22^\circ\text{C}$.



(a)



(b)

Figure 3.4 Comparaison des flux moyens mensuels calculés par notre code et ceux de S.Amjad: (a) climat froid; (b) climat chaud.

Après avoir élaboré un code fiable en comparant nos résultats à ceux présentés dans la littérature en régime permanent et en régime variable, nous avons procédé à la modélisation du transfert de chaleur d'un bâtiment dont ses parois intérieures sont colmatées par une couche d'enduit. Cette étude fait l'objet de ce qui suit:

III.5.2 Bâtiment complètement enterré

L'objectif de cette étude portée à cette structure complètement enterrée est la détermination de l'effet des caractéristiques du mortier (granulométrie du sable et dosage du ciment) et de son épaisseur sur les transferts thermiques au sein de ce bâtiment.

III.5.2.1 Effet de la granulométrie du sable

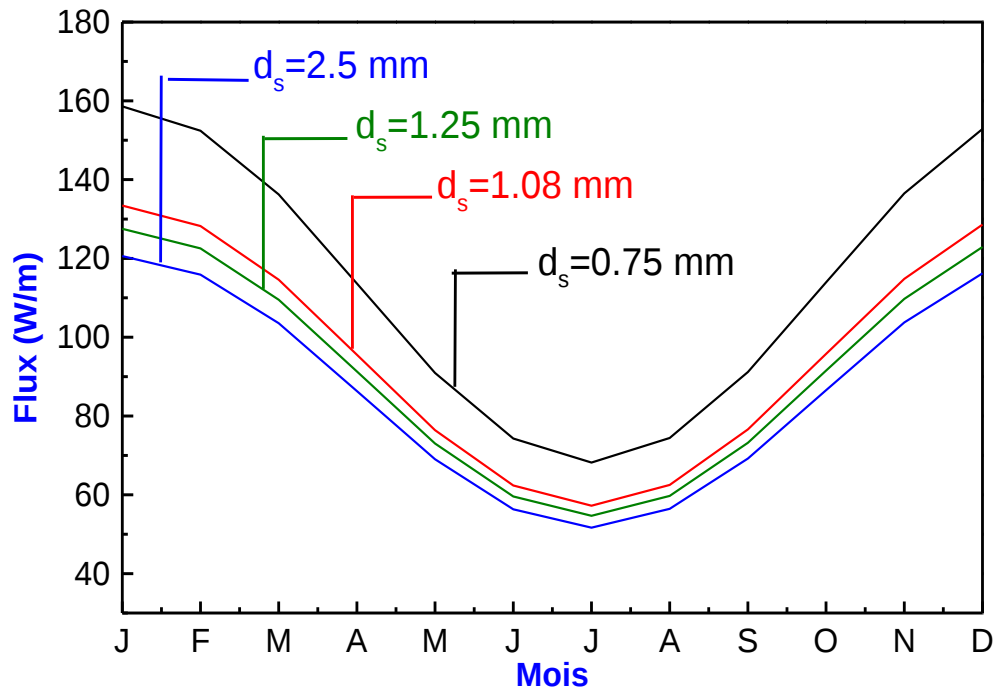
La figure 3.5 donne les variations annuelles du flux moyen mensuel total pour différentes granulométries du sable pour les deux types de climat; climat froid et climat chaud. Cette figure montre que l'augmentation du diamètre du sable entraîne une réduction des échanges thermiques entre le bâtiment complètement enterré et le sol respectivement de 24,05% en climat froid et 23,85% en climat chaud.

III.5.2.2 Effet du dosage du ciment

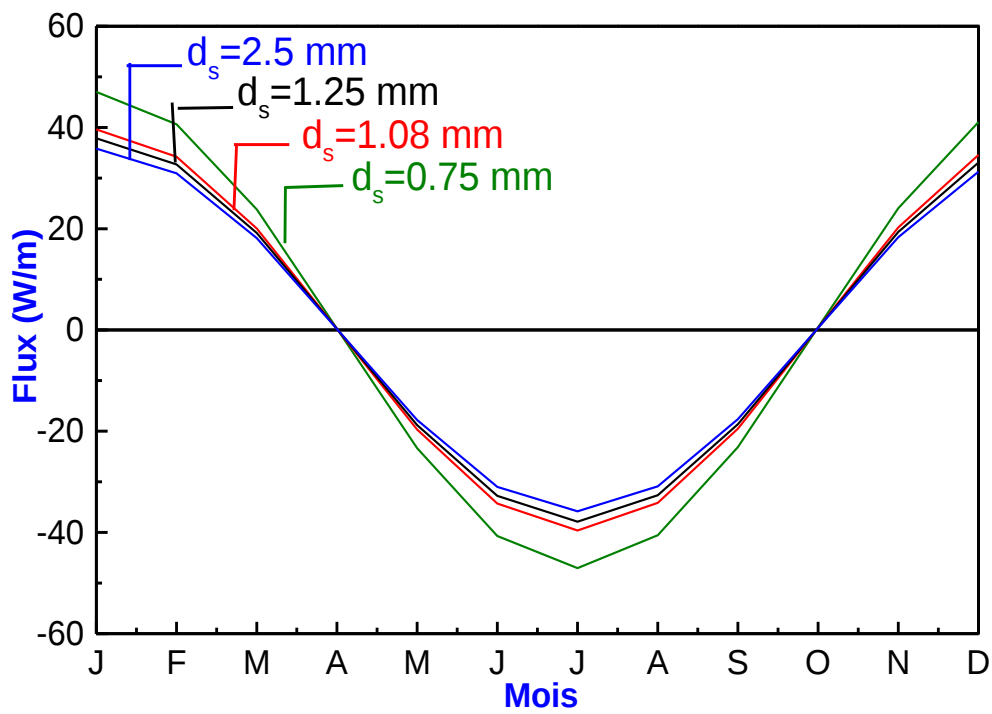
La figure 3.6 représente, les variations annuelles du flux moyen mensuel total pour différents pourcentages du dosage massique du ciment pour les deux types de climat; climat froid et climat chaud. Cette figure montre que les échanges de chaleur entre la cavité et le sol augmentent légèrement avec le dosage massique du ciment. Cette augmentation est de l'ordre de 8,28% pour le climat froid et 8,1% pour le climat chaud.

III.5.2.3 Effet de l'épaisseur et de la couche d'enduit

Les figures 3.7 et 3.8 représentent les variations annuelles du flux échangé entre la cavité complètement enterré et le sol. Ces échanges thermiques sont obtenus pour un test concernant l'effet de l'épaisseur et de la couche d'enduit pour $\lambda_m = 0.57 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\alpha_m = 3.9610^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. On peut constater que, l'augmentation de l'épaisseur de la couche du mortier entraîne la diminution des échanges thermiques entre la cavité en question et le sol (figure 3.7). Cette baisse peut atteindre 7,72% pour le climat chaud et 7,35% pour le climat froid.

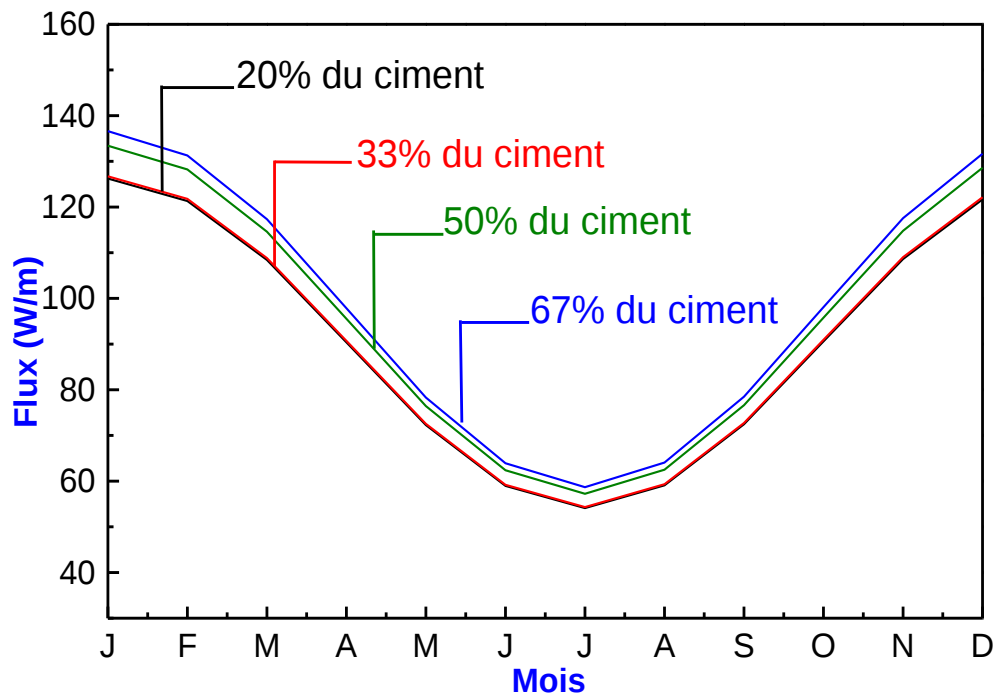


(a)

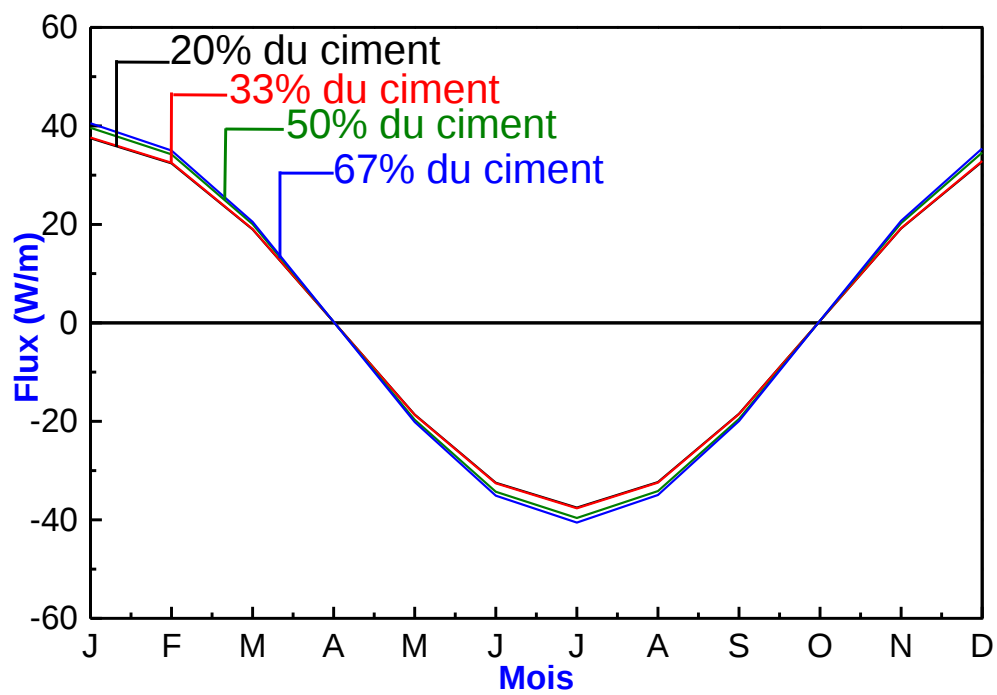


(b)

Figure 3.5 Effet de la granulométrie du sable sur les variations annuelles du flux moyen mensuel total: (a) climat froid; (b) climat chaud.

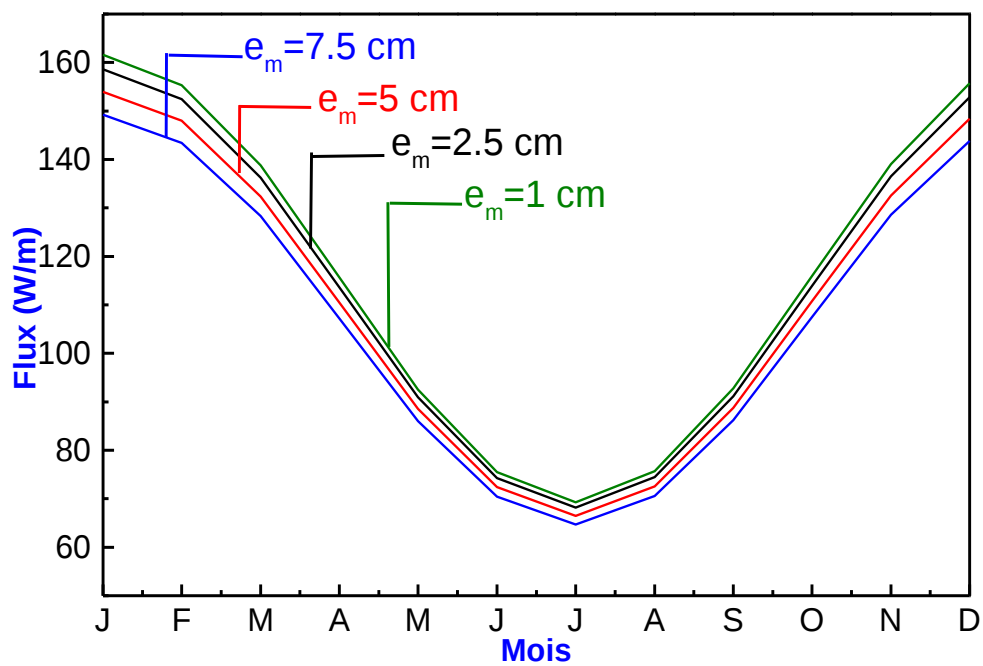


(a)

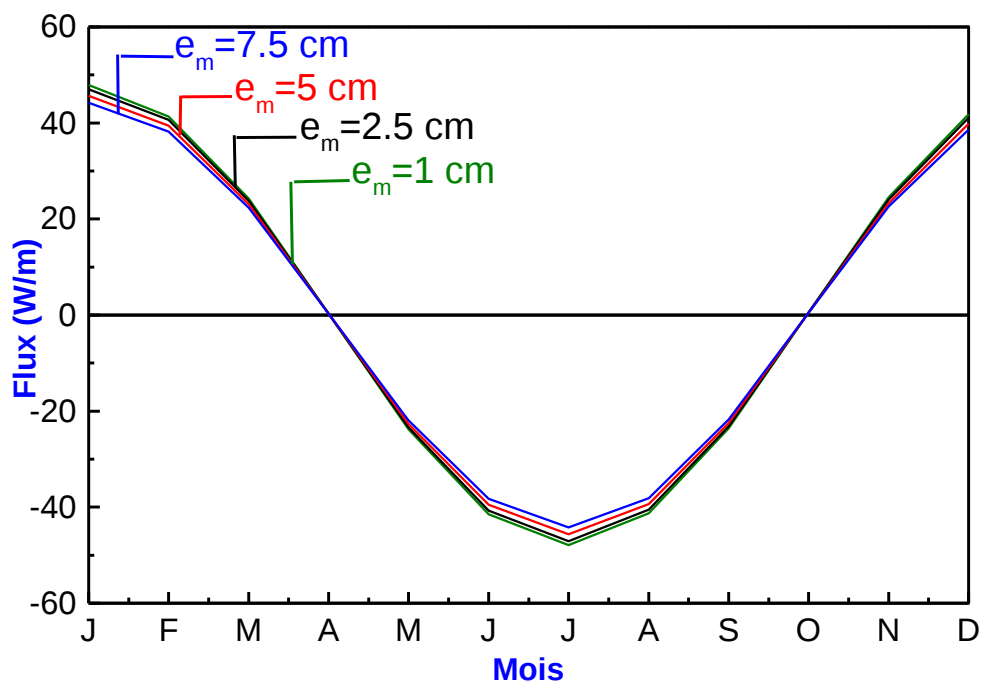


(b)

Figure 3.6 Variations annuelles du flux moyen mensuel pour différents pourcentages du dosage massique du ciment: (a) climat froid; (b) climat chaud.

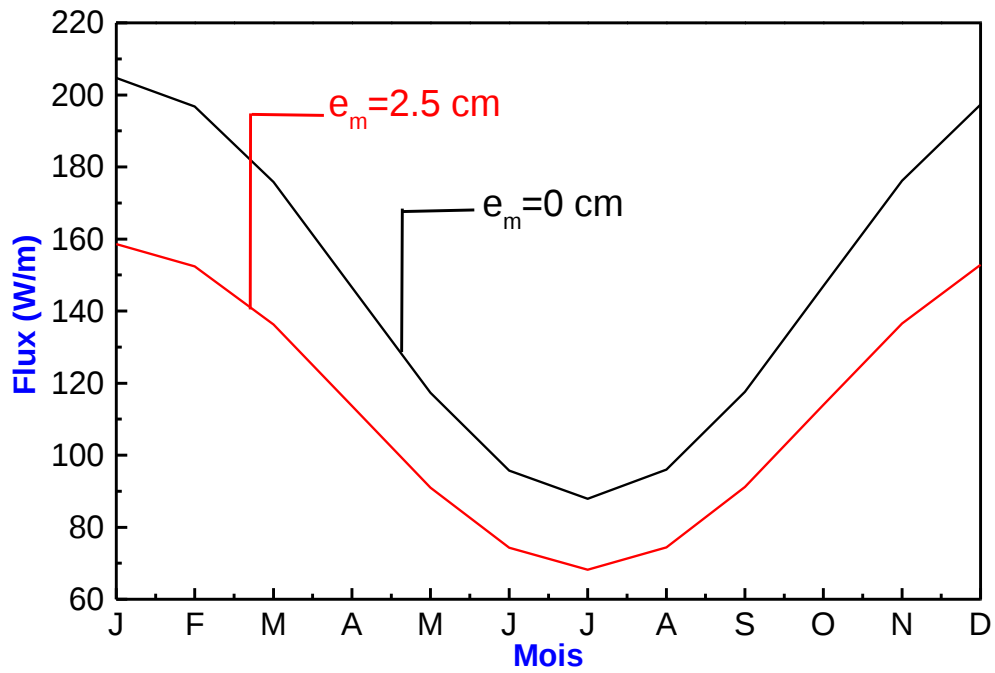


(a)

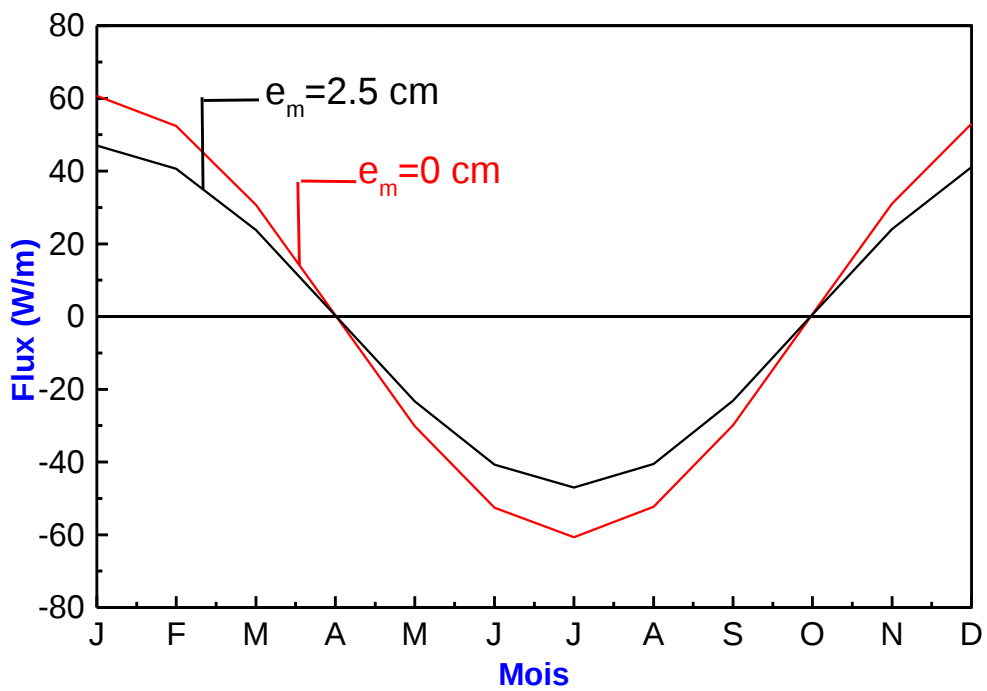


(b)

Figure 3.7 Effet de la variation d'épaisseur d'enduit sur les variations annuelles du flux moyen mensuel total : (a) climat froid ; (b) climat chaud.



(a)



(b)

Figure 3.8 Effet de la couche d'enduit sur les variations annuelles du flux moyen mensuel total: (a) climat froid; (b) climat chaud.

On remarque également (figure 3.8) que la diminution des pertes du bâtiment entre le cas où les parois de la cellule sont dépourvues d'une couche d'enduit ($e_m = 0$ cm) et celles où elles sont isolées par une couche d'épaisseur ($e_m = 2,5$ cm) peut atteindre 22,48% en climat froid et 22,5% en climat chaud.

D'après les résultats précédents, on peut dire que, dans le climat froid (Figures 3.5 (a), 3.6 (a), 3.7 (a) et 3.8 (a)), le bâtiment perd l'énergie vers le sol. Cet échange d'énergie diminue pendant la période d'été (au mois de juillet) pour atteindre une valeur minimale au moment où la température superficielle du sol atteint sa valeur maximale qui est égale à 14.91°C. (14.91°C: est la valeur moyenne de la température superficielle du sol pendant le mois juillet).

Dans le climat chaud (Figures 3.5 (b), 3.6 (b), 3.7 (b) et 3.8 (b)), on remarque également que le bâtiment perd plus d'énergie pendant la période d'hiver, par contre il récupère l'énergie pendant la période d'été. Cette récupération a une valeur maximale au mois de juillet au moment où la température superficielle du sol atteint la valeur maximale de l'ordre de 26.91°C. (26.91°C: est la valeur moyenne de la température superficielle du sol sur le mois juillet).

III.5.3 Bâtiment semi - enterré

Les figures 3.9 et 3.10 représentent les variations annuelles du flux moyen mensuel total échangé entre un habitat semi – enterré, dont ses parois intérieures sont colmatées par une couche du mortier, et le sol. Ces résultats sont obtenus pour un test concernant l’effet de la granulométrie du sable et le dosage massique du ciment dans le mélange.

III.5.3.1 Effet de la granulométrie du sable

D’après ces résultats, qui représentent le comportement thermique du bâtiment semi - enterré et qui sont obtenus pour les conditions climatiques de Marrakech où la température du sol est approximée par une fonction sinusoïdale pour deux types du climat; climat froid et climat chaud, on peut constater que les échanges de chaleur entre cet habitat et le sol diminuent considérablement en fonction de la granulométrie du sable. Ces échanges peuvent atteindre 14% pour le climat froid (figure 3.9 (a)) et 10,73% pour le climat chaud (figure 3.9 (b)).

III.5.3.2 Effet du dosage du ciment

La figure 3.10 présente les résultats concernant l’effet du dosage massique du ciment dans le mélange. En effet, l'examen de ces résultats indique que les échanges de chaleur, entre la cavité en question et le sol, augmentent légèrement en fonction du dosage massique du ciment dans le mélange. Cette augmentation est de l’ordre de 4% pour le climat froid (figure 3.10 (a)) et 2,83% pour le climat chaud (figure 3.10 (b)).

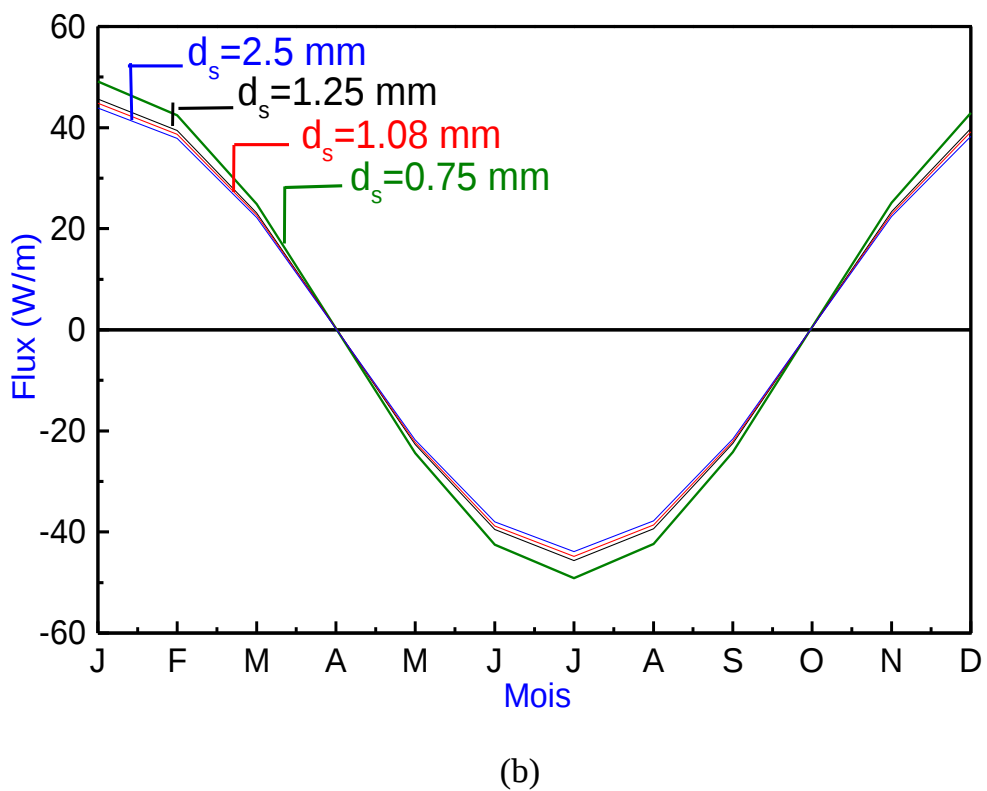
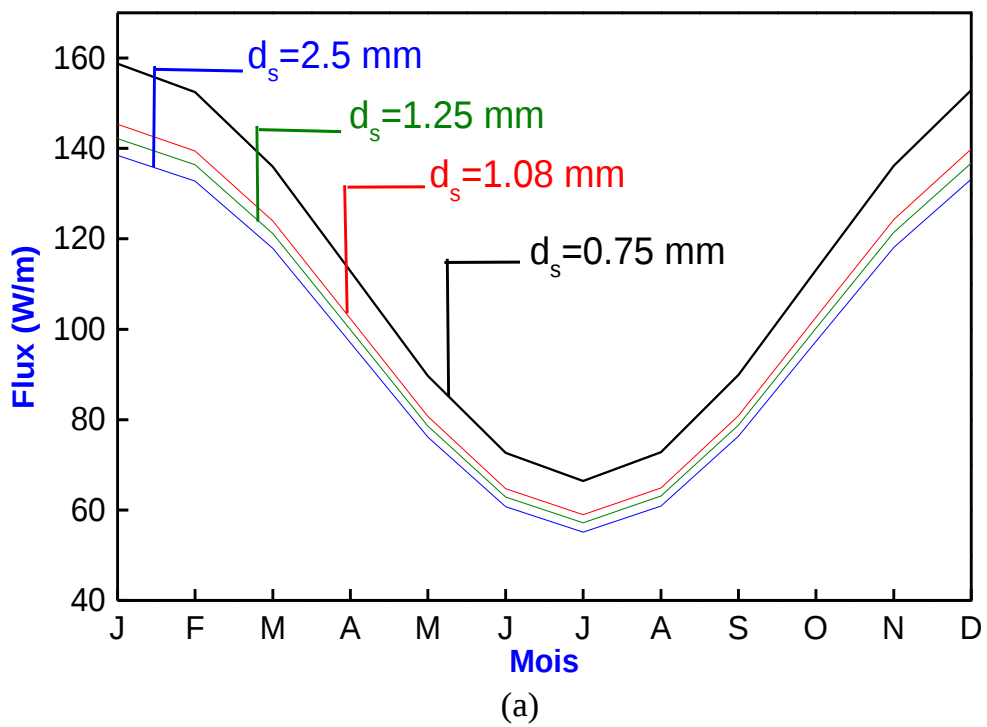
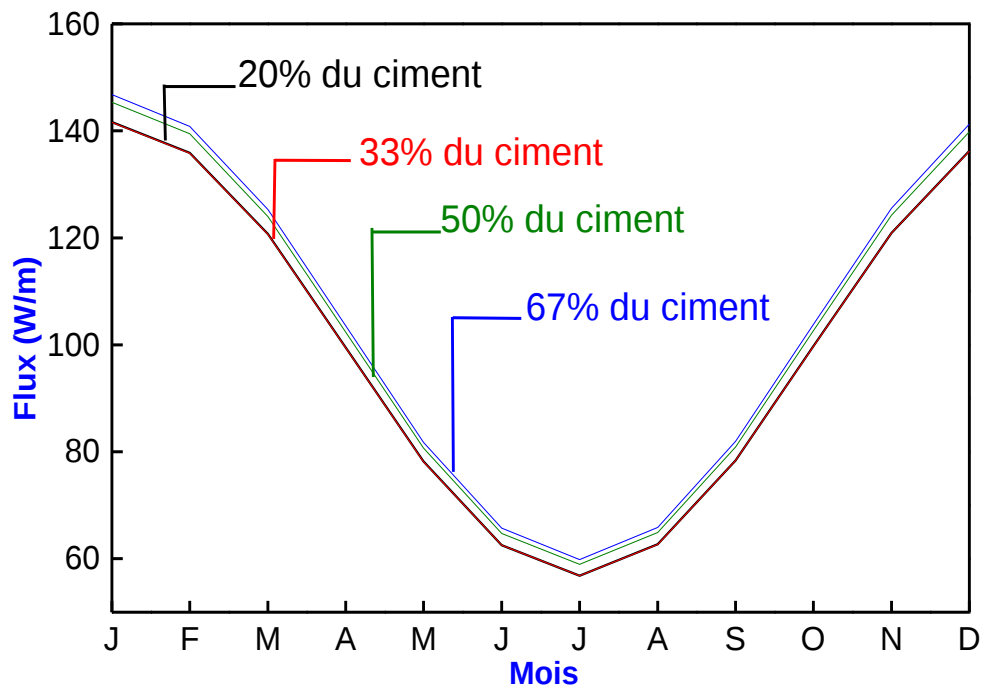
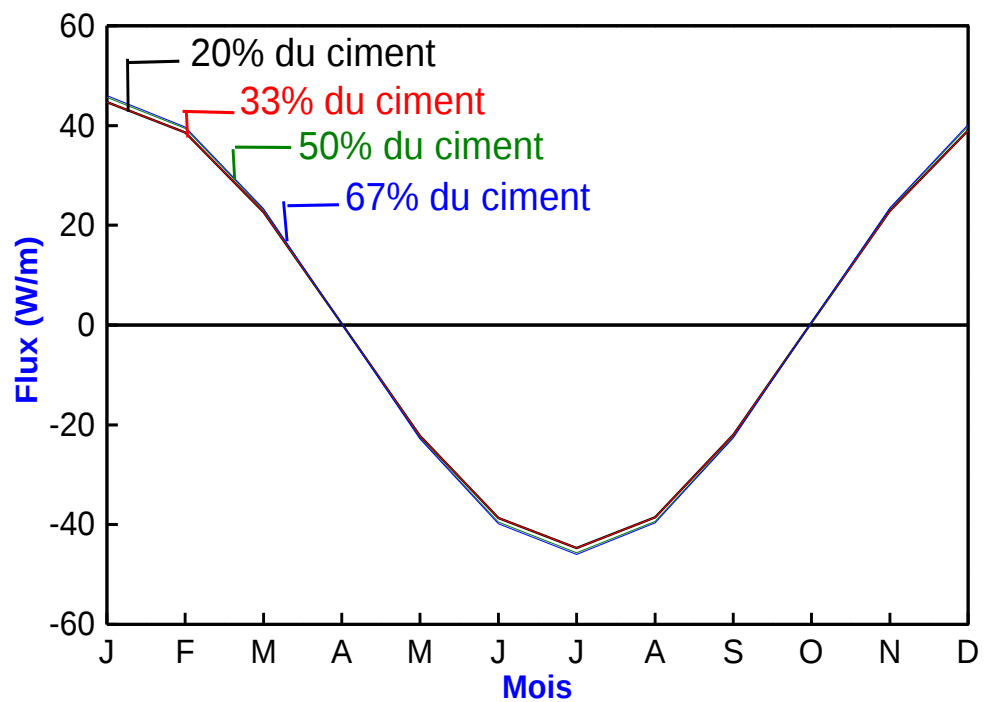


Figure 3.9 Effet de la granulométrie du sable sur les variations annuelles du flux moyen mensuel total: (a) climat froid; (b) climat chaud.



(a)



(b)

Figure 3.10 Variations annuelles du flux moyen mensuel pour différents pourcentages du dosage massique du ciment: (a) climat froid; (b) climat chaud.

III.6 CONCLUSION

L'étude présentée dans ce chapitre porte sur la simulation et l'optimisation, en configuration bidimensionnelle, du comportement thermique des bâtiments complètement enterré et semi - enterré, qui sont colmatés à chaque fois par une couche d'enduit sur des faces intérieures de leurs parois en se basant sur les caractéristiques réelles déterminées expérimentalement dans le chapitre II.

Dans le cas du bâtiment complètement enterré, les résultats obtenus permettent de conclure que l'augmentation du diamètre du sable, la diminution du taux de liant dans le mélange ainsi que l'augmentation de la couche d'enduit minimisent les pertes thermiques entre le bâtiment complètement enterré et le sol.

Dans le cas du bâtiment semi - enterré, nous avons constaté que les échanges de chaleur, entre le bâtiment et le sol, diminuent en fonction de la granulométrie du sable. Par contre, l'étude de l'effet du dosage massique du ciment a montré que celui-ci ne joue pas un rôle important dans les échanges de chaleur entre le bâtiment et le sol.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder la modélisation numérique des transferts de chaleur couplés à travers un bâtiment sur terre pleine.

Chapitre IV

Modélisation numérique des transferts de chaleur couplés à travers un bâtiment sur terre pleine

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons une étude numérique des transferts de chaleur bidimensionnels à travers un bâtiment pour un nombre de Rayleigh variant de 5.10^9 jusqu'à 2.510^{10} . Les équations qui régissent la conduction d'énergie au sein des parois de la cellule, la convection naturelle à l'intérieur du local ainsi que les échanges de chaleur par rayonnement entre les surfaces internes du bâtiment en question sont discrétisées par la méthode des différences finies, basée sur l'approche des volumes de contrôles et sont résolues en utilisant l'algorithme SIMPLEC (Semi-Implicit-Method for Pressure-Linked Equations Corrected) développé par [Patankar et Spalding (1972)]. Les deux faces horizontales extérieures du local sont thermiquement isolées, alors que, les deux autres faces verticales dont l'une qui est la surface gauche maintenue à une température chaude (T_c), tandis que,

celle de la face droite est maintenue à une température froide (T_F). Les différents résultats, qui sont obtenus dans le cas du régime permanent et pour un écoulement laminaire du fluide, sont présentés en terme de lignes de courant, isothermes, flux de chaleur vertical, flux de chaleur horizontal et flux radiatifs. Les effets du nombre de rayonnement et le rapport de températures sur le nombre du Nusselt et le flux de chaleur global traversant le bâtiment sont également discutés dans ce chapitre.

IV.2 CONFIGURATION DU BATIMENT ETUDIE

La configuration bidimensionnelle étudiée est représentée sur la figure 4.1. Il s'agit d'un bâtiment sur terre pleine ayant un toit d'épaisseur e_t et de largeur H_t , un mur d'épaisseur e_M et de hauteur H_M , et un plancher d'épaisseur e_p et de largeur H_p .

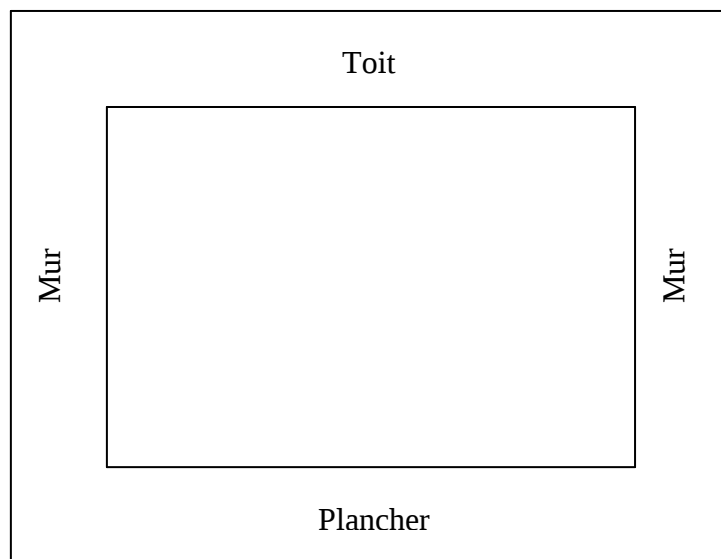


Figure 4.1 Configuration du bâtiment étudiée.

IV.3 MODELE MATHEMATIQUE

Les équations qui régissent l'écoulement d'air au sein de l'habitat et le transfert de chaleur au sein de celui-ci, dans le cas d'un problème bidimensionnel, sont déduites à partir des lois générales de conservation de la masse, de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) et de l'énergie.

IV.3.1 Equation de continuité

Elle traduit la conservation de la matière dans le système considéré. Elle est appelée également équation de continuité:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

IV.3.2 Equations du mouvement

Elles traduisent le bilan des forces qui agissent sur le fluide :

Suivant x:

$$\frac{\partial(\rho_a u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_a uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4.2)$$

Suivant y:

$$\frac{\partial(\rho_a v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_a vv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho_a g \quad (4.3)$$

ρ_a : masse volumique de l'air;

μ : viscosité dynamique du fluide étudié.

IV.3.3 Equation de l'énergie

$$\rho_a C_{pa} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + T \beta \left(\frac{dp}{dt} \right) + \phi + q \quad (4.4)$$

C_{pa} : chaleur massique de l'air à pression constante;

λ_a : conductivité thermique du fluide;

β : est le coefficient de dilatation volumique, à pression constante, du fluide;

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p.$$

ϕ : est la dissipation visqueuse de l'énergie du système par les frottements moléculaires.

q : représente le terme source d'énergie interne du système.

IV.3.4 Equation de conduction de chaleur

L'équation de conduction de l'énergie dans les parois solides du bâtiment est donnée par:

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4.5)$$

λ_s : conductivité thermique du solide;

C_{ps} : chaleur massique du milieu opaque étudié;

ρ_s : masse volumique de ce milieu.

IV.3.5 Hypothèses simplificatrices

La modélisation du phénomène d'écoulement libre de l'air au sein de l'habitat et le transfert de chaleur au sein de celui-ci a été menée en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidimensionnels;
- l'écoulement est laminaire;
- Le fluide est newtonien, incompressible et transparent au rayonnement infrarouge;
- Pour la prise en compte des échanges radiatifs entre les faces internes de la structure étudiée, celles-ci sont supposées grises à émission et réflexion diffuses ;
- Les propriétés physiques du fluide sont considérées constantes, sauf pour la masse volumique de l'air dans le terme de poussée, où celle-ci varie linéairement en fonction de la température.

Ainsi, en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, le système d'équations régissant notre problème se réduit à:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial(\rho_a u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_a uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial(\rho_a v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_a vv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho_0 g \beta (T - T_0) \quad (4.8)$$

$$\rho_a C_{pa} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} \right) = \lambda_a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.9)$$

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.10)$$

IV.4 FORMULATION ADIMENSIONNELLE DES EQUATIONS ET CONDITIONS AUX LIMITES

L'adimensionalisation des équations gouvernant le bilan thermique et l'écoulement de l'air à l'intérieur du local, et la conduction d'énergie au sein des parois (toit, murs et plancher) est faite en choisissant une échelle de longueur H_M caractéristique de la hauteur du mur du bâtiment étudié (figure 4.1) et une échelle de la diffusivité thermique α_a caractéristique de la diffusion thermique du fluide étudié. Les équations adimensionnelles sont obtenues après avoir opéré le changement de variable suivant :

$$\theta_a = (T_a - T_C) / (T_C - T_F), (X, Y) = (x, y) / H_M, (U, V) = (u, v) / (\alpha_a / H_M), \tau = t / (H_M^2 / \alpha_a),$$

$$P = (p + \rho g y) / \rho (\alpha_a^2 / H_M^2) \text{ et } \theta_s = (T_s - T_C) / (T_C - T_F).$$

Ce changement de variable appliqué aux équations du modèle, donne :

- pour l'équation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (4.11)$$

- pour l'équation de la quantité de mouvement suivant X et Y :

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial UU}{\partial X} + \frac{\partial VU}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + \frac{\partial UV}{\partial X} + \frac{\partial VV}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \text{Pr} R_a \theta_a \quad (4.13)$$

- pour l'équation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial \tau} + \frac{\partial U \theta_a}{\partial X} + \frac{\partial V \theta_a}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta_a}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_a}{\partial Y^2} \quad (4.14)$$

- pour l'équation de conduction d'énergie :

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \frac{\alpha_s}{\alpha_a} \left(\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Y^2} \right) \quad (4.15)$$

Avec θ_s est la température adimensionnelle du solide. Ra est le nombre de Rayleigh et Pr est le nombre de Prandtl définis respectivement par : $Ra = \frac{g\beta H_M^3 (T_C - T_F)}{\nu^2} Pr$ et $Pr = \frac{\nu}{\alpha_a}$

IV.4.1 Conditions aux limites

Les conditions aux limites dynamiques et thermiques du problème sont :

- $U = V = 0$ sur les surfaces internes du bâtiment
- $\theta_s(0, Y) = 1$ et $\theta_s(H_P, Y) = 0$ pour $0 \leq Y \leq (H_M + e_t + e_p)$
- $\frac{\partial \theta_s}{\partial Y}(X, Y) \Big|_{Y=0} = \frac{\partial \theta_s}{\partial Y}(X, Y) \Big|_{Y=H_M} = 0$ pour $0 \leq X \leq (H_t + 2e_M)$

La continuité de température et du flux de chaleur aux interfaces fluide – solide sont données par :

$$\theta_s(X, Y) = \theta_a(X, Y) \quad (4.16)$$

$$-\frac{\partial \theta_s}{\partial \eta} = -\frac{\lambda_a}{\lambda_s} \frac{\partial \theta_a}{\partial \eta} + Nr Q_r \quad (4.17)$$

Où Q_r est le flux radiatif net adimensionnel échangé entre la surface considérée et les autres faces du bâtiment et Nr est un nombre adimensionnel, caractérisant le rapport des échanges thermiques radiatifs aux transferts conductifs, il est défini par : $Nr = \frac{\sigma T_C^4 L}{\lambda_s (T_C - T_F)}$

La densité surfacique du flux radiatif net dimensionnel $q_k(\eta_k)$ échangé par un élément de surface dS_k , situé en un point d'abscisse η_k sur la surface k est exprimée, selon *Siegel et Howell* [70] par :

$$q_k(\eta_k) = J_k(\eta_k) - E_k(\eta_k) \quad (4.18)$$

Où $E_k(\eta_k)$ est l'éclairement de l'élément de surface dS_k et $J_k(\eta_k)$ sa radiosité, donnés respectivement par :

$$E_k(\eta_k) = \sum_{j=1}^4 \int_{S_j} J_j(\eta_j) dF_{dS_k-dS_j(\eta_k \eta_j)} \quad (4.19)$$

$$J_k(\eta_k) = \varepsilon_k \sigma (T_k(\eta_k))^4 + (1 - \varepsilon_k) E_k(\eta_k) \quad (4.20)$$

En remplaçant les deux équations (4.19) et (4.20) dans (4.18), et en divisant les deux membres de cette dernière par σT_C^4 , on obtient l'expression du flux radiatif net adimensionnel échangé par l'élément dS_k :

$$Q_k(\eta_k) = \varepsilon_k \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)^4 \left(\theta_k(\eta_k) + \frac{1}{\gamma - 1}\right)^4 - \varepsilon_k \sum_{j=1}^4 \int_{S_j} J_j(\eta_j) dF_{dS_k-dS_j} \quad (4.21)$$

IV.4.2 Nombre de Nusselt

La valeur moyenne du nombre du Nusselt sur la surface verticale gauche de la cellule étudiée est liée au coefficient de convection sur cette surface par la relation suivante:

$$\overline{Nu} = \frac{1}{H_M} \int_0^{H_M} \left(\frac{h_{on} H_M}{\lambda_a} \right)_{X=X_0} dY \quad (4.22)$$

Dans la couche limite stationnaire au contact de la paroi, le flux de chaleur échangé par conduction dans le fluide doit être égal au flux de chaleur par convection, ce qui permet d'établir la relation suivante:

$$-\lambda_a \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} = h_{con}(T_C - T_F) \quad (4.23)$$

Le coefficient de convection considéré est défini par:

$$h_{con} = - \frac{\left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial X} \right)_{X=0}}{(T_C - T_F)} \quad (4.24)$$

En combinant les équations (4.22) et (4.24), le nombre de Nusselt moyen sur la face verticale gauche de la cavité s'exprime par:

$$\overline{Nu} = - \frac{1}{H_M} \int_0^{H_M} \left(\frac{\partial \theta_s}{\partial X} \right)_{X=X_0} dY \quad (4.25)$$

IV.4.3 Flux de chaleur moyen

Le flux de chaleur dimensionnel traversant un élément de surface dS située sur la surface gauche de l'habitat est donné par:

$$dQ = -\lambda_a \frac{\partial T}{\partial X} dS \quad (4.26)$$

En divisant les deux membres de l'équation (4.26) par $\lambda_a \frac{(T_F - T_C)}{H_M dS}$, on obtient l'expression suivante donnant le flux de chaleur adimensionnel:

$$d\bar{Q} = - \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=X_0} \quad (4.27)$$

Le flux de chaleur moyen adimensionnel sur la face verticale gauche du bâtiment est donné par:

$$\bar{Q} = \frac{-1}{(e_t + H_M + e_p)} \int_0^{(e_t + H_M + e_p)} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=X_0} dY \quad (4.28)$$

IV.5 METHODE DE RESOLUTION

Les équations, établies ci-dessus, gouvernant la convection naturelle dans le bâtiment, les échanges de chaleur entre les faces intérieures de celui-ci, ainsi que la conduction de chaleur dans les parois de la structure étudiée peuvent être résolues en utilisant les méthodes de discrétisation. La méthode numérique adoptée dans cette étude est celle aux différences finies la plus utilisée en raison de sa simplicité relative et de la facilité de sa mise en œuvre. Il s'agit de la méthode de volume de contrôle.

IV.5.1 Méthode de volume de contrôle

IV.5.1.1 Principe de la méthode

Le schéma, que nous avons adopté pour résoudre le système d'équations aux dérivées partielles gouvernant le problème étudié, utilise une formulation de type différences finies basées sur une approche de volume fini développé par *S. Patankar* [71]. Cette méthode consiste à subdiviser la zone d'intégration en un nombre fini de volumes élémentaires "volumes de contrôle". Les points du maillage se trouvent tous au centre de gravité de ces volumes de contrôle (figure 4.2). Ces volumes sont égaux à $\Delta X . \Delta Y . 1$, ΔX et ΔY étant les pas d'espace selon les directions X et Y et l'unité 1 correspond à la troisième direction suivant l'axe des Z , à l'intérieur desquels les variables sont supposées constantes. Les équations de *Navier-Stokes* sont résolues en général au moyen de distribution décalée des volumes de contrôle.

Les vitesses U et V sont présentées sur la figure 4.2. Elles sont décalées par rapport à la pression P et la température T . Les valeurs des vitesses U sont à la limite du volume de contrôle avec Y constante, et les vitesses V à la limite correspondante avec X constante. Cette distribution présente l'avantage d'éviter des problèmes d'oscillations du champ de pression. Ce point est discuté en détail par *Patankar*.

IV.5.1.2 Discrétisation des équations en volumes finis

La discrétisation des équations de conservation est élaborée selon l'équation de transport - diffusion généralisée suivante :

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \frac{\partial(U\phi)}{\partial X} + \frac{\partial(V\phi)}{\partial Y} = \left[\frac{\partial \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)}{\partial X} + \frac{\partial \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right)}{\partial Y} \right] + S_\phi \quad (4.29)$$

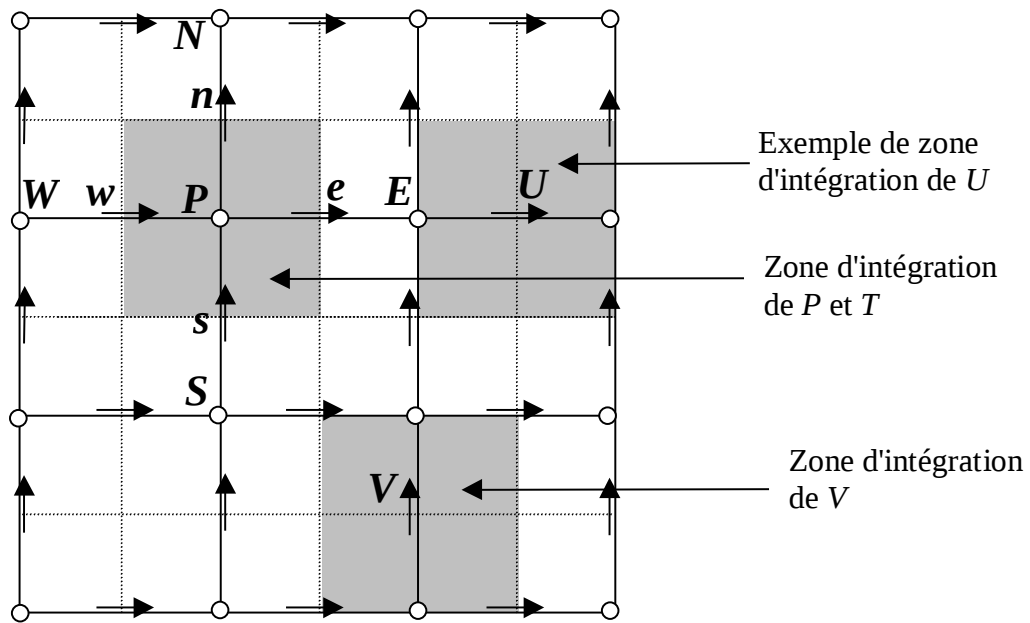


Figure 4.2 Distribution des volumes de contrôle avec maillage décalé.

Les équations (4.29) peuvent être retrouvées en posant, ϕ , Γ et S_ϕ comme suit:

Equations	ϕ	Γ	S_ϕ
Equation de quantité de mouvement suivant X	U	Pr	$-\frac{\partial P}{\partial X}$
Equation de quantité de mouvement suivant Y	V	Pr	$-\frac{\partial P}{\partial Y} + \theta_a \cdot \text{Pr} \cdot Ra$
Equation d'énergie	θ_a	1	0
Equation de conduction d'énergie	θ_s	α_s / α_a	0
Equation de conservation de la masse	1	0	0

En l'absence du terme source S_ϕ , l'intégration de l'équation (4.29) sur le volume de contrôle de la figure 4.2 donne :

$$\iiint_{w,s} \int_{\tau}^{e,n,\tau+\Delta\tau} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} dXdYd\tau + \iiint_{w,s} \int_{\tau}^{e,n,\tau+\Delta\tau} \frac{\partial}{\partial X} (U\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X}) dXdYd\tau + \iiint_{w,s} \int_{\tau}^{e,n,\tau+\Delta\tau} \frac{\partial}{\partial Y} (V\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y}) dXdYd\tau = 0 \quad (4.30)$$

Cette équation intégral-différentielle décrit l'équilibre entre les flux convectif et diffusif entrant et sortant des surfaces du volume de contrôle.

L'intégration des termes diffusifs de l'équation (4.29) donne :

$$\begin{aligned} \iiint_{w,s} \int_{\tau}^{e,n,\tau+\Delta\tau} \frac{\partial}{\partial X} (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X}) dXdYd\tau + \iiint_{w,s} \int_{\tau}^{e,n,\tau+\Delta\tau} \frac{\partial}{\partial Y} (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y}) dXdYd\tau &= \Delta\tau \Delta Y \int_w^e \frac{\partial}{\partial X} (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X}) dX \\ &+ \Delta\tau \Delta X \int_s^n \frac{\partial}{\partial Y} (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y}) dY = \Delta\tau \Delta Y \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_w \right] + \Delta\tau \Delta X \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right)_s \right] \end{aligned} \quad (4.31)$$

Les dérivées partielles $(\partial\phi/\partial X)_e$, $(\partial\phi/\partial X)_w$, $(\partial\phi/\partial X)_n$, $(\partial\phi/\partial X)_s$ sont approximées par un développement en série de *Taylor* à l'ordre 2 autour des points e , w , n et s .
Le rapport de l'expression (4.31) par $\Delta\tau$ devient donc :

$$D_e(\phi_e - \phi_p) - D_w(\phi_p - \phi_w) + D_n(\phi_n - \phi_p) - D_s(\phi_p - \phi_s) \quad (4.32)$$

Expression dans laquelle

$$\begin{aligned} D_e &= \frac{\Delta Y}{\Delta X} \Gamma_e, & D_n &= \frac{\Delta X}{\Delta Y} \Gamma_n \\ D_w &= \frac{\Delta Y}{\Delta X} \Gamma_w, & D_s &= \frac{\Delta X}{\Delta Y} \Gamma_s \end{aligned}$$

Où ΔX et ΔY représentent les dimensions du volume de contrôle entourant la maille $P_{i,j}$ respectivement suivant les directions X et Y . Les termes D_m ($m = e, w, n, s$) s'appellent des conductances et sont toujours positives.

De la même manière que les termes diffusifs, nous intégrons les termes convectifs de l'équation (4.29). Le rapport de l'expression résultante par $\Delta\tau$ donne :

$$\frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta\tau} (\phi_p - \phi_p^0) + C_e \phi_e - C_w \phi_w + C_n \phi_n - C_s \phi_s \quad (4.33)$$

Expression dans laquelle :

$$\begin{aligned} C_e &= U_e \Delta Y, & C_w &= U_w \Delta Y \\ C_n &= V_n \Delta X, & C_s &= V_s \Delta X \end{aligned}$$

Et ϕ^0 désigne la valeur de ϕ à l'instant précédent.

Ainsi donc, l'expression définitive qui correspond à la discrétisation de l'équation (4.29) s'écrit sous la forme générale :

$$A_P \phi_P = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + B \quad (4.34)$$

avec ;

$$A_E = D_e \cdot A(|Pe_e|) + \sup(-C_e, 0)$$

$$A_W = D_w \cdot A(|Pe_w|) + \sup(C_w, 0)$$

$$A_N = D_n \cdot A(|Pe_n|) + \sup(-C_n, 0)$$

$$A_S = D_s \cdot A(|Pe_s|) + \sup(C_s, 0)$$

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S + S_C + S_P ,$$

$$B = S_P \phi_P^0$$

$$S_P = \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta \tau}$$

$$S_C = C_e - C_w + C_n - C_s$$

$Pe_m = \frac{C_m}{D_m}$ appelé nombre de *Peclet* local, qui exprime le rapport du transfert de chaleur

par convection au transfert de chaleur par diffusion.

Les coefficients $A_m (m = e, w, n, s)$ représentent l'effet de la convection et de la diffusion aux quatre faces du volume de contrôle.

L'expression de la fonction $A(|Pe|)$ dépend du schéma adopté pour la discrétisation des termes convectifs. Dans notre cas, notre choix est fixé sur le schéma de loi de puissance de haute précision, recommandée par *Patankar*.

IV.5.1.3 Algorithme SIMPLEC

L'intégration des deux équations de quantité de mouvement donne les équations discrétisées suivantes :

$$A_e^U U_e = A_E^U U_{Ee} + A_W^U U_{Ww} + A_N^U U_{Ne} + A_S^U U_{Se} + \Delta Y (P_P - P_E) + S_e^U \quad (4.35)$$

$$A_n^V V_n = A_E^V V_{En} + A_W^V V_{Wn} + A_N^V V_{Nn} + A_S^V V_{Sn} + \Delta X (P_p - P_n) + S_n^V \quad (4.36)$$

Celles-ci pourraient être résolues avec un algorithme approprié selon U et V , si la pression P était connue. Comme la pression n'a pas d'équation de transport mais qu'il n'y a qu'une condition de compatibilité entre les vitesses, celle-ci, à partir de laquelle la pression sera calculée, doit être recherchée par une méthode spéciale dans le cas de fluide incompressible que nous étudions. Cependant, *Patankar et Spalding* [71] se sont attaqués à ce problème de façon judicieuse et ont proposé de résoudre ces équations avec celle de continuité à l'aide d'un algorithme SIMPLE (Semi-Implicit-Method for Pressure-Linked Equations). Les principales étapes de cet algorithme sont:

- Estimation d'un champ de pression $[P^*]$;
- Résolution des équations discrétisées de quantité de mouvement (4.35) et (4.36) avec le champ de pression évalué. Ceci nous donne les champs de vitesse $[U^*]$ et $[V^*]$;
- Comme $[P^*]$ est inexact, les vitesses calculées $[U^*]$ et $[V^*]$ ne vérifient pas l'équation de continuité;
- Les corrections de pression et de vitesse $[P']$, $[U']$ et $[V']$ seront faites de sorte que les valeurs corrigées $[U] = [U^*] + [U']$, $[V] = [V^*] + [V']$, $[P] = [P^*] + [P']$ satisfont à l'équation de continuité.

Après ces corrections, les équations discrétisées de quantité de mouvement ne sont plus exactes.

Les étapes ci-dessous sont répétées jusqu'à ce que les équations de quantité de mouvement et de continuité soient simultanément vérifiées.

IV.5.1.4 Equation de correction de pression

La soustraction des équations définies par les champs $[U^*]$, $[V^*]$ et $[P^*]$ des équations de quantité de mouvement exactes (4.35) et (4.36) donne, par exemple:

$$A_e^U U'_e = A_E^U U'_{Ee} + A_W^U U'_{Ww} + A_N^U U'_{Ne} + A_S^U U'_{Se} - (P'_E - P'_p) \Delta Y \quad (4.37)$$

Ces équations seront utilisées pour obtenir l'équation de correction de pression. Cette dernière est construite à partir de l'équation de continuité écrite sous la forme discrétisée suivante:

$$(U_e - U_w)\Delta Y + (V_n - V_s)\Delta X = 0 \quad (4.38)$$

Si on remplace U et V par leurs expressions dans l'équation (4.38), il vient que:

$$(U_e^* + U_e' - U_w^* - U_w')\Delta Y + (V_n^* + V_n' - V_s^* - V_s')\Delta X = 0 \quad (4.39)$$

Dans un maillage décalé, les courants de masse peuvent être déterminés sans interpolation puisqu'ils sont mémorisés au niveau des surfaces externes des volumes de contrôle de pression.

Dans ce travail, nous avons adopté l'algorithme SIMPLEC qui est presque identique à l'algorithme SIMPLE [72]. La différence s'agit sur le fait que, dans l'algorithme SIMPLEC, les corrections de vitesse des points voisins de U_e sont égales à U_e' . Cette approximation nous permet d'avoir l'équation semi-implicite suivante.

$$(A_e^U - A_E^U - A_W^U - A_N^U - A_S^U)U_e' = -(P_E' - P')\Delta Y \quad (4.40)$$

Des expressions analogues pour les autres corrections de vitesse peuvent être déduites. La substitution de ces expressions dans l'équation (4.39) donne l'équation de correction de pression :

$$D_P^P P_P' = D_E^P P_E' + D_W^P P_W' + D_N^P P_N' + D_S^P P_S' - S_m \quad (4.41)$$

Avec;

$$D_E^P = \frac{\Delta Y^2}{A_e^U - (A_E^U + A_W^U + A_N^U + A_S^U)}, \quad D_W^P = \frac{\Delta Y^2}{A_w^U - (A_E^U + A_W^U + A_N^U + A_S^U)},$$

$$D_N^P = \frac{\Delta X^2}{A_n^V - (A_E^V + A_W^V + A_N^V + A_S^V)}, \quad D_S^P = \frac{\Delta X^2}{A_s^V - (A_E^V + A_W^V + A_N^V + A_S^V)}$$

$$D_P^P = D_E^P + D_W^P + D_N^P + D_S^P$$

$$S_m = (U_e^* - U_w^*)\Delta Y + (V_n^* - V_s^*)\Delta X$$

S_m représente la source masse produite par le champ de vitesse $\vec{V}^*$

L'équation de correction de pression a la même forme que les équations discrétisées de quantité de mouvement et peut être résolue par la même méthode.

IV.5.2 Méthode de sous relaxation

Pour éviter la divergence des solutions des équations à fort caractère non – linéaire; la sous- relaxation est vivement conseillée.

Les corrections de pression qui en résultent de la méthode de résolution sont relativement trop importantes. Ceci peut conduire à une divergence de l'algorithme SIMPLEC si l'on ne fait pas une sous relaxation. C'est pourquoi dans le programme, la pression est corrigée par :

$$[P] = [P^*] + \alpha^P [P'] \quad (4.42)$$

α^P : est le facteur de sous relaxation pour la pression.

Les variables générales U, V, T et P seront sous relaxées par α^ϕ comme suit :

A gauche de l'équation algébrique (4.34), la valeur de l'itération précédente sera ajoutée et soustraite de la façon suivante :

$$\phi_p^\tau = \phi_p^{\tau-1} + \alpha^\phi \left(\frac{\sum_m A_m \phi_m^\tau + B}{A_p} - \phi_p^{\tau-1} \right) \quad (4.43)$$

Des répétitions successives de l'algorithme conduit finalement à une solution qui s'approche de la solution exacte des équations différentielles.

IV.5.3 Critère de convergence

L'un des tests de convergence les plus couramment utilisés dans la littérature est celui basé sur le contrôle de l'évolution des variables au cours des itérations. En adoptant le procédé utilisé par *Penot* [73], ce test peut être réalisé, pour une variable ϕ donnée, comme suit :

$$\sum_{i,j} \frac{|\phi_{i,j}^{iter+1} - \phi_{i,j}^{iter}|}{|\phi_{i,j}^{iter+1}|} \leq \varepsilon_0 \quad (4.44)$$

Le paramètre ε_0 doit être choisi suffisamment petit afin d'éviter les erreurs de troncature tout en restant au-dessus des erreurs d'arrondis.

En plus, dans notre code de calcul, nous complétons ce test de convergence par un contrôle des résidus des équations de conservation. Pour chaque équation, on somme les résidus de tous les points du domaine, ensuite on normalise par une quantité de référence (qui dépend du problème considéré) et on vérifie que le résultat est inférieur à un epsilon.

IV.5.4 Caractérisation du régime permanent

On considère que le régime permanent est établi si toutes les variables indépendantes du problème vérifient le critère suivant :

$$\frac{|\phi_{i,j}^{iter+1} - \phi_{i,j}^{iter}|}{|\phi_{i,j}^{iter+1}|} \leq \varepsilon' \quad (4.45)$$

IV.5.5 Algorithme de calcul

L'ensemble des calculs qui interviennent dans la résolution des équations mentionnées précédemment à l'aide de l'algorithme SIMPLEC peut se résumer comme suit :

1. Lire la définition du maillage, les conditions aux frontières et construire la grille décalée pour les composantes de la vitesse ;
2. Se donner un champ de pression estimé P^* ;
3. Calculer les composantes intermédiaires de la vitesse U^* et V^* aux nœuds de leurs grilles décalées en résolvant les équations de conservation de la quantité de mouvement ;
4. Calculer la correction de pression P' nécessaire pour corriger le champ de vitesse en vue de satisfaire l'équation de continuité ;
5. Calculer le champ de pression P en associant P' à P^* ;
6. Calculer les composantes de la vitesse U et V ;
7. Résoudre les équations discrétisées pour θ_a et θ_s ;
8. Poser $P^* \leftarrow P$ et reprendre l'exécution à l'étape 3 en répétant toute la procédure jusqu'à ce que la condition de convergence soit remplie.

IV.6 VALIDATION DU MODÈLE

Le programme de calcul est testé sur le cas d'une cavité carrée différentiellement chauffée. Les paramètres caractéristiques de l'écoulement et du transfert de chaleur sont calculés pour différents nombres de Rayleigh, en utilisant un maillage 42×42 . Les résultats trouvés sont comparés, sur la figure 4.3, à ceux obtenus par *De Vahl Davis* [74], *Le Breton et al.* [75] et *A.Abdelbaki et al.* [29]. La comparaison porte sur les valeurs maximales des composantes U et V de la vitesse respectivement à mi-largeur ($U_{\max}$) et à mi-hauteur ($V_{\max}$), sur la fonction de courant maximale ($\psi_{\max}$) et sur le nombre de Nusselt moyen ($\overline{Nu}$) à la surface chaude de la cavité. On peut constater que les résultats du présent travail sont en très bon accord avec ceux issus des trois autres études.

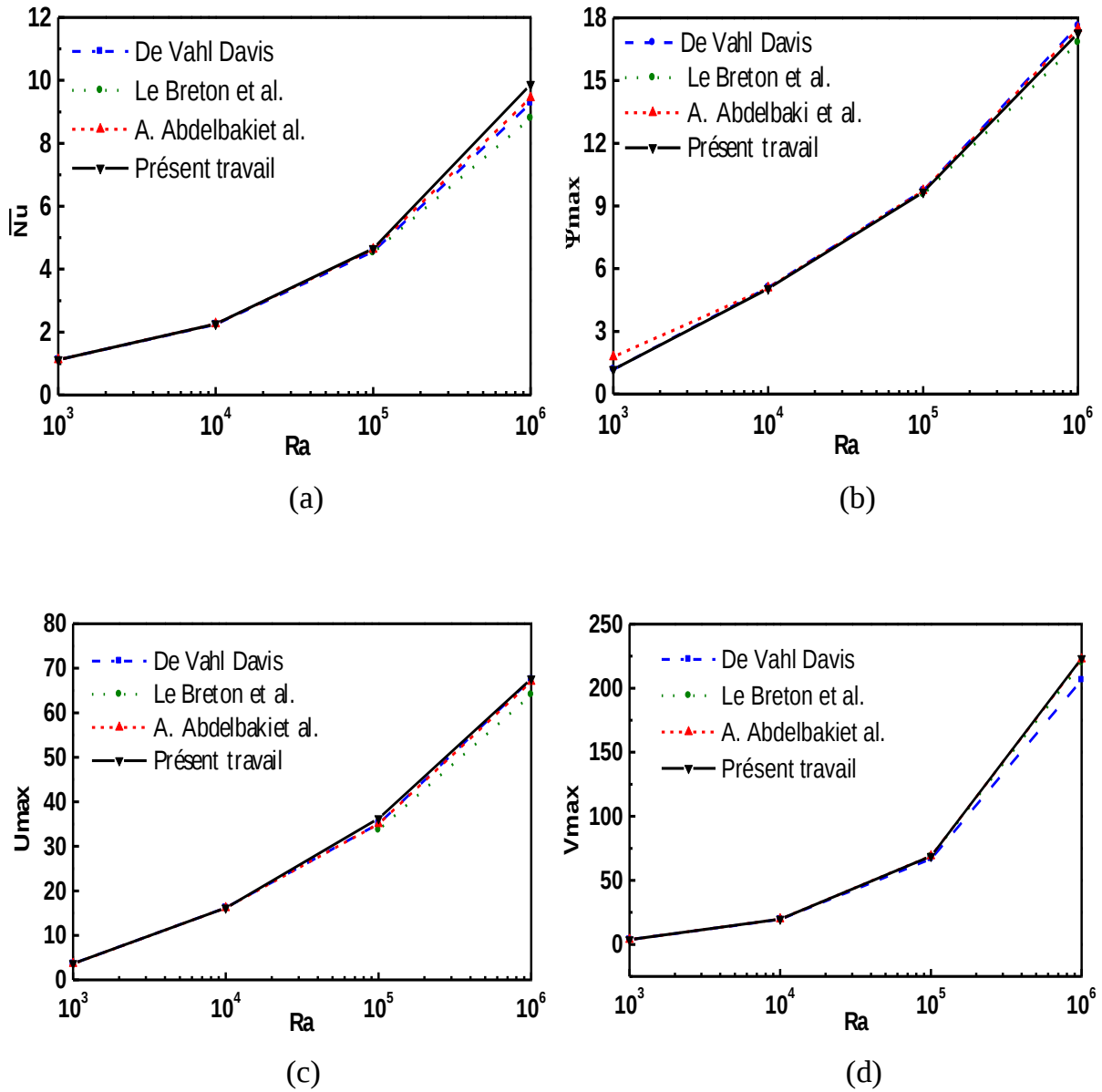


Figure 4.3 Représentation graphique des résultats du présent travail et ceux de *De Vahl Davis* [74], *Le Breton et al.* [75] et *A. Abdelbaki et al.* [29]: (a) Nusselt moyen, (b) fonction de courant maximal, (c) composante U de la vitesse à mi-largeur et (d) composante V de la vitesse à mi-hauteur.

IV.7 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés dans ce travail sont obtenus pour un bâtiment (figure 4.4) ayant un toit d'épaisseur $e_t/H_M = 0.05$ et de largeur $H_t/H_M = 1.2$, un mur d'épaisseur $e_M/H_M = 0.1$ et de hauteur $H_M/H_M = 1$, un plancher d'épaisseur $e_p/H_M = 0.05$ et de largeur $H_p/H_M = 1.2$. Le rapport λ_a/λ_s entre les conductivités de l'air et du solide est pris égal à 0,0242. Les nombres de Rayleigh (Ra), de rayonnement (Nr) et le rapport des températures (γ) varient respectivement de 5.10^9 à 25.10^9 , de 0 à 200 et de 1,02 à 1,07. Ces plages sont obtenues pour une différence de températures ($T_C - T_F$) variant de 5°C à 20°C . Cet intervalle de la différence de température ($T_C - T_F$) et la hauteur du mur du bâtiment (H_M) sont conformes aux conditions rencontrées dans la pratique. Le nombre de Prandtl de l'air dans l'habitat et l'émissivité (ε) des parois intérieures de celui-ci sont égaux respectivement à 0,71 et à 0.8.

Un compromis entre les pas d'espace et de temps et la précision des résultats a été fait. En effet, cette étude a conduit au choix d'un maillage non uniforme de 50×50 , avec 40×40 noeuds dans la cavité. Le pas de temps adimensionnel utilisé varie entre 10^{-6} et 10^{-5} selon la valeur du nombre de Rayleigh (Ra). La convergence est atteinte lorsque les écarts relatifs entre les variables calculées (U, V, P et θ), aux différents noeuds du maillage, dans deux itérations successives deviennent inférieurs à 10^{-6} .

IV.7.1 Lignes de courant et isothermes

D'après les résultats présentés sur la figure 4.5 (a); on peut constater que le transfert d'énergie dans une portion du plancher et du toit pour ($0.2 < X < 1$) est unidimensionnel. Ceci s'explique par le fait que les isothermes sont perpendiculaires à la direction principale du transfert de chaleur, direction ox . La distorsion des isothermes à l'intérieur du bâtiment, le long des parois verticales et dans le reste du plancher et du toit est due au transfert d'énergie bidimensionnel (Figure 4.5 (a)). La contraction de ces isothermes aux interfaces verticales solide - fluide est due principalement au nombre de Rayleigh qui est relativement élevé ($Ra = 5.10^6$ et $Ra = 5.10^9$) et aux gradients importants des températures dans cette interface. En effet, le rapport λ_a/λ_s entre les conductivités thermiques des deux milieux est relativement petit (égal à 0.0242). Ce rapport est déduit de la continuité du flux de chaleur

dans la même interface, solide - fluide. On ce qui concerne les lignes de courant (Figure 4.5 (b)), le résultat montre que l'écoulement d'air à l'intérieur du bâtiment est caractérisé par deux cellules tournantes dans le sens horaire. Les résultats obtenus pour $Ra = 5.10^3$ et $Ra = 5.10^6$ (figure 4.5 (b)) ont montré que la structure de l'écoulement est caractérisée par une cellule tournante dans le sens horaire. La distorsion de ces lignes de courant ($Ra = 5.10^6$ figure 4.5 (b)) indique que la cellule se prépare à se diviser si Ra augmente; ces résultats sont conformes à ceux trouvés dans les études présentées dans la littérature [29 et 39].

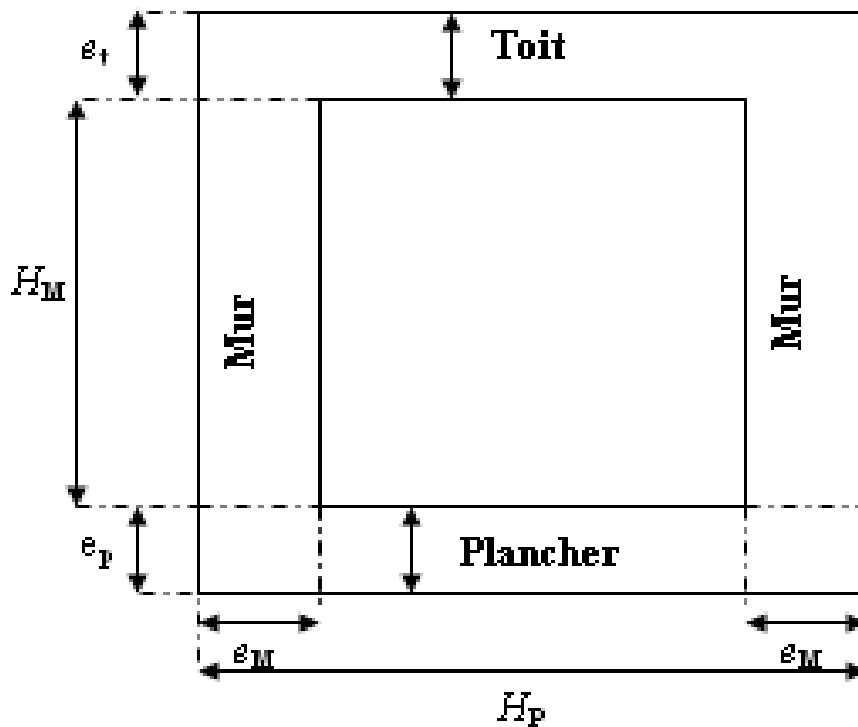
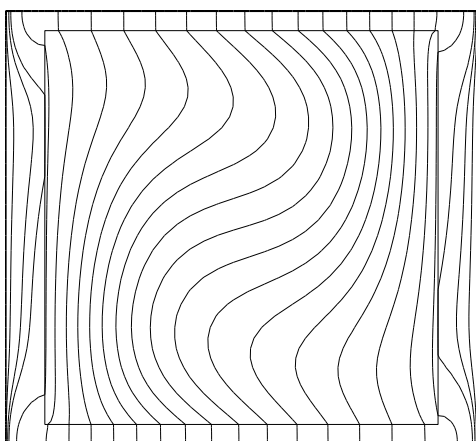


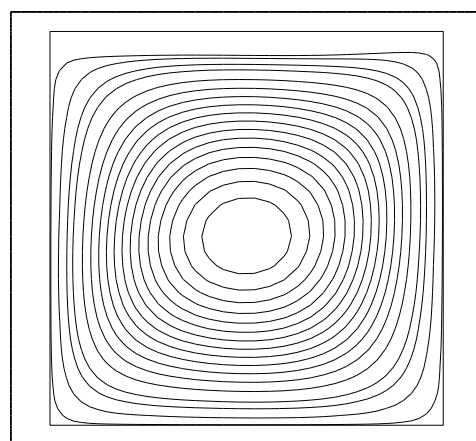
Figure 4.4 Structure du bâtiment étudié.

IV.7.2 Transfert d'énergie

La figure 4.6 présente les variations du flux de chaleur horizontal et vertical pour $\gamma = 1.05$, $Nr = 120$ et pour différentes valeurs de Ra . Concernant la distribution du flux de chaleur local en fonction de Y (figure 4.6 (a)), le résultat confirme l'importance des transferts thermiques convectifs et radiatifs à l'intérieur du local par rapport à ceux par conduction à travers les parois solides horizontales. Ces distributions de flux de chaleur présentent des maximums à mi - hauteur du mur à peu près. Ce même résultat, comme il est prévu, montre que les transferts d'énergie croissent en fonction de Ra .

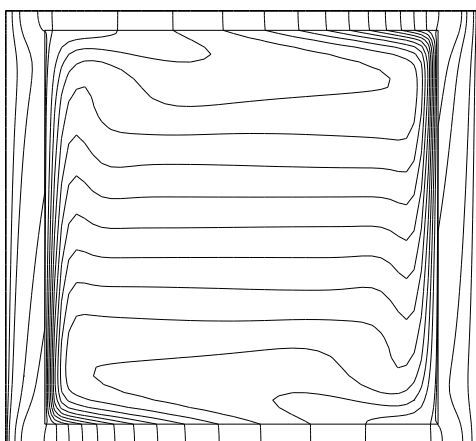


(a)

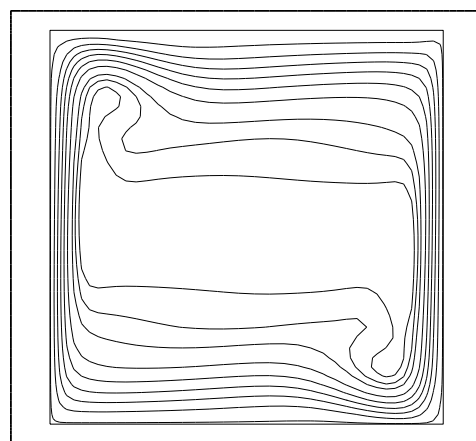


(b)

$Ra = 5.10^3$, $\gamma = 1.2$ et $Nr = 1.5$

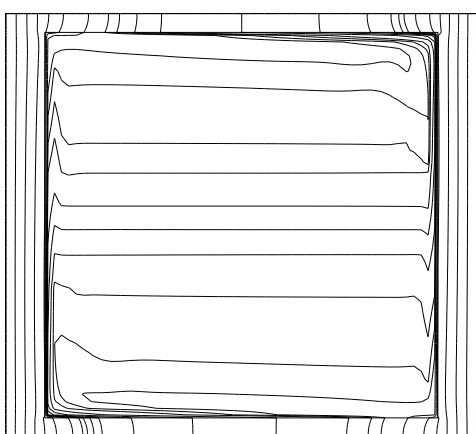


(a)

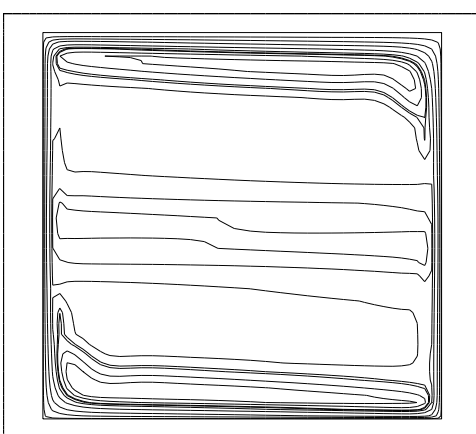


(b)

$Ra = 5.10^6$, $\gamma = 1.2$ et $Nr = 1.5$



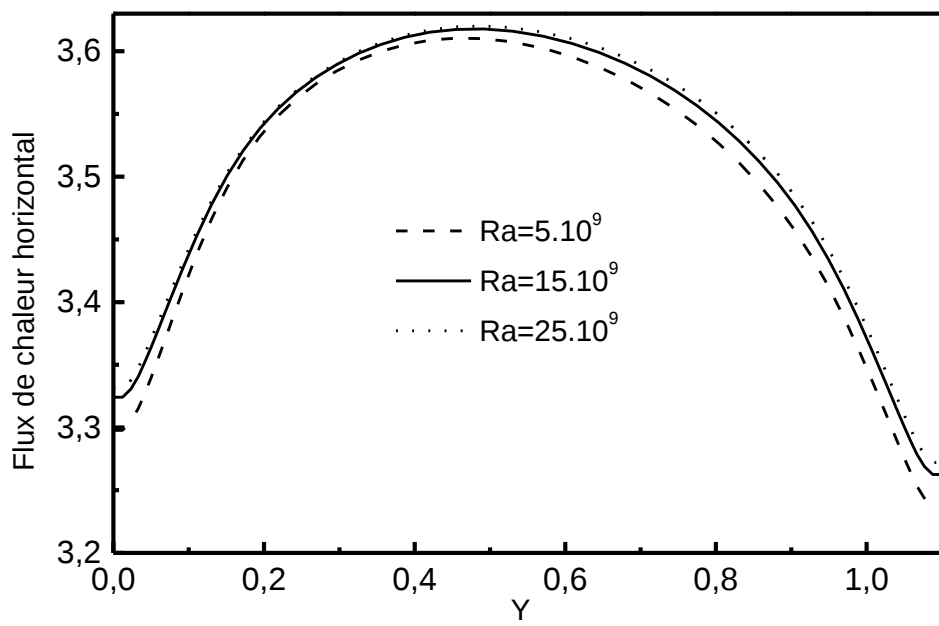
(a)



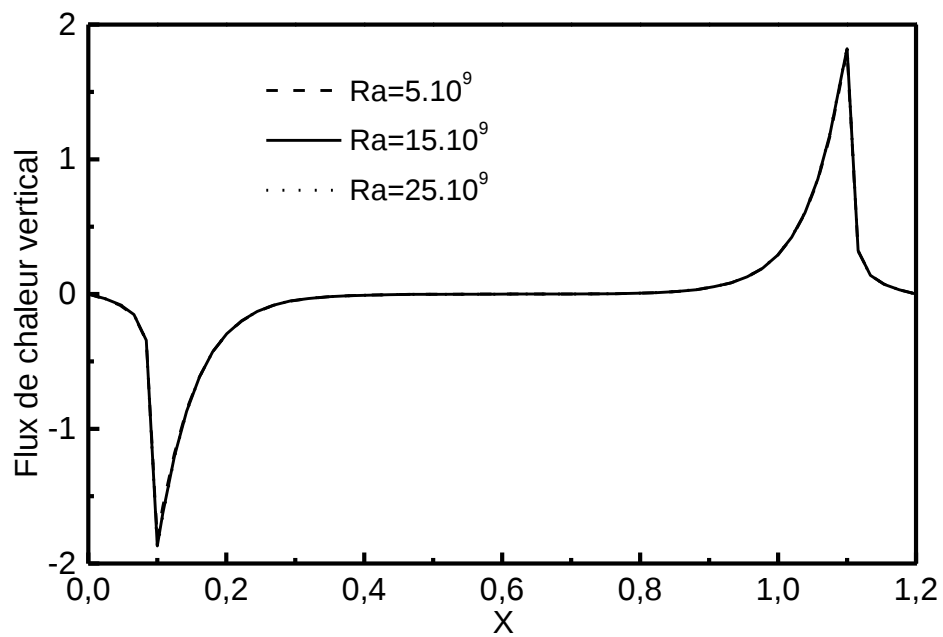
(b)

$Ra = 5.10^9$, $\gamma = 1.05$ et $Nr = 120$

Figure 4.5 (a) Isothermes, (b) lignes de courant.



(a)



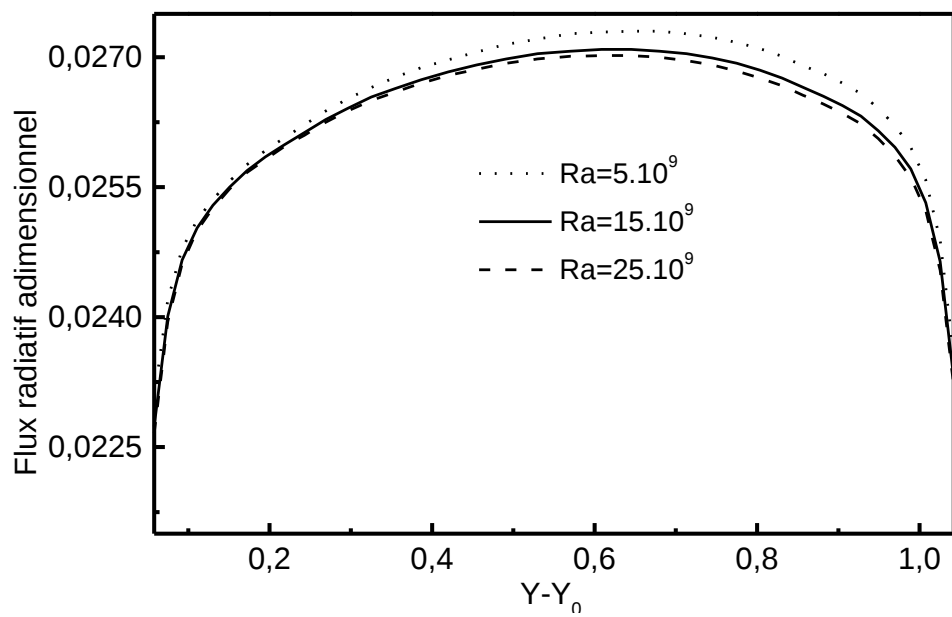
(b)

Figure 4.6 Profils des flux de chaleur: (a) flux de chaleur horizontal, (b) flux de chaleur vertical.

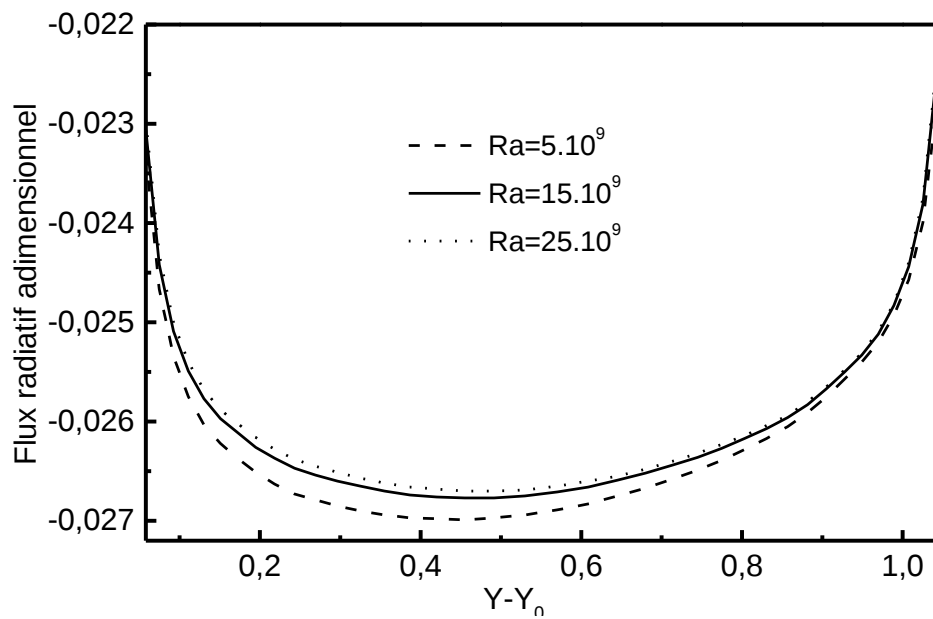
On ce qui concerne le transfert thermique, traversant le plancher à la hauteur $Y = 0.05$ (figure 4.6 (b)), le flux de chaleur présente un pic à l'interface fluide – solide de la paroi gauche du bâtiment. Ce pic est dû d'une part, au mouvement ascendant (transfert d'énergie par convection) du fluide et d'autre part, au transfert d'énergie verticalement dans le mur par conduction. Ces deux modes de transfert de chaleur deviennent importants en s'approchant de part et d'autre de cette interface. En suite, ce flux devient nul presque le long de la partie du plancher couvrant la cavité ($0.2 < X < 1$); ceci peut s'expliquer tout simplement par la monodimensionnalité du transfert d'énergie (suivant la direction ox). Le résultat observé à la proximité du mur droit est opposé à celui trouvé pour le mur gauche. Quant aux effets du nombre de Rayleigh sur la distribution du flux de chaleur verticale (figure 4.6 (b)), ils restent négligeables. Les mêmes résultats sont observés pour le flux traversant le toit à la hauteur $Y = 1.05$ (résultats non présentés ici).

La figure 4.7 donne les distributions des flux radiatifs adimensionnels sur les surfaces verticales gauche et droite du bâtiment pour un rapport de températures et un nombre de rayonnement qui sont égaux respectivement à $\gamma = 1.05$ et à $Nr = 120$ et pour un nombre de Rayleigh de valeur 5.10^9 , 15.10^9 et 25.10^9 . Concernant la surface gauche (figure 4.7 (a)), le profil du flux radiatif montre que cette surface perd l'énergie vers les autres surfaces du bâtiment. Cette perte d'énergie est due principalement à la température de la surface en question qui est chaude. Par contre, la surface droite (figure 4.7 (b)) récupère l'énergie provient des autres surfaces de l'habitat. Cette récupération de chaleur peut s'expliquer tout simplement par la température de cette dernière (surface droite) qui est froide. Les extremums des profils des flux radiatifs, presque à mi-hauteur des murs, sont dus au transfert d'énergie par convection des deux cellules tournantes dans le sens horaire et qui tendent à maintenir les distributions des températures, presque, sur les milieux des surfaces gauche et droite à prendre une valeur maximale et minimale respectivement.

On a également remarqué que la perte d'énergie par la surface chaude et la récupération de cette dernière par la surface droite (froide) diminuent en fonction du nombre de Rayleigh. Cette diminution peut s'expliquer clairement par le fait que ces échanges de chaleur radiatifs sont atténués par la convection naturelle au fur est à mesure que Ra croît.



(a)



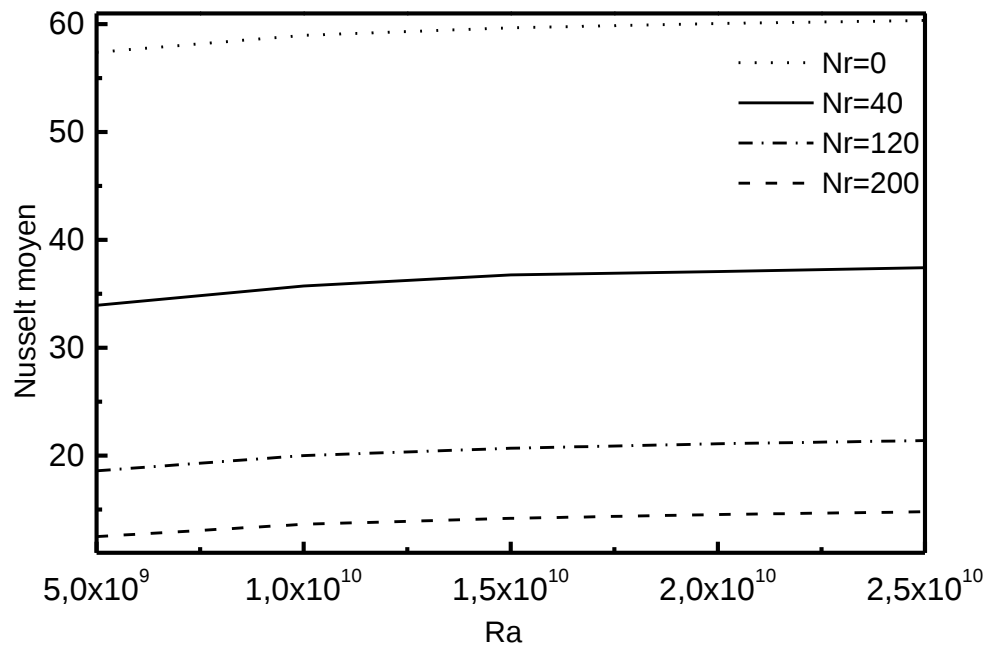
(b)

Figure 4.7 Distributions des flux de chaleur radiatifs : (a) sur la face verticale gauche, (b) sur la face verticale droite du bâtiment.

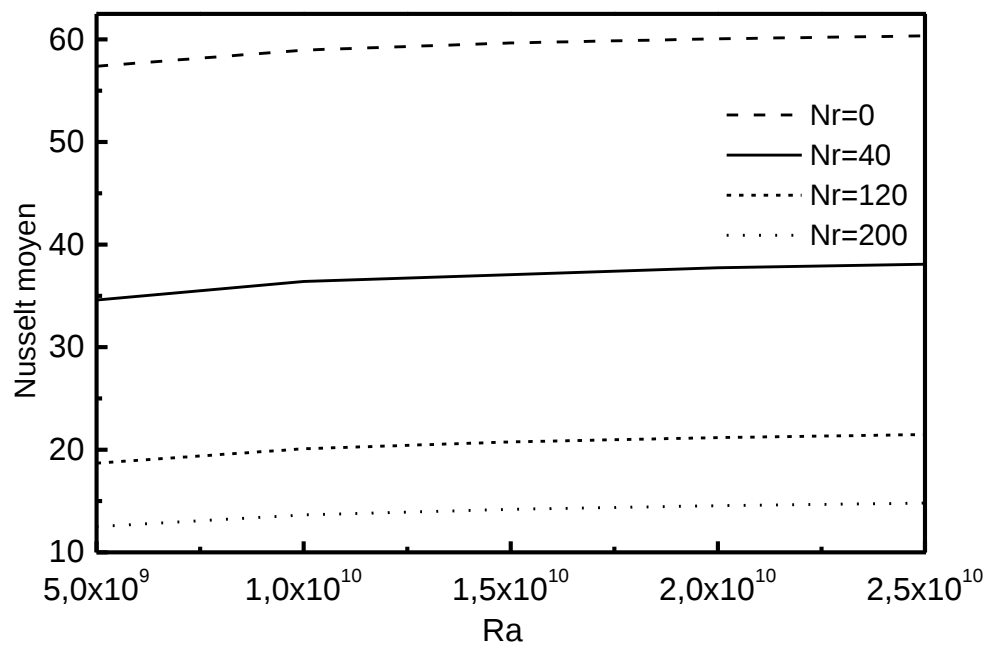
IV.7.3 Effet du rayonnement

Les variations de $\overline{Nu}$, sur les surfaces verticales gauche et droite du bâtiment, obtenues pour $\gamma = 1.05$ et pour différentes valeurs de nombre de rayonnement Nr sont portées sur la figure 4.8 en fonction de Ra . Comme il est prévu, les transferts convectifs sont atténués par les échanges radiatifs. En effet, lorsque Nr passe de 0 à 200, le nombre de Nusselt moyen, calculé sur les deux faces verticales gauche et droite du bâtiment, diminue. Cette diminution est de l'ordre de 78% pour $Ra = 5.10^9$ et de 75% pour $Ra = 2,5.10^{10}$. Les résultats obtenus montrent également que les échanges convectifs sur la surface gauche sont égaux à ceux de la surface droite du bâtiment. Cet égalité de ces échanges est due tout simplement à la monodimensionnalité du transfert d'énergie presque le long des parois horizontales couvrant la cavité pour $(0.2 < X < 1)$ et en plus, les flux moyens traversant le plancher et le toit sont égaux respectivement à $\overline{Q}_p \approx 0$ et $\overline{Q}_t \approx 0$. Ceux-ci permettent de conclure que l'égalité du nombre de Nusselt sur les deux surfaces en question est relative au principe de conservation de l'énergie (énergie entrante égale à celle sortante). Les résultats ont montré également que les échanges convectifs croissent en fonction de Ra .

En ce qui concerne l'influence des échanges radiatifs sur le transfert thermique global, la figure 4.9 montre qu'elle se traduit par une augmentation du flux de chaleur traversant l'habitat en fonction du nombre de Rayleigh (Ra). Ce flux moyen croît en fonction du nombre du rayonnement Nr . En effet, Lorsque Nr varie de 0 à 200, Q croît de 70 % à peu près pour toutes les valeurs de Ra .



(a)



(b)

Figure 4.8 Effet du nombre de rayonnement Nr sur la convection naturelle : (a) sur la surface intérieure gauche ; (b) sur la surface intérieure droite.

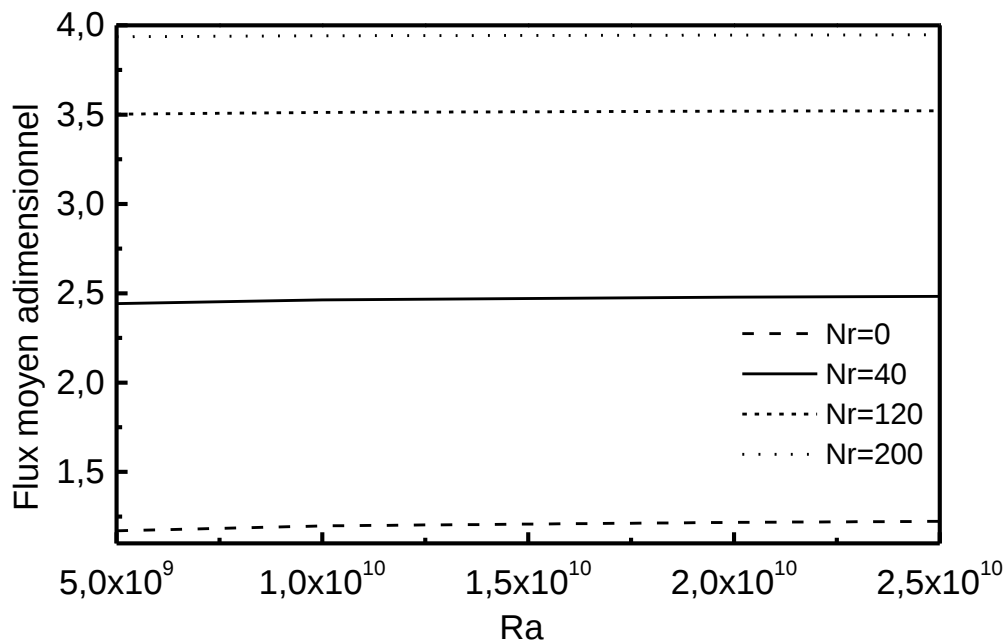
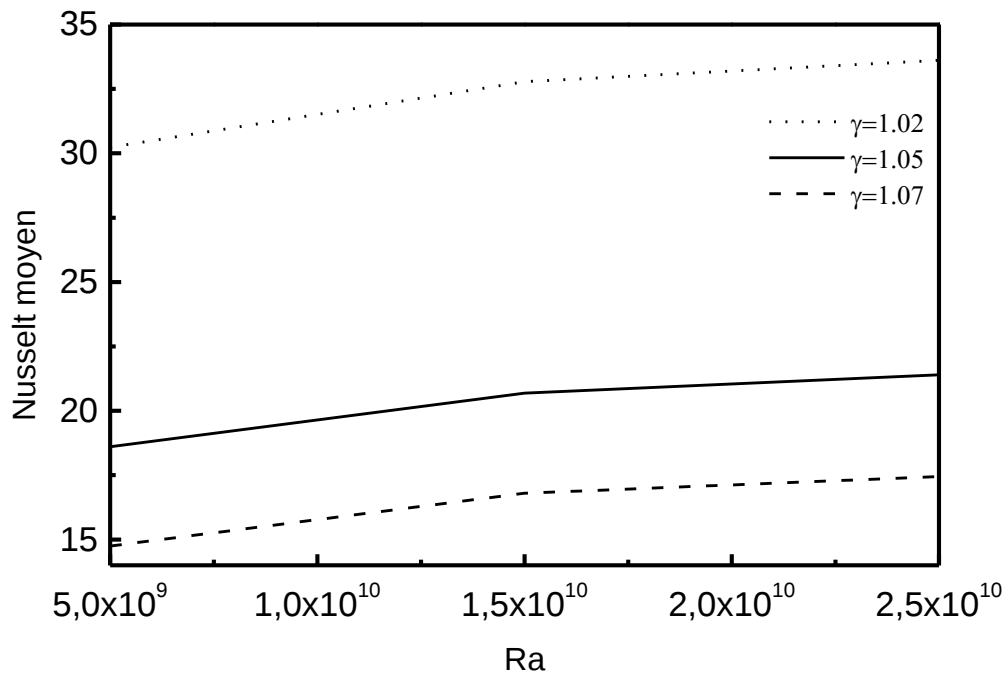


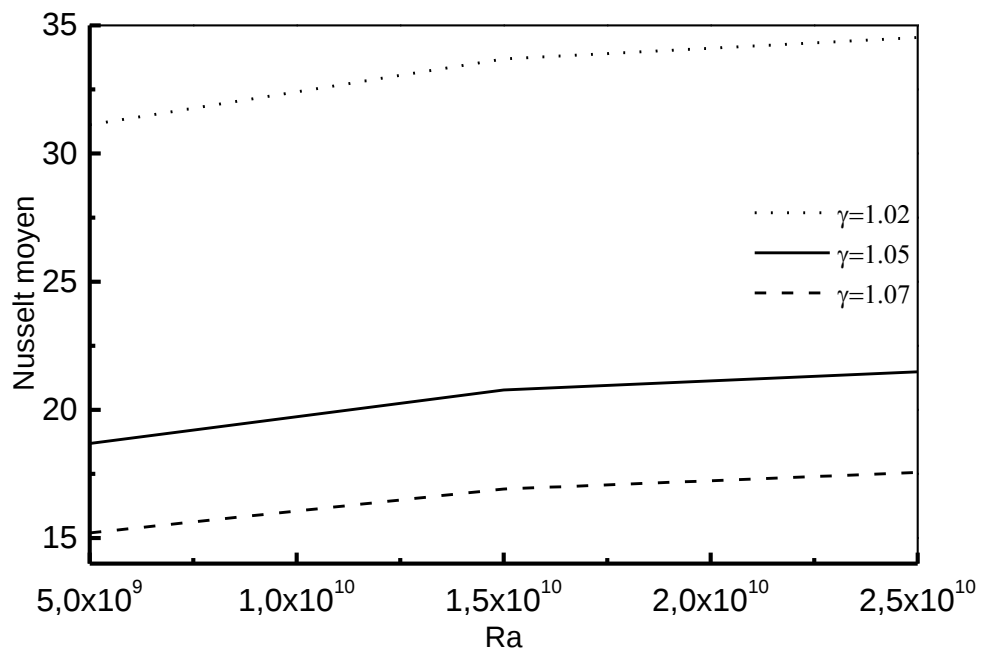
Figure 4.9 Effet du nombre du rayonnement Nr sur le transfert de chaleur global à travers l'habitat.

IV.7.4 Effet du rapport de températures γ

Les figures 4.10 (a) et (b) représentent, pour le nombre de rayonnement $Nr = 120$ et pour différentes valeurs de γ , les variations de $\overline{Nu}$ en fonction de Ra respectivement le long des surfaces verticales, gauche et droite du bâtiment. L'examen de ces figures montre que l'influence du paramètre γ sur la convection naturelle dans cet habitat est très appréciable. En effet, la variation du rapport de températures de 1.02 à 1.07 entraîne une diminution du nombre du Nusselt moyen de l'ordre de 50% le long des deux surfaces verticales, gauche et droite du bâtiment. Les résultats ont montré également que les valeurs du nombre du Nusselt moyen calculées sur la surface gauche sont presque les mêmes que celles calculées sur la surface droite. Cette égalité est due tout simplement à la conservation de l'énergie (les flux moyens traversant le plancher et le toit sont relativement nuls).



(a)



(b)

Figure 4.10 Effet du rapport de températures γ sur la convection naturelle : (a) sur la surface intérieure gauche; (b) sur la surface intérieure droite.

En ce qui concerne les variations de $\bar{Q}$ en fonction de γ (figure 4.11) et pour la même valeur de Nr ($Nr=120$) ; on constate également que le paramètre γ affecte notablement le flux thermique traversant la paroi verticale gauche. Ces résultats examinés ont montré que le flux moyen traversant cette structure, en fonction de γ , peut atteindre 29%.

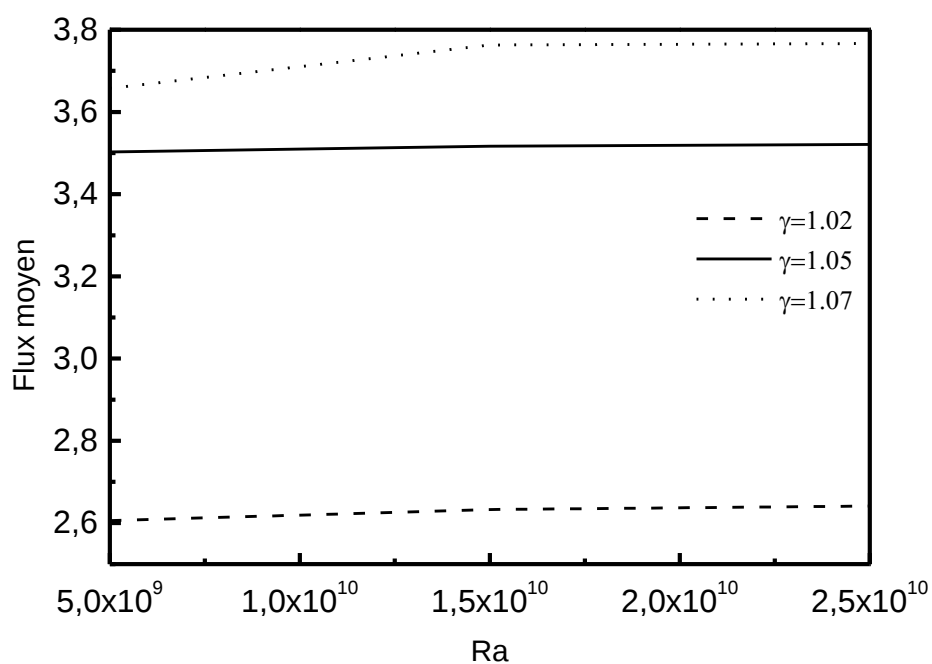


Figure 4.11 Effet du rapport de températures γ sur le transfert de chaleur global à travers le bâtiment.

IV.8 CONCLUSION

Une étude numérique des transferts de chaleur couplés par conduction, convection et rayonnement a été conduite. Les résultats obtenus, pour des plages importantes des paramètres adimensionnels caractéristiques du problème étudié, montrent que le transfert d'énergie dans une portion du plancher et du toit se fait suivant la direction ox (unidimensionnel) pour $(0.2 < X < 1)$, alors que, ce transfert de chaleur a un caractère bidimensionnel le long des parois verticales et à l'intérieur de l'habitat. Les résultats confirment également l'importance des transferts thermiques convectifs et radiatifs à l'intérieur du local par rapport à ceux par conduction à travers les parois solides horizontales. Concernant la distribution du flux adimensionnel radiatif, les résultats indiquent que la surface verticale chaude perd l'énergie alors que la surface froide récupère l'énergie radiative provenant des autres surfaces du bâtiment. Ces échanges radiatifs diminuent en fonction du nombre de Rayleigh. On ce qui concerne l'influence du nombre de rayonnement; les résultats observés montrent que les transferts convectifs sont atténués en fonction de Nr et le transfert thermique global croît en fonction de ce paramètre. En fin, l'effet du rapport de températures joue un rôle négatif sur la convection naturelle à l'intérieur du bâtiment et un rôle positif sur le flux thermique global traversant la paroi verticale gauche de l'habitat étudié.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail de recherche, nous rappelons d'abord les principaux résultats obtenus et les différentes conclusions. Ensuite, nous évoquons les perspectives immédiates qu'ouvre notre investigation.

A l'issue des résultats expérimentaux obtenus sur le mortier en fonction de la granulométrie du sable et le dosage massique du ciment dans le mélange, nous constatons que la conductivité thermique, la chaleur massique et l'effusivité thermique décroissent en fonction de la granulométrie du sable. Par contre la diffusivité thermique évolue dans le sens opposé.

En ce qui concerne le dosage massique du ciment dans le mélange, l'étude a montré que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique décroissent en fonction du pourcentage du ciment dans le matériau. Par contre la chaleur massique décroît en fonction du même matériau dans le mélange.

En suite, nous avons procédé à la caractérisation des sols limoneux prélevés des différents sites de la région d'Agadir au Maroc et sont identifiés selon la classification LCP. Ces sols limoneux qui sont liés fortement à l'eau, leurs teneurs en eau varient en permanence sous l'effet des contraintes climatiques dues au changement de saison. Cette variation est favorisée par la nature du sol qui est un matériau hygroscopique ; ça veut dire qu'il a tendance à absorber ou émettre la vapeur d'eau naturellement afin de maintenir son contact bien équilibré avec l'environnement. Cette quantité d'eau échangée, par le matériau en question, diminue en fonction de la profondeur du sol, à cause de l'accroissement de la compacité de ce matériau et

de la diminution de la teneur en air. Les résultats, obtenus en fonction de la teneur volumique en eau, ont montré que les différents matériaux étudiés sont fortement influencés par le pourcentage de l'eau dans le matériau. En effet, la conductivité thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique croissent en fonction de la teneur volumique en eau. Par contre la chaleur massique évolue dans le sens opposé aux trois grandeurs précédentes. Les résultats obtenus peuvent être considérés comme référence pour prédire les différentes propriétés thermophysiques de la majorité des sols étudiés de la région d'Agadir au Maroc. Il suffit donc de déterminer, par une procédure simple, la teneur volumique en eau du sol étudié.

Cette étude expérimentale a été faite par la méthode des boîtes permettant de déduire simultanément la conductivité thermique en régime permanent, et la diffusivité thermique en régime transitoire. La chaleur massique et l'effusivité thermique, de ces matériaux, ont été également déduites.

A la suite de cette étude expérimentale, nous avons pu exploiter les résultats expérimentaux du mortier dans la simulation numérique des transferts de chaleur couplés entre les deux bâtiments complètement enterré et semi - enterré et le sol en régime variable. Les équations régissant la conduction d'énergie dans le sol et les parois solides du bâtiment sont résolues par la méthode implicite aux directions alternées (ADI). Les parois intérieures, de ces deux configurations bidimensionnelles, sont enduites à chaque fois par une couche de cet enduit à base du ciment et du sable. Les échanges de chaleur entre le bâtiment et le sol ont été étudiés en fonction du diamètre du sable dans le mélange, le taux du liant dans le matériau ainsi que l'effet de l'épaisseur de la couche du mortier pour un dosage massique et pour un diamètre de sable fixes. Cette étude a été faite en considérant deux types de climat de Marrakech, climat chaud et climat froid. Le programme de calcul est testé sur le cas d'un bâtiment complètement enterré dont les parois intérieures sont dépourvues d'une couche du mortier, les résultats sont confrontés avec ceux obtenus en régime permanent et en régime transitoire. Ainsi, l'étude du comportement thermique de ces deux bâtiments, complètement enterré et semi - enterré a montré que:

- ✓ Dans le cas du bâtiment complètement enterré, les résultats obtenus permettent de conclure que l'augmentation du diamètre du sable, la diminution du taux de liant dans le mélange ainsi que l'augmentation de la couche d'enduit minimisent les pertes thermiques entre ce bâtiment et le sol.

✓ Dans le cas du bâtiment semi - enterré, nous avons constaté que, concernant l'influence du diamètre du sable, les échanges de chaleur avec le sol diminuent en fonction de la granulométrie de ce matériau. L'étude de l'effet du dosage massique du ciment a montré que celui-ci ne joue pas un rôle important dans les échanges de chaleur entre le bâtiment en question et le sol.

Ensuite, une étude numérique des transferts de chaleur couplés par trois modes à savoir: transfert de chaleur par conduction dans les parois massives du bâtiment, par convection à l'intérieur de celui-ci et par rayonnement entre les surfaces intérieures de l'habitat en question a été faite. Les résultats obtenus montrent que le transfert d'énergie au sein de la partie du plancher et celle du toit couvrant la cavité est unidimensionnel pour ($0.2 < X < 1$), alors que, ce transfert de chaleur devient bidimensionnel le long des parois verticales et à l'intérieur de l'habitat. Les résultats confirment également l'importance des transferts thermiques convectifs et radiatifs à l'intérieur du local par rapport à ceux par conduction à travers les parois solides horizontales. Concernant la distribution du flux adimensionnel radiatif, les résultats indiquent que la surface verticale chaude perd l'énergie alors que la surface froide récupère l'énergie radiative provenant des autres surfaces du bâtiment. Ces échanges radiatifs diminuent en fonction du nombre de Rayleigh. On ce qui concerne l'influence du nombre de rayonnement; les résultats observés montrent que les transferts convectifs sont atténués en fonction de Nr et le transfert thermique global croît en fonction de ce paramètre. En fin, l'effet du rapport de températures joue un rôle négatif sur la convection naturelle à l'intérieur du bâtiment et un rôle positif sur le flux thermique global traversant la paroi verticale gauche de l'habitat étudié.

La résolution des équations gouvernant la conduction d'énergie dans les parois massives du bâtiment, la convection naturelle à l'intérieur du local ainsi que les échanges radiatifs entre les faces intérieures de celui-ci, est réalisée par la méthode de volumes finis décrite par Patankar avec le schéma en loi de puissance. Nous avons aussi adopté l'algorithme SIMPLEC pour le couplage entre les équations de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et l'équation de continuité.

Parmi les perspectives immédiates de notre étude sera celle des transferts de chaleur entre un bâtiment complètement enterré et le sol, en configuration bidimensionnelle, dans différents sites de la région d'Agadir. Il s'agit de Dcheira, Aourir, Founti et Hay Mohammadi qui sont reconnus par des types de sol qui sont respectivement limon silteux, limon beige, sable et limon calcaire. Les propriétés thermophysiques, du sol qui entoure la cellule étudiée, à

savoir : la conductivité thermique la diffusivité thermique, la chaleur massique ainsi que l'effusivité thermique sont caractérisées expérimentalement par la cellule EI700 qui utilise la méthode dite "des boîtes". L'objectif de cette étude sera la détermination de l'effet des caractéristiques du sol en fonction de la teneur en eau sur les transferts thermiques au sein du bâtiment. La température superficielle du sol des différents sites est mesurée in situ, en fonction du temps, par les météorologues d'Agadir. Par contre celle de l'air intérieur du local sera prise constante.

Par la suite, nous allons étendre l'étude, du couplage des transferts d'énergie laminaire en régime permanent et en configuration bidimensionnelle que nous avons faite, à une étude des transferts de chaleur couplés par ces trois modes en régime turbulent et variable à travers un bâtiment en configuration tridimensionnelle.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Sangho Choi, Moncef Krarti*, Slab heat loss calculation with non-uniform inside air temperature profiles, *Energy Convers. Mgmt Vol. 37*, No. 9, pp. 1435-1444, 1996.
- [2] *Abdelhalilm Abdelbaki*, Contribution à la modélisation des transferts thermiques à travers le plancher d'un habitat sur terre pleine, thèse de DES, Faculté des sciences Marrakech, 4 Juin 1993.
- [3] *Sangho Choi, Moncef Krarti*, Heat transfer for slab-on-grade floor with stepped ground, *Energy Convers, Mgmt Vol. 39*, No, 7, pp. 691-701, 1998.
- [4] *Moncef Krarti*, Effect of Spatial Variation of Soil Thermal Properties on Slab-on-Ground Heat Transfer, *Building and Environment*, Vol. 31, No. I, pp. 51-57, 1996.
- [5] *Pirawas Chuangchid, Moncef Krarti*, Foundation heat loss from heated concrete slab-on-grade floors, *Building and Environment* 36 (2001) 637–655.
- [6] *Adnan Al-Anzi, Moncef Krarti*, Local/global analysis applications to ground-coupled heat transfer, *International Journal of Thermal Sciences* 42 (2003) 871–880.
- [7] *Adnan Al-Anzi, Moncef Krarti*, Local/global analysis of transient heat transfer from building foundations, *Building and Environment* 39 (2004) 495 – 504.

[8] *Souad Amjad*, Contribution à l'étude du comportement thermique des bâtiments semi- enterrés, Thèse de DES, Faculté des Sciences Marrakech, Maroc, 17 Décembre 1997.

[9] *Souad Amjad, Abdelhalim Abdelbaki, Zaki Zrikem*, Transfer functions method and sub-structuration technique for two-dimensional heat conduction problems in high thermal mass systems, *Energy and Building* 35 (2003) 593–604.

[10] *Y. Yuan, B. Cheng, J. Mao, Y. Du*, Effect of the thermal conductivity of building materials on the steady-state thermal behaviour of underground building envelopes, *Building and Environment* 41 (2006), 330–335.

[11] *M. Krarti, S. Choi*, Optimum insulation for rectangular basements. *Energy and Buildings*; 22 (1995) 125-131.

[12] *S.Amjad, A. Abdelbaki, Z. Zrikem*, Simulation numérique des transferts thermiques entre une cavité enterrée et le sol: méthode des fonctions de transfert bidimensionnelles et sous structuration, *Int. J. Therm. Sci.* (1999) 38, 965.

[13] *S. Choi, M. Krarti*, Thermally optimal insulation distribution for underground structures, *Energy and Buildings*, 32-2000, .251–265.

[14] *Shen, L. S., Ramsey, J. W.*, A simplified thermal analysis of earth sheltered buildings using a Fourier-series boundary method, *ASHRAE Trans.*, Vol 89, Part 1B,, (1983), 438-448.

[15] *Krarti M., Claridge D.E., Kreider J.F.*, Two dimensional heat transfers from earth-sheltered building, *Solar Energ. Eng.* 112 (1990), 43–50.

[16] *Krarti, M.*, Developments in Ground-coupling heat transfer, Ph. D. thesis, University of Colorado, Boulder, USA, (1987).

[17] *S.Amjad*, Développement des Fonctions de Transfert par la Technique de Sous -structurations et de Corrélations pour le Calcul des Transferts Thermiques pour Différents Couplages «Bâtiment - Sol», Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, Juin (2002).

[18] *Eckert, E .R. G., Bligh, T. P. et Pfender, E.*, Energy exchange between earth-sheltered structures and surrounding ground, The ground used as energy source, energy sink, or for energy storage, *Energy*, Vol. 4, pp. 171-181,(1979).

[19] *Larson D.W., Viskanta R.*, Transient combined laminar free convection and radiation in a rectangular enclosure, *J. Fluid Mech.* 78 (1976) 65-85.

[20] *Lage J.L., Lim J.S., Bejan A.*, Natural convection with radiation in a cavity with open top end, *J. Heat Trans.-T. ASME* 114 (1992) 479-486.

[21] *Koutsoheras W., Charters W.W.S.*, Natural convection phenomena in inclined cells with finite side-walls: a numerical solution, *Energy* 19 (1977) 433-438.

[22] *Kim D.M., Viskanta R.*, Study of the effects of wall conductance on natural convection in differentially oriented square cavities, *J. Fluid Mech.* 144 (1984) 153-176.

[23] *Kim D.M., Viskanta R.*, Effect of wall heat conduction on natural convection heat transfer in a square enclosure, *J. Heat Trans.-T. ASME* 107 (1985) 139-146.

[24] *Tsan-Hui Hsu, So-Yenn Tsai*, Natural convection of micropolar fluids in a two-dimensional enclosure with a conductive partition, *Numer. Heat Tr.* 28 (1995) 69-83.

[25] *V.A.F.COSTA*, Double diffusive natural convection in a square enclosure with heat and mass diffusive walls, *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 40, No. 17, pp. 4061-4071, 1997.

[26] *C. Ouardi*, Contribution à l'étude du comportement thermique d'un habitat dans le climat de Marrakech, Thèse de DES, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, décembre (1997).

[27] *D. Khaine, Jean-Yves Desmons, A. Khaine, R. Ben Younes et M. Le Ray*, Simulation du comportement thermique d'un local par la méthode des fonctions de Green, *Int. J. Therm. Sci.* (1999) 38, 340-347.

[28] *Hong Wanga, Shihe Xin, Patrick Le Quéré*, Étude numérique du couplage de la convection naturelle avec le rayonnement de surfaces en cavité carrée remplie d'air, *C. R. Mecanique* 334 (2006) 48–57.

[29] *A. Abdelbaki et Z. Zrikem*, Simulation numérique des transferts thermiques couples à travers les parois alvéolaires des bâtiments, *Int. J. lherm. Sci.* (1999) 38, 719-730.

[30] *A. Abdelbaki*. Etude détaillée des transferts thermiques couplés par convection, conduction et rayonnement dans les structures alvéolaires en régimes permanent et transitoire. Application à l'identification des coefficients de la fonction de transfert des parois du bâtiment. Thèse de doctorat d'état, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, 2000.

[31] *A. Abdelbaki, Z. Zrikem, F. Haghighat*. Identification of empirical transfer function coefficients for a hollow tile based on detailed models of coupled heat transfers. *Building and Environment*, Vol.36, p. 139-148, 2001.

[32] *T. Ait-taleb, A. Abdelbaki , Z. Zrikem*, Transferts thermiques dans des hourdis à deux alvéoles dans la direction verticale chauffés par le bas, 8ème congrès de mécanique avril (2007) 309-311.

[33] *T. Ait-taleb, A. Abdelbaki , Z. Zrikem*, Couplage convection naturelle – conduction –rayonnement dans les hourdis, Forum International sur les énergies renouvelables, Acte du forum Tome II. Mai (2002), Tétouan, Maroc, 500-505.

[34] *T. Ait-taleb, A. Abdelbaki , Z. Zrikem*, Numerical simulation of coupled heat transfers by conduction, natural convection and radiation in hollow structures heated from below or above, *Int. J. lherm. Sci.*(In press).

[35] *T. Ait-taleb, A. Abdelbaki , Z. Zrikem*, Identification des coefficients de la fonction de transfert pour une structure alvéolaire chauffée verticalement. 7ème Congrès de Mécanique Avril (2005) Vol. II, Casablanca, Maroc, 275-277.

[36] *T. Ait-taleb, A. Abdelbaki, Z. Zrikem*, Effet du nombre d'alvéoles dans la direction horizontale sur les transferts thermiques couples a travers un plancher alvéolaire, Congrès Comple's'2K7, Energie et Environnement 2007, ENSA-AGADIR (Maroc), 411-416.

[37] *O. Tadrari, A. Abdelbaki et Z. Zrikem*, Transfert thermiques couplés dans un système solaire à mur massif, Forum International sur les énergies renouvelables, Acte du forum Tome I. Mai (2002), Tétouan, Maroc, 167-172.

[38] *H. El harfi, A. Abdelbaki et Z. Zrikem*, Effet du rapport de forme sur les transferts thermiques couplés dans un mur trombe non ventile, 8ème congrès de mécanique avril (2007) 300-302.

[39] *M. Boukendil, A. Abdelbaki et Z. Zrikem*, Couplage convection naturelle – conduction – rayonnement dans une cavité verticale à parois alvéolaires, 8ème congrès de mécanique avril (2007) 303-305.

[40] *M. Boukendil, A. Abdelbaki et Z. Zrikem*, Étude numérique des transferts thermiques couples a travers deux parois alvéolaires séparées par une lame d'air, Congrès Comple'2K7, Energie et Environnement 2007, ENSA-AGADIR (Maroc), 332-337.

[41] *K.-Y. Chien*, Predictions of channel and boundary layer flows with a low-Reynolds-number two-equation model of turbulence, AIAA-80-0134 (1980).

[42] *W. P. Jones and B. E. Launder*, The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence, Znr. J. Heat Mass Transfer 15,301-314 (1972).

[43] *R. A. W. M. HENKES, F. F. VAN DER VLUGT and C. J. HOOGENDOORN*, Natural-convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-number turbulence models, Int.J.Heat Mass Transfer. Vol.34, No.2, pp.377-388, 1991.

[44] *M. S. Bohn, A. T. Kirkpatrick and D. A. Olson*, Experimental study of three-dimensional natural convection at high Rayleigh number, J. Heat Transfer 106,339-345 (1984).

[45] *A. T. KIRKPATRICK and M. BOHN*, An experimental investigation of mixed cavity natural convection in the high Rayleigh number regime, int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 29, No. 1, pp. 69-82, 1986.

[46] Y.S. Tian, T.G. Karayiannis, Low turbulence natural convection in an air filled square Cavity Part I: the thermal and fluid flow fields, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000) 849-866.

[47] A.M. Lankhorst, Laminar and turbulent natural convection in cavities - numerical modelling and experimental validation, Ph.D. thesis, Technology University of Delft, The Netherlands, 1991.

[48] J. Blumm, A. Lindemann, S. Min, Thermal, Characterization of liquids and pastes using the flash technique, *Thermochimica Acta*, 455 (2007) 26–29.

[49] Wilson Nunes dos Santos, Paul Mummery, Andrew Wallwork, Thermal diffusivity of polymers by the laser flash technique, *Polymer Testing* 24 (2005) 628–634.

[50] M. Lachi et A. Degiovanni, Influence de l'erreur de mesure de température de surface par thermocouples de contact sur la détermination de la diffusivité thermique par méthode « flash », *J. Phys. III France* 2 (1992) 2247.

[51] Seog-Kwang Kim, Yong-Jin Kim, Improvement of specific heat measurement by the flash method, *Thermochimica Acta* 455 (2007) 30–33.

[52] S. Min, J. Blumm, A. Lindemann, A new laser flash system for measurement of the thermophysical properties, *Thermochimica Acta* 455 (2007) 46–49.

[53] A. Degiovanni, J.C. Barsale et D. Maillet, Mesure de la diffusivité longitudinale de matériaux anisotropes, *Rev Gén Therm* (1996) 35, 141-147.

[54] Jerzy Bodzenta, Bogusław Burak, Marian Nowak, Monika Pyka, Maria Szalajko, Marta Tanasiewicz, Measurement of the thermal diffusivity of dental filling materials using modified Angström's method, *Dental Materials* (2006) 22, 617–62.

[55] H.H. Friis-Pedersen, J.H. Pedersen, L. Haussler, B.K. Storm, Online measurement of thermal diffusivity during cure of an epoxy composite, *Polymer Testing* 25 (2006) 1059–1068.

[56] *Saleh A. Al-Ajlan*, Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 2184.

[57] *O. Carpentier, D. Defer, E. Antczak, A. Chauchois, B. Duthoit*, In situ thermal properties characterization using frequential methods, *Energy and Buildings* (In press).

[58] *Mohamed FILALI*, Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures, Thèse de doctorat, N° 2326, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 24 Février 2006.

[59] *N. Lamkharou et , S. Boussaid , H. Ezbakhe , A. El Bakkouri, T. Ajzoul, A. El Bouardi*, Etude thermique de la terre de Larache stabilisée au ciment, *Forum International sur les énergies renouvelables, Acte du forum Tome II*. Mai (2002), Tétouan, Maroc, 541.

[60] *A.EL Bakkouri, T. Ajzoul, H. Ezbakhe, A. Et Bouardi*, Influence de l'humidité sur les propriétés thermo-physiques de certains matériaux locaux liège, plâtre et brique creuse, *Revue marocaine de génie civil* N°64 Juillet - Août (1996), 89.

[61] *A.EL Bakkouri*, Caractérisation thermophysique et mécanique de quelques matériaux locaux utilisés dans l'isolation et la construction: le plâtre, le liège et la brique creuse. Thèse de DES, Université Abdelmalek essaadi Faculté des Sciences Tétouan, Maroc, Février (1996).

[62] *A. EL BAKKOURI, H. EZBAKHE, T. AJZOUL, A. EL BOUARDI*, Etude thermomécanique du béton allégé avec du liège et du béton allégé avec des grignons d'olive, 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005, 307-310.

[63] *P.S. Ngohe-Ekam, P. Meukam, G. Menguy, P. Girard*, Thermophysical characterisation of tropical wood used as building materials: With respect to the basal density, *Construction and Building Materials*, 20 (2006) 929.

[64] *Lahcen BOUKHATTEM*, Caractérisation thermophysique des matériaux de construction : étude expérimentale et numérique, mémoire de DESA, Université Ibn Zohr, Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Agadir, Juillet (2004).

[65] Bulletin technique, Cellule de mesure des caractéristiques thermo-physiques des matériaux, EI700.

[66] *Sacadura JF.*, Initiation aux transferts thermiques, CAST, technique et documentation, INSA de Lyon, 3eme trimestre, 1978.

[67] *P. Dol Zotto*, Mémotech, Génie Energétique, Edition CASTEILLA.

[68] *A. Khabbazi*, Etude des écoulements le long d'une paroi verticale non isotherme, dans une cavité fermée a grand nombre de Rayleigh, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, février (1993).

[69] Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Cours de mécanique des sols, Tome I propriétés des sols.

[70] Siegel R., Howell J.R., Thermal radiation heat transfer, McGraw-Hill, 2nd ed, New York, 1981.

[71] *Suhas V. Patankar*, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere, New York, 1980.

[72] *Ching Jen Chen, Richard Bernatz, Kent D. Carlson and Wanlai Lin*, Finite analytic method in flows and heat transfer.

[73] *Penot F.*, Numerical calculation of two-dimensional natural convection in square open cavities, Numer. Heat Transfer, 5, pp. 421-437.

[74] *De Vahl Davis G.*, Natural convection of air in a square cavity: a Bench Mark numerical solution, Int. J. Numer. Meth. FI. 3 (1983) 249-264.

[75] *Le Breton P., Caltagirone J.-P., Arquis E.*, Natural convection in square cavity with thin porous layers on its vertical walls, J. Heat Trans.-T. ASME, 113 (1991) 892-898.

Résumé:

Dans cette thèse, nous avons présenté une étude expérimentale de caractérisation thermophysique du mortier et des sols limoneux. La caractérisation thermophysique du mortier, qui est le matériau de construction par excellence, est réalisée en fonction de la granulométrie du sable et le dosage massique du ciment dans le mélange. En revanche, la caractérisation des sols limoneux est faite en fonction de la teneur volumique en eau. Ces sols sont prélevés des différents sites de la région d'Agadir au Maroc. Il s'agit de Dcheira, Aourir, Hay Mohammadi et Founti qui sont connus par des types de sol qui sont respectivement limon silteux, limon beige, limon calcaire et le sable. Ces sols limoneux ont été identifiés selon la classification LCP. Cette étude expérimentale est réalisée par le dispositif EI700 qui est conçu spécialement pour déterminer simultanément la conductivité thermique et la diffusivité du matériau par la méthode dite "des boîtes" du régime permanent et transitoire. Par la suite, les caractéristiques réelles du mortier sont utilisées dans l'étude de la simulation et optimisation des transferts de chaleur entre les deux bâtiments, complètement enterré et semi - enterré, et le sol en configuration bidimensionnelle. Les parois de la cellule bidimensionnelle étudiée sont colmatées à chaque fois par une couche de ce mortier. Les équations régissant la conduction d'énergie dans le sol et les parois solides du bâtiment sont résolues par la méthode des différences finies en utilisant le schéma (ADI). En fin de ce travail, la simulation numérique des transferts de chaleur couplés par trois modes (conduction, convection et rayonnement) à travers un bâtiment a fait l'objet de cette étude. Les équations qui régissent la conduction d'énergie au sein des parois de la cellule, la convection naturelle à l'intérieur du local ainsi que les échanges de chaleur par rayonnement entre les surfaces internes du bâtiment en question sont discrétisées par la méthode des différences finies, basée sur l'approche des volumes de contrôles et sont résolues en utilisant l'algorithme SIMPLEC. Les deux faces horizontales extérieures du local sont thermiquement isolées, alors que, les deux autres faces verticales dont l'une qui est la surface gauche maintenue à une température chaude, tandis que, celle de la face droite est maintenue à une température froide.

Mots clés: Caractérisation; Méthode des boîtes; Mortier; Sols limoneux; Bâtiment complètement enterré; Bâtiment semi – enterré; Simulation; Transferts thermiques couplés.

Abstract:

In this work, we presented an experimental study of thermophysical characterization of mortar and silty soils. The thermophysical characterization of mortar, which is an excellent building material, is carried out according to the granulometry of sand and the proportioning of cement. On the other hand, the thermophysical characterization, based on water content, has been carried out to determine thermophysical properties of silty soils taken from different sites of Agadir area. It's a matter of Dcheira, Aourir, Founti and Hay Mohammadi which are well-known by types of soil which are respectively silty silt, beige silt, sand and calcareous silt. These silty soils are identified according to the HDGP classification. The characterization has been experimentally done by EI700 Device which is specially designed to determine simultaneously the thermal conductivity and diffusivity of the material by the method called "box". Steady-state and unsteady state methods were used to measure thermal conductivity and thermal diffusivity, respectively. Thereafter, the thermophysical properties of mortar are used in the study of the simulation and optimization of two-dimensional of heat transfers between the two buildings, completely buried and shallow basement, and the soil. The walls of the studied buildings are filled at each time by a layer of mortar in interior faces of their walls. The equations governing the conduction of energy in the soil and walls of buildings are solved by the method ADI (Alternating Direction Implicit). At the end of this thesis, the numerical simulation of the coupled heat transfers by conduction, convection and radiation through a building has been done. Equations governing the heat conduction in the surrounding walls of building, the natural convection in the room and the radiation heat exchange between internal surfaces are solved using a finite difference technique based on the control volume approach and the SIMPLEC algorithm. The two horizontal walls of building are differentially isolated whereas the two vertical walls, one of which is the left surface maintained at a hot temperature and the right surface is maintained at a cold temperature.

Keywords: Thermophysical characterisation; Boxes method; Mortar; Silty soils; Simulation; Earth - sheltered building; Shallow basement; Coupled heat transfer