

République algérienne démocratique et populaire
Ministère De l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia Adrar

Faculté des Sciences et de la technologie - Département d'Hydrocarbures et Energies Renouvelables



Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Energies Renouvelables

Option: Energies Renouvelables

Intitulée :

***Contribution à l'optimisation et l'amélioration de l'isolation
d'une habitation utilisant une source renouvelable dans les
zones arides.***

Soutenu publiquement le 26/12/2018 par : BELATRACHE Djamel

Devant le jury composé de :

Mr. HAMOUDA Messaoud	Professeur	Université Ahmed Draia-Adrar	Président.
Mr. BENTOUBA Saïd	Professeur	Université Ahmed Draia-Adrar	Directeur de Thèse.
Mr. BOUROUIS Mahmoud	Professeur	Université Rovira i Virgili, Espagne	Co-Directeur de Thèse.
Mr. BENATIALLAH Ali	Professeur	Université Ahmed Draia-Adrar	Examineur.
Mr. TOUATI Boumediene	Professeur	Université Tahri Mohammed-Béchar	Examineur.
Mr. HARROUZ Abdelkader	MCA	Université Ahmed Draia-Adrar	Examineur.

L'année universitaire : 2018/2019

Remerciements :

Tout d'abord, louange à « Allah » qui nous a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

Notre gratitude est grande, en premier lieu envers mon encadreur, directeur de thèse, le professeur BENTOUBA Saïd de l'Université d'Adrar et mon co-directeur de thèse le professeur BOUROUIS Mahmoud de l'Université Rovira i Virgili, Tarragona, pour avoir accepté de diriger ce travail malgré ses innombrables tâches. Nous tenons à le remercier vivement pour ses précieux conseils et ses critiques constructives qui ont orienté ce modeste travail de recherche jusqu'à son aboutissement.

Nous tenons à remercier Monsieur HAMOUDA MESSOUAD, professeur à l'Université d'Adrar ; qui nous a honoré en acceptant d'être président de ce jury.

Nous remercions également Monsieur, BENATIALLAH Ali professeur à l'Université d'Adrar, Monsieur TOUATI Boumediene professeur à l'Université Tahri Mohammed-Béchar et Monsieur HARROUZ Abdelkader maître de conférence à l'Université d'Adrar pour avoir accepté la charge d'être examinateur.

Je tiens à remercier enfin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicace

A mes parents

A mes frères et mes sœurs

*A tous les enseignants de l'université d'Adrar
et l'université d'Ouargla*

A tous mes amis d'Adrar et d'Ouargla

*A tous ceux qui m'ont enseigné; même une
seule lettre*

Je dédie ce travail

Titre : Contribution à l'optimisation et l'amélioration de l'isolation d'une habitation utilisant une source renouvelable dans les zones arides.

Résumé : Les changements climatiques et le réchauffement de la planète sont des préoccupations majeures dans la société moderne, non seulement dans le contexte de modifications des paramètres physiques du climat aux niveaux régional et mondial, mais également en ce qui concerne les changements qu'il entraîne à tous les niveaux du monde vivant: la population, l'environnements, l'écosystème, les habitats résidentiels. En période d'été, les bâtiments sont influencés par les radiations solaires intenses. Notre travail est dans le cadre de la recherche des solutions bioclimatiques dans les bâtiments en utilisant des sources naturelles et renouvelables ; donc un nouveau modèle de refroidissement passif avec un échangeur de chaleur air/sol assisté par un échangeur de chaleur air/végétal a été étudié pour évaluer le confort thermique dans les bâtiments résidentiels. L'étude expérimentale a été effectuée pour extraire les propriétés de (07) sept échantillons avec deux types d'isolations thermiques (fibres de palmier dattier, épillet de palmier dattier). Les résultats ont été introduits dans une simulation afin d'étudier l'effet de l'utilisation de ces matériaux sur le confort thermique des bâtiments. Les trois chambres (a), (b) et (c) construites avec du sable argileux, de la fibre de palmier et des épillets de palmiers, respectivement. La simulation est effectuée pour évaluer la performance de ces matériaux afin de réduire la consommation d'électricité dans la région d'Adrar pendant la période d'été. Des prototypes sont réalisés pour tester l'effet des isolations sur les toits du bâtiment et les comparer aux résultats obtenus avec la simulation.

Title: Contribution to optimizing and improving the insulation of a building using a renewable source in arid climates.

Summary: Climate change and global warming are major concerns in modern society, not only in the context of changes in the physical parameters of the climate at the regional and global levels, but also in the changes, it brings to all the levels of the living world: the individual population, their environments, ecosystems, residential habitats. In the summer period, buildings are influencing by intense solar radiation. Our work integrated in the search for bioclimatic solutions in buildings using natural and renewable sources; therefore, a new passive cooling model in an air / ground heat exchanger assisted by an air / plant heat exchanger was studied to evaluate the thermal comfort in residential buildings. The experimental study was carried out to extract the properties of (07) seven samples with two types of thermal insulation (date palm fibers, date palm spikelet). The results were introduced in a simulation to study the effect of the use of these materials on the thermal comfort of buildings. The three rooms (a), (b) and (c) constructed with clay sand, palm fiber and spikelet of palm, respectively. The simulation is performed to evaluate the performance of these materials to reduce electricity consumption in the Adrar region during the summer period. Prototypes are made to test the effect of insulation on the roofs of the building and compare them with the results obtained with the simulation.

العنوان: المساهمة في تحسين العزل الحراري في المنازل باستخدام مصدر متجدد في المناطق القاحلة

ملخص: يعد تغير المناخ والاحتباس الحراري العالمي من الشواغل الرئيسية في المجتمع الحديث، ليس فقط في سياق التغيرات في المعايير المادية للمناخ على المستويين الإقليمي والعالمي، ولكن أيضًا في التغييرات التي يسببها. على جميع مستويات العالم الحي: السكان الأفراد، بيناتهم، النظم الإيكولوجية، الموائل السكنية. في فترة الصيف، تتأثر المباني بالإشعاع الشمسي المكثف. يندمج عملنا في البحث عن الحلول المناخية الحيوية في المباني باستخدام المصادر الطبيعية والمتجددة. لذلك تم دراسة نموذج تبريد سلبي جديد في المبادل الحراري الجوي / الأرضي بمساعدة مبادل حراري للهواء / النبات لتقييم الراحة الحرارية في المباني السكنية. أجريت الدراسة التجريبية لاستخراج خواص (07) سبعة عينات مع نوعين من العزل الحراري (ألياف نخيل البلح، نخيل التمر). تم تقديم هذه النتائج في محاكاة لدراسة تأثير استخدام هذه المواد على الراحة الحرارية للمباني. الغرف الثلاث (أ) و (ب) و (ج) شيدت بالرمال الطينية وألياف النخيل وسبيكة النخيل على التوالي. يتم تنفيذ المحاكاة لتقييم أداء هذه المواد لتقليل استهلاك الكهرباء في منطقة أدرار خلال فترة الصيف. يتم عمل نماذج أولية لاختبار تأثير العزل على أسطح المباني ومقارنتها بالنتائج المحققة مع المحاكاة.

Symboles :

A	Surface (m^2)
C _p	Capacité calorifique spécifique du sol (J / kg.K)
L _s	Épaisseur (m)
I	Radiations solaires totales sur la surface horizontale (W/m ²)
λ	Conductivité thermique (W / m.K)
ρ	Densité de l'échantillon (kg / m ³)
h	Coefficient de convection (W / m ² .C)
q	Flux de chaleur (W / m ²)
R ₀	Toiture
T	Température (° C)
W	Fenêtre (/)
W _a	Mur (/)
V	Volume (m ³)
Q	Flux de chaleur (W)
T	Température (° C)
t	Temps (Heure)
η	Efficacité moyenne du système (%)
α	Diffusivité thermique du sol (m ² / jour)
C _p	Capacité calorifique spécifique du sol (J / kg.K)
λ	Conductivité thermique du sol (W / m.K)
ρ	Densité du sol (kg / m ³)
φ	Flux de chaleur (kJ)
R _{conv}	Résistance thermique de l'échange de chaleur par convection (m.K / W)
R _{pipe}	Résistance thermique du tuyau enterré (m.K / W)
R _{soil}	Résistance thermique du sol (m.K / W)
r _i	Rayon intérieur du tuyau enterré (m)
r _e	Rayon extérieur du tuyau enterré (m)
ω	Fréquence annuelle de la température (rad / jour)

t	Jour de l'année (Jour)
t ₀	Jour de température maximale de surface (c'est-à-dire 198)
A _s	Amplitude de la variation de température de la surface du sol (° C)
T _{mean}	Température annuelle moyenne (° C)
Z	Profondeur de la surface de la terre (m)
D	Diamètre du tuyau (m)
h	Coefficient de transfert de chaleur (W / m ² .C)
ṁ	Débit massique (kg / s)
Nu	Numéro de Nusselt (-)
Pr	Numéro de Prandtl (-)
Q	Flux de chaleur (W)
Ra	Numéro Rayleigh (-)
Re	Le numéro de Reynold (-)
T	Température (° C)
η	Efficacité moyenne de l'échangeur (%)
Q _{cool}	Potentiel de refroidissement quotidien moyen (Wh)

Abréviations :

Amb	Ambiant
EPD	Epillet de palmier dattier
FPD	Fibres de palmier dattier
PPD	Pétiole de palmier dattier
In	Intérieur
Out	Extérieur
Int	Surface interne
Ext	Surface externe
Poly	Polystyrène

Liste des figures

Chapitre I :

Figure.I.1. Tendance de la consommation totale d'énergie. 3

Figure.I.2. La consommation énergétique en Algérie de 1990 à 2016..... 4

Figure.I.3. La consommation énergétique en Algérie en 2016 par type..... 5

Figure.I.4: La division du programme des énergies renouvelables par secteur technologique.....6

Figure.I.5. Mur de Trombe non ventilé; Mur ventilé de Trombe en mode hiver; Mur ventilé Trombe en mode été. 7

Figure.I.6. Principe de fonctionnement du PCM système 8

Figure.I.7. Différents types de bricks 9

Figure.I.8. Vue sur le dôme du hammam de Sidi Younes à Cherchell..... 10

Figure.I.9. Toiture végétalisée avec différents types: résidentiel. 11

Figure.I.10: sélection des matériaux de construction.12

Figure.I.11: Rotin: a) fibres de rotin; b) maison de boue + rotin de fibre.....13

Figure.I.12: La cheminée solaire. 14

Figure.I.13: Bardage extérieur en bois.14

Figure.I.14: échangeur de chaleur ; mode boucle ouverte..... 15

Figure.I.15. Les échanges thermiques du corps humain..... 16

Figure.I.16 Exemple de plage de confort sur le diagramme de l'air humide..... 19

Figure.I.17 Température de confort pour différentes vitesses relatives de l'air et un habillement moyen..... 20

Figure.I.18 : Classification des climats selon Köppen 22

Figure.I.19: Classification du climat en Algérie..... 23

Figure.I.20 La situation géographique de région d'Adrar. 24

Figure.I.21 : Température moyenne mensuelle (Tmin, Tmax) pour la région d'Adrar (2004 à 2017). 25

Figure.I.22 : Précipitation moyenne mensuelle dans la région d'Adrar (2004 à 2017)..... 26

Figure.I.23 : Vitesse moyenne mensuelle des vents dans la région d'Adrar (2004 à 2017)..... 27

Figure.I.24: Humidité relative moyenne mensuelle dans la région d'Adrar (2004 à 2017). 28

Figure.I.25 :Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de De-Martonne. 29

Figure.I.26 : Place de région d'étude Adrar dans le Climagramme d'EMBERGER (2004-2017). 30

Chapitre II:

Figure.II.1. Schéma du système de ventilation en nuit et l'échangeur de chaleur terre-air en journée..... 37

Figure.II.2. Présentation schématique d'un système couplé puits canadien et cheminée solaire..... 38

Figure.II.3. Schéma intégrée à l'échangeur de chaleur air et de la cheminée solaire. 39

Figure.II.4. Le modèle du bâtiment, (air/sol), modèle du sol TRNSYS..... 41

Figure.II.5 Schéma de système photovoltaïque assistée par échangeur air/sol. 42

Figure.II.6 : Schéma de prototype utilisé dans l'étude expérimentale..... 51

Figure.II.7 : Schéma d'un tour de refroidissement à sec à tirage naturel amélioré..... 53

Figure.II.8. Schéma pour les deux types de plafond de refroidissement PCM.....59

Figure.II.9. Capteur du vent de refroidissement..... 60

Chapitre III:

Figure.III.1. Les matériaux utilisés pour le mélange 69

Figure.III.2. Échantillons composites utilisés pour la mesure de la conductivité thermique 69

Figure.III.3. (a) Machine de conductivité thermique H112N (b) schéma méthode de la graduation de plaque chaude..... 71

Figure.III.4 Influences des pourcentages73

Figure.III.5. Chambres : (a) brique d'argile, (b) brique d'argile avec DPF, (c) brique d'argile avec DPS74

Figure.III.6. Modèle de simulation TRNSYS TYPE 56 pour une chambre..... 77

Figure.III.7. Variation des températures des murs dans la pièce (a) 79

Figure.III.8. Variation des températures des murs dans la pièce (b) 81

Figure.III.9: Variation de températures des murs dans la pièce (c)..... 82

Figure.III.10 Variations horaires des températures internes et externes des toits dans les pièces..... 83

Figure.III.11 Variation mensuelle de la température intérieure dans les chambres avec et sans climatisation. 84

Figure.III.12 Variation des charges de refroidissement horaires des pièces. 85

Figure.III.13. Travail expérimentale..... 86

Figure.III.14. Placement des thermocouples pour chaque chambre.....86

Figure.III 15. Variation de température extérieure et l'irradiation solaire.....90

Figure.III.16. Variations de la température de surface externe et interne.....91

Figure.III.17. Variation de température intérieure dans chaque prototype.....92

Chapitre IV:

Figure.IV.1 système de rafraîchissement passif utilisant un échangeur de chaleur à air.....96

Figure.IV.2. La variation de température du sol dans la région de l'Adrar à différentes profondeurs.....98

Figure.IV.3. Schéma de principe de l'échangeur de chaleur sol simulé.....99

Figure.IV.4. Schéma d'un échangeur air/sol couplé avec échangeur air/végétal.....102

Figure.IV.5. Température de l'air le long du tube à différentes profondeurs.....104

Figure.IV.6. Profils de température mensuels sur une année de l'air ambiant, de l'air à la sortie de l'échangeur et de la différence de température entre les deux.....105

Figure.IV.7. Influence de la température du tuyau sur la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur.....106

Figure.IV.8. Variation de l'efficacité moyenne et du potentiel de refroidissement journalier de l'échangeur en fonction de la longueur du tuyau.....106

Figure.IV.9. Variation mensuelle sur une année de la température de l'air ambiant et du potentiel de capacité de refroidissement.....107

Figure.IV.10. La variation de la température de la sortie en fonction du diamètre.....108

Figure.IV.11. La variation de la température de la sortie d'air en fonction de la vitesse.....109

Figure.IV.12. La variation de la température de la sortie d'air en fonction de la profondeur.....110

Figure.IV.13. La variation de la température de la sortie d'air en fonction de la longueur.....110

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 : Température moyenne mensuelle pour la région d’Adrar24
Tableau I.2 : Précipitation de la région d’Adrar25
Tableau I.3 : Variation de vent de la région d’Adrar.....26
Tableau I.4 : Humidité relative moyenne mensuelle dans la région d’Adrar.....27

Chapitre II:

Tableau II.1 : Modèle empirique d'estimation de température du sous-sol.....35

Chapitre III :

Tableau III.1: Proportions de tous les mélanges d’échantillons séchés et leurs propriétés.....70
Tableau III.2: Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés72
Tableau III.3: Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans chaque chambre.....76
Tableau III.4: Coefficient du transfert de chaleur Valeurs.....87
Tableau III.5: Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans chaque prototype.....89

Chapitre IV :

Tableau IV.1: Propriétés thermiques et physiques de l’air, des tuyaux et du sol dans ce travail..... 96
Tableau IV.2: Paramètres de l’échangeur de chaleur air/sol utilisés dans la simulation96
Tableau IV.3: Températures maximales et minimales mensuelles du site à Adrar 97
Tableau IV.4: Les paramètres utilisés pour la validation par rapport aux données expérimentaux... 101
Tableau IV.5 : Résultats de la validation d'un modèle par rapport aux données expérimentaux102
Tableau IV.6: Paramètres de l’échangeur de chaleur air/sol proposé dans la simulation.....108
Tableau IV.7: Meilleure configuration de l'échangeur utilisée avec le mur végétalisé..... 111

Sommaire

Table des matières

Remerciement	i
Dédicaces.....	ii
Résumé	iii
Nomenclature	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	viii

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Les techniques de la climatisation passive dans les bâtiments

I.1. Introduction	3
I.2. Les techniques utilisant dans les bâtiments pour réduire la consommation	5
I.2.1. Les murs	5
I.2.2. Les toits	8
I.2.3. Les systèmes de rafraîchissement passif	12
I.3. Confort thermique	15
I.3.1. Notion de confort	15
I.3.2. L'échanges thermiques du corps humain avec l'environnement	16
I.3.3. Paramètres influant sur le confort thermique.....	18
I.4. Le climat	20
I.4.1. Définition du climat	20
I.4.2. Classification de climat	21
I.5. Conclusion	31
Références	32

Chapitre II : État d'art sur la climatisation passive

II.1. Introduction	35
II.2. État de l'art des systèmes de climatisation passive par échangeur.....	35
II.3. État de l'art des systèmes de climatisation passive par la ventilation naturelle (Tour Vent/cheminée solaire)	52
II.4. Conclusion	60
Références	61

Chapitre III : Etude théorique et expérimentale d'isolation dans la toiture

III.1. Introduction	68
III.2.1. Préparation des échantillons	68

III. 3. Analyse thermodynamique utilisant trois types des matériaux de construction à base de dattier dans une pièce dans les climats arides	73
III.3.1. Modèle numérique de la simulation	73
III.3.2. Résultats de la simulation	77
III.4. Etude théorique et expérimental sur l'utilisation des matériaux locaux des dattes de palme pour l'isolation des toitures dans les climats arides	85
III. 4.1. Prototype room and roofs description	85
III.4.2. Approche de simulation	85
III.4.3. Validation entre les résultats théoriques et expérimentaux	89
III.5. Conclusion	92
Références	94

Chapitre IV: Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien

IV.1. Introduction	95
IV.2. Modélisation mathématique	95
IV.2.1 Modélisation de la température du sol	98
IV.2.2 Modélisation de l'échangeur de chaleur air/sol	99
IV.2.3. Validation du modèle	101
IV.2.4 Modélisation de l'échangeur de chaleur air/végétal	102
IV.3. Résultats de simulation	104
IV.3.1 Effet de la profondeur sur les performances de l'échangeur	104
IV.3.2 Variation annuelle de la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur	105
IV.3.3. Influence de la longueur du tube sur la différence de température de l'échangeur	105
IV.3.4 Variation de l'efficacité moyenne et le refroidissement potentiel journalier en fonction de la longueur de tuyau de l'échangeur	106
IV.3.5 La variation mensuelle de la température ambiante et du potentiel de refroidissement	107
IV.3.6. Influence de la végétation sur la performance d'un échangeur air/sol	107
IV.4. Conclusion	111
Références	113
Conclusion générale	114
List des publicaions	116
Annexe	117
publicaions	128

Introduction générale

Introduction générale :

La consommation d'énergie primaire mondiale ne cesse d'augmenter depuis la révolution industrielle du XIXe siècle avec une part prépondérante pour les énergies fossiles (80 % en 2016) [1]. Depuis 20 à 30 ans, en raison de la situation mondiale de la pollution environnementale issue des émissions des gaz à effet de serre, tous les systèmes énergétiques durables se basent sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Il est intéressant d'exploiter ces sources d'énergie renouvelables sur le lieu de consommation, en les transformant directement pour satisfaire des besoins de climatisation ou génération de l'électricité.

Le secteur résidentiel en Algérie est le secteur le plus consommateur d'énergie par rapport à l'énergie totale consommée et donc le plus provoquant des émissions à effet de serre. Ce secteur représente près de 46% de l'utilisation totale d'énergie en Algérie et environ 59% de cette énergie est utilisé pour la climatisation, la ventilation et le refroidissement de l'espace. Les systèmes de refroidissement et de chauffage classiques éprouvent un grand impact sur la sécurité des émissions de fourniture d'énergie et de gaz à effet de serre. Il est donc nécessaire de réduire l'impact environnemental de ce secteur en promouvant le concept des bâtiments utilisant les énergies renouvelables et aussi implémenter des méthodes pour réduire la consommation d'énergie, contrairement à l'approche classique.

La réduction de l'utilisation des énergies fossiles peut influencer positivement la réduction de la production de ces gaz à effet de serre et assurer une autosuffisance électrique, soit à travers l'isolation thermique des bâtiments ou l'utilisation des énergies renouvelables dans le secteur des bâtiments ou les deux ensembles, ainsi l'utilisation des énergies renouvelables a un impact important sur le développement de l'économie nationale dans une vision de développement durable articulé sur le programme national des énergies renouvelables qui prévoit un taux de 40% à base des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique Algérien d'ici 2040.

Les pouvoirs publics montrent actuellement une volonté affirmée de réduction des consommations énergétiques dans le secteur des bâtiments à travers de différentes réglementations thermiques légiférées. En Algérie, la loi 99-09 et le décret exécutif 2000-09[2], suivis par des autres réglementations, ont pour objectifs la maîtrise de l'énergie et l'introduction de l'efficacité énergétique dans les bâtiments. Le centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB) aide à cette démarche énergétique en publiant des documents techniques réglementaires à l'usage des

professionnels du bâtiment. L'agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APPRUE), comme CNERIB, contribue aussi à la nouvelle démarche énergétique algérienne. Sa stratégie vise à mobiliser les acteurs du bâtiment autour des programmes et des objectifs inscrits dans le cadre du programme national de la maîtrise d'énergie.

La thèse est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la conception architecturale de l'habitat résidentiel, dans cette partie nous présentons une mise en situation et diverses réflexions quant à l'isolation thermique, les techniques utilisées dans les maisons pour réduire la consommation énergétique.

Dans le deuxième chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur les études antérieures menées par les chercheurs scientifiques et les professionnels du bâtiment, sur les systèmes de l'isolation thermique; la climatisation naturelle par échangeur de chaleur, le tour de vent et la cheminée solaire.

Le chapitre trois est subdivisé en trois volets principaux :

- Étude expérimentale sur deux types de mélanges « l'argile, le sable » et « l'argile, le sable avec différents teneurs de fibre » ou les conductivités thermiques ont été introduites dans le programme de simulation Trnsys.
- Etude théorique de l'effet de l'isolation thermique par matériaux locaux dans la période estivale.
- Étude théorique des pertes thermique à travers la toiture d'une lame d'air sans et avec le remplissage de fibre de palmier dans la toiture ont été validés expérimentalement.

Le chapitre quatre a été consacré à un modèle analytique thermique afin d'étudier le mouvement de l'air dans le sol à travers un tube du puits canadien avec et sans végétation, dont l'objectif est de fournir la température du sol constante avec certaine profondeur durant une année. La simulation numérique par Matlab de la climatisation passive dans un système utilisé le puits canadien comme, source de climatisation principal, ventilation naturelle, respectivement, dans la région d'Adrar a été effectué en utilisant les données climatiques de la région d'Adrar.

Une conclusion générale clôtura cette thèse de doctorat.

Chapitre I

Techniques de la climatisation passive dans les bâtiments.

I.1. Introduction :

Les bâtiments commerciaux et résidentiels jouent un rôle principal dans les économies d'énergie. La réduction des émissions de gaz à effet de serre, la pollution et la protection de l'environnement sont une priorité nationale puisqu'ils consomment près de 40% de l'énergie primaire et environ 59% de l'électricité en Algérie [1]. Évidemment, la consommation d'énergie par le secteur de d'habitat augmente continuellement en raison de l'évolution démographique et l'extension du secteur de bâtiments à travers toute l'Algérie, ce qui fait monter la consommation d'énergie par habitant. Les données de la consommation énergétique dans le monde indiquent que le demande à l'électricité pour le bâtiment a doublé entre 1990 et 2016, et devrait encore augmenter de 50% d'ici 2025, la figure.I.1 montre la consommation totale d'énergie entre les années 1990 et 2016 pour différentes régions dans le monde [2]. On remarque que la consommation énergétique pour l'Afrique est entre 382 et 784 Metp avec une augmentation substantielle année après année. La tendance à l'évolution drastique de la consommation d'énergie dans les bâtiments commerciaux et résidentiels ne s'arrêtera pas à long terme à moins d'un réveil mondial des populations et des gouvernements, d'améliorations technologiques efficaces et de politiques préférentielles pour encourager les applications des énergies renouvelables.

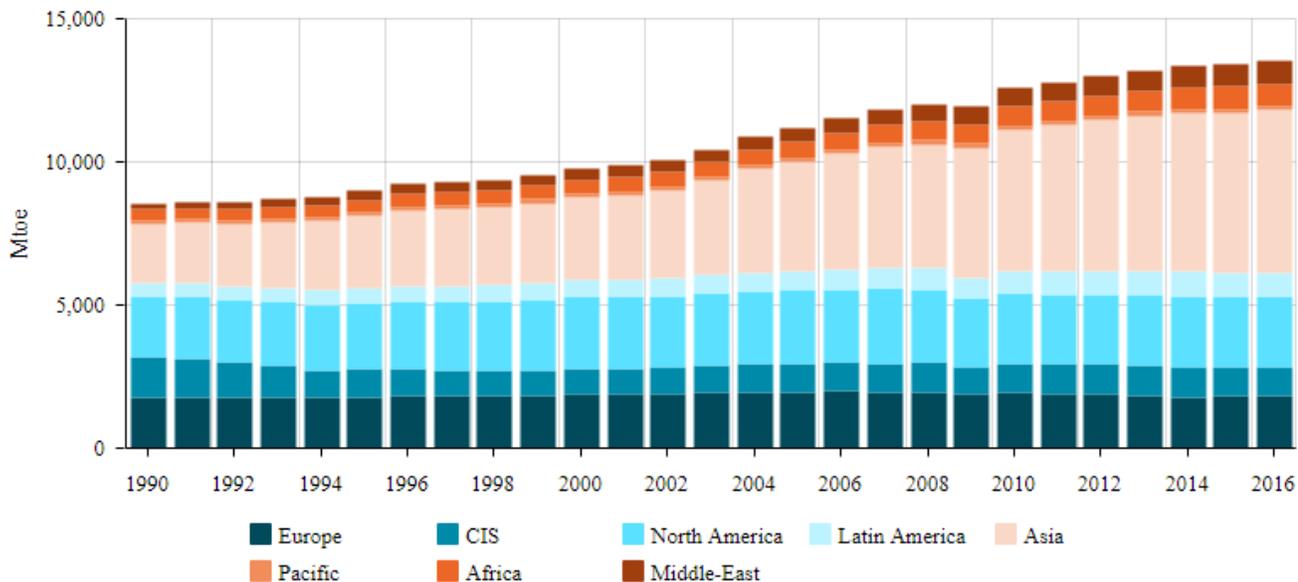


Figure.I.1. Tendance de la consommation totale d'énergie [2].

L'Algérie est située en Afrique du Nord avec plus de 2,38 millions de kilomètres carrés de superficie, contient 48 provinces. En 2017, la population algérienne était estimée à 40,9 millions (33^{ème} dans le monde), la majorité de la population est condensée au nord du pays [2]. L'Algérie est classée comme le plus grand pays d'Afrique et 10^{ème} au monde en termes de superficie [2], et classée également 55^{ème} en consommation d'énergie au monde avec 55 MTEP en 2016, plus du double de ce qu'elle consomme avant deux décennies (Figure.I.2) en basant sur l'énergie fossile avec un taux de 98% comme le montre la Figure.I.3.

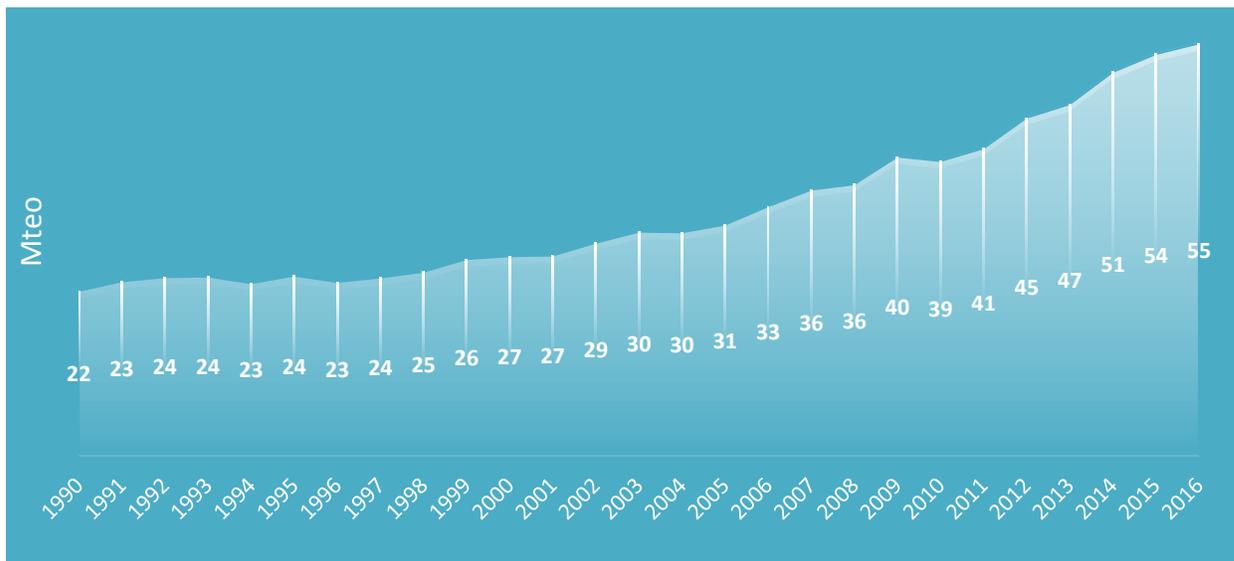


Figure.I.2. La consommation énergétique en Algérie de 1990 à 2016.

La répartition de la consommation finale par produits est présentée dans figure.I.3, il ressort que la structure de la consommation finale reste dominée par les produits pétroliers (36%). L'évolution de cette structure par rapport à 2015, indique une croissance des parts de l'électricité et du gaz naturel au détriment de la part des produits pétroliers qui a baissé de près de 2% en 2016. [3]

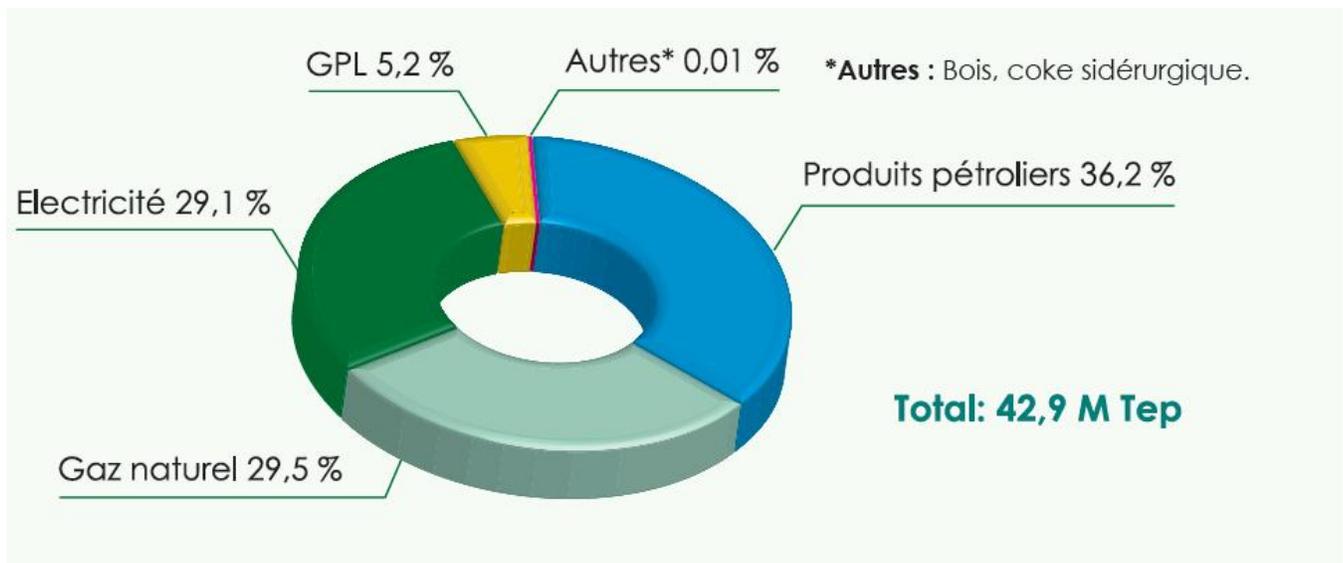


Figure.I.3. La consommation énergétique en Algérie en 2016 par type. [2]

En consommation électrique, l'Algérie est classée au 47ème à l'échelle mondiale avec 60 TWh en 2016 (10% de la consommation Africaine), et 44ème en production d'électricité avec 78 TWh [1]. L'Algérie possède l'un des potentiels solaires parmi les plus élevés au monde. L'irradiation horizontale globale est de 3000 Wh / m² par an dans le nord et de plus de 5000 Wh / m² par an dans le sud algérien [3]. L'Algérie possède également une importante ressource éolienne dans le sud du pays, avec une vitesse de vent variant entre 4 m/s et 8 m / s [3], une estimation de la ressource éolienne de 35 TWh par an dans l'ensemble du pays [4]. Le gouvernement algérien a planifié une stratégie de conception pour le développement des énergies renouvelables 2011-2030, la consistance renouvelable du programme à réaliser pour les besoins du marché national pendant la période 2015-2030 est de 22000 MW. La réalisation de ce programme permettra d'atteindre d'ici 2030 une part d'énergies renouvelables d'environ 27% dans le rapport national de production électrique [5], la répartition de ce programme par secteur technologique apparaît à la figure I.4.

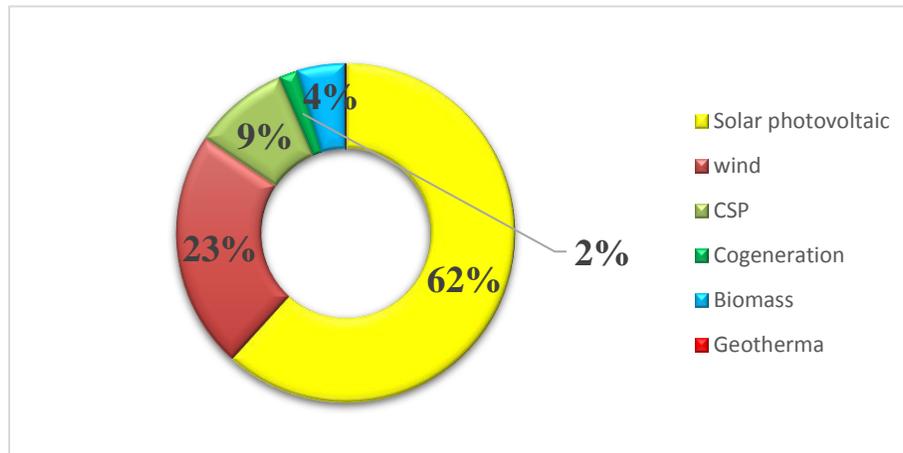


Figure I.4: La division du programme des énergies renouvelables par secteur technologique [5]

I.2. Les techniques utilisées dans les bâtiments pour réduire la consommation :

Près de la moitié de l'énergie totale consommée par un bâtiment est utilisée pour le refroidissement et le chauffage de l'espace intérieur des bâtiments. Il existe des stratégies actives et passives pour faire face à ce défi, les stratégies actives comprennent le chauffage, la ventilation, la climatisation, l'éclairage, et les stratégies passives comprennent les préoccupations concernant l'enveloppe du bâtiment. Une enveloppe de bâtiment est la surface qui sépare l'environnement intérieur d'un bâtiment à l'environnement extérieur tel que les murs, les toits, les fenêtres, les ombrages extérieurs, l'isolation thermique, la masse thermique...etc. Pour des enveloppes de bâtiment spécialement conçues, les bâtiments éco-énergétiques peuvent être construits pour atteindre la durabilité énergétique. Les bâtiments que nous attendons aujourd'hui devraient être dotés d'une architecture éco énergétique et des matériaux de construction respectueux de l'environnement.

I.2.1. Les murs :

Les murs couvrent la plus grande surface parmi les différentes enveloppes de bâtiment. Le confort thermique et acoustique d'un habitat est aussi principalement dû à la conception de l'enveloppe. La résistance thermique d'un mur de bâtiment est l'un des paramètres importants qui contrôle considérablement la consommation d'énergie d'un bâtiment. Les murs sont classés en fonction du matériau nécessaire de construction: il y a des murs à base de bois, des murs à base de métal et des murs

à base de maçonnerie. Cependant, les conceptions modernes de mur avec des technologies avancées peuvent considérablement améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Différentes technologies de murs avancés sont discutées ci-dessous. [6]

➤ **Murs solaires passifs :**

Ces murs sont faits d'une épaisseur de béton de 30 cm pour accueillir le rayonnement solaire disponible au sud. Le verre est utilisé dans la couverture externe des murs pour fournir un effet de serre. Il y a quatre façons d'atteindre l'efficacité énergétique à l'intérieur des bâtiments tel que les murs solaires passifs qui sont des murs solaires non ventilés, des murs Trombe, des murs Trombe isolés et des murs solaires composites. Les murs Trombe ou les murs solaires non ventilés sont favorable dans l'été. Cependant, les saisons de chauffage plus courtes peuvent être gérées par des murs solaires composites ou des murs isolés Trombe. La surchauffe des bâtiments pendant les saisons d'été peut être régulée par des boucliers solaires, la Figure.I.5 présente les modes de Mur Trombe dans les périodes été et hiver. [6]

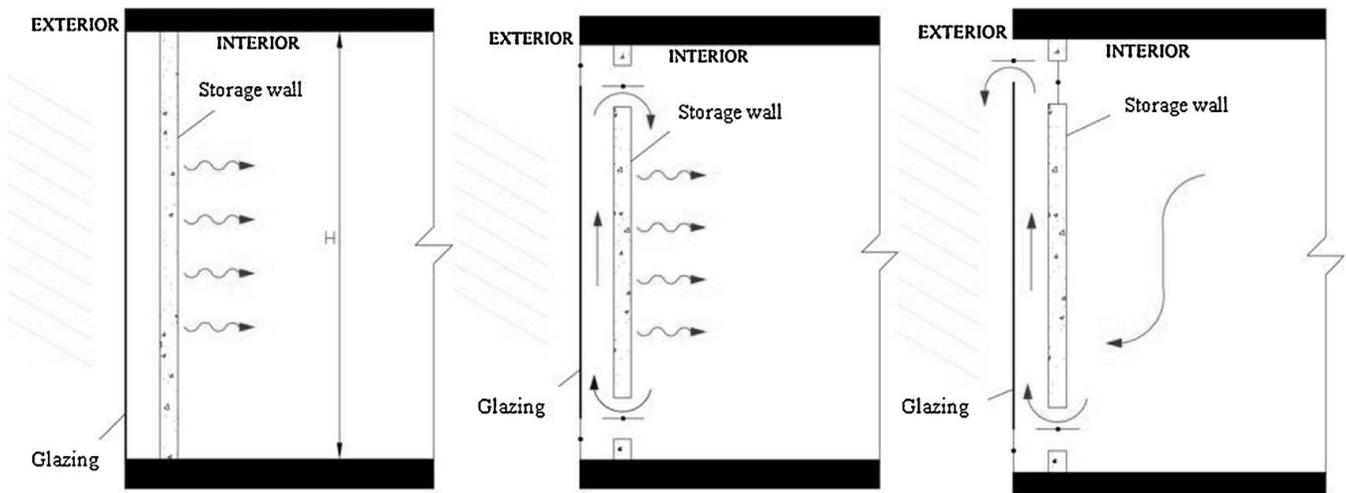


Figure.I.5. Mur de Trombe non ventilé (à gauche); Mur ventilé de Trombe en mode hiver (centre); Mur ventilé Trombe en mode été (droite). [6]

➤ **Murs utilisant le system de stockage thermique (MCP):**

Les matériaux à changement de phase (MCP) attirent les chercheurs à cause de leur capacité à matérialiser l'objectif du contrôle du chauffage au cours de la dernière décennie. La fonctionnalité des MCP repose en grande partie sur l'absorption de l'énergie excédentaire lorsqu'il y en a suffisamment et sur la libération de l'énergie absorbée en cas de déficit énergétique. L'utilisation de cette technologie réduit la consommation énergétique du bâtiment au niveau de confort de l'environnement intérieur en raison des fluctuations de température marginales. Les MCP sont généralement utilisés dans les bâtiments pour l'installation de panneaux muraux à base MCP sur le côté intérieur de l'enveloppe du bâtiment comme montré dans la figure.I.6. La capacité élevée de stockage thermique de ces panneaux muraux absorbe et libère la chaleur dans le bâtiment pendant une partie importante de la journée. Basé sur la capacité de stockage thermique suffisante de ces panneaux muraux, l'utilisation d'une faible inertie thermique est prometteuse. Les MCP peuvent généralement être classés en deux groupes, à savoir les composés organiques et inorganiques. [7]



Figure.I.6. Principe de fonctionnement du PCM système. [8]

➤ **Murs avec Béton léger :**

Les murs de béton, comme illustré dans la figure.I.7, étaient populaires en raison de leur rentabilité et de la disponibilité de la main-d'œuvre moins qualifiée. Ces murs sont résistants à la chaleur, mais leur résistance thermique peut encore être améliorée en utilisant des agrégats légers tels que la pierre ponce, l'argile expansée de diatomite. Au cours des dernières années, les gens ont également signalé des agrégats à faible conductivité thermique tels que le polystyrène, la vermiculite...etc. [9]

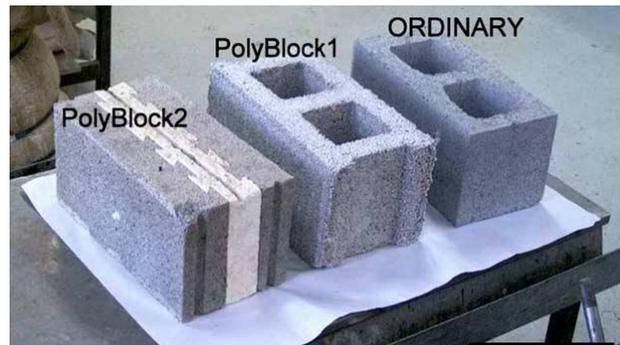


Figure.I.7. Différents types de bricks. [9]

I.2.2. Les toits :

Les toits jouent un rôle important pour contrôler l'état thermique de l'intérieur de l'habitat, car les toits représentent une grande quantité de perte de chaleur par rapport aux murs. Ceci est particulièrement vrai pour les bâtiments ayant une surface de toit plus grande, tels que les complexes sportifs, les auditoriums, les halls d'exposition...etc. Par conséquent, les techniques utilisées dans l'architecture des toits sont très importantes pour réguler les conditions climatiques de l'intérieur d'un bâtiment.

➤ **Toits en dôme :**

En Algérie (El oued, Tipaza), les toits dôme se retrouvent en grande partie dans l'architecture vernaculaire des bâtiments où le climat est chaud et aride [10]. Les toits en dôme, ventilés, absorbent plus de chaleur en raison de la plus grande surface. La voûte ou les dômes couvrent plus de 70% de la stratification thermique. La figure.I.8 présente une vue sur le dôme dans les habitats traditionnels.



Figure.I.8. Vue sur le dôme du hammam de Sidi Younes à Cherchell. [10]

➤ **Toiture photovoltaïque :**

Un système photovoltaïque intégré au bâtiment consiste en un ensemble des panneaux photovoltaïques mis dans les enveloppes du bâtiment (les toits et les façades). Le système photovoltaïque peut être intégré en différentes manières dans les enveloppes de bâtiment. Ceux-ci peuvent être incorporés dans des auvents et des conceptions de dent de scie sur une façade de bâtiment, qui non seulement ajoute l'esthétique mais offre également l'ombrage passif. [11]

➤ **Toiture végétalisé :**

La toiture végétalisée est une technique de refroidissement passive dans laquelle la végétation sur les toits est utilisée pour retenir le rayonnement solaire afin d'atteindre la surface du toit comme montré dans la figure.I.9. Les toitures végétalisées sont maintenues entre deux à trois couches qui comprennent une membrane imperméable à l'eau et sol ou la croissance d'une couche de végétation moyenne elle-même. Les toitures végétalisées non seulement gardent l'intérieur frais mais offrent également des nombreux avantages environnementaux tels que la gestion de l'eau. [12]



Figure.I.9. Toiture végétalisée avec différents types: résidentiel. [12]

➤ **Matériaux de construction :**

Les propriétés des matériaux utilisés pour les murs, sols, plafonds et les ouvertures ont une influence directe sur la consommation énergétique des habitats. Le choix des matériaux se fait en fonction de ceux qui sont disponibles à proximité. Ils sont particulièrement adaptés au climat avec un montant de construction attractive [13] :

- Les constructions en pierre locale sont ainsi adaptées au climat à forte variation de température journalière.
- Les constructions en bois permettront une augmentation en température du bâtiment particulièrement adaptées au climat froid.
- Les constructions en terre crue ou sable permettent d'accumuler de fortes radiations solaires est montées en température avec limitation des risques de surchauffes.

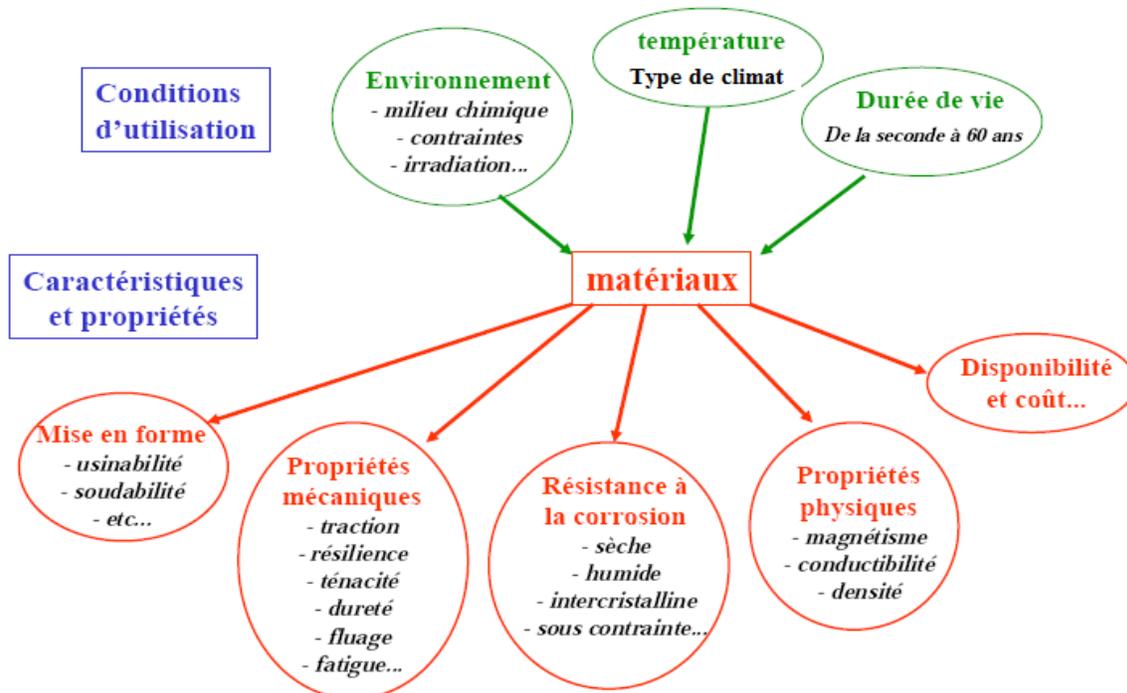


Figure.I.10: sélection des matériaux de construction. [14]

➤ **L'isolation thermique des toits :**

Un matériau de grande isolation thermique est un matériau composé permettant de réduire le flux de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Cette isolation réduit considérablement la consommation d'énergie. La figure.I.11 illustre différents types d'isolation bioclimatique. Un moyen simple et efficace d'améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment consiste à utiliser des enveloppes thermiquement isolées. Le choix de l'isolant est obtenu en examinant deux paramètres: la conductivité thermique et l'inertie thermique du matériau. Les impacts environnementaux et sanitaires de certains matériaux isolants doivent être pris en compte pour choisir le matériau isolant approprié. [15]

Les matériaux à changement de phase (MCP) classés parmi les masses thermiques, sont des matériaux intelligents sur l'application d'un principe physique simple basé sur un stockage et déstockage de l'énergie en fonction des besoins de chauffage et/ou de refroidissement. Ce stockage résulte de la chaleur latente qui provient du changement de phase des matériaux.

Actuellement la majorité des travaux des systèmes d'isolation sont orientés sur :

- L'utilisation de MCP intégrés à l'enveloppe des bâtiments pour des applications de chauffage.
- L'intégration de MCP à l'enveloppe des bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer le confort d'été.



Figure.I.11: Rotin: a) fibres de rotin; b) maison de boue + rotin de fibre. [15]

I.2.3. Les systèmes de rafraîchissement passif :

➤ Les cheminées solaires :

La cheminée solaire est un autre type de rafraîchissement passif s'appuyant sur le phénomène de tirage thermique. L'objectif de ce système est de favoriser la ventilation naturelle en été, c'est-à-dire le renouvellement d'air et le rafraîchissement du bâtiment sans assistance mécanique, la figure. 12 présente le système de la cheminée solaire. En été, en présence d'apports solaires, la chaleur absorbée derrière le vitrage induit un écoulement de l'air intérieur du bâtiment vers l'extérieur, la différence de pression d'air dans le bâtiment est équilibrée par une entrée d'air qui se fait en un autre point. [16]

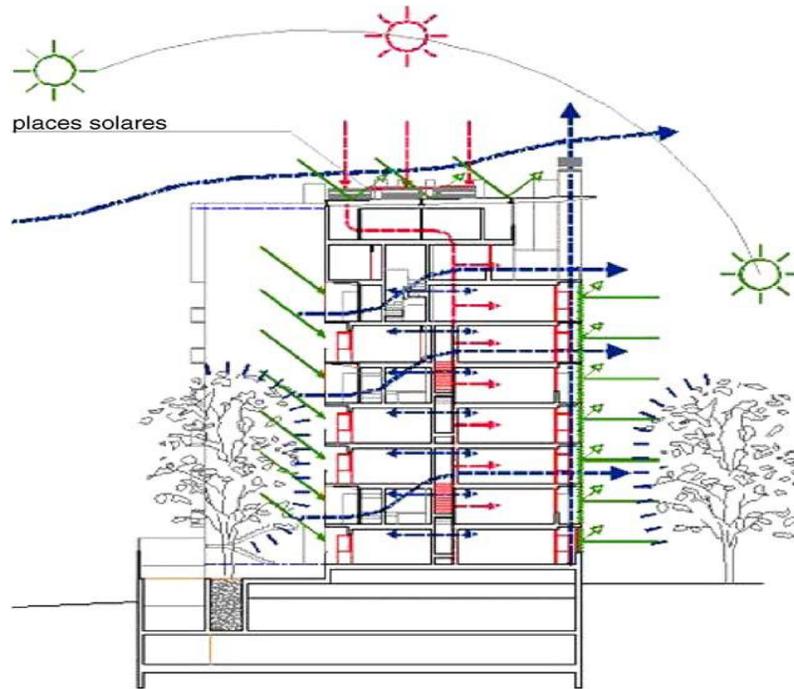


Figure.I.12: La cheminée solaire. [16]

➤ **Les bardages :**

Les bardages sont des couvertures de mur extérieur. Le bois est souvent utilisé mais ils peuvent aussi être métalliques ou en terre cuite. L'élément de bardage est posé sur des liteaux, qui délimitent une lame d'air. Plusieurs configurations de liteaux sont possibles : posés à l'horizontal, vertical ou croisés.



Figure.I.13: Bardage extérieur en bois. [17]

➤ **L'échangeur de chaleur air/sol:**

L'échangeur de chaleur air/sol dit aussi puits canadien consiste à faire passer, avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf dans des tuyaux enterrés dans le sol à certaine profondeur. Cette profondeur dépend des caractéristiques géographiques de sol et climatiques de la région. En hiver, le sol à cette profondeur est plus chaud que la température extérieure. L'air froid est alors préchauffé lors de son passage. En été, l'air passant dans les tubes enterrés profite de la fraîcheur du sol et l'introduit dans la maison. La Figure.I.14 illustré le model de l'échangeur de chaleur air/sol [18].

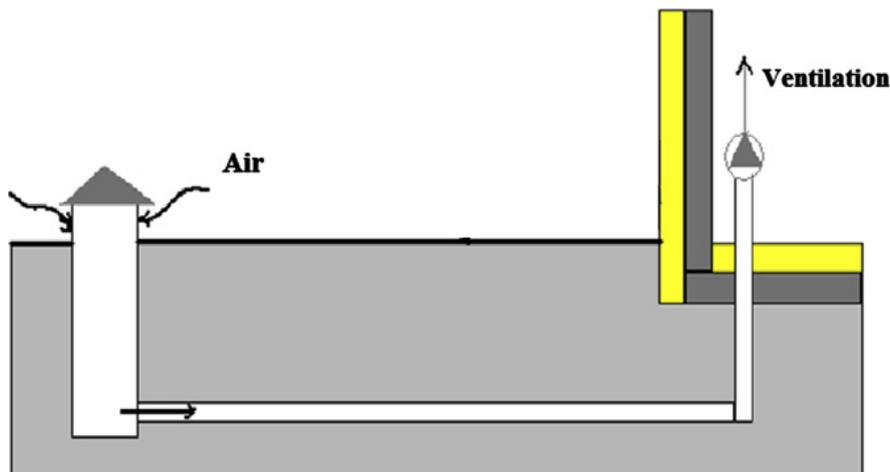


Figure.I.14: échangeur de chaleur ; mode boucle ouverte. [18]

I.3.Confort thermique :

I.3.1. Notion de confort :

Le confort thermique dans les environnements habitats en général est plus précisément dans les environnements internes des logements. Le confort thermique qui est l'état de satisfaction du corps vis-à-vis de son environnement thermique est un paramètre clé, nous pouvons ajouter également que l'état de confort de l'habitant envers ces environnements thermiques dépend de l'interaction entre de multiples facteurs physiques, physiologiques et psychologiques. [19]

I.3.2. Les échanges thermiques du corps humain avec l'environnement :

Les transformations moléculaires et énergétiques qui se déroulent au sein des cellules de l'organisme, le métabolisme, produisent de la chaleur qui est échangée avec l'environnement de l'individu sous différentes formes. Avec la thermorégulation, les échanges se font à l'intérieur du corps. Pour que les échanges se fassent avec l'environnement direct de l'individu, plusieurs phénomènes physiques entrent en jeu : au niveau de la peau, les échanges peuvent se faire par rayonnement, convection, conduction et évaporation. Lors de la respiration, les échanges s'effectuent par convection et évaporation. [20]

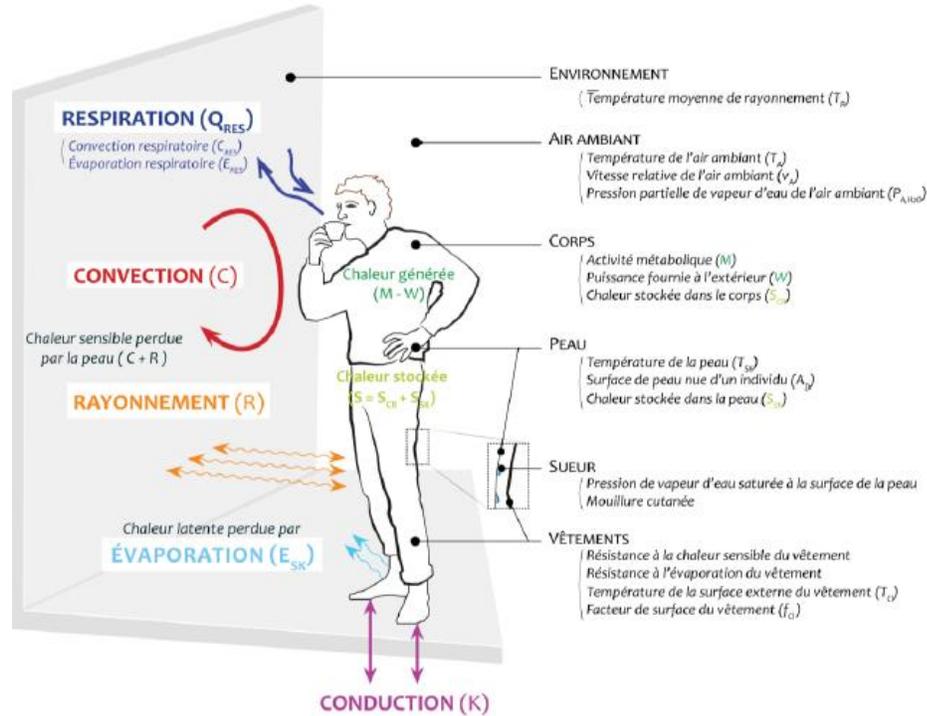


Figure.I.15. Les échanges thermiques du corps humain. [20]

a. L'échange thermique par conduction :

La conduction est la transmission de proche en proche de l'agitation moléculaire par chocs entre molécules. Les échanges par conduction correspondent à un échange de chaleur entre deux corps. Pour un être humain debout, la conduction se fera par la plante des pieds. Elle est souvent négligée car elle est très faible dans le cas d'une personne debout. Dans les autres cas, l'élément en contact joue le rôle d'isolant thermique comme le ferait un habit très épais. [20]

b. Les échanges convectifs :

La convection est un échange de chaleur entre un fluide, l'air, et un solide, l'individu. Cet échange est accentué ou diminué suivant la vitesse de l'air et les courants d'air. Si le fluide est froid, l'être humain a tendance à se refroidir et au contraire si le fluide est chaud, il se réchauffe. Les échanges de chaleur sont alors dus à la différence de température entre la surface de contact (la surface cutanée ou vestimentaire) et l'air ambiant. [20]

c. L'échange thermique par rayonnement :

Il existe deux rayonnements qui peuvent être pris en compte lors des échanges de chaleur entre l'homme et son environnement : le rayonnement infrarouge provenant des parois et des objets et le rayonnement solaire qui nous réchauffe [21]. La température de rayonnement correspond à la température des surfaces qui entourent l'individu et avec lesquelles il échange de la chaleur. Les échanges de chaleur par rayonnement sont à l'origine de la sensation de paroi froide ou chaude. En effet, lorsqu'un individu se situe près d'une paroi qui possède une température faible, il ressent une sensation de froid. Il s'établit alors entre la paroi et l'individu des échanges thermiques par radiation. Or, comme il y a une différence de température entre les deux corps, le système cherche à rentrer en équilibre. Pour cela, l'être humain échange des calories par rayonnement avec la paroi et il ressent donc une sensation de froid si la paroi est froide. Le même système existe pour les parois chaudes et la sensation thermique est alors inversée.

d. L'échange thermique par évaporation :

Le corps humain est composé à 70 % d'eau. La peau, donc les cellules cutanées, produisent continuellement de la sueur. Lors de fortes chaleurs, le phénomène est accentué par la thermorégulation végétative. L'évaporation, changement d'état de la sueur (liquide) en vapeur d'eau(gaz), puise de l'énergie dans le corps pour évaporer l'eau. Ce dernier est donc rafraîchi. C'est le système de

thermorégulation qui détermine la quantité de sueur nécessaire pour maintenir l'équilibre thermique. [20]

I.3.3. Paramètres influents sur le confort thermique:

Depuis longtemps, Macpherson et Tham [22-23] déclarent que le confort thermique d'une personne dans une certaine ambiance donnée dépend des six paramètres suivants :

- ✚ La température de l'air (T_a) ;
- ✚ L'humidité de l'air (R_h) ;
- ✚ La vitesse relative de l'air (v) ;
- ✚ La température radiante moyenne (la température moyenne des parois) (T_r) ;
- ✚ Le métabolisme (M) ;
- ✚ La résistance thermique des vêtements (ICL).

I.3.3.1-Température ambiante et température opérative de l'air:

La température ambiante de l'air est le paramètre le plus influant sur la sensation thermique de l'habitant bien qu'il existe pas mal de paramètres qui ont également des impacts considérables sur la sensation thermique. Les spécialistes ont défini plusieurs températures destinées à caractériser les échanges thermiques notamment par convection et par rayonnement. [24]

La température opérative permet de définir la température du confort thermique, qui prend en compte l'effet de la convection et du rayonnement. Elle est exprimée par la relation suivante : [25]

$$T_{op} = \frac{h_r \times h_{mr} + h_c \times T_a}{2} \quad (I.1)$$

h_c : Coefficient de transfert thermique par convection.

h_r : Coefficient de transfert thermique par rayonnement.

T_a : Température ambiante

T_{mr} : Température radiante moyenne.

I.3.3.2. L'humidité relative :

L'humidité est une mesure de la quantité de la vapeur d'eau contenue dans l'air, si les températures d'air sont confortables ; elle n'a pas d'effet significatif que lorsqu'elle est extrêmement haute ou extrêmement basse. Il est admis des variations de l'humidité relative entre 19 à 65 %.

L'humidité relative de l'air est le rapport entre la pression de la masse de la vapeur d'eau contenue dans l'air d'une température donnée et la pression maximale de la vapeur d'eau (c'est-à-dire pour l'air saturé) pour la même température de l'air [25]

On peut définir la plage du confort hygrothermique dans le diagramme présenté sur la figure ci-dessous (Figure.I.16) permet de faire figurer les grandeurs caractéristiques de l'air humide à pression atmosphérique dans diverses conditions de température et d'humidité. Ce diagramme est essentiellement utilisé lors de la conception des climatisations et des centrales de traitement d'air.

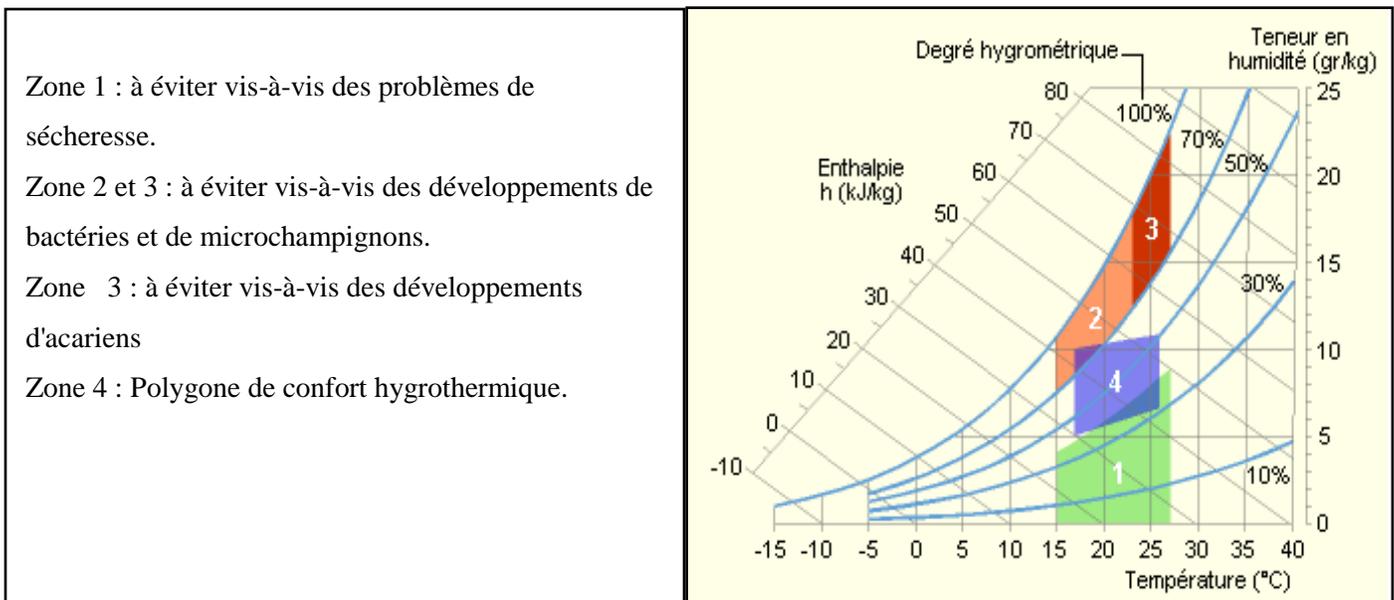


Figure.I.16 Exemple de plage de confort sur le diagramme de l'air humide. [26]

I.3.3.3. Vitesse de l'air :

La vitesse de l'air est un paramètre important sur le confort thermique, car elle influe sur les échanges de chaleur par convection. A l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que le confort thermique des occupants est assuré tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0.5 m/s. La figure.I.17 présente les exigences du confort thermique en fonction de la température. [25]

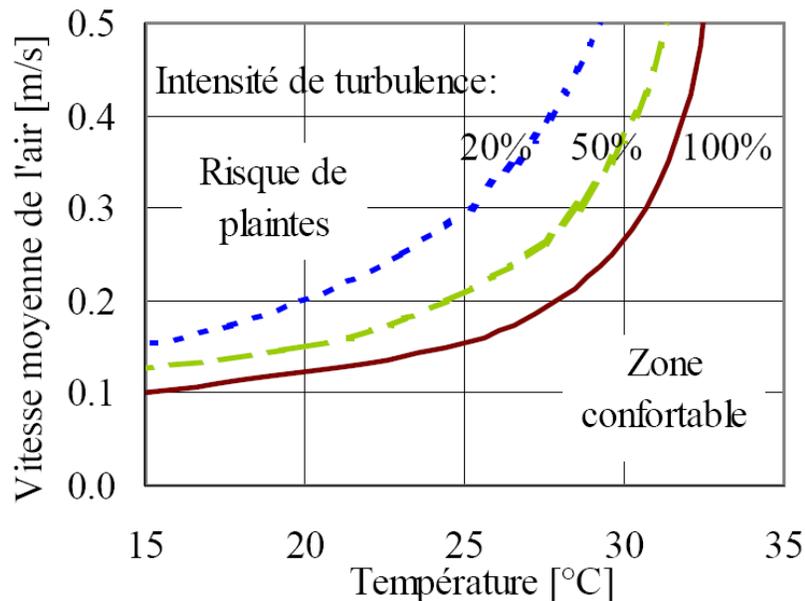


Figure.I.17 Température de confort pour différentes vitesses relatives de l'air et un habillement moyen. [27]

I.4. Le climat :

I.4.1. Définition du climat :

Le climat peut être défini comme le temps qu'il fait en moyen. En un sens plus large, c'est l'état du système climatique. Le climat peut être décrit en termes de description statistique de la tendance centrale et de la variabilité d'éléments pertinents comme la température, les précipitations, les vents, ou à travers d'une combinaison d'éléments comme les types de temps caractéristiques d'un lieu, d'une région ou du monde pour une période de temps déterminée [28]. Le climat désigne les conditions générales du temps et ce que l'on prévoit à cet égard. On peut envisager cette notion comme une condition locale ou l'appliquer à de plus vastes régions ou à la planète entière. « Le climat est le résultat de plusieurs années de tous les phénomènes atmosphériques observés dans un endroit particulier ». Le climat d'un lieu dépend de sa position en latitude, de sa circulation atmosphérique générale. On peut distinguer un ensemble d'éléments et de facteurs climatiques rapportés en catégorie selon les facteurs énergétiques (rayonnement et température), les facteurs hydrologiques : précipitations et hygrométrie et les facteurs mécaniques : vents et enneigements. [29]

I.4.2. Classification de climat :

Les chercheurs ont classé les climats en grandes catégories dans les quelles en regroupe les climats ayant des caractéristiques très voisines, celles-ci varient en fonction des conditions locales. Avec deux grands types: biogéographiques, et climatiques [29].

I.4.2.1. Classification du climat dans le monde :

La classification La plus complété et plus fréquente admise est celle de Vladimir Koppen, météorologue soviétique du début du siècle ; elle est établie d'après des seuils thermiques et pluviométriques (Figure.I.18) : Koppen divise le monde en Cinq grandes zones climatiques qu'il symbolise chacune par une lettre de l'alphabet [30]:

Type A : est le climat Tropical Humide : caractérisé par de fortes précipitations et une température toujours supérieure à 18°C. Parfaitement représenté au niveau de l'équateur, se dégrade au fur et mesure que l'on se rapproche des tropiques jusqu'à devenir un climat aride.

Type B : est le climat Désertique : Le total des précipitations annuelles est inférieur à 250 mm, la chaleur très forte et l'évaporation intense. Ce climat connaît quatre saisons bien tranchées.

Type C : est le climat Tempéré : en général celui des régions comprises aux latitudes moyennes ; les critères sont une amplitude thermique annuelle modérée.

Type D : est le climat Continentale : froid avec de longs hivers neigeux ; la température moyenne du mois le plus froid est inférieure à -3°C mais la température moyenne du mois le plus chaud est à peine supérieure à 10°C.

Type E : est le climat Polaire: la température moyenne du mois le plus chaud est toujours inférieure à 10°C.

Type H : est le climat de Montagne en raison de l'altitude, ses des données sont comparables à celles du climat polaire.

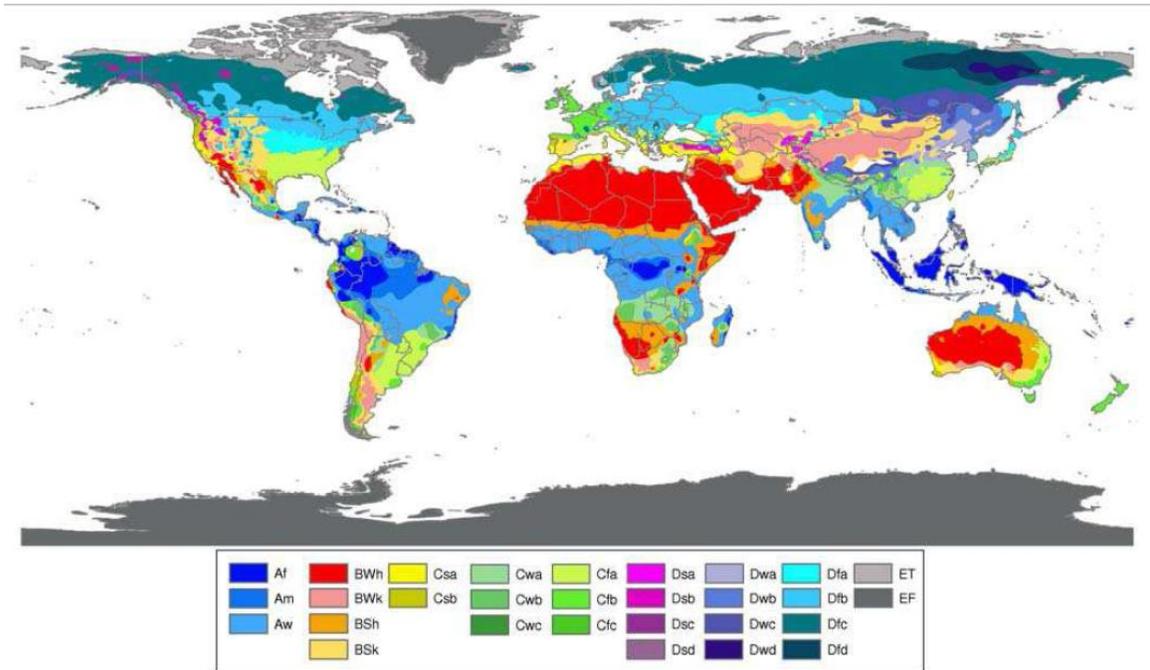


Figure.I.18 : Classification des climats selon Köppen [30].

I.4.2.2- Classification du climat en Algérie :

L’Algérie est caractérisée par une diversité de zones climatiques qu’on peut classer en trois catégories, le Tell : climat tempéré humide de type méditerranéen, les hautes plaines : climat de type continental, et Sahara : climat aride et sec. Elle est située entre la latitude 18° et 38° Nord, et entre 9° de longitude Ouest, et 12° de longitude Est, le méridien international 0° Greenwich passant près de la ville de Mostaganem. Les distances entre le nord et le sud, l’est et l’ouest varient de 1500 à 2000 Km. L’Algérie occupe une superficie de 2.381.741 Km² avec une large variété géographique et climatique allant du littoral au désert. [25]

Zone A	*
Zone B	*
Zone B1	*
Zone C	*
Zone D	*
Zone E	*
Zone E1	*
Zone F	*

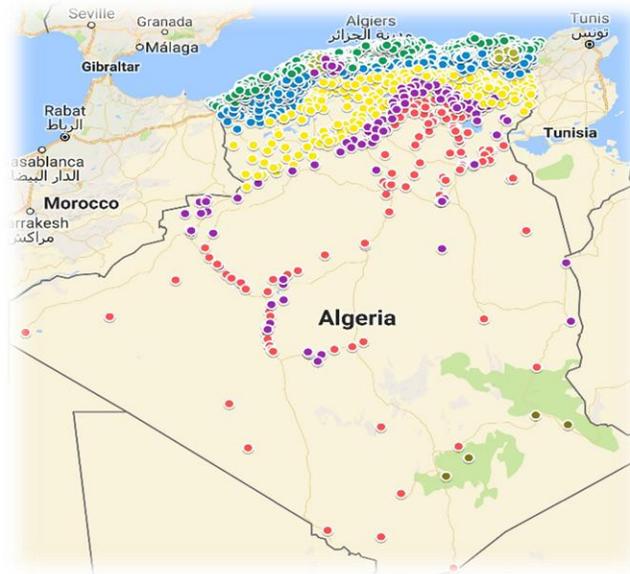


Figure.I.19: Classification du climat en Algérie [31].

I.4.2.3 Climat de la région d'Adrar:

La wilaya d'Adrar se situe dans la partie centrale du Sahara Algérien, elle s'étend sur une superficie de 427968 Km², occupé par 336046 habitants. Elle est limitée au nord-ouest par la wilaya de Bechar, à l'est par la wilaya de Ghardaïa et Tamanrasset, à l'ouest par la wilaya de Tindouf, au sud-ouest par la Mauritanie et Mali au sud. Cette wilaya, avec une altitude moyenne de 222 m, est composée de trois grandes régions : Gourara, Touat et Tidikelt. Elle s'étend entre les coordonnées géographiques :

- les longitudes entre 0°30`et 0°30`à l'Ouest.

-les latitudes entre 26°30`et 28°30`au Nord-. [32]

Le climat de la commune d'Adrar est de type désertique continental et la pluviométrie est extrêmement faible et même insignifiante dans la ville d'Adrar.

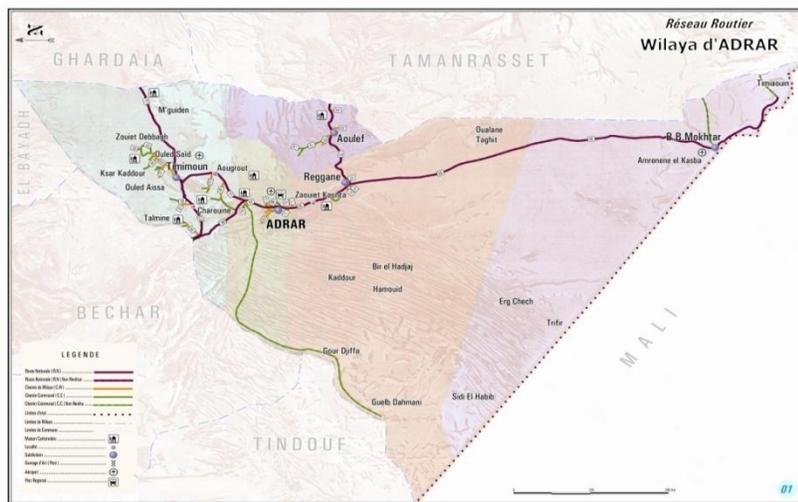


Figure.I.20 La situation géographique de région d’Adrar. [32]

a. Température :

La température est un élément fondamental du climat, sa variation influe sur la transformation de l’humidité, que ce soit à la surface ou dans le sous- sol, elle influe sur le degré d’évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique, c’est un facteur principal qui conditionne le climat de la région. L’analyse des températures sera faite à partir des données de la station d’Adrar pour la période allant de 2004 à 2017. La température moyenne annuelle est de 25.35° C (Tableau I.1) avec une température mensuelle moyenne du mois le plus froid (Janvier) est de 13.38° C et la moyenne du mois le plus chaud (Juillet) est de 38.64° C [33].

Tableau I.1 : Température moyenne mensuelle (Tmin, Tmax) pour la région d’Adrar

	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.	Sep.	Oct.	Nov.	déc.
T _{min}	5.53	8.23	12.48	17.05	22.88	27.46	29.24	28.69	25.05	20.95	11.83	6.56
T _{moy}	13.28	16.33	21.06	26.21	27.57	32.15	38.64	37.57	33.37	24.65	19.48	13.88
T _{max}	21.5	24.38	29.13	34.18	37.61	42.51	46.45	45.25	41.05	34.35	27.48	21.68

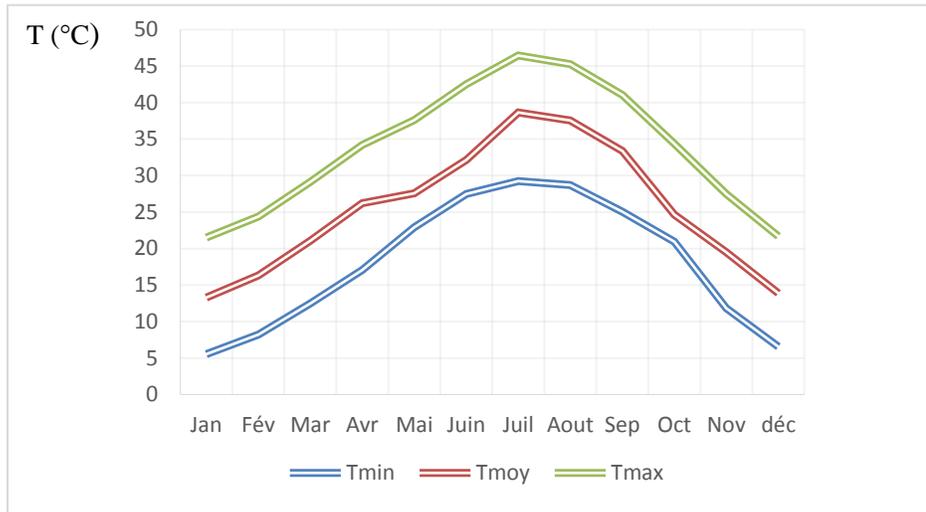


Figure.I.21 : Température moyenne mensuelle (Tmin, Tmax) pour la région d’Adrar (2004 à 2017).

b. La Précipitation :

La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental des régions sahariennes, laFigure.I.22 ci-dessus montre que les précipitations annuelles sont très faibles et ne dépassent guère les 19 mm/an dans toute la région. La précipitation moyenne annuelle dans notre région d’étude est de l’ordre de 18.54 mm. Le rapport mensuel des précipitations varie avec les valeurs moyennes du minimum 0.09 mm en (Février) à la valeur maximal 5.67 mm (en Octobre). [33]

Tableau I.2 : Précipitation de la région d’Adrar.

	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin.	Juil.	Aout.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
P	1.89	0.99	2.24	3.37	1.33	1.92	0.09	0.36	1.59	5.67	0.46	0.27	18.54

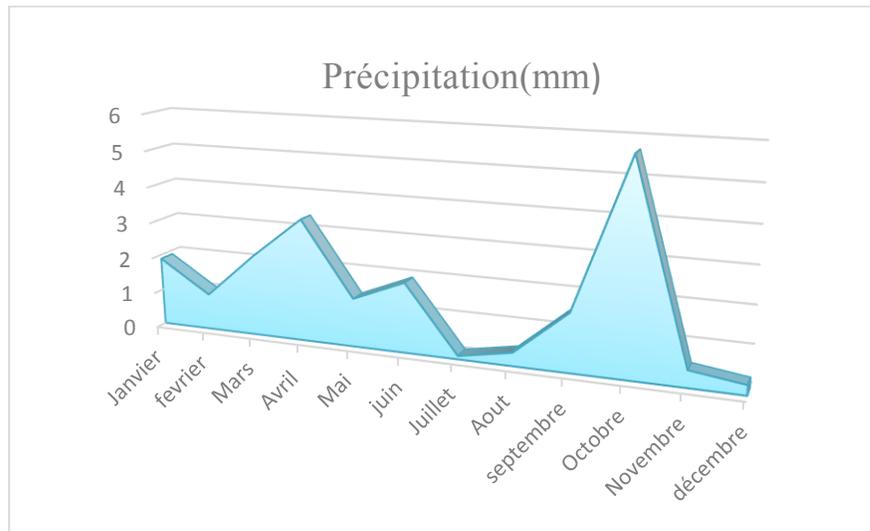


Figure.I.22 : Précipitation moyenne mensuelle dans la région d’Adrar (2004 à 2017).

c. Le vent :

Le vent est un des éléments les plus caractéristiques de la région d’Adrar, on note que les vents sont très fréquents durant toute l’année, c’est durant la saison du printemps (Fév -Mars - Avril) que se manifestent violemment les tempêtes de sable, des vitesses supérieures à 23 km/h sont observées dans la région, en été, les vents sont chauds avec une direction dominante des vents (NE) en hiver et (SW) en été (TableauI.3). [33]

Tableau I. 3 : Variation de vent de la région d’Adrar

	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moyen
V(Km/h)	21	22.8	23.34	23.91	22.96	20.60	23.1	22.08	20.8	19.94	20.2	20.78	21.82

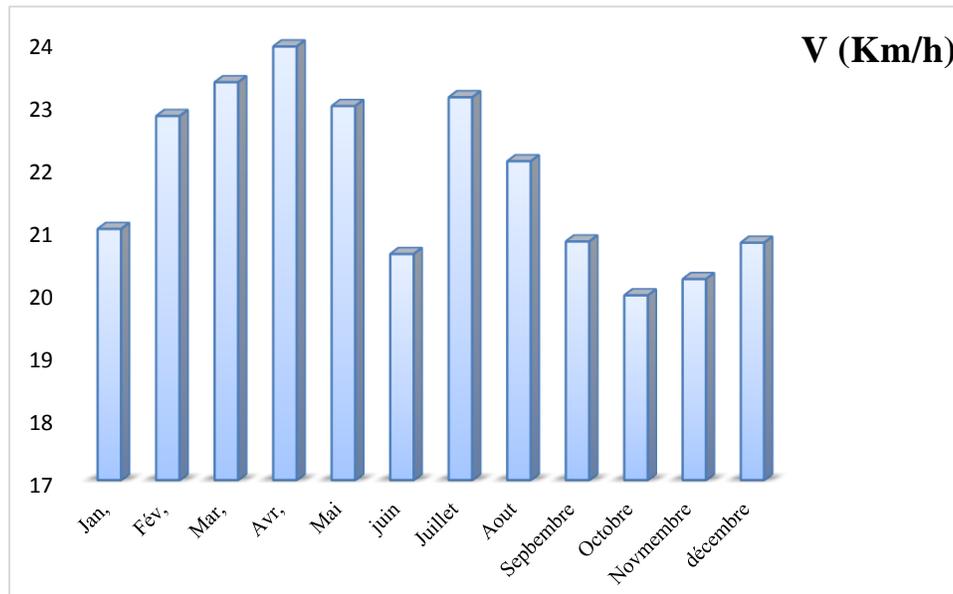


Figure.I.23 : Vitesse moyenne mensuelle des vents dans la région d’Adrar (2004 à 2017).

d. Humidité relative (Hr) :

La répartition des résultats de l’humidité est l’inverse de la répartition des résultats de la température. La valeur maximale de l’humidité de l’air est obtenue en hiver (Novembre-Décembre) et la valeur minimale en été (Juin-Juillet-aout) tel que présenté dans la Figure.I.24, l’humidité relative est faible elle est inférieure à 39%. [33]

Tableau I.4 : Humidité relative moyenne mensuelle dans la région d’Adrar (2004 à 2017).

	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	déc.	moyen
Hr (%)	33.25	26.15	22.25	19.38	18.08	14.86	11.07	13.89	21.91	28.08	34.13	38.96	31.01

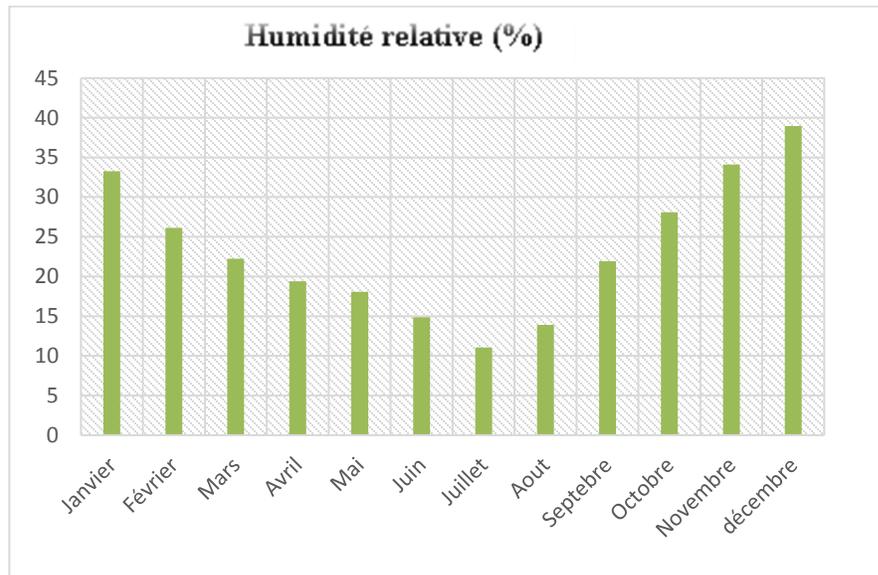


Figure. I. 24: Humidité relative moyenne mensuelle dans la région d'Adrar (2004 à 2017).

E. Détermination des Indices climatiques :

➤ **Indice d'aridité de DE MARTONNE :**

Cet indice est basé essentiellement des précipitations moyennes mensuelles en (mm) et la température annuelle en (°C), en appliquant la relation : [34]

$$I = \frac{P}{T+10} \tag{I.2}$$

P : Pluviométrie moyenne annuelle (mm) ;

T : Température moyenne annuelle (°c). ;

I : Indice d'aridité.

P = 1,545mm ; T = 25.35°C

I=1,545 / (25,89 + 10) = 0.043 mm/°C

Suivant les valeurs de (I), De Martonne a établi la classification suivante ;

- I < 5.....Climat hyper –aride
- 5 < I < 7.5.....Climat désertique
- 7.5 < I < 10.....Climat steppique
- 10 < I < 20.....Climat semi-aride
- 20 < I < 30.....Climat tempéré

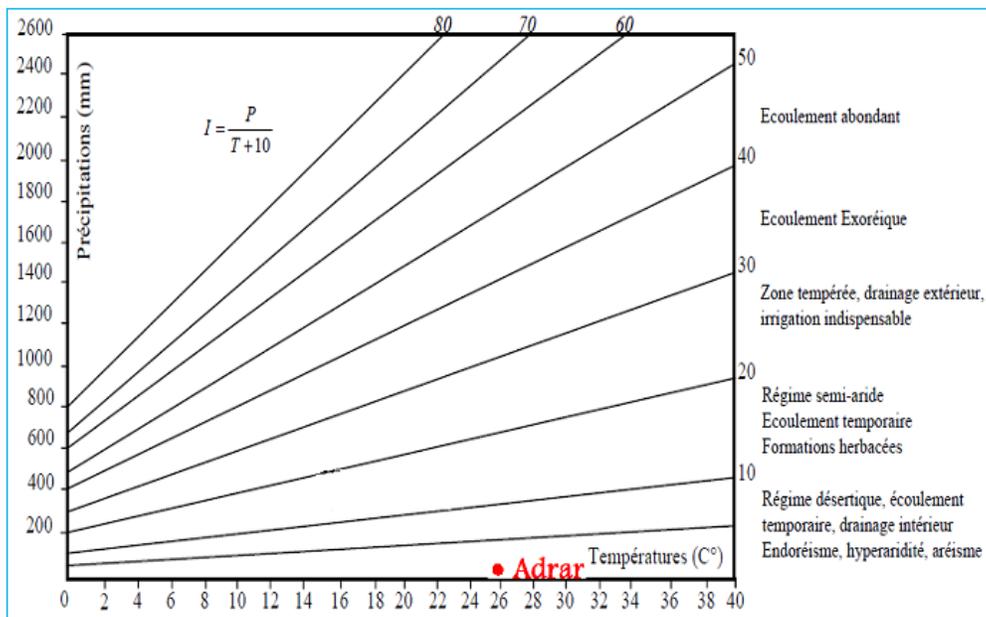


Figure.I.25 Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de De-Martonne.

D'après l'indice d'aridité de De-Martonne, on peut dire que notre région d'étude se caractérise par un climat hyper aride $I < 5$, la Figure.I.25 montre la position de notre région.

➤ **Climagramme d'Emberger :**

Cet indice nous aide à définir les 5 types de climat méditerranéen du plus aride jusqu'à celui de haute montagne (Emberger 1941) [35], a été amené à caractériser l'intensité de la sécheresse estivale par l'indice où PE représente la somme des précipitations moyennes estivales et M la moyenne des

températures maximales du mois le plus chaud. Un climat ne peut être réputé méditerranéen du point de vue phytogéographique que si $S < 7$ (Emberger, 1942) [36].

Il propose donc la formule suivante Q_2 :

$$Q_2 = \frac{2000 P}{(M+m)(M-m)} \tag{I.3}$$

Avec ;

P : Précipitation moyenne annuelle (mm), M : Moyenne des maximal du mois le plus chaud (en degré Kelvin), m : moyenne des minimal du mois le plus froid (en degré Kelvin) $P = 1,545\text{mm}$; $M = 311,64^\circ\text{K}$, $m = 286,28^\circ\text{K}$. Ce qui donne : $Q_2 = 0.2$ La Figure.I.26 permet de dire que le climat de la région d'Adrar est de type saharien à hiver chaud.

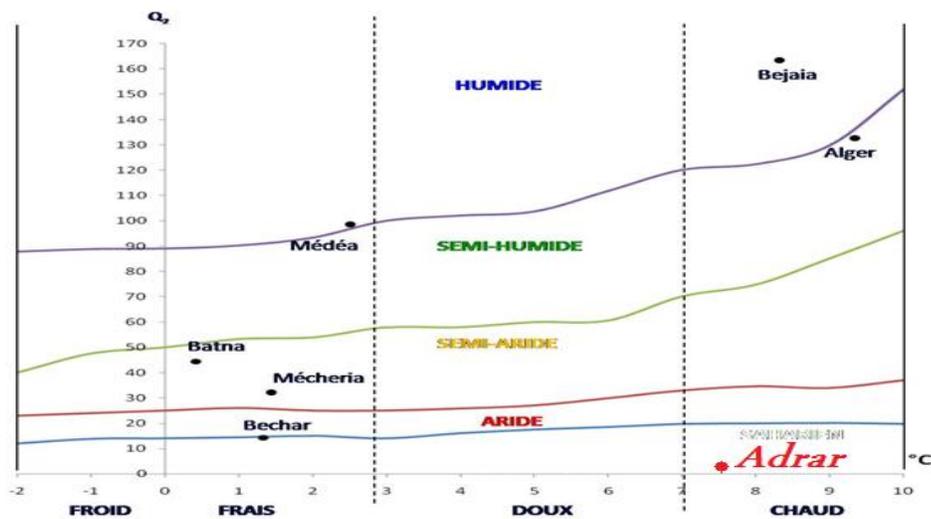


Figure.I.26 : Place de région d'étude Adrar dans le Climagramme d'EMBERGER (2004-2017).

I.5. Conclusion :

Le confort thermique constitue, actuellement, une demande reconnue et justifiée dans les habitats du fait de son impact sur la qualité des ambiances intérieures, la santé et la productivité de l'occupant passant les trois quarts de son temps à l'intérieur. Cette demande est assujettie par des normes et des réglementations qui permettent d'assurer la conformité des ambiances intérieures aux exigences du confort thermique. La région Adrar se caractérise par un climat sec et super aride, la ventilation naturelle et le rafraîchissement passif sont des solutions adéquates. Dans ce chapitre introductif, nous avons fait une présentation fidèle sur les techniques de climatisation passive dans les bâtiments.

Références:

[1]: ENERDATA, Global Energy Statistical Yearbook. Electricity Production. <http://yearbook.enerdata.net>, Consulted in Mai, 2018.

- [2]: Factbook, C. I. A. "The world factbook.": <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/geos/ag.html>
- [3]: Bilan énergétique national (French), Ministry of energy. Algeria. Edition 2017; [Online] http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2017/Bilans_et_statistiques_du_secteur/Bilan-Energetique/Bilan_Energetique_National_2016_edition_2017.pdf
- [4] Stambouli, Amine Boudghene. "An overview of different energy sources in Algeria." Jordan Engineers (2009).
- [5] Renewable energies and energy efficiency development program in Algeria, Ministry of energy. Algeria. Edition 2016 (http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Projets_du_Secteur/Programme_EnR_2016/Plaque_PNEREE_2016_En.pdf).
- [6]: Krüger, Eduardo, Eimi Suzuki, and Adalberto Matoski. "Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. Energy and Buildings 66 (2013): 364-372.
- [7]: Xu, Ben, Peiwen Li, and Cholik Chan. "Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments." Applied Energy 160 (2015): 286-307.
- [8]: Salunkhe, Pramod B., and Prashant S. Shembekar. "A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system." Renewable and Sustainable Energy Reviews 16.8 (2012): 5603-5616.
- [9]: Al-Jabri, Khalifa S., et al. "Concrete blocks for thermal insulation in hot climate." Cement and Concrete Research 35.8 (2005): 1472-1479.
- [10]: Chennaoui, Youcef. "Architectural correlation analysis of the hammams of Churchill, Algeria: linear vs aggregate space in the traditional bath." International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR 3.1 (2009): 145-156.
- [11]: Ban-Weiss, George, et al. "Electricity production and cooling energy savings from installation of a building-integrated photovoltaic roof on an office building." Energy and Buildings 56 (2013): 210-220.
- [12]: Berardi, Umberto, AmirHosein GhaffarianHoseini, and Ali GhaffarianHoseini. "State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs." Applied Energy 115 (2014): 411-428.
- [13]: T.Salomon et S.Bedel, la maison des watts ;le guide malin de chez soi, Terre vivante,149p,2004.
- [14]: L. Chahwane, Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments Thèse de doctorat, université de Grenoble,2012
- [15]: Damfeu, J. C., P. Meukam, and Yves Jannot. "Modeling and measuring of the thermal properties of insulating vegetable fibers by the asymmetrical hot plate method and the radial flux method: Kapok, coconut, groundnut shell fiber and rattan." Thermochemica Acta 630 (2016): 64-77.
- [16]: MACIAS, M., MATEO, A., SCHULER, M., et al. Application of night cooling concept to social housing design in dry hot climate. Energy and buildings, 2006, vol. 38, no 9, p. 1104-1110.

- [17]: Marceau, ML, VanGeem MG. Comparison of the life cycle assessments of an insulating concrete form house and a wood frame house. *J ASTM Int.* 2006; 3:1–11.
- [18]: Bisioniya, Trilok Singh, Kumar, Anil, Baredar, Prashant. Experimental and analytical studies of earth–air heat exchanger (EAHE) systems in India: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 19, p. 238-246.
- [19]: Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S. and van den Dobbelsteen, A. (2013) ‘A review into thermal comfort in buildings’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, pp. 201–215.
- [20]: BATIER, Cécile. Confort thermique et énergie dans l’habitat social en milieu méditerranéen. 2016. Thèse de doctorat. Université de Montpellier.
- [21]: Endravadan, M. (2006). Régulation des systèmes de chauffage et de climatisation basée sur la sensation thermique humaine: impact sur la consommation d’énergie dans les bâtiments (Doctoral dissertation, Toulouse 3).
- [22]: Macpherson, R. K. (1962) ‘The Assessment of the Thermal Environment. A Review’, *British Journal of Industrial Medicine*, 19(3), pp. 151–164.
- [23]: Tham, K. W. (1993). Conserving energy without sacrificing thermal comfort. *Building and Environment*, 28(3), 287-299.
- [24]: Gagge, A. P. (1971) ‘An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response’, *Ashrae Trans.*, 77, pp. 247–262.
- [25] Benzaama, Mohammed Hichem. Etude du confort thermique dans l’habitat par des procédés Geo-Heliothermiques. Diss. Reims, Mai 2017.
- [26]: Akchiche Zineb, Etude de comportement d’une cheminée solaire en vue de l’isolation thermique, pp. 159. Thèse de magister, Spécialité ‘Génie des procédés’, Université Kasdi Merbah Ouargla (Algérie), mai 2011.
- [27]: Fanger, P, et al. "Air turbulence and sensation of draught" *Energy and buildings* (1988): 21-39.
- [28]: Foucault, Alain. Climatologie et paléoclimatologie 2^{ème} édition. Dunod, 2016.
- [29]: Benlatreche Toufik, Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics, Spécialité ‘Architecture’, Thèse de Magister, université mentouri Constantine, 2006.
- [30]: Peel, Murray C., Brian L. Finlayson, and Thomas A. McMahon. "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification." *Hydrology and earth system sciences discussions* 4.2 (2007): 439-473.
- [31] : CNERIB, Ministère de l’habitat, 2007. Recommandations architecturales. Editions ENAG, Alger, <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1Km41eokl-PtgVAPRVAwgBc4BPQI&ll>

[32] : Yousfi, Badr-Eddine. Dynamiques urbaines, mobilités et transports dans le Sud-ouest algérien (wilayas d'Adrar et de Bechar). Diss. Université de Franche-Comté, 2012.

[33]: Network, Tutiempo. "Climate Adrar: climate data 2004-2017. [Cited 05 Mai 2018].

[34] : Gouaidia, Layachi. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana nord-est Algérien. Université Badji Mokhtar-Annaba, 2008.

[35]: Emberger, Louis, and René Maire. Catalogue des plantes du Maroc (Spermatophytes et Pteridophytes). 1941.

[36] : Emberger, Louis. Un projet d'une classification des climats du point de vue phytogéographique. Les frères Douladoure, 1942.

Chapitre II

État d'art sur la climatisation passive

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une étude sur les travaux réalisés pour trois types de techniques dans le but de réduire la consommation d'électricité dans les maisons résidentielles :

- L'utilisation d'échangeurs air/sol
- L'isolation thermique. (Matériaux du changement de phase, locaux, commercial...etc.)
- La ventilation naturelle.

Cette recherche a montré qu'il existe un manque d'études sur les systèmes de rafraîchissement, climatisation passive et de ventilation naturelle.

II.2. État de l'art des systèmes de climatisation passive par échangeur air/sol:

La première utilisation des échangeurs air/sol pour la climatisation remonte fort loin dans le temps des civilisations anciennes. Plus récemment, un regain d'intérêt pour cette technique s'observe dans le domaine de la construction et de l'énergétique, avec des utilisations variées telles que le stockage solaire, l'échangeur air/sol (rafraîchissement par renouvellement d'air/Climatisation Naturel), l'utilisation d'échangeurs air/sol pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments et des serres agricoles par Ahmed El-Sayed et al en 1980 [1]. La performance d'un échangeur de chaleur air / sol dépend de la température souterraine du sol, certains chercheurs ont étudié expérimentalement la température du sous-sol, par contre des autres ont utilisés des modèles empiriques par estimation. Diverses études numériques et expérimentales ont été réalisées pour estimer la variation de la température du sous-sol $T(z, t)$ en fonction de la profondeur du sol z et du temps t .

Le tableau.II.1 donne quelques formules de cette température.

Tableau.II.1 : Modèle empirique d'estimation de température du sous-sol.

Modèle	Référence
$T(z, t) = T_m + A_s \times (e^{-(z)\sqrt{\pi/8760\alpha}} \times \cos\left\{ \frac{2\pi}{8760} \times (t - t_0) - (z/2) \times \sqrt{8760/\pi\alpha} \right\})$	[2]
$T(z, t) = T_m + A_s \times (e^{-(z)\sqrt{\pi/365\alpha}} \times \cos\left\{ \frac{2\pi}{365} \times (t - t_0) - (z/2) \times \sqrt{365/\pi\alpha} \right\})$	[3]
$T(z, t) = T_m + A_s \times \cos\{ w \times (t - t_0) - (z/d) \} \times e^{-\left(\frac{z}{d}\right)}$	[4]

Tzaferis et al [5], a étudié la performance des échangeurs air/sol dans lesquels il a considéré que la température est uniforme sur la surface extérieure du tube. La température du sol est évaluée analytiquement par la résolution unidimensionnelle de l'équation de la chaleur au milieu semi infini ou encore prise constante pour chaque mois. La température de sortie dans l'échangeur est calculée par un modèle analytique avec une expression, tel que la température de sortie a une relation avec la température d'entrée, la température de l'air dans le tube est décroissante en fonction de la longueur du tube.

Mihalakakou G et al [6] a présenté un nouveau modèle numérique pour la prédiction de la performance thermique des échangeurs air/sol. Le modèle décrit le transfert simultané de chaleur et de masse à l'intérieur du tube et dans le sol considéré. Le modèle est validé par rapport à un ensemble de travaux expérimentaux. Les algorithmes proposés sont appropriés pour le calcul de la variation de l'humidité et de la température de l'air circulé dans les tubes avec la température et l'humidité à l'intérieur du sol. Le modèle présenté a été développé dans l'environnement TRNSYS et peut facilement être couplé avec des codes de simulation dans les bâtiments et les maisons serres afin de décrire la performance des échangeurs air/sol.

Un modèle analytique est développé par Mihalakakou G et al [7] pour déterminer la performance thermique d'un échangeur air/sol. Le modèle suppose que le système atteint un comportement périodique et quasi-statique d'équilibre après quelques jours de fonctionnement. Le modèle calcule la variation de température de l'air dans l'échangeur pour toutes les heures de la journée. Il peut également déterminer la moyenne journalière et l'amplitude de l'effet total de refroidissement de système. L'analyse paramétrique est menée afin de déterminer l'effet de diamètre hydraulique et le débit d'air de l'échangeur sur le transfert de chaleur entre le sol et l'air à l'intérieur du tube. Le modèle est validé par rapport aux données de mesure.

Benkert S et al [8], a développé un outil informatique GAEA (Allemand pour la conception graphique de l'échangeur air/sol), basé sur un modèle physique, puis il a validé son modèle expérimentalement avec de bons résultats. Les échangeurs air/sol sont caractérisés par une grande économie d'énergie potentielle et un faible entretien. La profondeur optimale, la distance entre tuyaux, la longueur optimale et la section transversale des conduites d'air pour un débit donné peuvent être calculées pour la mise en place d'un échangeur.

Mihalakakou G [9], a présenté une autre étude qui porte sur deux méthodes pour la modélisation et l'estimation de la variation journalière/annuelle de la température de la surface du sol. L'auteur a trouvé

que la température de surface du sol est un facteur important pour calculer les performances thermiques des bâtiments en contact direct avec le sol, ainsi que pour calculer l'efficacité des échangeurs. Les deux méthodes sont testées et validées par rapport à de vastes ensembles des mesures. La comparaison entre les deux modèles a montré que la technique proposée est capable d'estimer correctement la distribution de la température à la surface du sol.

Breesch et al [10], a évalué le confort thermique intérieur dans un habitat en tenant compte de l'échangeur et du mode de ventilation jour et nuit. Il a trouvé que la ventilation naturelle était comparativement plus efficace pour améliorer le confort thermique d'été que l'échangeur seulement. Le mode de fonctionnement du jour et de nuit est indiqué dans la figure.II.1.

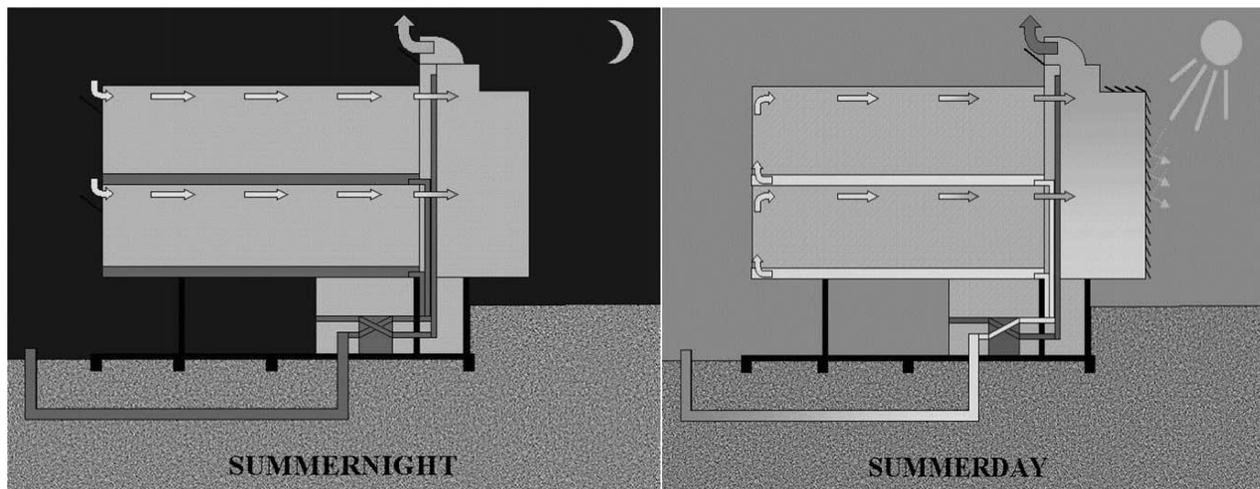


Figure.II.1. Schéma du système de ventilation en nuit et l'échangeur de chaleur terre-air en journée.

Haorong Li et al [11], a utilisé un système couplé (puit canadien & cheminée solaire). Le caractère unique de cette enquête est dans le système solaire couplé avec l'énergie géothermique, et l'analyse de la performance synergique pour les bâtiments de conditionnement. Avec le système couplé, nous pouvons trouver de grandes économies d'énergie dans le secteur du bâtiment et pour réduire la demande d'électricité en été. Ce système couplé utilisé pour fournir le refroidissement et la ventilation des bâtiments est affiché dans la figure.II.2 :

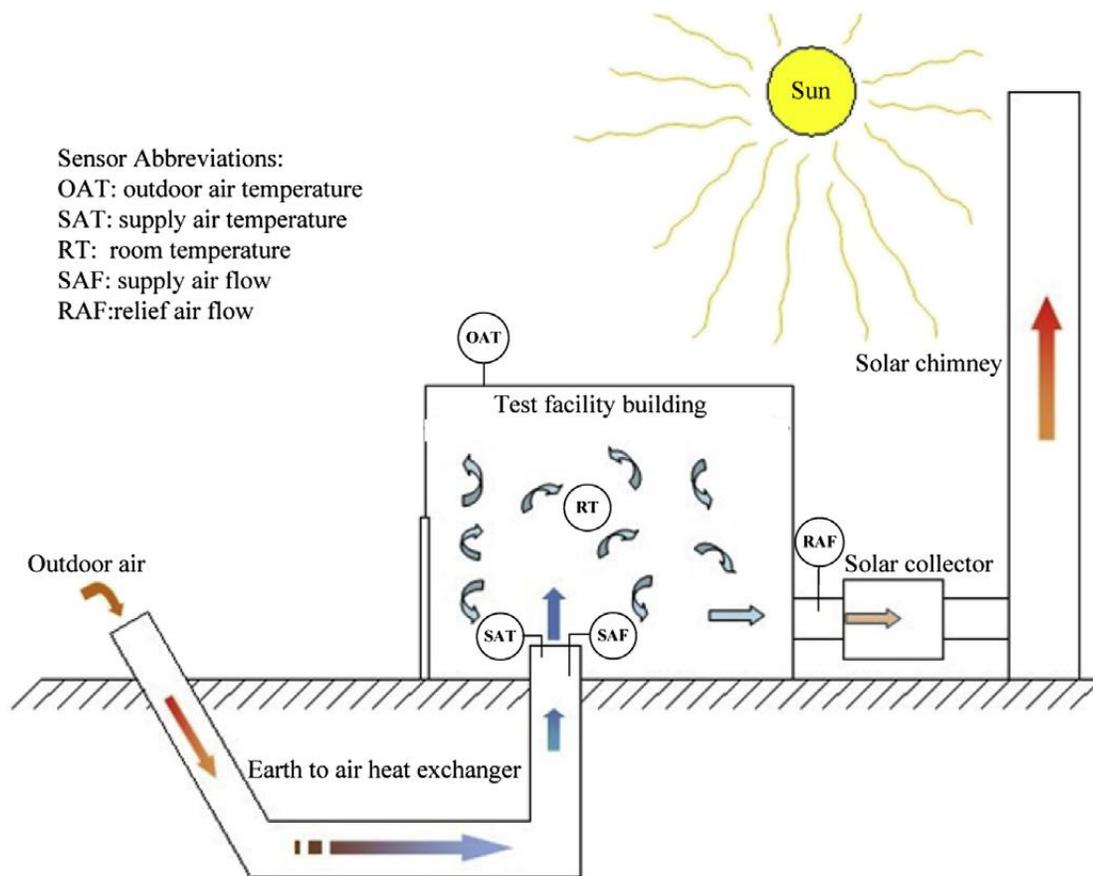


Figure.II.2. Présentation schématique d'un système couplé puits canadien et cheminée solaire.

L'air chaud crée une différence de pression et aspire l'air ambiant à l'intérieur de la chambre, l'air chaud extérieur se déplace à travers le tube de puits, il se refroidit en raison du processus d'échange de chaleur qui se produit avec le sol souterrain, fournissant l'air frais à la maison est finalement en va gagner un refroidissement passif écologique. Les caractéristiques de puits canadien étudié sont; 57 m de longueur, 3 m de profondeur, 0.45 m de diamètre, L'entrée inclinée de 8,53 M, puis pénètre le terrain pour 3 M et des courbes à une partie horizontale d'environ 45,7 m, plie enfin à la hausse pour 3,65 m. Les caractéristiques de la cheminée solaire, 12.2 m de hauteur, 0.457 m de diamètre. La cheminée a été construite de quatre tubes en spirale d'acier ; chaque tube est de 3,048 m de longueur. Le collecteur solaire a été conçu avec une surface absorbante de 20 m², en considérant que le rayonnement solaire est de 400 W/m² avec un coefficient de perte thermique de 8,5 W/(m². °C) et une capacité d'absorption de 0.8.

M. Maerefat et al [12], a utilisé l'échangeur de chaleur air/sol avec un système de cheminée solaire dans un habitat résidentiel, ce système réalise à la fois le refroidissement et la ventilation pendant la journée à l'aide de l'énergie solaire, c'est une technique de la ventilation naturelle dans la journée. La chambre de dimensions, 4.0 * 4.0 * 3.125 m, demande un minimum de refroidissement $Q = 116W$, sans filtration d'air. Le plan schématique de la pièce refroidie passivement est montré dans la figure.II.3. Ce système réalise le refroidissement et la ventilation pendant la journée à l'aide de l'énergie solaire, c'est la technique de ventilation naturelle de la journée. Le système solaire proposé se compose de deux parties: la cheminée solaire, et la terre à échangeur de chaleur air-sol. La cheminée solaire est composée d'une surface de verre orientée vers le sud et un absorbeur paroi qui fonctionne comme une surface de capture. L'air est chauffé dans la SC1 et SC2 par l'énergie solaire. Remontant en haut en raison de l'effet de cheminée, il résulte une force motrice qui aspire l'air à l'extérieur pour traverser le refroidissement du tuyau.

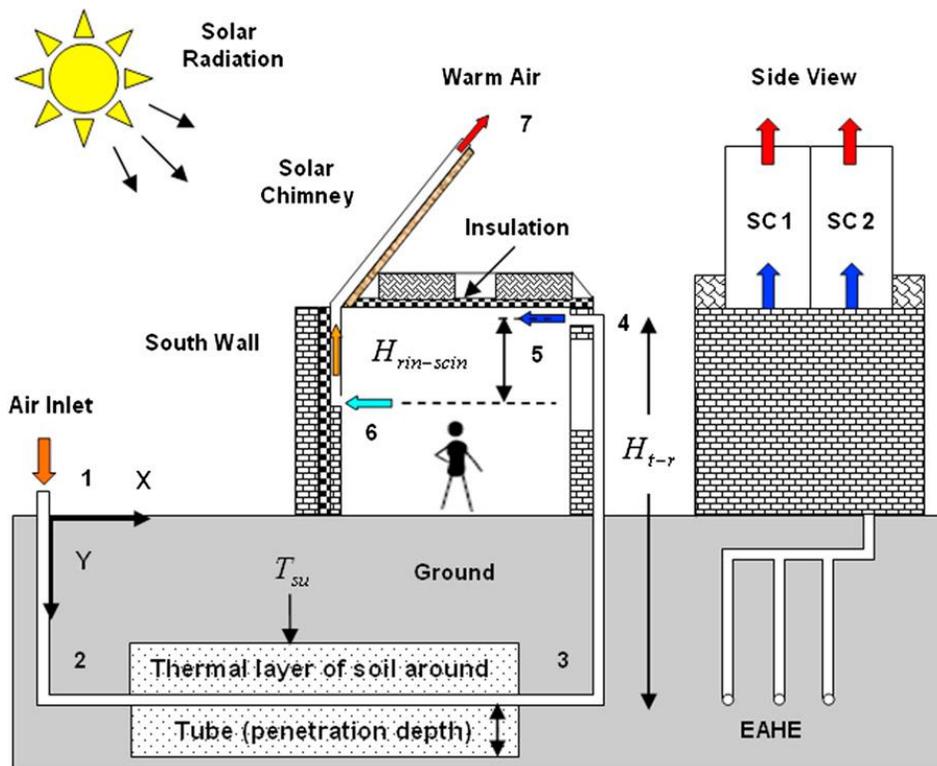


Figure.II.3. Schéma intégrée à l'échangeur de chaleur air et de la cheminée solaire.

M. De Paepe et al [13], a présenté une méthode d'analyse unidimensionnelle utilisée pour analyser l'influence des paramètres de conception de l'échangeur air/sol sur la performance thermique du système. La relation de la chute de pression spécifique reliant l'efficacité thermique avec la chute de pression de l'air à l'intérieur du tube est calculée. La relation est utilisée pour formuler une procédure de conception qui peut être utilisée pour déterminer les dimensions caractéristiques de l'échangeur air/sol d'une manière telle que l'efficacité thermique optimale est atteinte avec une perte de pression acceptable. Le choix des dimensions caractéristiques, devient ainsi indépendant du sol et des conditions climatiques. Cela permet aux concepteurs de choisir la configuration de l'échangeur de chaleur air/sol avec les meilleures performances.

P. Hollmuller et al [14], a présenté une solution analytique pour la diffusion de la chaleur d'un échangeur de chaleur cylindrique avec une condition adiabatique ou isotherme, soumis à un débit d'air constant et un signal de température harmonique à l'entrée. L'auteur montre que la couche du sol induira l'amplitude d'amortissement du régime et le décalage de phase du signal périodique d'entrée en fonction de son épaisseur pour une couche mince soumis à condition adiabatique limite, il est possible de compléter le déphasage à l'entrée, un phénomène apparemment inexploité jusqu'à présent, ce qui pourrait donner lieu à des techniques de manipulation d'énergie intéressantes. Les résultats analytiques sont comparés à un modèle de simulation numérique des éléments finis et validés par une étude expérimentale.

Al-Ajmi F et al [15], a développé un modèle théorique d'un échangeur de chaleur air/sol pour calculer la température de l'air de sortie et le potentiel de refroidissement dans un climat chaud et aride (Koweït). Ce modèle est validé par rapport à d'autres modèles publiés et a donné de bons résultats. Le modèle de température de sol est adapté pour les conditions spécifiques du Koweït ainsi à la température de sortie est comparé avec des mesures expérimentaux. Le modèle de construction d'une habitation typique du Koweït a été mis en œuvre et tous les modèles ont été codés dans l'environnement TRNSYS, la figure.II.4 illustre ce concept. Une année météorologique typique pour le Koweït est utilisée pour prédire les charges de refroidissement de l'air conditionné d'une habitation avec et sans l'aide de l'échangeur. Les résultats de simulation ont montré que le système pourrait fournir une réduction de 1700 W durant le pic de charge de refroidissement, avec une réduction de la température intérieure de 2,8 °C pendant les heures de la pointe (mois de Juillet). Le potentiel de réduction de refroidissement de la demande d'énergie dans une maison typique était de 30% au cours de la saison estivale.

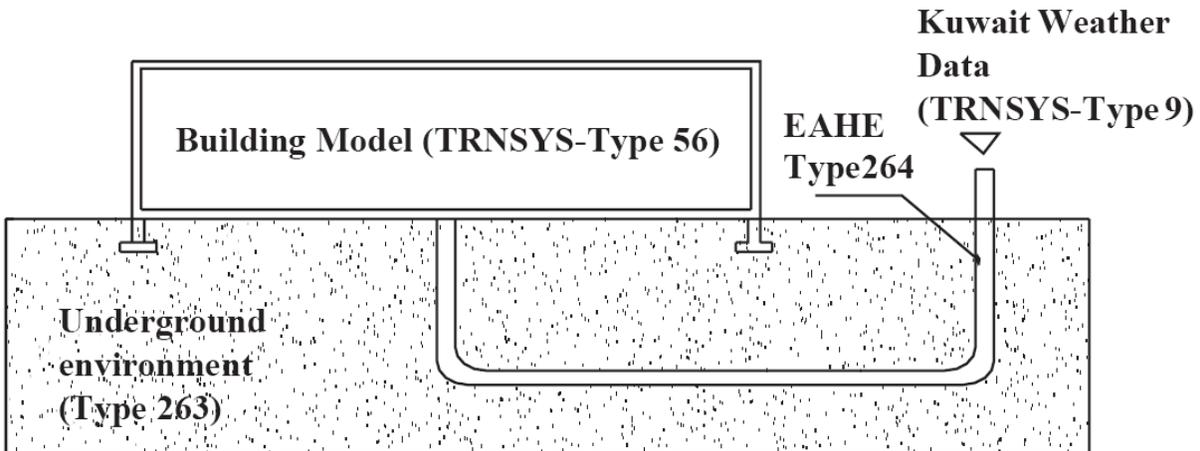


Figure.II.4. Le modèle du bâtiment, (air/sol), modèle du sol TRNSYS.

V. Badescu et al [16], ont développé des recherches antérieures pour le chauffage des locaux résidentiels. Le modèle d'échangeur de chaleur air/sol développé est basé sur une approche bidimensionnelle transitoire numérique qui permet de calculer la température du sol à la surface et à différentes profondeurs. Ce modèle a été intégré dans l'approche théorique existante et mis en œuvre dans le code informatique utilisé pour simuler le fonctionnement du système de chauffage à Pirmasens (Rhénanie-Palatinat, Allemagne). L'échangeur air/sol du Pirmasens se compose d'un seul tube 36 m de longueur. Le potentiel de chauffage et de refroidissement du système dans les conditions climatiques réelles a été étudié. L'énergie fournie par l'échangeur air/sol dépend de manière significative de différents paramètres de conception comme la profondeur, le diamètre et le matériau de l'échangeur.

Stéphane Thiers et al [17], a modélisé un échangeur air/sol en utilisant le logiciel de simulation dynamique COMFIE, qui est dédié à la construction d'éco-conception bâtiments pour réduire la consommation d'énergie et offrant un niveau de confort thermique satisfaisant dans les bâtiments. Afin de quantifier les bénéfices apportés par une conception passive, les résultats de simulation sont présentés pour la maison passive et une maison de référence conforme à la réglementation thermique française pour les bâtiments. La charge de chauffage et le niveau de confort thermique des deux maisons sont comparés. Les résultats montrent, pour la conception passive une réduction de 10 fois de la charge de chauffage en été.

Une étude expérimentale a été testée par Ahmet Yıldı et al [18] sur la performance énergétique d'un système solaire photovoltaïque, assisté par un échangeur air/sol utilisé pour le refroidissement d'une

chambre chaude, à l'université d'Ege, Izmir, en Turquie. Ce système se compose principalement de 6 circuits séparés, le convertisseur, les cellules PV 0.9 kW, l'onduleur, le ventilateur comme souffleur, l'échangeur de chaleur air/sol et la maison serre. La maison serre a été placée vers le sud et elle sera conditionnée pendant les saisons d'été et d'hiver en fonction des besoins des produits agricoles à cultiver. Le système utilise un tuyau en acier galvanisé souterrain en combinaison avec un ventilateur pour maintenir la température de la maison serre. Un ventilateur d'air de 736 W et de débit volumétrique de 5300 m³/h était équipé d'une tête d'aspiration positionnée dans le coin sud-ouest de la maison serre. La valeur moyenne de différences de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur observée est de 8,29 °C (mesures expérimentales). Le taux de rejet de chaleur moyenne a été réalisé en 5.02 KW en utilisant un ventilateur de 0,7 kW. Le système a été opéré environ 11 heures/jour. Les résultats montrent que la consommation totale d'énergie électrique a été mesurée à 8,10 kWh et 34,55% de cette demande d'énergie fournie à partir des cellules photovoltaïques. En outre, 65,45% de la demande d'énergie de l'électricité a été fournie à partir de la connexion au réseau. La figure.II.5 montre un schéma du système qui utilise un puits canadien couplé avec une soufflante pour maintenir la température de la serre à l'état réglé.

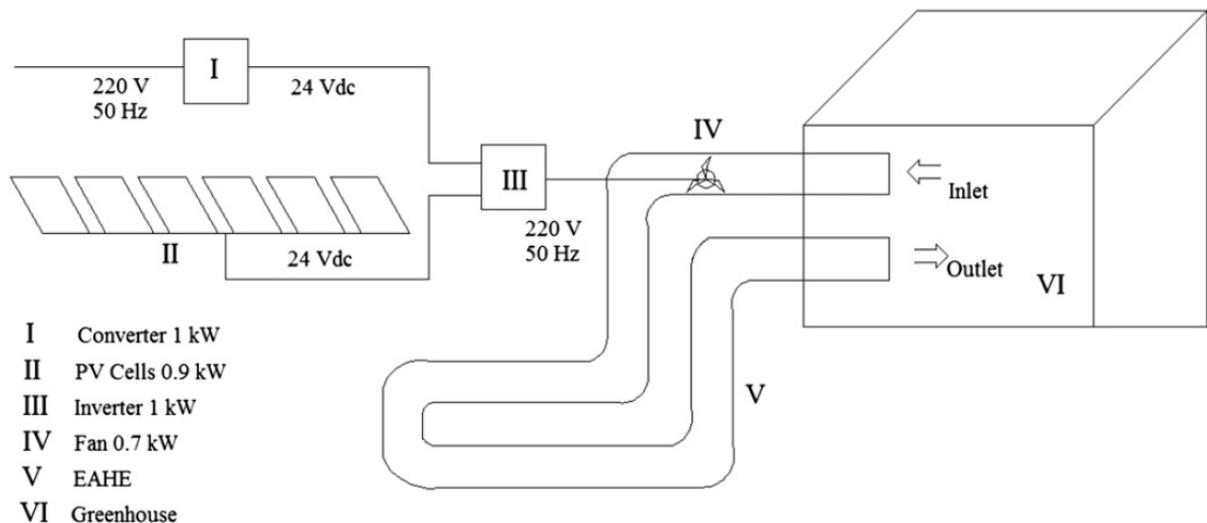


Figure.II.5 Schéma de système photovoltaïque assistée par échangeur air/sol.

Hua Su et al [19], a développé un modèle analytique d'un échangeur air/sol utilisé dans les habitats pour économiser l'énergie électrique. La précision de ce modèle numérique a été vérifiée par la

comparaison des températures de l'air, du sol et de l'humidité relative entre les résultats numériques et les données des tests. La partie expérimentale divisée en deux parties, correspondant aux deux objectifs interdépendants. La première partie pour mesurer la température ambiante, la surface du sol et la température du sol souterrain. Elle est suivie par la deuxième expérience de validation. Les deux tests ont été effectués sur un site dans le campus de l'Université islamique internationale de Malaisie.

Aliyah N.Z. Sanusi et al [20], a présenté une enquête sur la technologie de refroidissement air/sol, menée dans un campus universitaire en Malaisie. Le sol a été utilisé comme un dissipateur de chaleur pour produire de l'air frais. Dans ce travail, les températures de l'air et du sol ont été mesurées. A une profondeur de 1 m sous le sol. Le résultat est plus important, la température du sol est de 6 °C et 9 °C inférieure à la température ambiante maximale pendant la saison humide, chaud et sec, respectivement.

Onder Ozgener et al [21], a amélioré un modèle prédisant la température du sol quotidien en fonction de la profondeur et du temps. Le comportement thermique du sol en fonction de la profondeur et du temps est difficile à simuler car il a des nombreux paramètres tels que les variations de météo, les variations saisonnières, la teneur en eau du sol, la conductivité thermique du sol etc. Il a utilisé un flux de chaleur transitoire avec les hypothèses ; un flux de chaleur unidimensionnel, sol homogène et diffusivité thermique constante. Les températures du sol à des profondeurs 5cm, 10cm, 20cm et 300 cm ont été comparés avec des résultats expérimentaux pour valider l'exactitude du modèle amélioré. Pour un cycle annuel; en profondeur 5cm, 10cm, 20cm et 300 cm le pourcentage maximal moyen des erreurs était de 10,78%, 10%, 10,26% et 14,95%, respectivement.

Ramírez-Dávila, L et al [22], a mené une étude comparative, numérique pour la prédiction du comportement thermique d'un échangeur de chaleur air/ sol pour trois villes au Mexique. Les conditions climatiques correspondent à une chaleur extrême de la température de l'été et de l'hiver (Cd. Juárez, Chihuahua), le climat doux (Mexico) et le climat chaud (Mérida, Yucatán). Un code Computational Fluide Dynamique basé sur la méthode des volumes finis a été développé afin de modéliser l'échangeur. Les simulations ont été réalisées pour les modes de sable, limon et l'argile de sol textures pour les cités Juárez, Mexico et Mérida, respectivement, pour différents nombres de Reynolds, $Re = 100, 500, 1000, 1500$ durant un an. Pour Cd-Juárez, et Mexico, les résultats des simulations révèlent que la performance thermique de l'échangeur est mieux en été qu'en hiver, En revanche pour Mérida, l'échangeur a connu sa meilleure performance thermique en hiver. L'utilisation d'échangeur est appropriée pour le chauffage ou

le refroidissement des bâtiments dans des régions à des températures modérées ou extrême où l'effet d'inertie thermique dans le sol est plus élevé.

L'objectif de l'étude de Rodrigues Michel et al [23] était de développer une nouvelle méthode de modélisation numérique des échangeurs de chaleur tubulaires à écoulement transversal. L'utilisation de la méthode proposée sur un modèle numérique d'un radiateur de voiture a été développée et mis en œuvre un système de contrôle numérique du radiateur, pour évaluer la précision de la méthode numérique proposée, le modèle numérique du radiateur de la voiture a été comparé avec un modèle analytique. La méthode proposée basée sur une méthode des volumes finis de la température du gaz à travers une rangée de tubes est appropriée pour la modélisation de la nageoire de la plaque et des échangeurs tubulaires. Les simulations numériques réalisées dans ce travail ont été effectuées en utilisant un modèle informatique développé dans le logiciel Fluent, qui est basé sur la méthode des volumes finis et la géométrie avec logiciel Gambit. Les résultats obtenus démontrent que la méthode constructive désignée peut être appliquée avec succès dans la recherche d'une performance supérieure d'un échangeur. La performance thermique maximale pour le refroidissement était $T_m = 7,51$ °C.

L'étude de Niu Fuxin et al [24], a porté sur la méthode de volumes finis transitoire. Le domaine du sol est divisé en unités de volume le long des directions axiales et radiales. Un bilan thermique de chaque unité est conçu pour calculer la température de l'ensemble du domaine du sol à base d'un procédé séquentiel. Le sol peut être considéré comme une grande source d'énergie thermique. Cette recherche a établi un modèle de simulation numérique pour un système air/sol validé avec les données réelles. Les résultats numériques ont été validés par les données de test basé sur une installation expérimentale existante. L'augmentation du débit d'air peut améliorer le transfert de chaleur à proximité de la sortie de l'échangeur.

En 2014, Trilok Singh Bisoniya et al [25], a évalué la performance thermique annuelle d'un système d'échangeur air/sol pour des conditions climatiques chaudes et sèches de Bhopal (Inde). Le modèle 3D CFD a été développé pour évaluer le chauffage / refroidissement du potentiel du système. Les résultats de la simulation ont été validés par des observations expérimentales prises sur la configuration expérimentale installée à Bhopal. L'écoulement subsonique à l'entrée du tuyau d'échangeur. La vitesse normale de circulation de l'air a été définie comme 2, 3.5, 5 m/s. La température statique de l'air à l'entrée a été définie comme 40.4, 38.8, 39.9 °C.

En 2015 Yang, Dong et al [26], a intégré à la fois les fluctuations annuelles et quotidiennes de température de l'air dans les équations unifiées et il a fait une procédure pour déterminer la profondeur de pénétration. L'expérience a été menée pour tester le modèle, les prédictions du modèle montrent un bon accord avec les données mesurées. Cette étude a examiné l'utilisation de l'échangeur air/sol pour l'amélioration du confort thermique à l'intérieure. Le couplage entre l'échangeur air/sol et la masse thermique contenue dans un bâtiment ventilé a fait l'objet de cet article. L'objectif de modèle est de prévoir à la fois la température de l'air dans l'échangeur air-sol et la température de l'air intérieur d'un bâtiment combiné avec un système air/sol. Le modèle a été testé expérimentalement et les résultats sont en bon accord. L'analyse a démontré que l'augmentation de la profondeur d'enfouissement d'un échangeur air-sol et la longueur de tube améliore la température quotidienne moyenne de l'air intérieur.

Mathur Anuj et al [27], ont étudié l'effet des propriétés thermo-physiques des trois types de sol sur la performance d'un échangeur air-sol. L'analyse a été effectuée pour un modèle numérique tridimensionnel, transitoire pour trois types de sols différents Ajmer (India), Jodhpur (India), Presles (France). Les équations régissant, basées sur le modèle de l'équation énergie k- ϵ ont été utilisés pour décrire les phénomènes de turbulence et de transfert de chaleur, ont été résolues avec l'utilisation de la méthode des volumes finis. La comparaison a été faite en termes de chute de température, le taux de transfert thermique et COP du système qui fonctionne pendant 12 h. L'étude révèle que chaque sol présente un taux de dissipation de la chaleur et de la saturation thermique différent sur une période de fonctionnement. Les trois sols ont de différentes combinaisons de densité, de chaleur spécifique et de conductivité thermique donnant une différence significative de diffusivités thermiques. Les valeurs de diffusivité thermiques pour les trois sols ont été calculées.

Yuebin et al [28], ont étudié un système de refroidissement géothermique, un échangeur air/sol couplé avec une cheminée solaire. Les expériences ont été menées avec une installation de test existant en été pour évaluer la performance du système. Trois tests différents ont été réalisés en 43 jours successifs, un mode de refroidissement passif et un mode de refroidissement actif, puis revenir à un mode de refroidissement passif. Les résultats montrent que le système géothermique couplé est possible d'assurer le refroidissement de l'installation en mode de fonctionnement normal libre sans utiliser de l'électricité. La cheminée solaire améliorée peut fournir plus d'air dans le système pendant la journée avec une intensité solaire plus forte. L'analyse de la sensation thermique à base de vote moyenne prévue et prédite pour 100 personnes insatisfaites indique que les conditions de l'air à l'intérieur dans un milieu de ventilation naturelle

était plus acceptable en termes de confort thermique supérieur à celui du flux d'air forcé. La capacité de refroidissement du système couplé diminue rapidement après le test de débit d'air forcé d'une semaine en raison de l'augmentation de la température du sol. Les résultats d'essais pour la température du sol indiquent que la dissipation de la chaleur du sol dans le plan horizontal est supérieure à celui du niveau vertical.

Anuj mathur et al [29], a étudié un model CFD sous des conditions transitoires pour trois types des sols différents avec trois modes de fonctionnement. Le premier mode de fonctionnement du système est continu pendant 12 h, dans le deuxième mode, il fonctionne pendant 60 minutes, puis il est éteint pendant 20 minutes et le dernier mode fonctionne pendant 60 min et reste éteint pendant 40 min. En deuxième et troisième mode le système est exploité pendant 12 h par intermittence. Ce modèle a été développé en GAMBIT et les résultats sont obtenus à partir de l'environnement FLUENT, puis validés avec les données expérimentales. L'analyse CFD a été réalisée à l'aide d'un modèle numérique en trois dimensions transitoires.

J. Xamán et al [30], a présenté une étude numérique d'un échangeur air/sol pour trois villes du Mexique. Les conditions climatiques correspondent à la journée la plus chaude en été et le jour le plus froid en hiver pour des conditions météorologiques extrêmes (ville Juarez, Chihuahua), la journée froide (ville Mexico, D.F.) et la journée chaude (Mérida, Yucatán). Les simulations de l'échangeur air/sol ont été faites dans un code interne basé sur la méthode des volumes finis. Les simulations horaires ont été effectuées pour quatre nombres de Reynolds (100, 500, 1000, 1500) durant un jour. Dans Juarez ville, le système a fonctionné correctement à des fins de refroidissement et de chauffage pendant toute la journée. Pour Mérida et la ville de Mexico ce système n'a pas fonctionné pendant certaines périodes. Le potentiel de refroidissement maximal prévu par l'échangeur était de 17.4, 10.2 et 10°C à Juarez, Mérida et de Mexico, respectivement. Le potentiel de chauffage maximal prévu par l'échangeur était de 6.3, 12.5 et 3.2 °C à Juarez, Mérida et Mexico, respectivement.

Sanjeev jakhar et al [31], a présenté une étude expérimentale d'un échangeur air/sol couplé avec un conduit de chauffage solaire de l'air pour le climat aride de Ajmer ville du nord-ouest de l'Inde, pendant la saison d'hiver. Pour améliorer la capacité de chauffage, le système est couplé avec un conduit de chauffage solaire de l'air à l'extrémité de sa sortie. Les résultats montrent que l'air qui sort du système couplé est relativement plus chaud que l'air fourni par le système de l'échangeur seulement. La capacité

du chauffage obtenu a augmenté de 1217.625 à 1280.753 kWh quand il a été couplé avec le conduit du chauffage solaire à air avec une augmentation substantielle de la température ambiante par 1.1 à 3.5°C. Le coefficient de performance du système a également augmenté jusqu'à 4,57 dans l'état de couplage du conduit de chauffage de l'air avec l'énergie solaire.

Arvined Chel et al [32], ont présenté une étude expérimentale et simulation pour évaluer la performance thermique d'une maison résidentielle par l'utilisation d'un modèle du bâtiment multizone simulée à l'aide de TRNSYS 17. Le modèle de bâtiment intègre des systèmes tels que l'échangeur de chaleur (air-sol), un échangeur (air-eau) couplé à un échangeur d'eau-sol. Les résultats de la simulation, pour l'échangeur air-sol et l'échangeur air-eau ont un impact de 66% et 7% respectivement sur la réduction de la consommation annuelle du chauffage de la maison. Tous les systèmes intégrés contribuent de manière significative (72%) dans la réduction de la consommation annuelle du chauffage de la maison. La consommation annuelle du chauffage de la maison par unité de surface est estimée à 6,9 kWh/ m²/an qui est dans la norme de la maison passive. Il y a une réduction significative du temps de surchauffe 25°C en raison de l'échangeur eau-sol installé dans la maison avec une contribution de la ventilation annuelle pour le refroidissement de l'air de 602,6 kWh / an.

Dong Yang et al [33], a proposé un modèle mathématique basé sur l'effet de la masse thermique et la ventilation de l'échangeur air/sol sur l'environnement thermique intérieur des bâtiments. Ce modèle est applicable pour calculer le montant de l'économie d'énergie en utilisant un système combiné, dans une maison couplée avec un système de ventilation air/sol. Par conséquent, les variations annuelles et journalières de la température de l'air intérieur et leurs relations avec les paramètres du système combiné sont considérées. La combinaison avec un système air-sol pourrait prolonger le délai de la température de l'air intérieur dans une période de fluctuation annuelle d'une période quotidienne en deux ou trois heures par jour. L'auteur a noté que la masse thermique du bâtiment a un impact significatif pour l'efficacité des systèmes air/sol.

S.E. Diaz-Mendez et al [34], a étudié la performance de la régulateur PID utilisé dans l'échangeur de chaleur air-sol. Ainsi, ce travail montre comment ce contrôleur améliore la performance de l'échangeur de chaleur air-sol pour la climatisation dans les bâtiments. L'air est passé à travers un échangeur de chaleur enterré à quelques mètres au-dessous du sol. Ce processus nécessite moins d'énergie, le régulateur PID (proportionnelle, intégrale et dérivée) peut être appliquée à un échangeur de chaleur air-sol afin de réduire

encore plus la consommation d'énergie. Par conséquent, la simulation thermodynamique d'un échangeur de chaleur air-sol a été réalisée et utilisée avec le régulateur PID, pour évaluer les économies de la consommation d'énergie. Les résultats montrent que la consommation d'énergie peut être réduite jusqu'à 87% avec le contrôle PID.

R. Vidhi et al [35], ont présenté une étude comparative entre un cycle supercritique avec et sans échangeur de chaleur air/sol. Un certain nombre de réfrigérants organiques (R32, R125, R134a, R143a, R170 et R218) ont été étudiés comme fluides de test. Le rang de la température à partir 125-2000 °C a été considérée comme une source de chaleur et l'air ambiant refroidi à l'aide de l'échangeur. L'effet de divers paramètres (pression de fonctionnement, la température de sortie de la source de chaleur et la géométrie de l'échangeur) sur le rendement du cycle thermodynamique a été étudié.

Krommweh MS et al [36], ont proposé une étude à long terme du logement modulaire avec l'échangeur de chaleur géothermique intégré afin de déterminer le chauffage avec la performance de refroidissement. Pour la première fois, tous les paramètres nécessaires ont été enregistrés dans la période expérimentale. Ce système de logement modulaire a été étudié pour la première fois au cours d'une période expérimentale d'un an à Warendorf (dans l'ouest de l'Allemagne). Ce bâtiment se caractérise notamment par le fait que l'air entrant dans les sections est soumise à l'air conditionné selon la température extérieure (préchauffage et de pré-refroidissement de l'air d'alimentation).

Gan Guohui [37], a développé un modèle numérique pour la simulation du transfert de chaleur et de l'humidité transitoire dans le sol avec un échangeur de chaleur horizontal couplé pour le préchauffage et le refroidissement des bâtiments. Le modèle prend en compte les interactions de transfert de chaleur et d'humidité entre le sol et l'air d'alimentation (air passant à travers l'échangeur de chaleur) et des conditions ambiantes. Le programme résout les équations de transfert de chaleur et d'humidité dans le sol couplé avec des conditions aux limites pour la convection, le rayonnement et l'évaporation qui varient avec le climat.

S. Mongkon et al [38], ont évalué la capacité géothermique et les paramètres de refroidissement en Thaïlande par un modèle mathématique. L'effet du système géothermique sur la culture des plantes a été réalisé dans deux maisons serres identiques avec 30 m³ de volume pour chacune. L'échangeur de chaleur horizontal fournit l'air refroidi au modèle de maison serre et les résultats de la croissance des plantes ont été comparés à ceux d'une maison serre classique. Les résultats montrent que le coefficient de

performance durant une journée claire serait plus de 2 dans l'expérience. La performance de refroidissement en utilisant le système échangeur air/sol horizontal a été étudiée dans la maison serre de l'agriculture sous le climat tropical en Thaïlande.

Hugo Campaniço et al [39], ont développé un indicateur de performance pour les systèmes de refroidissement passifs basé sur la ventilation géothermique, ils ont appelé le potentiel de refroidissement climatique qui doit être suffisamment robuste pour permettre l'estimation des économies potentielles de la demande des bâtiments de refroidissement.

Xichen Liu et al [40], ont proposé un modèle numérique pour écrire le transfert de chaleur simulé entre l'air et la surface du tunnel dans le sol. Ils divisent l'espace de tunnel en plusieurs tranches. Ce modèle est validé par rapport aux mesures expérimentales sur terrain qui ont montré une bonne concordance entre la simulation et les données de mesure. Le modèle est ensuite réalisé sur un tunnel souterrain d'exploitation pour une période de 10 ans.

Seung-Yeong Song et al [41], ont réalisé une étude expérimentale dans un bâtiment au niveau du Campus Center construit récemment à Séoul, pour évaluer la performance énergétique d'un système de ventilation à labyrinthe thermique. Les résultats montrent que les pointes de charge pour le refroidissement et le chauffage de l'air extérieur sont réduites à 47,6% et 41,2% respectivement.

G. Tsilingiridis et al [42], ont étudié la relation entre la température de l'air ambiant et le sol dans différentes profondeurs et proposé des équations pour calculer la température du sol mensuelle moyenne. Ils ont mesuré les valeurs moyennes quotidiennes de l'air ambiant à des profondeurs de 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 et 1.5 m, dans une période de 10 ans par la station météorologique d'Aristote Université de Thessalonique.

Md. ShazibUddin et al [43], ont examiné la performance de confort thermique de l'air à l'intérieur d'un bâtiment en utilisant le sol comme source naturelle pour l'installation de l'échangeur air/sol à Bangladesh, et ils ont préparé le sol sous forme bobine pour un système d'échangeur air/sol avec l'attachement de drainage et a effectué l'analyse de la performance thermique durant la saison d'été et celle d'hiver.

Ozgen et al [44], ont proposé un modèle de prédiction des températures du sol par jour en fonction de la profondeur et du temps. Le travail expérimental a été effectué à Ege Université (Azmir), un tuyau

en acier galvanisé de 56 cm de diamètre et 4700 cm de longueur a été enterré dans le sol à environ 3 m de profondeur. Au niveau des profondeurs 5cm, 10cm, 20cm, et 300 cm le pourcentage maximal moyen d'erreurs était de 10,78%, 10%, 10,26% et 14,95%, respectivement.

Popiel, C.O et al [45], ont mesuré la distribution de la température de sol basé sur un modèle analytique unidimensionnel transitoire dans les solides semi-infini en utilisant la température du sol pour surveiller les équations semi-empiriques de la distribution de la Température.

Dans un autre article publié par J. Xamán et al [46], une étude numérique a été réalisée pour la prédiction de la performance thermique d'un échangeur de chaleur air/sol pour trois villes du Mexique. Les conditions climatiques correspondent à un climat tempéré en Mexico, un climat humide-chaud (Mérida, Yucatán) et un climat chaud (Cd. Juárez, Chihuahua). L'effet d'isolation thermique au niveau de la section de sortie de l'échangeur a été étudié. Dans la ville de Mexico, l'isolation d'une épaisseur de 0.05 m a été recommandée pour améliorer la performance du l'échangeur. En hiver, l'isolation a augmenté l'effet de chauffage jusqu'à 2 °C par rapport à un échangeur sans isolation. En été, l'isolation thermique fournit une amélioration de l'effet de refroidissement jusqu'à 1,3 °C. Dans Mérida. Les résultats indiquent que l'isolation thermique d'une épaisseur de 0,05 m est la meilleure option. En hiver, cette mesure a amélioré l'effet du chauffage jusqu'à 2,6 °C par rapport à l'échangeur sans isolation. En particulier, pour le Cd. Juárez pendant l'été, le comportement thermique de l'échangeur n'a pas été amélioré grâce à l'isolation thermique. Par conséquent, pour Mexico et Mérida la valeur suggérée de l'isolation a fait l'échangeur pour fonctionner correctement pendant tous les mois de l'été, car il a évité le gain de chaleur indésirable du sol à la sortie. En d'autres termes, l'isolation a amélioré l'effet de refroidissement jusqu'à 5 °C par rapport à l'échangeur sans isolation.

Kubota et al [47], ont déterminé des stratégies potentielles de refroidissement passif vernaculaires pour améliorer le confort thermique des maisons résidentielles modernes dans le climat chaud et humide à Malaisie. Les Mesures sur le terrain ont été effectuées dans deux maisons de bois traditionnel malais et deux maçonnerie traditionnelles chinois pour enquêter sur leurs environnements thermiques intérieurs et techniques de refroidissement passif. Les résultats montrent que les températures de l'air intérieur sont plus élevées que les températures de l'air extérieur de 1 °C pendant la journée dans des conditions de fenêtre ouverte, et 2 °C la nuit dans des conditions de fenêtre fermée en moyenne. Les stratégies

potentielles de refroidissement passif pour les maisons mitoyennes existantes, y compris la ventilation de nuit, pour le toit isolation du plafond, pour la fenêtre mur ombrage et pour la cour ventilation forcée.

El mays A et al [48], ont étudié un système de stockage thermique par l'utilisation des matériaux de changement de phase MCP dans une maison résidentiel prototype. Cet article présente une étude sur l'application de la vaseline blanche, utilisée comme un matériau à changement de phase, avec un système de chauffage électrique au sol. Pour continuer, un prototype de maison bien isolée est construit. Une étude expérimentale a été réalisée par temps relativement froid pour étudier le comportement thermique de l'utilisation de matériaux à changement de phase. Les résultats montrent qu'à une température ambiante moyenne de 14, la consommation électrique a été décalée de 6 heures en moyenne en raison de la chaleur latente stockée dans le MCP.

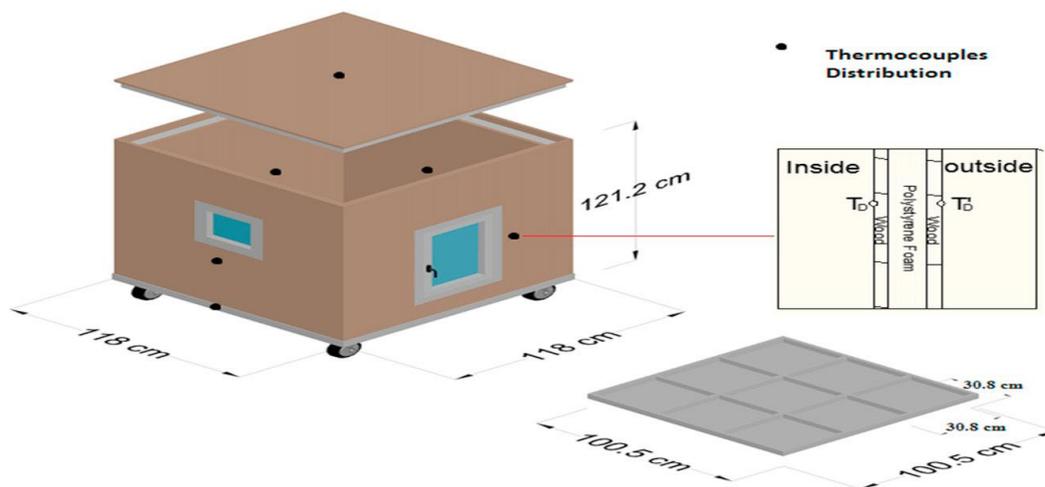


Figure.II.6 Schéma de prototype utilisé dans l'étude expérimentale.

Sau Wai Lee et al [49], ont évalué des solutions d'isolation thermique couramment utilisées pour un toit d'hypermarché typique en Malaisie. Huit systèmes d'isolation thermique couramment utilisés ont été identifiés et évalués. Afin de trouver la mesure d'isolation thermique la plus rentable, trois types de méthodes d'évaluation économique, à savoir les économies de cycle de vie, la période de retour sur l'investissement et le taux de rendement interne ont été utilisés. Les huit systèmes d'isolation thermique ont été classés en fonction de ces trois méthodes. Il a été constaté que le système d'isolation utilisant une petite feuille d'aluminium en bulle se classait au premier rang avec les économies de cycle de vie les plus

élevées, le taux de rendement interne et la période de retour sur investissement la plus courte. Des analyses de sensibilité ont également été effectuées pour identifier les effets des modifications des paramètres clés, par exemple le coût du capital et la durée de vie sur les résultats de l'évaluation. Les analyses montrent que la feuille d'aluminium à petites bulles est la moins exposée aux fluctuations de ces deux paramètres par rapport aux autres matériaux isolants examinés.

II.3. État de l'art des systèmes de climatisation passive par la ventilation naturelle (Tour Vent/cheminée solaire) :

M.H. El-Awady et al [50], ont présenté une maison-serre solaire intégrée pour le dessalement de l'eau à partir d'énergie renouvelable, la plantation et le traitement des eaux usées ont été construites et testées sur le terrain dans des conditions météorologiques réelles à Gizeh- Egypte. Le système a utilisé l'énergie solaire de dessalement d'eau et fonctionne en saturant l'air avec l'humidité de vaporisation de saumâtre ou l'eau de mer à l'intérieur d'une maison-serre suivie par déshumidification, causant la condensation de l'eau douce. Plusieurs expériences ont été réalisées sur ce système pour évaluer la performance thermique dans les maisons serre.

Alex Yong Kwang Tan et al [51], ont étudié un système de cheminée solaire dans le bâtiment à zéro énergie dans les régions tropicales à Singapore, pour déterminer l'effet de la vitesse de l'air ambiant et de la charge de la chaleur interne sur l'environnement thermique des conduits de cheminée solaire et l'intérieur de la chambre. Les résultats expérimentaux et numériques montrent que la vitesse maximale de l'air ambiant élevée supérieure à 2 m/s améliore la vitesse de l'air dans les conduits de cheminée solaire, deux vitesses de l'air ambiant hautes et basses sont trouvées pour améliorer la vitesse de l'air intérieur de la classe.

Zheng Zou et al [52], ont fait une analyse numérique en 3D par l'utilisation de ANSYS pour étudier l'effet d'un blocage partiel introduit sur la performance de refroidissement de tour solaire; qui est présenté dans la figure.II.6 et pour déterminer la limite supérieure de l'augmentation de la taille du capteur solaire dans le tour de refroidissement à sec naturelle renforcée solaire avec une zone fixe d'échangeurs de chaleur. Dans la simulation, les capacités du tour de refroidissement à sec naturel et avec solaire renforcée selon les mêmes paramètres géométriques. Les résultats ont montré que pour un système avec zone fixe d'échangeur de chaleur, la limitation supérieure de l'augmentation de la taille du capteur solaire est celle correspondant à un rapport de blocage qui atteint 50%.

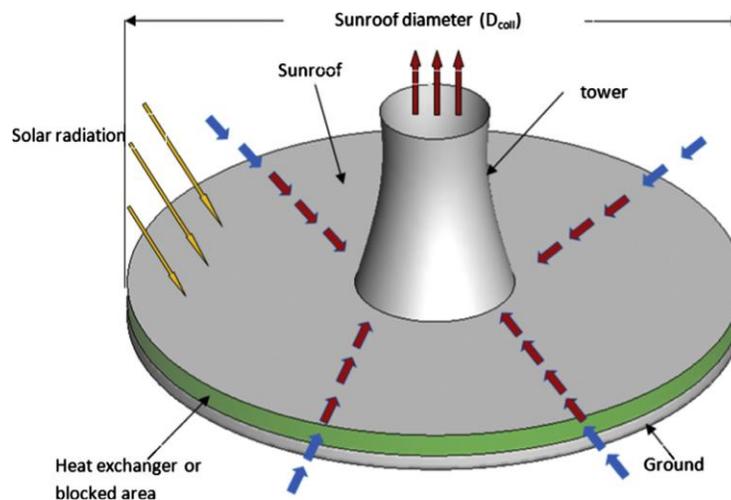


Figure.II.7 : Schéma d'un tour de refroidissement à sec à tirage naturel amélioré.

A.P. Haghighi et al [53], ont étudié une analyse approfondie sur le transfert de chaleur par convection naturelle et le rayonnement de surface en 2D pour une chambre en contact avec une ambiance extérieure froide pour déterminer la relation entre la performance du système et la profondeur de l'entrefer de la cheminée solaire, la taille des ouvertures, la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire. Le système se compose d'une chambre avec une cheminée solaire caractérisé par une surface de verre orientée vers le sud, les résultats finals illustrent une taille optimale de 0,2 m.

Justin DeBlois et al [54], ont étudié la performance économique et énergétique d'une cheminée solaire par simulation et expérimentation, l'auteur a simulé une maison individuelle avec deux types de ventilation; ventilation transversale et ventilation standard, l'étude est mise en quatre climats. Dans la partie de réalisation, l'auteur a réalisé trois chambres d'une surface de 189 m². Les panneaux photovoltaïques sont intégrés dans la surface de la cheminée solaire sur le toit orienté au sud pour améliorer les performances des panneaux. L'utilisation de la ventilation naturelle avancée et approchée réduit la charge de refroidissement dans les maisons caractérisées par leur efficacité élevée. Les techniques combinées minimisent plus de 70% de charge énergétique.

Haiwei Jing et al [55], ont réalisé un modèle de cheminée solaire avec rapport largeur/hauteur entre 0,2 et 0,6. L'étude expérimentale de la cheminée solaire a été effectuée avec des dimensions internes de 2 m de hauteur, 1 m de largeur et un écart de cheminée variable entre 0,4 m à 1,2 m. La cheminée est constituée en quatre parois; une paroi chauffée, deux parois latérales et une paroi mobile. Les quatre murs

de la cheminée sont caractérisés par une épaisseur de 15 mm à haute densité. Les résultats montrent que la méthode de prédiction valable dans la littérature hausse les valeurs de prédiction du débit de l'air dans la cheminée solaire.

Bin Liu et al [56], ont fait une étude expérimentale pour tester l'effet de cheminée avec double paroi solaire hybride sur le confort thermique d'un habitat. On teste aussi l'effet de la ventilation, l'intensité du rayonnement solaire sur la distribution de température et le débit d'air à la sortie entre les parois hybrides. Les résultats montrent que la vitesse de l'air dans la cheminée solaire augmente avec l'accroissement du rayonnement et montre aussi que la valeur crête avec la diminution de la largeur de la fente de la cheminée et on conclut que le rapport optimal de la cheminée écart-largeur-hauteur est d'environ de 0,2 à 0,3.

Karima E. Amori et al [57], ont étudié numériquement et expérimentalement l'écoulement de fluide dans une cheminée solaire utilisée pour la ventilation naturelle. Ils ont étudié aussi l'effet de l'intégration de la cheminée avec et sans matériaux à changement de phase sur son comportement thermique. L'auteur a utilisé un CFD basé sur la méthode des volumes finis pour prédire la performance thermique et l'écoulement du fluide dans la cheminée solaire à deux dimensions.

L'effet d'inversion du flux sur le débit d'air de flottabilité induite dans une cheminée solaire pour les applications de ventilation sur une gamme de paramètres de contrôle a été étudié numériquement par Rakesh Khanal et al [58], L'auteur a étudié la flottabilité de convection naturelle à l'intérieur d'une cheminée solaire avec une procédure analytique numérique et qui est supporté par une expérience de visualisation d'écoulement qualitative.

Kuo-Tsang Huang et al [59], ont utilisé un modèle de simulation avec le programme « Energie-Plus » pour une étude prédictive dans les environ 2020, 2050, et 2080 pour les données météorologiques. Ce modèle a été utilisé pour déterminer l'état de fonctionnement de la climatisation pendant les heures d'occupation d'un bâtiment résidentiel pour déterminer la consommation énergétique de refroidissement. Les simulations ont révélé une augmentation de l'énergie de refroidissement de 31%, 59%, et 82% dans les trois tranches de temps.

Farzaneh Soflaei [60], a étudiée le concept de la cour centrale traditionnelle en tant que stratégie de refroidissement passif pour améliorer le confort thermique intérieur dans le climat de BS à Iran. L'étude

empirique sur le terrain a été menée pour analyser les trois variantes important de design, l'orientation, les dimensions et proportions, ainsi que les murs et les fenêtres. Dans les 14 maisons traditionnelles dont 5 anciennes sites. Les résultats montrent que les cours centrales traditionnelles iraniennes ont été conçues sur la base d'une attention particulière à l'orientation et les propriétés géométriques concernant les paramètres physiques et naturels pour agir comme un système passif de refroidissement. Le modèle de conception physique de l'environnement proposé pour les cours centrales comme une stratégie passive nécessaire peut être généralisée à une utilisation plus large des principes de conception respectueuse de l'environnement dans le futur.

Foruzanmehr et al [61], ont exploré la perception des utilisateurs au sujet de balcons traditionnels. Il a utilisé une gamme des différentes méthodes, l'auteur a conçu une enquête par questionnaire socio-culturel et observations personnelles. Elle montre que le balcon est un élément spatial dominant dans les habitations vernaculaires à Yazd (Iran) qui est populaire. Les résultats montrent qu'il existe une série de facteurs positifs et négatifs attribués aux balcons traditionnels. Les attributs positifs indiquent que ces espaces ont été créés pour servir les besoins sociaux culturels, esthétique et les besoins de confort.

Chávez, et al [62], ont évalué la performance thermique d'un système de conditionnement de l'environnement appelé « Hydrodynamique-Cool-Roofs -système ». Ce système a été créé pour réduire la température intérieure des toits en béton pour les bâtiments situés dans les climats tropicaux. Le système peut être installé dans les bâtiments neufs et existants. Le toit du bâtiment est rafraîchi quand l'eau passe à travers le système placé sur la toiture. Un logiciel CFD utilisé pour trouver la performance thermique du système de refroidissement. L'auteur a utilisé l'approche expérimentale avec des prototypes développés puis il a fait des tests pour déterminer leur potentiel de refroidissement. Les résultats montrent que le système peut diminuer de 8 °C.

Lu, Xing et al [63], ont préparé un article review sur les tendances de pompage de la chaleur au moyen de refroidissement radiatif passif (PRC). Xing a discuté les modèles de performance pour les systèmes de refroidissement radiatif passifs avec les conceptions et les facteurs de construction, l'auteur a discuté aussi les différentes configurations des systèmes qui sont disponibles à ce jour pour démontrer les formes d'intégration de la construction des systèmes.

Tejero-González et al, [64] ont étudié l'effet des paramètres climatiques sur les techniques de chauffage et refroidissement passif. L'étude a été élaborée à partir des résultats des travaux de recherche.

Il continue à recueillir les variables météorologiques consacrant l'énergie solaire passive, la ventilation naturelle, le refroidissement libre et les technologies de refroidissement par évaporation. Ensuite, l'auteur a étudié quatre villes choisies dans différentes conditions climatiques. L'intégration des matériaux de changement de phase dans la construction des murs a intéressé les chercheurs dans ces dernières années par leur efficacité énergétique dans le domaine de refroidissement passif. Pour cela, Hussein Akeiber et al ont présenté les études récentes sur les applications des matériaux de changements de phase pour le refroidissement passif dans les bâtiments. Hussein a cité une liste de différents MCP inorganiques et organiques pour le refroidissement passif dans les bâtiments. [65]

Muriel et al [66], ont analysé les études précédentes sur l'application de la technologie de MCP pour le refroidissement libre et le chauffage des bâtiments. Le stockage d'énergie thermique en général et MCP en particulier ont été discuté dans cet article. Une étude approfondie sur les systèmes MCP a été effectuée par l'utilisation des méthodes passives et actives avec les avantages et les inconvénients pour chaque état. Des approches expérimentales et numériques figurent dans cet article. Les méthodes actives sont adoptées pour les climats extrêmes pour répondre à la demande énergétique.

Murat Kenisarin [67] ont analysé l'état de l'art sur l'intégration des matériaux de changement de phase pour tester le contrôle thermique passif dans la construction des maisons résidentielles. Quelques matériaux de changement de phase tel que les paraffines, les acides gras et leurs mélanges, les esters d'acides gras, sont considérés pour le contrôle thermique passif des bâtiments. Les plaques de plâtre, les bétons poreux et d'autres matériaux utilisés pour la construction des maisons de formation, les technologies de l'intégration MCP dans les structures de construction sont discutées aussi dans cet article. Les résultats d'essais comparatifs sur 15 bâtiments de taille réelle contenant des éléments avec MCP ont été explorés.

Nasser A. Al-Azri [68], ont présenté le développement d'une année typique basé sur la température ambiante et la température de rosée à partir d'une base de données disponibles. L'approche permettra le développement des cartes bioclimatiques plus accessible et aussi plus précis.

Azadeh Jafari et al [69], ont proposé un nouveau système solaire pour le refroidissement passif des bâtiments, ce système est composé d'un refroidisseur d'absorption solaire, une cheminée solaire et un canal de refroidissement. La simulation de la température ambiante, l'humidité relative, et le changement de l'air par heure sont évalués. Les effets des autres paramètres comme les conditions ambiantes, la

demande de la chambre de refroidissement, les dimensions de la cheminée solaire et le canal de refroidissement à la température ambiante ont été étudiés. L'utilisation des trois plaques au lieu d'une température ambiante permet de réduire de 26,8%. On constate que le système proposé consomme l'énergie d'environ 37% par rapport à un climatiseur dans le même système.

Leonardo Micheli et al [70], ont analysé les avantages de refroidissement passif pour un système concentrateur photovoltaïque. La performance des puits de chaleur a été liée au rendement énergétique calculé d'une triple jonction cellulaire standard dans un système déployé à plusieurs endroits appropriés à travers le monde. Puits de cuivre et aluminium ont été examinés et comparés. Les résultats montrent les avantages de la miniaturisation et le refroidissement les plus petites cellules peut être réalisé à l'aide de dissipateurs thermiques plats.

L'application des matériaux de changement de phase a été proposée comme une solution prometteuse pour contrôler l'état thermique à l'intérieur des bâtiments ou l'étude a été faite par Paula Marin et al [71]. L'application de la technologie MCP dans les bâtiments déplaçables comme une alternative passive pour économiser l'énergie dans différentes conditions météorologiques. Les résultats montrent la possibilité d'utiliser des plaques de plâtre MCP pour améliorer le confort thermique dans les bâtiments pour augmenter la performance énergétique au cours des deux saisons hiver et été.

Li Yongcai et al [72], ont étudié expérimentalement la performance thermique d'une cheminée solaire à base de MCP avec trois flux thermiques différents de 500 W/m^2 , 600 W/m^2 et 700 W/m^2 . Les résultats montrent que pour une même période de charge de 7 h et 10 min, si le PCM ne pas fondre entièrement dans les cas de 600 W/m^2 et 500 W/m^2 , les variations de température sur la surface d'absorption pour les trois flux de chaleur sont les mêmes dans la période du changement de phase, à la période de décharge de chaleur. Les températures de surface diminuent très lentement jusqu'aux dégagements de chaleur latente. Les périodes de changement de phase sont presque 13 h 50 min pour tous les cas étudiés. Le débit d'air de $0,04 \text{ kg/s}$ pour le cas de 700 W/m^2 est légèrement supérieur à $0,039 \text{ kg/s}$ pour 600 W/m^2 et $0,038 \text{ kg/s}$ pour 500 W/m^2 . La température moyenne d'air à la sortie est égale à $19,6^\circ\text{C}$ pour le cas de 700 W/m^2 , qui est le plus bas parmi les trois cas. La température est à $20,1^\circ\text{C}$ pour les 600 W/m^2 et à $20,5^\circ\text{C}$ pour les 500 W/m^2 . Les rendements thermiques de pointe de la cheminée solaire sont observés à environ 80% pour tous les cas à la période de ventilation tôt.

Pouya Samani et al [73], ont comparé entre les différentes techniques de refroidissement passif d'ombrage, de ventilation naturelle, de peinture fraîche et d'augmentation de l'épaisseur l'intérieur du plâtre pour les bâtiments résidentiels, afin de lutter contre la surchauffe dans les climats chauds. Les techniques étudiées sont mesurées et comparées à la température de l'air intérieur maximale, minimale, ainsi que le confort thermique des occupants basé sur deux taux de ASHRAE55 d'acceptabilité et trois limites d'acceptabilité dans trois climats: Porto, Nairobi et Mumbai. Les résultats de la comparaison sur l'efficacité des techniques de refroidissement passif sont très bénéfiques au niveau de la conception. Les résultats soulignent l'amélioration de toutes les techniques étudiées.

T. van Hooff et al [74], ont étudié l'effet des mesures d'adaptation appliquées à l'échelle du niveau du bâtiment. Les autres études ont montré que les changements climatiques passifs des mesures d'adaptation peuvent avoir un effet positif sur le confort thermique en été. Les auteurs ont appliqué les mesures d'adaptation climatique passive au niveau des composants de construction pour la demande de refroidissement et de chauffage d'énergie d'une maison. Les résultats montrent l'énergie de refroidissement nécessaire lorsque la protection solaire externe ou une ventilation naturelle supplémentaire sont appliqués.

J.I. Perén et al [75], ont présenté une simulation numérique avec Computational Fluid Dynamics (CFD) pour étudier l'impact du toit simple et double sur le vent entraîné par ventilation transversale dans un bâtiment isolé générique. Les simulations ont été fondées sur une analyse grille-sensibilité et sur la validation des résultats par CFD en utilisant Vélocimétrie Particule Image de la littérature. Pour les cas de la toiture unique, les résultats de toit convexe dans le sens du débit volumique sont plus élevés, ce qui représente environ 8,8% supérieure à celle du toit concave et 3,5% plus élevé que le toit rectiligne. Un toit à double travée effectue un peu mieux qu'un toit à travée unique par rapport à des débits de ventilation ($Q > 4,2\%$) dans le cas d'un toit rectiligne ou concave.

Les premiers résultats de la surveillance des puissances de refroidissement passif mesurés par deux types PCM de plafond de refroidissement sont présentés par Helmut Weinsläder et al [76], dans le Centre de l'efficacité énergétique. Un nouveau bâtiment de R & D avec des types de plafond de refroidissement sont présentés dans la figure.II.7, deux MCP différents sont installés et surveillés dans deux chambres dans un bureau. Les plafonds sont reliés à un circuit d'eau utilisé pour le chauffage et le refroidissement. Les plafonds MCP sont des prototypes différents par la mise en place de la couche de MCP: le premier

plafond avec le PCM seulement, le deuxième type avec le MCP et des conduites d'eau. Il a été constaté, que le refroidissement du plafond avait une meilleure connexion thermique entre MCP et la chambre.

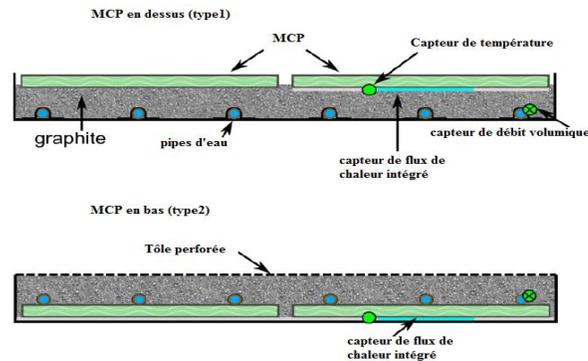


Figure.II.8. Schéma pour les deux types de plafond de refroidissement PCM.

M.H. Porhemmat et al [77], ont créé un modèle primaire réduit (RPM) pour évaluer la réponse dynamique primaire, sur la base des équations de gouvernance fondamentales, un autre modèle pour la boucle primaire d'un REP moderne est proposé ici pour la modélisation. Les auteurs ont supposé un scénario d'accident en base Passive System de refroidissement et sur la base du RPM, les réponses dynamiques primaires selon les équations de gouvernance fondamentale sont déterminées et les résultats sont mesurés par le code RELAP5.2. L'augmentation de la température est calculée pendant 5 minutes pour évacuer la chaleur de désintégration en utilisant la technique des paramètres localisés.

Blaz Hudobivnik et al [78], ont évalué l'influence de la haute intensité de refroidissement passif comme l'une des solutions passives de la surchauffe des bâtiments sur la réponse thermique globale de la construction de systèmes d'enveloppe. Les auteurs ont simulé la réponse thermique non stationnaire de plusieurs poids lourds et des murs extérieurs légers par une méthode d'éléments finis. Les résultats montrent que l'intensité intérieure du changement d'air comme les gains de chaleur internes a un impact significatif sur le flux de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment.

John Kaiser Calautit et al [79], ont construit en grande échelle un prototype de vent de refroidissement installé sur le dessus d'une salle inoccupée de 3m*3m*3m sur un site ouvert à Ras Al Khaimah (Emirats Arabes Unis). Il a intégré des refroidisseurs par évaporation dans un capteur de vent traditionnel. Une modélisation, une simulation par CFD et une validation expérimental ont été faites. L'analyse a montré l'application de tubes de chaleur pour le refroidissement naturel par ventilation. Ils ont

conclu que le système était capable de réduire la température de l'air jusqu'à 12-15°C. Le capteur est présenté dans la figure 8.

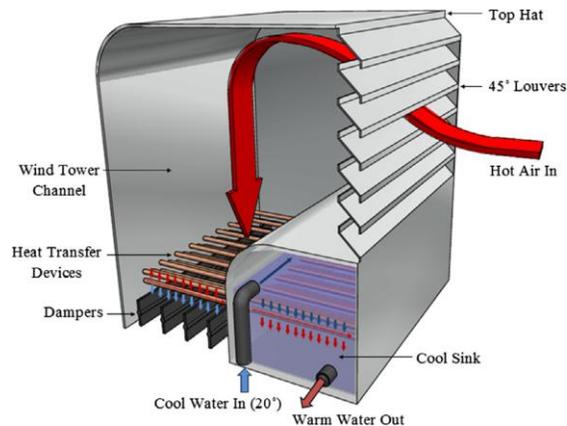


Figure.II.9. Capteur du vent de refroidissement.

J.I. Peren et al [80], ont étudié la géométrie du toit sous le vent en utilisant différentes géométries du toit en dents et qui sont évalués en utilisant Computational Fluide Dynamique (CFD). Les simulations 3D CFD sont effectuées en utilisant Reynolds-moyen l'approche constante de Navier-Stokes avec le $k-\omega$ modèle de turbulence pour fournir la fermeture des équations. La grille du calcul est basée sur l'analyse de la sensibilité et le modèle de calcul sont validés avec succès en utilisant des mesures pour un bâtiment isolé.

II.4. Conclusion :

A partir les études et les recherches antérieures (état de l'art), qui ont traité les méthodes de refroidissement sous différentes formes, on note que l'isolation thermique (matériaux locaux / MCP) et le refroidissement passive par la température de sol (échangeur air/sol) ont une grande importance pour réduire la température et réduire la consommation d'électricité dans les maisons. Le principe d'un échangeur air-sol qui exploite la géothermie très basse énergie (appelé en France échangeur air-sol ou encore puits provençal) est simple. On fait passer l'air de renouvellement, avant qu'il n'entre dans la maison, dans un tube enterré.

Références:

- [1] : A. Ahmed, Simulation of simultaneous heat and moisture transfer in soils heated by buried pipes, Ph.D. Dissert., The Ohio State University, Columbus (1980).
- [2]: Kusuda T, Achenbach P. Earth temperature and thermal diffusivity on at selected stations in the united states. ASHRAE Trans 1965;71:61-75.
- [3]: Belatrache D, Bentouba S, Bourouis M. Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates. Int. J. Hydrog. Energy 2017;42(13):8898-904.
- [4] Derbel HBJ, Kanoun O. Investigation of the ground thermal potential in Tunisia focused towards heating and cooling applications. Appl Therm Eng 2010;30:1091-100.
- [5] : A. Tzaferis, D. Liparakis, M. Santamouris, A. Argiriou, 'Analysis of the Accuracy and Sensitivity of Eight Models to Predict the Performance of Earth-To-Air Heat Exchangers', Energy and buildings, Vol. 8, N°1, pp. 35 - 43, 1992.
- [6] : Mihalakakou G, Santamouris M, Asimakopoulos DN. Modelling the thermal performance of earth to air heat exchangers. Solar Energy 1994;53:301-5.
- [7]: Mihalakakou, G., et al. "On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles." Solar Energy 60.3-4 (1997): 181-190.
- [8]: Benkert S, Heidt FD, Scholer D. Calculation tool for earth heat exchangers GAEA. In: Proceeding of building simulation, vol. 2. Prague: Fifth International IBPSA Conference; 1997.
- [9] : Mihalakakou G. On estimating soil surface temperature profiles. Energy and Buildings 2002;34:251-9.
- [10]: Breesch, Hilde, A. Bossaer, and Arnold Janssens. "Passive cooling in a low-energy office building." Solar Energy 79.6 (2005): 682-696.
- [11] : Li Haorong, Yu Yuebin, Niu Fuxin, Shafik Michel, Chen Bing. Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney. Renew Energy 2014;62:468-77.
- [12] : Maerefat M, Haghghi AP. Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney. Renew Energy 2010;35(10):2316-24.
- [13] : M. De Paepe, A. Janssens, Thermal-hydraulic design of earth-air heat exchanger, Energy Build. 35 (2003) 389-397.
- [14]: P. Hollmuller, Analytical characterization of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers, Int. J. Heat Mass Transfer 46 (2003) 4303-4317.
- [15] : Al-Ajmi F, Love day DL, Hanby VI. The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. Build Environ 2006;41: 235-44.

- [16]: V. Badescu, Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house, *Renewable Energy* 32 (2007) 845-855.
- [17]: Thiers Stéphane, Bruno Peuportier. "Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France." *Solar Energy* 82, no. 9 (2008): 820-831.
- [18]: Yıldız, Ahmet, Onder Ozgener, Leyla Ozgener. "Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell (PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling: An experimental study for low energy architecture in Aegean Region." *Renewable Energy* 44 (2012): 281-287.
- [19]: Su, Hua, Xiao-Bing Liu, Lei Ji, Jing-Yu Mu. "A numerical model of a deeply buried air-earth-tunnel heat exchanger." *Energy and Buildings* 48 (2012): 233-239.
- [20]: Sanusi, Aliyah NZ, Li Shao, Najib Ibrahim. "Passive ground cooling system for low energy buildings in Malaysia (hot and humid climates)." *Renewable energy* 49 (2013): 193-196.
- [21]: Ozgener, Onder, Leyla Ozgener, Jefferson W. Tester. "A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 62 (2013): 473-480.
- [22]: Ramírez-Dávila, L., J. Xamán, J. Arce, G. Álvarez, I. Hernández-Pérez. "Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates." *Energy and Buildings* 76 (2014): 238-248.
- [23]: Rodrigues, Michel Kepes, Ruth da Silva Brum, Joaquim Vaz, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Elizaldo Domingues dos Santos, Liércio André Isoldi. "Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method." *Renewable Energy* 80 (2015): 538-551.
- [24]: Niu, Fuxin, Yuebin Yu, Daihong Yu, Haorong Li. "Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies." *Applied Thermal Engineering* 77 (2015): 90-100
- [25]: Bisoniya, Trilok Singh, Anil Kumar, Prashant Baredar. "Energy metrics of earth-air heat exchanger system for hot and dry climatic conditions of India." *Energy and Buildings* 86 (2015): 214-221.
- [26]: Yang, Dong, Jinpeng Zhang. "Analysis and experiments on the periodically fluctuating air temperature in a building with earth-air tube ventilation." *Building and Environment* 85 (2015): 29-39.
- [27] : Mathur, Anuj, Ayushman Srivastava, Jyotirmay Mathur, Sanjay Mathur, G. D. Agrawal. "Transient effect of soil thermal diffusivity on performance of EATHE system." *Energy Reports* 1 (2015): 17-21.

- [28] : Yu, Yuebin, Haorong Li, Fuxin Niu, Daihong Yu. "Investigation of a coupled geothermal cooling system with earth tube and solar chimney." *Applied Energy* 114 (2014): 209-217.
- [29]: Mathur, Anuj, Ayushman Srivastava, G. D. Agrawal, Sanjay Mathur, Jyotirmay Mathur. "CFD analysis of EATHE system under transient conditions for intermittent operation." *Energy and Buildings* 87 (2015): 37-44.
- [30]: Xamán, J., I. Hernández-Pérez, J. Arce, G. Álvarez, L. Ramírez-Dávila, F. Noh-Pat. "Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation." *Energy and Buildings* 85 (2014): 356-361.
- [31]: Jakhar, Sanjeev, Rohit Misra, Vikas Bansal, M. S. Soni. "Thermal performance investigation of earth air tunnel heat exchanger coupled with a solar air heating duct for northwestern India." *Energy and Buildings* 87 (2015): 360-369.
- [32]: Chel, Arvind, Arnold Janssens, Michel De Paepe. "Thermal performance of a nearly zero energy passive house integrated with the air-air heat exchanger and the earth-water heat exchanger." *Energy and Buildings* 96 (2015): 53-63.
- [33]: Yang, Dong, Jinpeng Zhang. "Theoretical assessment of the combined effects of building thermal mass and earth-air-tube ventilation on the indoor thermal environment." *Energy and Buildings* 81 (2014): 182-199.
- [34]: Diaz-Mendez, S. E., C. Patiño-Carachure, J. A. Herrera-Castillo. "Reducing the energy consumption of an earth-air heat exchanger with a PID control system." *Energy Conversion and Management* 77 (2014): 1-6.
- [35]: Vidhi, R., D. Y. Goswami, E. K. Stefanakos. "Parametric study of supercritical Rankine cycle and earth-air-heat-exchanger for low temperature power generation." *Energy Procedia* 49 (2014): 1228-1237.
- [36]: Krommweh MS., Peter Rösmann, Wolfgang Büscher. "Investigation of heating and cooling potential of a modular housing system for fattening pigs with integrated geothermal heat exchanger." *Biosystems Engineering* 121 (2014): 118-129.
- [37]: Gan Guohui. "Dynamic interactions between the ground heat exchanger and environments in earth-air tunnel ventilation of buildings." *Energy and buildings* 85 (2014): 12-22.
- [38]: Mongkon, S., Sirichai Thepa, Pichai Namprakai, Naris Pratinthong. "Cooling performance assessment of horizontal earth tube system and effect on planting in tropical greenhouse." *Energy Conversion and Management* 78 (2014): 225-236.
- [39]: Campaniço, Hugo, Pierre Hollmuller, Pedro MM Soares. "Assessing energy savings in cooling demand of buildings using passive cooling systems based on ventilation." *Applied Energy* 134 (2014): 426-438.

- [40]: Liu, Xichen, Yimin Xiao, Kiao Inthavong, Jiyuan Tu. "A fast and simple numerical model for a deeply buried underground tunnel in heating and cooling applications." *Applied Thermal Engineering* 62, no. 2 (2014): 545-552.
- [41]; Song, Seung-Yeong, Jin-Hee Song, and Jae-Han Lim. "Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy: A case study of an educational facility in South Korea." *Energy for Sustainable Development* 23 (2014): 150-164.
- [42]: Tsilingiridis, G., K. Papakostas. "Investigating the relationship between air and ground temperature variations in shallow depths in northern Greece." *Energy* 73 (2014): 1007-1016.
- [43]: Uddin, Md Shazib, Raju Ahmed, and Masudur Rahman. "Performance evaluation and life cycle analysis of earth to air heat exchanger in a developing country." *Energy and Buildings* 128 (2016): 254-261.
- [44]: Ozgener Onder, Leyla Ozgener, Jefferson W. Tester. "A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 62 (2013): 473-480.
- [45]: Popiel, C. O., J. Wojtkowiak. "Temperature distributions of ground in the urban region of Poznan City." *Experimental Thermal and Fluid Science* 51 (2013): 135-148.
- [46]: Xamán, J., I. Hernández-López, R. Alvarado-Juárez, I. Hernández-Pérez, G. Álvarez, Y. Chávez. "Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México." *Energy and Buildings* 99 (2015): 273-283.
- [47] : Kubota, Tetsu, and Doris Hooi Chyee Toe. "Application of Passive Cooling Techniques in Vernacular Houses to Modern Urban Houses: A Case Study of Malaysia." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 179 (2015): 29-39.
- [48] : El Mays, A., Ammar, R., Hawa, M., Akroush, M. A., Hachem, F., Khaled, M., & Ramadan, M. (2017). Using phase change material in under floor heating. *Energy Procedia*, 119, 806-811.
- [49] : LEE, Sau Wai, LIM, Chin Haw, CHAN, Seong Aun, et al. Techno-economic evaluation of roof thermal insulation for a hypermarket in equatorial climate: Malaysia. *Sustainable cities and society*, 2017, vol. 35, p. 209-223.
- El-Awady, M. H., H. H. El-Ghetany, M. Abdel Latif. "Experimental investigation of an integrated solar green house for water desalination, plantation and wastewater treatment in remote arid Egyptian communities." *Energy Procedia* 50 (2014): 520-527.
- [49] : Tan, Alex Yong Kwang, Nyuk Hien Wong. "Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics." *Solar Energy* 102 (2014): 116-125.
- [50] : Zou, Zheng, Zhiqiang Guan, and Hal Gurgenci. "Numerical simulation of solar enhanced natural draft dry cooling tower." *Solar Energy* 101 (2014): 8-18.

- [51] : Haghghi, A. P., and M. Maerefat. "Solar ventilation and heating of buildings in sunny winter days using solar chimney." *Sustainable Cities and Society* 10 (2014): 72-79.
- [52] : DeBlois, Justin, Melissa Bilec, and Laura Schaefer. "Simulating home cooling load reductions for a novel opaque roof solar chimney configuration." *Applied Energy* 112 (2013): 142-151.
- [53] : Jing, Haiwei, Zhengdong Chen, and Angui Li. "Experimental study of the prediction of the ventilation flow rate through solar chimney with large gap-to-height ratios." *Building and Environment* 89 (2015): 150-159.
- [54] : Liu, Bin, Xiaoyan Ma, Xiaolin Wang, Chao Dang, Qingwei Wang, and Rachid Bennacer. "Experimental study of the chimney effect in a solar hybrid double wall." *Solar Energy* 115 (2015): 1-9.
- [55] : Amori, Karima E., and Saif Watheq Mohammed. "Experimental and numerical studies of solar chimney for natural ventilation in Iraq." *Energy and Buildings* 47 (2012): 450-457.
- [56] : Khanal, Rakesh, and Chengwang Lei. "Flow reversal effects on buoyancy induced air flow in a solar chimney." *Solar Energy* 86, no. 9 (2012): 2783-2794.
- [57] : Huang, Kuo-Tsang, and Ruey-Lung Hwang. "Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan." *Applied Energy* (2015).
- [58] : Soflaei, Farzaneh, Mehdi Shokouhian, and Seyed Majid Mofidi Shemirani. "Investigation of Iranian traditional courtyard as passive cooling strategy (a field study on BS climate)." *International Journal of Sustainable Built Environment* 5, no. 1 (2016): 99-113.
- [59] : Foruzanmehr, Ahmadreza. "People's perception of the loggia: A vernacular passive cooling system in Iranian architecture." *Sustainable Cities and Society* 19 (2015): 61-67.
- [60] : Chávez, Ulises, Carlos Escobar del Pozo, Elba T. Haro, and Juan M. Rodríguez. "A Thermal Assessment for an Innovative Passive Cooling System Designed for Flat Roofs in Tropical Climates." *Energy Procedia* 91 (2016): 284-293.
- [61] : Lu, Xing, Peng Xu, Huilong Wang, Tao Yang, and Jin Hou. "Cooling potential and applications prospects of passive radiative cooling in buildings: The current state-of-the-art." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65 (2016): 1079-1097.
- [62] : Tejero-González, Ana, Manuel Andrés-Chicote, Paola García-Ibáñez, Eloy Velasco-Gómez, and Francisco Javier Rey-Martínez. "Assessing the applicability of passive cooling and heating techniques through climate factors: An overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65 (2016): 727-742.
- [63] : Akeiber, Hussein, Payam Nejat, Muhd Zaimi Abd Majid, Mazlan A. Wahid, Fatemeh Jomehzadeh, Iman Zeynali Famileh, John Kaiser Calautit, Ben Richard Hughes, and Sheikh

Ahmad Zaki. "A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016): 1470-1497.

[64] : Iten, Muriel, Shuli Liu, and Ashish Shukla. "A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61 (2016): 175-186.

[65] : Kenisarin, Murat, and Khamid Mahkamov. "Passive thermal control in residential buildings using phase change materials." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (2016): 371-398.

[66] : Al-Azri, Nasser A. "Development of a typical meteorological year based on dry bulb temperature and dew point for passive cooling applications." *Energy for Sustainable Development* 33 (2016): 61-74.

[67] : Jafari, Azadeh, and Amin Haghghi Poshtiri. "Passive solar cooling of single-storey buildings by an adsorption chiller system combined with a solar chimney." *Journal of Cleaner Production* 141 (2017): 662-682.

[68] : Micheli, Leonardo, Eduardo F. Fernandez, Florencia Almonacid, Tapas K. Mallick, and Greg P. Smestad. "Performance, limits and economic perspectives for passive cooling of High Concentrator Photovoltaics." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 153 (2016): 164-178.

[69] : Marin, Paula, et al. "Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions." *Energy and Buildings* 129 (2016): 274-283.

[70] : Li, Yongcai, and Shuli Liu. "Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM." *Applied Energy* 114 (2014): 172-178.

[71] : Samani, Pouya, Vítor Leal, Adélio Mendes, and Nuno Correia. "Comparison of passive cooling techniques in improving thermal comfort of occupants of a pre-fabricated building." *Energy and Buildings* 120 (2016): 30-44.

[72] : van Hooff, Twan, Bert Blocken, H. J. P. Timmermans, and J. L. M. Hensen. "Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building." *Energy* 94 (2016): 811-820.

[73] : Perén, Jorge Isaac, Twan van Hooff, B. C. C. Leite, and Bert Blocken. "CFD simulation of wind-driven upward cross ventilation and its enhancement in long buildings: Impact of single-span versus double-span leeward sawtooth roof and opening ratio." *Building and Environment* 96 (2016): 142-156.

[74] : Weinläder, Helmut, Felix Klinker, and Modar Yasin. "PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center—passive cooling potential of two different system designs." *Energy and Buildings* 119 (2016): 93-100.

[75] : Porhemmat, M. H., F. Faghihi, and A. Rabiee. "Primary loop analysis for a PWR contains Passive Core Cooling System; LOCA and clad rising temperature." *Annals of Nuclear Energy* 91 (2016): 8-21.

[76] : Hudobivnik, Blaž, Luka Pajek, Roman Kunič, and Mitja Košir. "FEM thermal performance analysis of multi-layer external walls during typical summer conditions considering high intensity passive cooling." *Applied Energy* 178 (2016): 363-375.

[77] : Calautit, John Kaiser, and Ben Richard Hughes. "A passive cooling wind catcher with heat pipe technology: CFD, wind tunnel and field-test analysis." *Applied Energy* 162 (2016): 460-471.

[78] : Perén, J. I., T. Van Hooff, R. Ramponi, B. Blocken, and B. C. C. Leite. "Impact of roof geometry of an isolated leeward sawtooth roof building on cross-ventilation: Straight, concave, hybrid or convex?." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 145 (2015): 102-114

Chapitre III

Etude théorique et expérimentale d'isolation dans la toiture

III.1. Introduction :

Avant de commencer l'étude expérimentale, Il était nécessaire de présenter le matériel utilisé pour notre protocole expérimental à savoir : les appareils de mesure, les plaques, les chambres et les toitures à utiliser. Ensuite, nous avons préparé des méthodes ajustées pour effectuer des tests sur la température, l'irradiation solaire ainsi que la simulation par le logiciel (Transient system simulation/TRNBuild 1.0). Le premier objectif de cette recherche est d'étudier les propriétés thermiques de sept (07) échantillons d'argile de différentes compositions et d'autres matériaux utilisés pour les tests de conductivité thermique, puis d'étudier l'effet de la conductivité thermique de ces matériaux sur le confort thermique de trois types de bâtiments. Ensuite, on compare la consommation électrique entre trois salles différentes dans la période d'été (juillet, août et septembre). Le deuxième objectif est d'essayer d'améliorer les performances des trois types de matériaux utilisés dans une toiture de chambre prototype et faire une validation numérique par le modèle TRNSYS d'une expérimentation de trois chambres.

III.2. Calcul des propriétés thermo-physiques des matériaux locaux :

Dans cette Partie, nous présentons les matériaux utilisés dans la construction de sept échantillons (sable, argile, matériaux), la quantité des matériaux utilisés et la méthode de séchage, la méthode d'extraction et de calcul des propriétés thermiques de chaque échantillon. Enfin, nous évaluons et comparons les résultats.

III.2.1. Préparation des échantillons :

On utilise dans la préparation des échantillons une quantité de sable sec, l'argile sèche et deux types des matériaux locaux (fibres et épillets), tous ces matériaux sont extraits à partir des palmiers (H'mira) dans la ville d'Adrar au sud-ouest de l'Algérie avec des proportions différentes sont présentées dans la figure.III.1. La préparation a été faite en laboratoire, après l'opération de broyage (sable, argile), nous avons mélangé 6,4 kg (80%) de sable sec avec 1,6 kg (20%) d'argile pendant 4-5 minutes pour obtenir un mélange homogène. Ensuite, nous avons ajouté une quantité d'eau pour rendre le mélange plus cohésif et nous avons ajouté les matériaux locaux avec des pourcentages bien précis. Cette pâte est compactée avec un peu de pression pour la rendre plus solide dans une moule avec dimension interne de $300 \times 300 \times 40 \text{ mm}^3$ comme elle est montré dans la figure.III.1 (c). Après nous avons laissé l'échantillon de 7-10 jours pour se débarrasser complètement de l'eau et obtenir un morceau sec pour l'expérience.



Figure.III.1. Les matériaux utilisés pour le mélange (a) Fibre de palmier dattier. (b) Épillet de palmier dattier. (c) Dimension du notre moule.

Nous avons réalisé plusieurs expériences pour obtenir des proportions optimales de matériaux utilisés qui conservent la forme et la consistance de l'échantillon. Enfin, nous avons obtenu sept échantillons avec différents pourcentages de poids (0, 0.72, 1.02 et 1.32%) de fibre de palmier-dattier, (0, 0.69, 0.97 et 1.36%) épillet de palmier-dattier, la mesure de conductivité thermique a été faite pour chaque échantillon séché illustré dans la figure.III.2.

Sable et argile	Épillet de palmier dattier 50 g 0.697 %	Épillet de palmier dattier 75 g 0.97 %	Épillet de palmier dattier 100 g 1.36 %
Date Palmier fibre 50 g 0.72 %	Date Palmier fibre 75 g 1.01 %	Date Palmier fibre 100 g 1.32 %	

Figure.III.2. Échantillons composites utilisés pour la mesure de la conductivité thermique

Le tableau.III.1 représente les proportions des matériaux utilisés dans chaque expérience.

Tableau.III.1. Proportions de tous les mélanges d'échantillons séchés et leurs propriétés :

Échantillons	Sable (kg)	Argile (kg)	FPD (g)	EPD(g)	poids final (kg)	Densité (kg/m ³)
(a)	6.4	1.6	0	0	7.576	1957.6
(b)	6.4	1.6	0	50 g	7.166	1851.7
(c)	6.4	1.6	0	75 g	7.722	1995.3
(d)	6.4	1.6	0	100g	7.326	1893
(e)	6.4	1.6	50 g	0	6.940	1793
(f)	6.4	1.6	75 g	0	7.400	1912
(g)	6.4	1.6	100 g	0	7.550	1950.9

a- Description de la machine :

H112N est conçue sur la base de l'unité de conductivité thermique Hilton des matériaux de construction et d'isolation, b480 est basée sur la méthode relative de mesure de conductivité thermique qui a été déterminée en utilisant une méthode stationnaire basée sur une norme internationale ISO 8301. [1] La méthode du débitmètre thermique apparaît dans la norme Standard 8301: 1991, cette méthode est l'une des meilleures façons pour mesurer l'isolation thermique des matériaux par rapport aux autres méthodes d'état stationnaire.

Les échantillons sont placés entre une plaque chaude et un débitmètre thermique ; qui est fixé à une plaque froide. La machine est entourée d'un isolant comme illustré dans la figure.III.3. Les plaques, froide et chaude, sont fixées (ou conservées) à une température constante de 24.5 et 40 °C qui sont mesurées par les thermocouples type-k. L'ISO indique que les faces de l'échantillon doivent être planes à un taux d'erreur ne dépassant pas 0,025% et être parallèles à 2% de l'épaisseur. Pour le bon fonctionnement de la machine, la température de la plaque chaude doit être supérieure à la température de la plaque froide, la différence optimale entre les deux plaques est de 15 à 20 °C, il est possible d'ajuster toutes les températures requises de la plaque chaude avec une température maximale jusqu'à 100 °C. Le temps requis pour atteindre un état de stabilisation dépend du matériau utilisé dans l'essai et de la stabilisation de l'alimentation en eau de refroidissement et du flux de température. Pour les bons isolants, le temps de stabilisation est plus grand que les matériaux à faible isolation, dans notre étude généralement le temps de chaque expérience varie entre 4 et 6 heures.

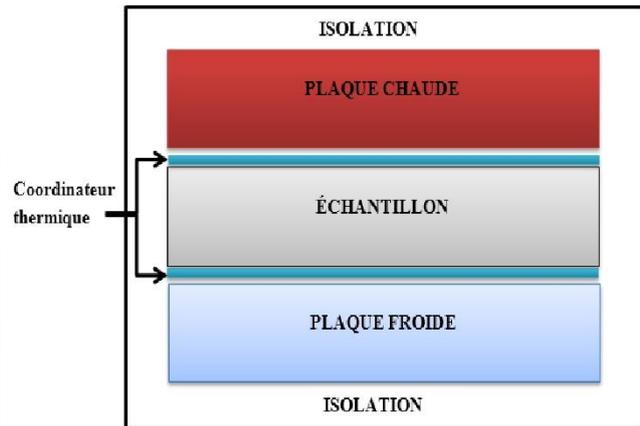


Figure.III.3. (a) Machine de conductivité thermique H112N (b) schéma méthode de la graduation de plaque chaude.

b- Approche de calcul des propriétés thermiques :

Après le séchage de nos échantillons pendant une période de 10 jours pour chaque échantillon, nous calculons chacun et extrairons la densité par la relation suivante :

$$\rho = M/V \dots\dots\dots (1)$$

La conductivité thermique de l'échantillon est donnée par l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{Is \times [(k_1 + (k_2 \times \bar{T})) + ((k_3 + (k_4 \times \bar{T})) \times HFM) + ((k_5 + (k_6 \times \bar{T})) \times HFM^2)]}{dT} \dots\dots (2)$$

Où : HFM : lecteur de débitmètre de chaleur (mV). K1 = -46.9381, K2 = 0.7358, K3 = 9.4031, K4 = 0.0124, K5 = 0.0475 et K6 = 0.002 Constantes d'étalonnage pour l'appareil donnée dans le catalogue de la machine. Les résultats obtenus à partir de cette équation sont en W / m.K, dT : Différence de température entre les deux plaques et $\bar{T} = dT/2$.

La résistance thermique de chaque échantillon est calculée par l'équation suivante : [2]

$$R = \frac{e}{\lambda} \dots\dots\dots (3)$$

c- Résultats expérimentaux :

✓ La densité :

Généralement, la densité de l'échantillon varie en fonction de la densité de notre mélange, la quantité d'air, le rapport des matériaux locaux et de la taille maximale de l'agrégat. Les densités de mélange frais ont été rapportées dans le tableau.III.1, le poids de l'échantillon de sable-argileux diminue à mesure que le pourcentage de EPD et FPD augmente. Les mélanges de FPD et de EPD ont montré une densité inférieure à celle de l'argile sableuse sèche. La densité a diminué lorsque la quantité de fibres de palmier dattier a augmenté.

✓ La conductivité thermique :

Dans l'expérience un débitmètre thermique est utilisé. Les sept valeurs mesurées de la conductivité thermique et les valeurs moyennes sont indiquées dans le tableau.III.2.

Tableau.III.2 les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans la construction des plaques.

échantillon	FPD (%)	EPD (%)	λ (w/m.K)	R (K.m ² /w)
(a)	0	0	1.87	0.023
(b)	0.72	0	0.742	0.058
(c)	1.01	0	0.683	0.063
(d)	1.32	0	0.381	0.112
(e)	0	0.697	0.13	0.330
(f)	0	0.97	0.129	0.333
(g)	0	1.36	0.106	0.405

La conductivité thermique de chaque échantillon préparé est présentée dans le tableau.III.2, on remarque que l'utilisation de mélange sans addition (argile et sable) donne une conductivité thermique de 1,87 W / m.K.

Les résultats expérimentaux de l'utilisation des matériaux locaux de la région d'Adrar montrent que le FPD est un bon isolant, où l'ajout d'une quantité de 50 g, 75 g et 100 g (un pourcentage de 0,72%, 1,01% et 1,32%) donne une conductivité thermique de 0.742 w / m.K, 0.683 w / m.K et 0.381 w / m.K respectivement. Cependant, les résultats expérimentaux pour le EPD ont montré que l'ajout de 50 g, 75 g et 100 g (0,697%, 0,97% et 1,36%) ont provoqué une conductivité thermique de 0.13 w / m.K, 0.129 w / m.K et 0.106 w / m.K respectivement. La Figure.III.4 montre les résultats obtenus. La conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la quantité de palmier, nous notons également que le EPD est le meilleur isolant, sa conductivité thermique est de 0,106 w / m.K lorsque son taux dans l'échantillon est de 1,36% voire un poids de 100 g.

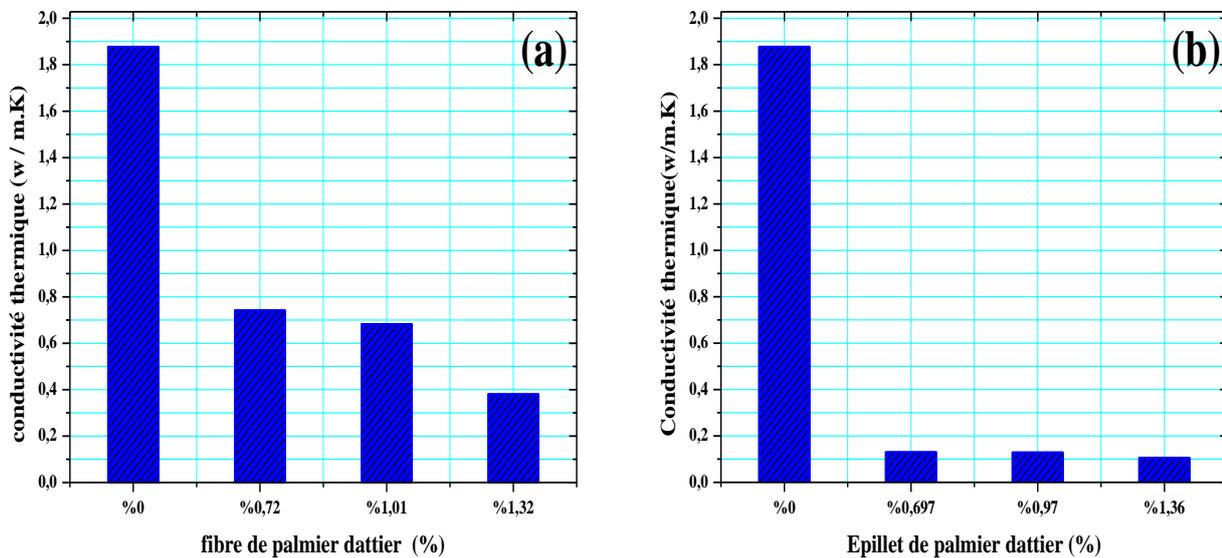


Figure.III.4 Influences des pourcentages (a) Fibre de palmier dattier. (b) Épillet de palmier dattier contenu sur la conductivité thermique des échantillons.

III. 3. Analyse thermodynamique utilisant trois types des matériaux de construction à base de dattier dans une pièce dans les climats arides :

Dans la deuxième partie de cette étude, nous avons effectué une analyse thermodynamique pour trois pièces différentes en terme de matériaux pris à partir de la datte de palmiers utilisée dans la construction, afin de démontrer l'efficacité énergétique de ces matériaux pour l'isolation thermique sur le confort thermique d'habitat et savoir quelles surfaces (murs et toits) influencé par l'irradiation solaire sont les plus absorbeurs de chaleur à partir de l'extérieur. La simulation a été réalisée en trois jours

différents, trois mois spécialement pour la période estivale afin de déterminer la quantité d'énergie électrique consommée pour chaque pièce, puis on compare les résultats.

III.3.1. Modèle numérique de la simulation :

Le système a été modélisé avec le programme TRNSYS et l'étude numérique est simulée avec le TYPE 56 [3], ce type (bâtiment multizone) est utilisé pour simuler le comportement thermique du bâtiment, les données météorologiques pour Adrar sont introduites par des moyens de sous-routine Type 109-TMY2. Les principales données d'entrées pour le modèle de bâtiment multizone sont : les caractéristiques géométriques et matérielles et les stratégies de contrôle du système de refroidissement [4]. Dans cette étude, nous avons supposé qu'il y a trois salles construites avec trois types de briques qui sont présentées dans la figure.III.5, les trois chambres n'avaient pas de charges internes et avaient une seule fenêtre, une porte et des différents murs en termes de matériaux constitutifs suivants :

- ✓ (a) brique d'argile simple.
- ✓ (b) brique d'argile avec fibre de palmier dattier.
- ✓ (c) brique d'argile avec épillet de palmier dattier.

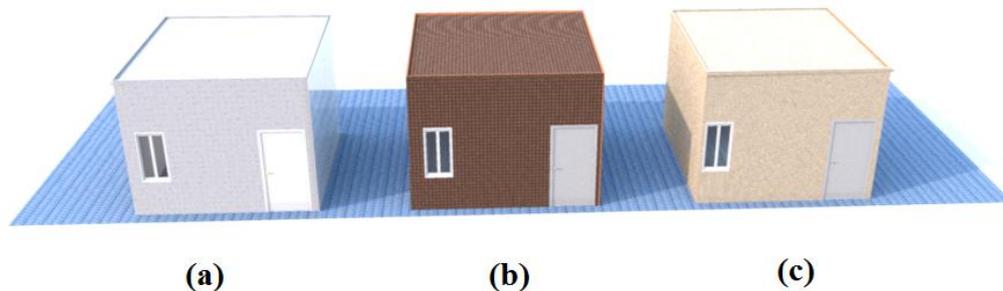


Figure.III.5. Chambres : (a) brique d'argile simple, (b) brique d'argile avec FPD, (c) brique d'argile avec EPD

Dans cette étude, nous avons ajouté les meilleurs résultats obtenus dans notre travail expérimental précédent, on a supposé que nous avons trois salles (a), (b) et (c), constituées de briques ordinaires, un mélange de briques et de fibres palmier 1,32% ($\lambda = 0,381 \text{ w / (m.K)}$), et un mélange de briques d'épillet 1,36% ($\lambda = 0,106 \text{ w / (m.K)}$), respectivement. Dans cette partie, la performance thermique attendue des chambres étudiées est évaluée en tenant compte des hypothèses de conception suivantes :

- Les chambres ont des dimensions externes de $4,00 \times 4,00 \times 4,00 \text{ m}^3$.
- La fenêtre à la façade nord de la chambre avec dimension extérieure de $1 \times 1 \text{ m}^2$.
- La porte est à la façade nord de la chambre de dimensions extérieures de $2 \times 0,8 \text{ m}^2$.
- Les chambres n'avaient pas de charges internes (éclairage, équipement ou occupants).

Comme résumé dans le tableau.III.3, on voit que l'épaisseur d'isolation s'applique pour chaque chambre de chaque mur, toit et les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette simulation concernant la conductivité thermique et la résistivité. Le tableau.III.3 montre les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans chaque chambre.

Dans cette simulation nous avons étudié l'effet de trois modèles de briques différentes (a, b, c) pendant les mois d'été (Juillet, Août et Septembre) quand le climat est très chaud. Nous avons simulé la variation des températures des trois chambres (ambiante intérieure, surface externe et surface interne pour chaque mur et toiture) pour les journées suivantes (17 juillet, 16 août et 15 septembre). Il s'agit des jours moyens recommandés pour les mois donnés par la référence [5], puis on calcul l'efficacité du refroidissement et la consommation électrique pendant la période estivale pour chaque chambre.

	Unité utilisé	chambre (a)			chambre (b)			chambre (c)		
Murs	-	Mélange Sable argile	plâtre	Gypse	MFPD	plâtre	Gypse	MEPD	plâtre	Gypse
	λ (KJ/h.m.K)	6.73	5	0.756	1.371	5	0.756	0.381	5	0.756
	e(m)	0.24	0.015	0.012	0.24	0.015	0.012	0.24	0.015	0.012
	R (k.m ² /w)	0.128	0.0107	0.0571	0.63	0.0107	0.0571	2.264	0.01	0.0571
Toiture	-	Mélange Sable argile	Isolant		T _{FPD}	Isolant		T _{EPD}	Isolant	
	λ (Kj/h.m.K)	6.73	0.144		1.371	0.144		0.381	0.144	
	e(m)	0.24	0.16		0.24	0.16		0.24	0.16	
	R (k.m ² /w)	0.128	4		0.63	4		2.264	4	
Sol		Floor	Stone		Concret		Isolant			
	λ (Kj/h.m.k)	0.252	5		7.56		0.144			
	e(m)	0.005	0.060		0.24		0.08			
	R (k.m ² /w)	0.071	0.0432		0.1142		2			

Tableau.III.3. Caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans chaque chambre

III.3.2. Résultats de la simulation:

La simulation de l'énergie thermique a été faite sur trois chambres comme illustré par la figure.III.6, afin d'évaluer les performances d'isolation thermique concernent les matériaux utilisés dans les trois pièces. Nous avons étudié d'abord le changement de température pendant trois jours, la température intérieure des pièces, la température de surface externe et interne des murs et des toits, puis nous avons calculé la variation de la température intérieure avec et sans climatisation électrique pendant trois mois pour obtenir la différence dans le coût de refroidissement entre les trois chambres. Dans le cas d'une chambre utilisant un matériau pour l'isolation, l'intensité de l'irradiation solaire global instantané de la ville d'Adrar généré par Métronome a été intégrée dans notre calcul sur une base horaire (KJ/h.m²) utilisant logiciel TRNSYS.

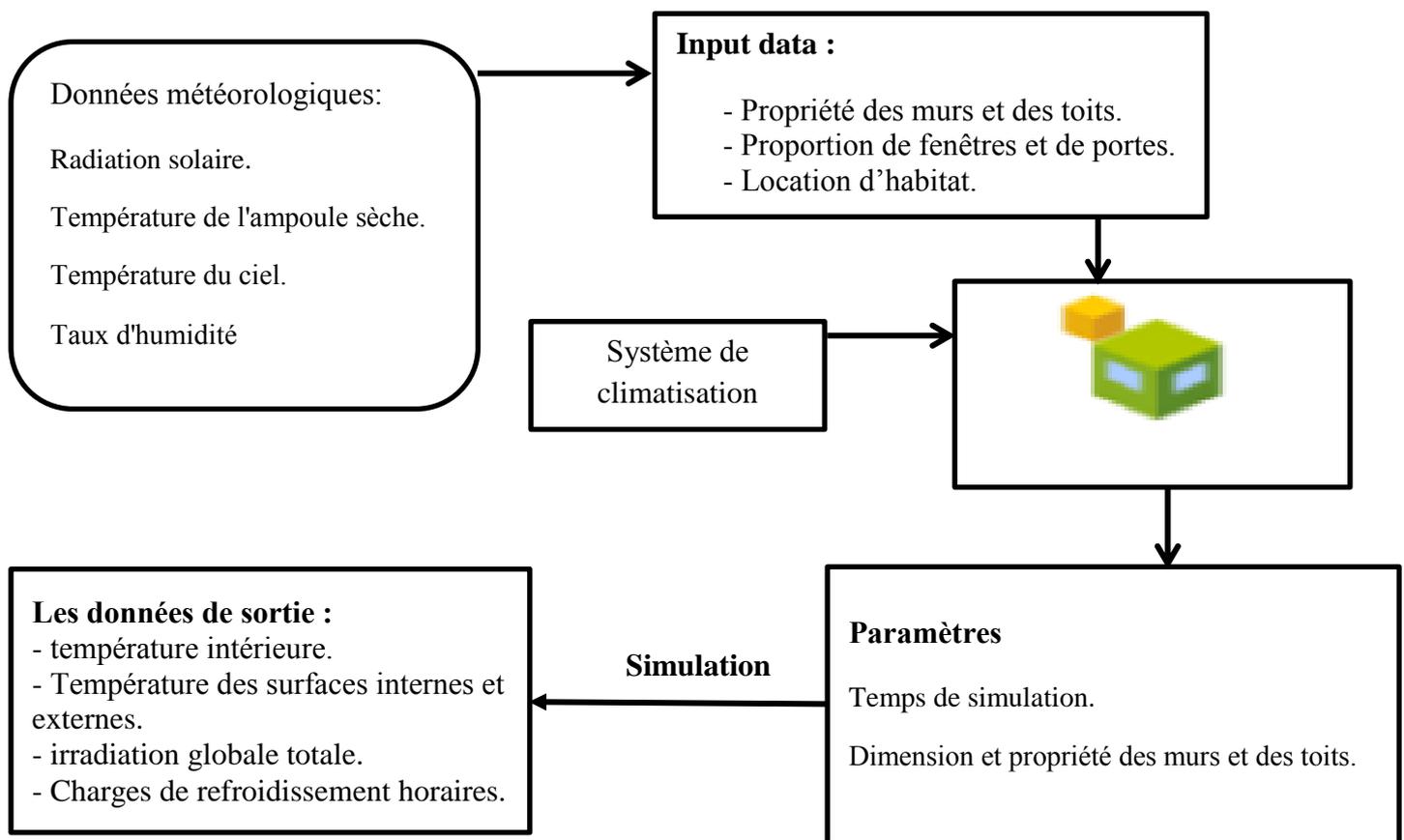
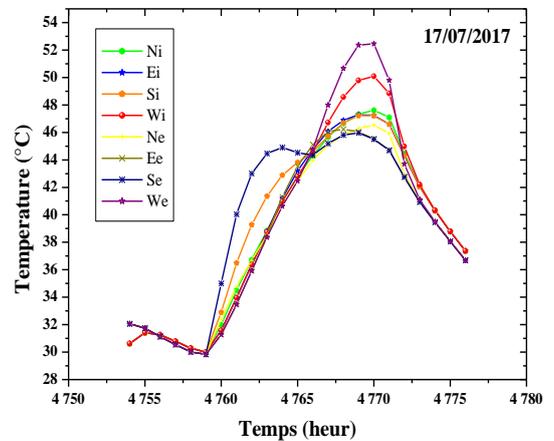
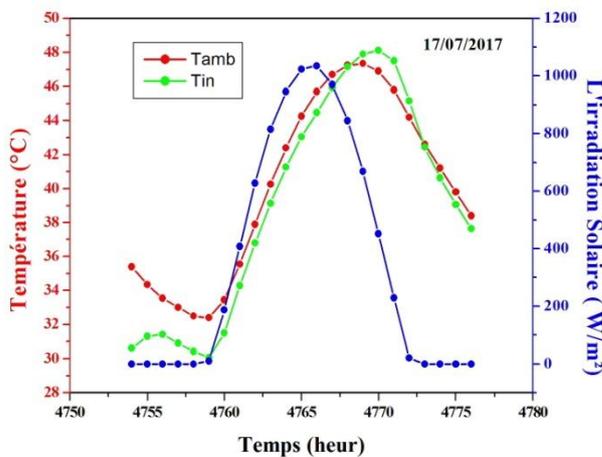


Figure.III.6. Modèle de simulation TRNSYS TYPE 56 pour une chambre.

a- Variation des températures dans la chambre (a) :

La figure.III.7 (a) illustre la variation de l'irradiation solaire globale et les températures ambiantes dans la chambre (a). Les profils de la température ambiante et la température intérieure montrent des petites différences durant les jours de la simulation entre 0.1°C et 1.3°C à partir de 7h00 jusqu'à 13h00 pour chaque jour. Nous remarquons également qu'il y a une correspondance claire après le lever du soleil pendant les premières trois heures jusqu'à ce qu'il atteigne la différence de valeur opposée 1.7°C, 1.77°C, 1.4°C après-midi concernant le 17 juillet, le 16 août et le 15 septembre respectivement. La Figure.III.7 (b) montre la variation de la température des surfaces externes et internes des murs de la pièce (a). Nous notons que la température extérieure la plus basse au moment du pic enregistrée dans le mur nord est de 47.6°C, 48.2°C et 40°C respectivement, par contre la plus grande température extérieure enregistrée dans le mur ouest est de 52.46°C, 53.68°C et 46.26°C en date du 17 Juillet, 16 Août, et le 15 Septembre respectivement. Nous remarquons que la température intérieure la plus basse enregistrée en période de pic dans le mur nord est de 45.51°C, 46.86°C et 39.85°C respectivement. D'autre part la plus grande température intérieure enregistrée dans le mur ouest est de 50.08°C, 51°C et 44.1°C.



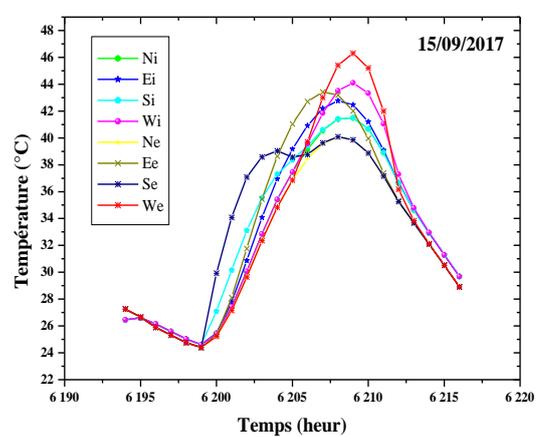
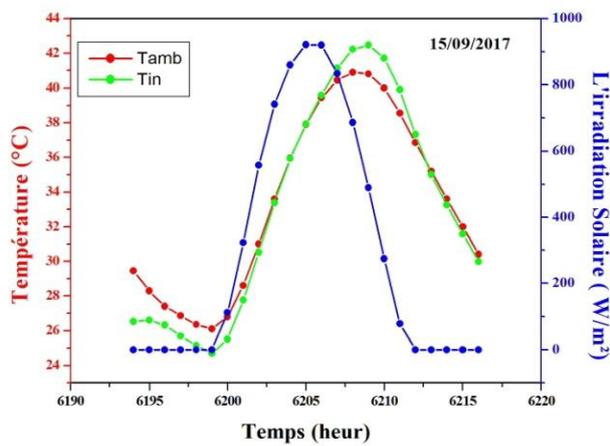
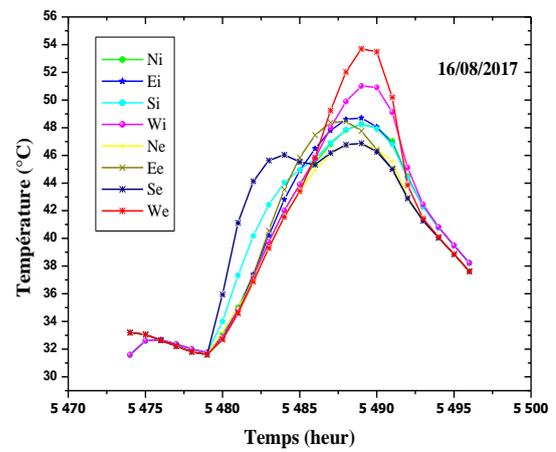
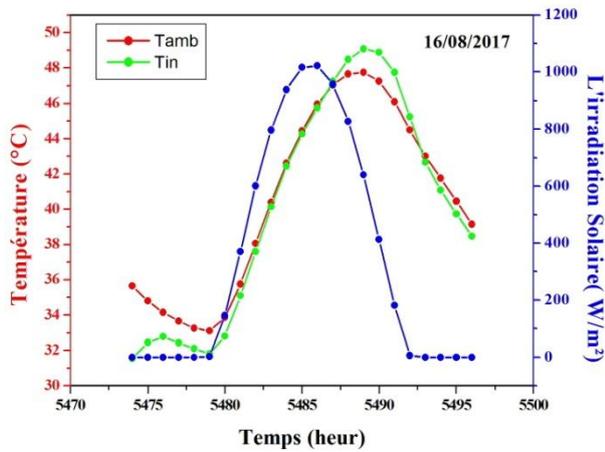


Figure.III.7 (a).

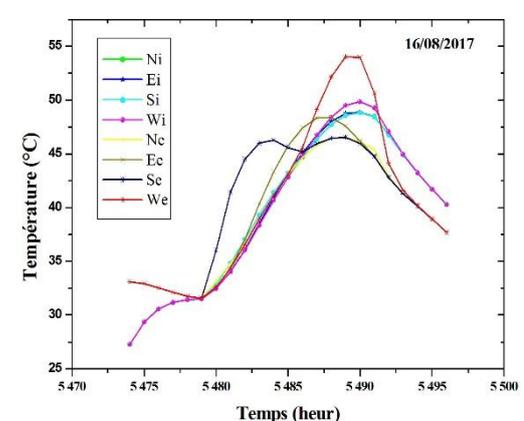
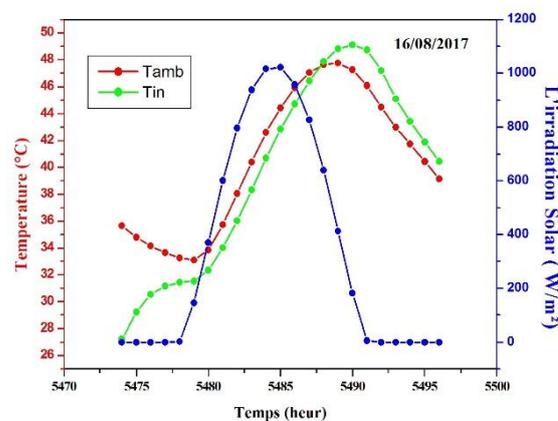
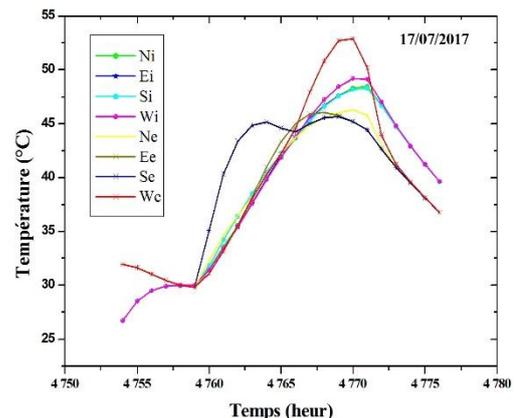
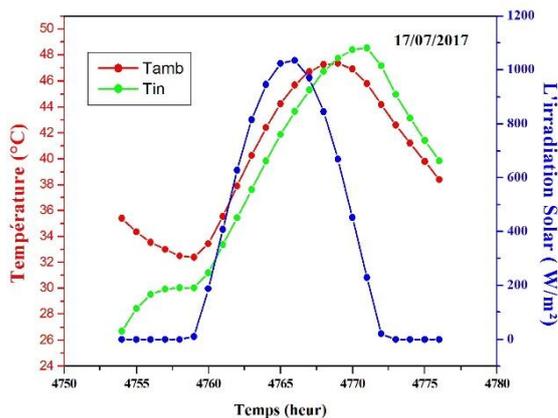
Figure.III.7 (b).

Figure.III.7 : La variation des températures des murs dans la pièce (a).

b- Variation des températures dans la chambre (b) :

Dans les jours chauds, la température intérieure et la température ambiante en milieu de journée (pic d'irradiation) atteignent respectivement 48.53°C et 47.35°C (17 Juillet), comme indiqué dans Figure.III.8 (a). Nous remarquons que la température extérieure n'a pas d'effet significatif sur la température interne de la pièce, ce qui explique l'avantage de l'utilisation des fibres dans la construction. Nous notons également qu'il y a eu une température élevée dans l'après-midi suite à l'isolation thermique, ceci n'est pas indiqué dans la pièce (a) car elle est sans isolation thermique. On remarque également qu'au début de la journée, la température de la pièce intérieure (b) est toujours

inférieure à la température extérieure jusqu'au milieu de la journée (12h00), dans ce cas l'effet de l'isolation thermique apparaît clairement. La température ambiante intérieure augmente progressivement pour dépasser la température extérieure provoquée par le stockage thermique de l'isolant pour atteindre une différence constante de 1.5°C au coucher du soleil. La Figure.III.8 (b) montre la variation de la température de la surface externe et interne des murs de la pièce (b). Nous notons que la température extérieure la plus basse au moment du pic enregistrée dans le mur nord est de 45.22°C, 46.56°C et 39.52°C, respectivement et la plus grande température extérieure enregistrée dans le mur ouest est de 52.88°C, 54.02°C et 46.66°C en 17 Juillet, 16 Août, et le 15 Septembre, respectivement. Nous remarquons aussi que la température intérieure la plus basse dans ce moment dans le mur nord est de 48.2°C, 48.6°C et 41.9°C. D'autre part la plus grande température intérieure enregistrée dans le mur ouest est de 49.1°C, 49.54°C et 42.85°C respectivement pour les jours de la simulation.



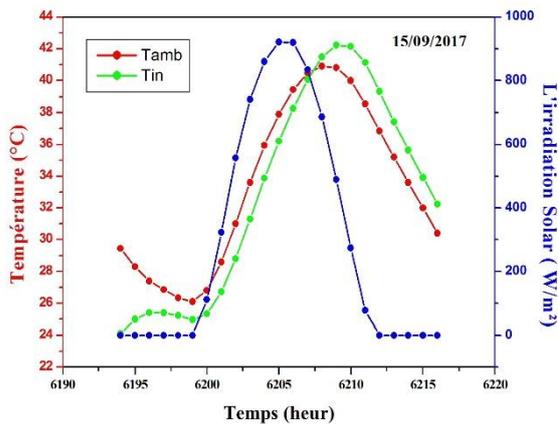


Figure.III.8 (a)

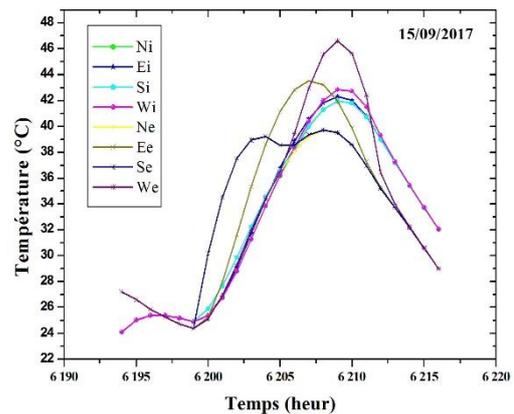


Figure.III.8 (b)

Figure.III.8 : La variation des températures des murs dans la pièce (b).

c- Variation des températures dans la chambre (c) :

La Figure.III.9 (a) indique que les résultats obtenus dans la pièce (c) sont les meilleurs. On constate qu'à partir du lever de soleil jusqu'au midi, la température intérieure de la pièce (c) prend une valeur de 30°C, 24°C et 29°C pour les jours de la simulation. La température augmente à partir de l'après-midi à 39°C, 40°C et 37°C en 17 Juillet, 16 août et 15 Septembre, respectivement ; en raison du stockage thermique dans cette pièce. Dans le début de la journée, la température ambiante intérieure de la pièce (c) est inférieure à la température ambiante extérieure avec une différence qui prend une valeur moyenne de 2 ° C jusqu'au midi de la journée, ce qui montre que l'effet de l'isolation thermique dans la pièce (c) est plus efficace que les autres pièces (a) et (b). La température intérieure augmente progressivement pour dépasser la température externe, ceci est dû au stockage thermique de l'isolant qui reste relativement élevé au coucher du soleil, contrairement à ce qui a été observé dans les deux chambres précédentes. La Figure.III.9 (b) représente la variation de la température de surface externe et interne des murs de la pièce (c). La température extérieure la plus basse enregistrée au moment du pic dans le mur nord est de 45.08°C, 46.44°C et 39.38°C, et la plus grande température extérieure enregistrée dans le mur ouest est de 53.01°C, 54.14°C et 46.7°C en 17 Juillet, 16 Août, et le 15 Septembre respectivement. Nous remarquons aussi que la température intérieure la plus basse dans ce moment dans le mur nord est de 47.46°C, 47.07°C et 40.42°C et La plus grande température intérieure enregistrée dans le mur ouest est de 47.78°C, 47.37°C et 40.70°C respectivement pour les jours choisis.

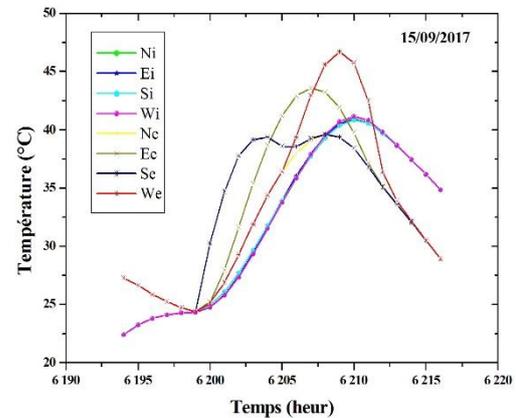
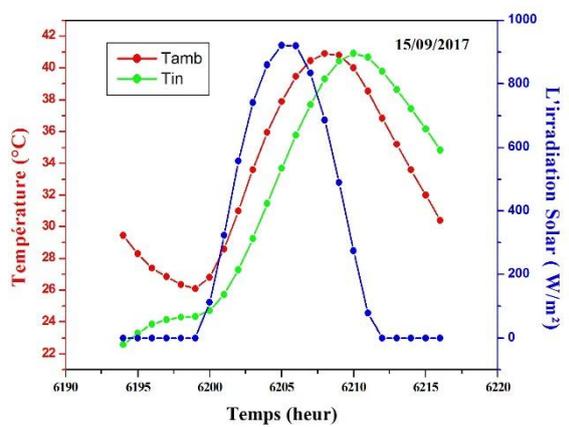
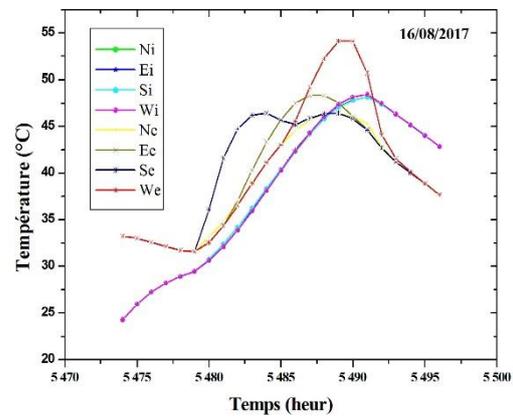
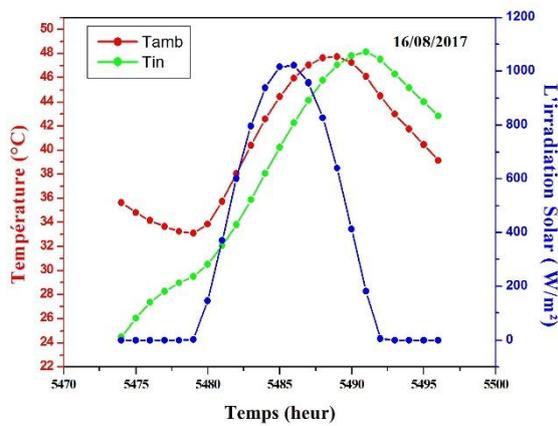
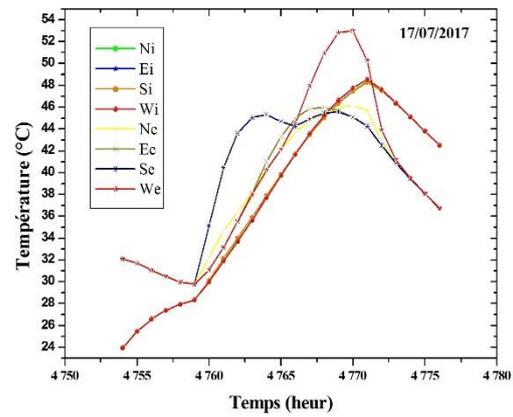
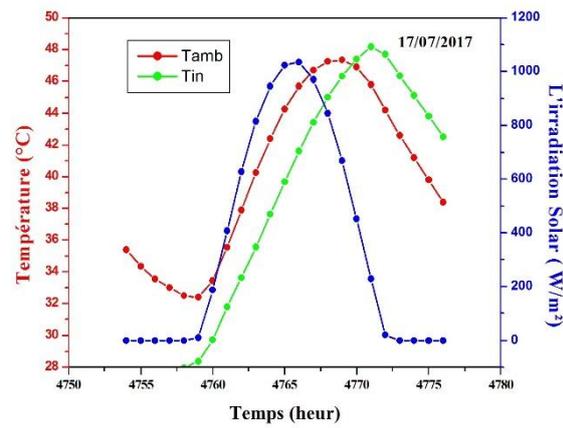


Figure.III.9 (a)

Figure.III.9 (b)

Figure.III.9 : La variation de températures des murs dans la pièce (c).

d- Variation de la température interne et externe des toits dans les chambres :

La figure.III.10 montre la variation de la température de la surface interne et externe de toiture et les irradiances solaires. La température du toit de la surface externe était généralement supérieure d'environ d'un intervalle de température allant de 6°C à 28°C par rapport à la température interne de la surface du toit. A partir de la figure.III.10, la température de surface externe varie proportionnellement avec l'irradiation solaire directe, tandis que la température de surface interne change doucement par rapport à la surface externe. On remarque que la plus basse température intérieure est de 30.42°C, 26.72°C et 24.18°C en 17 juillet dans chaque chambre (a), (b) et (c), respectivement.

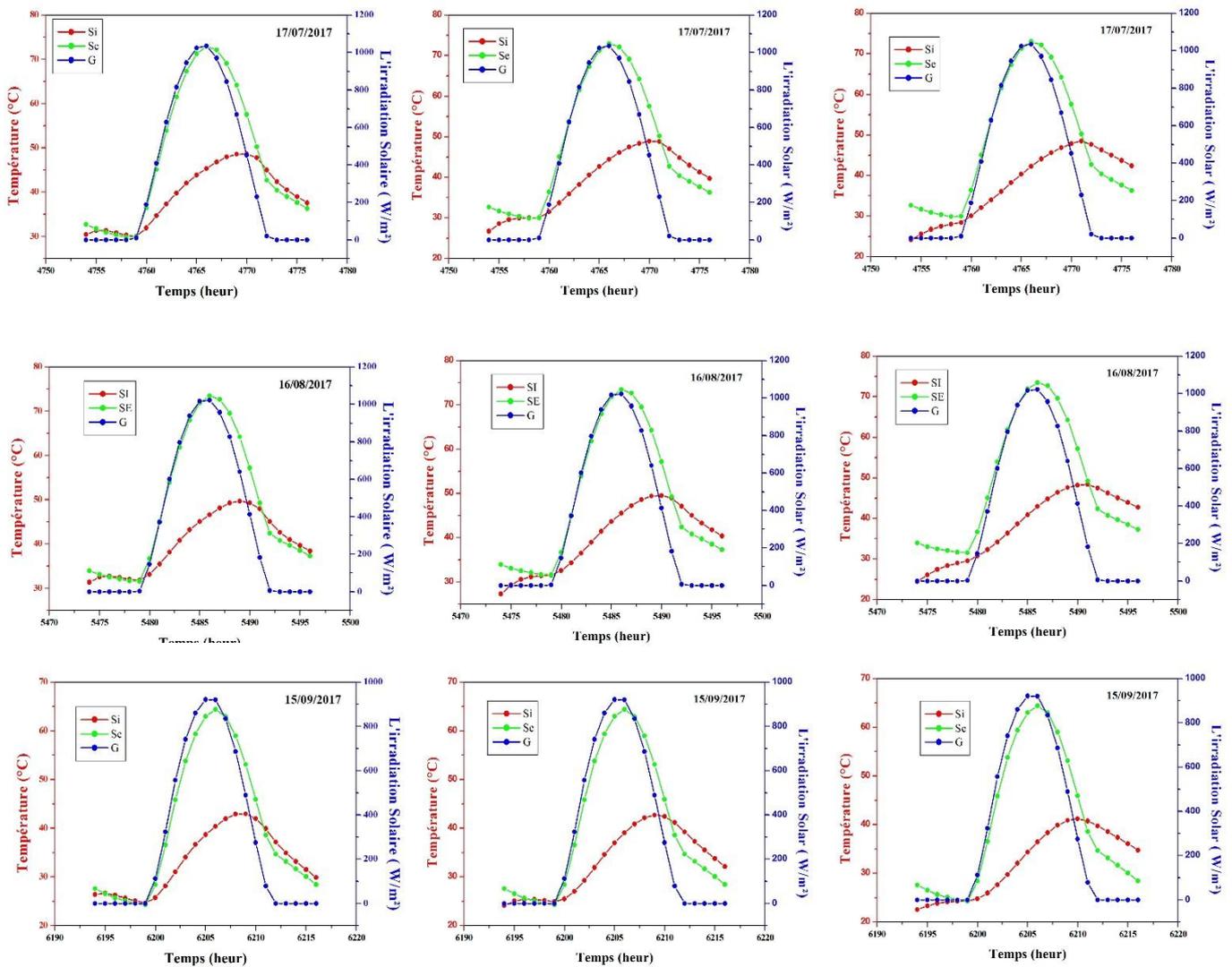


Figure.III.10 : La variations horaires des températures internes et externes des toits dans les pièces.

e- Variation mensuelle de la température intérieure dans les chambres :

La figure.III.11 présente les variations de la température de l'air intérieur dans les chambres calculées avec et sans climatisation pendant les mois de juillet, août et septembre. Dans le cas d'utilisation de la climatisation, lorsque la température intérieure dépasse 28°C le système de refroidissement s'allume automatiquement. En raison de la bonne isolation du EPD dans la chambre (c), le transfert de chaleur prend plus du temps par rapport aux autres chambres ce qui signifie que le système de climatisation ne s'allume pas rapidement. Cependant, à la fin de la journée, la température intérieure dans la chambre (c) demeure élevée par rapport les autres chambres en raison de l'effet de l'isolation ce qui empêche la pénétration de la chaleur à l'extérieur.

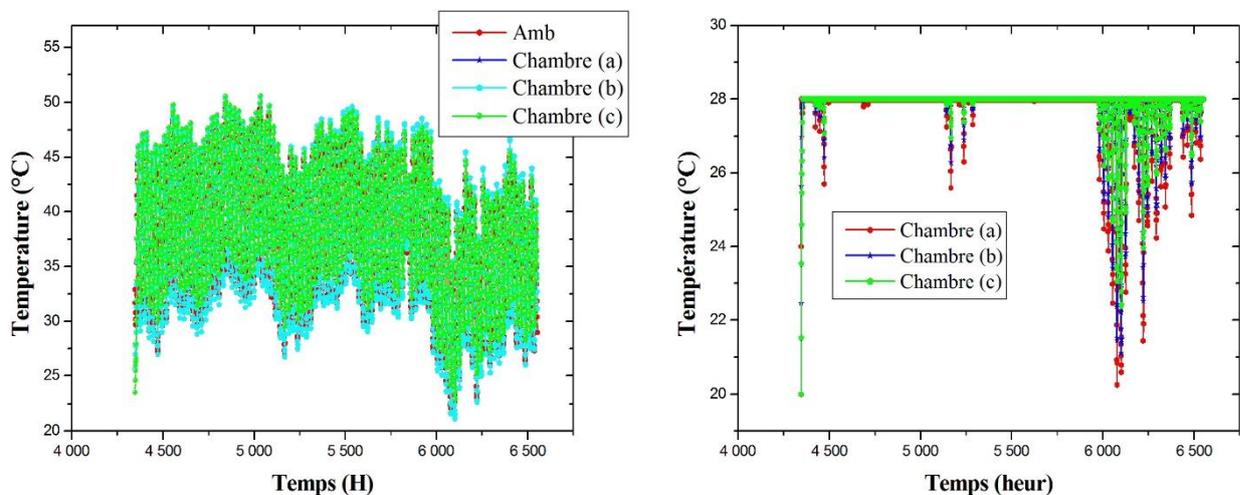


Figure.III.11 : La variation mensuelle de la température intérieure dans les chambres avec et sans climatisation.

f- Variation mensuelle des charges de refroidissement horaires des chambres :

Les résultats sont évalués par rapport à toutes les pièces, les valeurs de refroidissement mensuels sont montrées dans la figure.III.12. Le système de climatisation sera plus efficace que la température de la chambre(a) simple, chambre (b) avec FPD et chambre (c) avec EPD. L'énergie thermique totale durant trois mois était de 2973.813 kW, 1750.012 kW et 1049.118 kW, respectivement. L'utilisation d'argile et du sable conduit à une consommation d'électricité de 1.5 kWh à 3.4 kWh, les fibres de palmiers coûtent de 1 kWh à 1.8 kWh mais le coût de l'épillet de palmier est de 0 kWh à 1 kWh, ce qui prouve l'efficacité de l'isolation thermique en utilisant l'épillet de palmier par rapport aux autres matériaux utilisés dans cette simulation. L'utilisation de EPD dans la chambre (c), nous permet de réduire de 64,72% la demande d'énergie par rapport à la pièce (a), tandis que nous réduisons 41,15% de la demande d'énergie avec FPD dans la chambre (b).

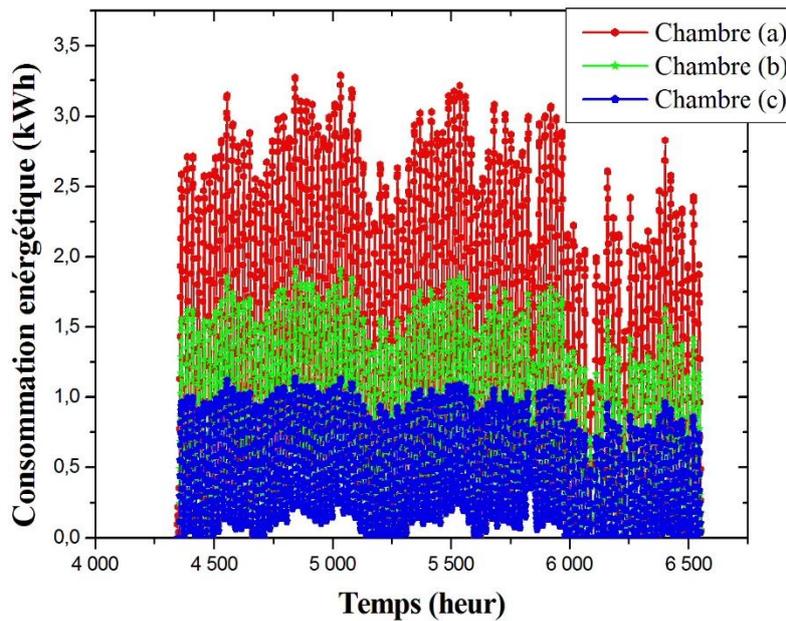


Figure.III.12 Variation des charges de refroidissement horaires des pièces.

III.4. Etude théorique et expérimental sur l'utilisation des matériaux locaux des dattes de palmier pour l'isolation des toitures dans les climats arides :

Dans cette partie nous présentons une étude expérimentale et simulation de l'isolation thermique concernant quatre (04) types de toit, nous avons mené trois expériences en trois jours le 28 mai 2016, le 16 octobre 2016 et le 25 mai 2017 dans le laboratoire de développement durable et informatique LDDI à l'université Adrar ; concernant quatre chambres différentes ; notre expérience a été menée pour chaque deux modèles de toits séparément ; deux à la fois par jour. Nous comparons les résultats obtenus pour la température ambiante interne et externe, la température de surface interne et externe et l'irradiation solaire.

III. 4.1. La description de prototype et les toitures utilisées:

Le Prototype étudié dans ce travail à une dimension externe de $0,8 \times 0,8 \times 0,6 \text{ m}^3$ réalisé en laboratoire de Développement Durable et Informatique, situé à l'université d'Adrar, en Algérie. Nous avons construit ces deux chambres avec les mêmes conditions que celles présentées dans le tableau.III.5 et indiqué dans la figure.III.14. Tous les placements de thermocouples sont montrés dans la figure.III.14. Pour chaque prototype, nous avons quatre (04) thermocouples pour mesurer la température comme suit :

- ✚ K1 placé à l'extérieur pour mesurer la température ambiante extérieure.
- ✚ K2 placé dans l'espace intérieur du prototype pour mesurer la température intérieure.
- ✚ K3 placé dans le toit de surface externe du prototype.
- ✚ K4 placé dans le toit de surface interne du prototype.



Figure.III.13 : Le travail expérimentale.

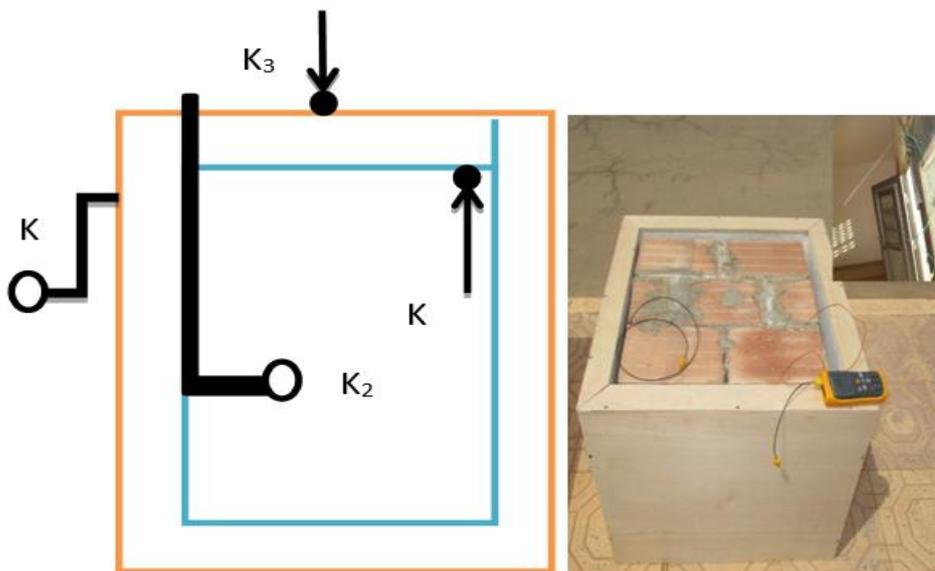


Figure.III.14 : L'emplacement des thermocouples pour chaque chambre.

III.4.2. Approche de simulation :

La simulation est basée sur les équations de bilan énergétique et l'équation de transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Nous avons utilisé la conductivité thermique extraite à partir des résultats obtenus dans chaque journée expérimentale. Afin d'obtenir la conductivité thermique, nous suivons quelques équations mathématiques qui simplifient la méthode du calcul. Le calcul des valeurs de variation de la température de surface interne, externe et du toit pendant la période d'expérimentation de trois jours. Nous vérifions les résultats pour trouver le temps de stabilité de la différence entre la température de surface externe et interne. En ce moment "état stable", le flux de chaleur est constant dans cet état, et nous pouvons calculer la conductivité thermique de notre toit. Nous avons déterminé le flux de chaleur de l'équation comme suite :

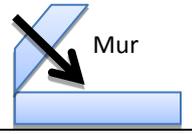
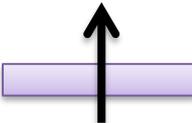
$$\varphi_{con} = \varphi_{cnv} + \varphi_r \dots\dots (4)$$

Avec :

$$\varphi_{cnv} = H \times \delta T = H \times (T_{sky} - T_{Amb}) \dots\dots (5)$$

H : est donné à partir du document technique de ministère algérien comme indiqué dans le tableau.III.4: [6]

Tableau.4. Coefficient du transfert de chaleur Valeurs.

	Chambre connectée avec extérieur.			Chambre connectée avec une autre.		
	1/h _i	1/h _e	1/h _i + 1/h _e	1/h _i	1/h _e	1/h _i + 1/h _e
 Mur	0.1	0.04	0.14	0.1	0.11	0.21
 Toiture	0.16	0.04	0.20	0.16	0.17	0.33
	0.8	0.04	0.12	0.08	0.09	0.17

La température du ciel calculée par l'équation suivante : [6]

$$T_{sky} = 0.0552 \times T_{amb}^{1.5} \dots\dots (6)$$

$$\varphi_r = I * C_a \dots\dots\dots (7)$$

C_a: est donné à partir de [7] où : C_a= 0.70.

Ensuite, la conductivité thermique lambda est égale à : [8]

$$\varphi_{cnv} = \frac{\lambda * e}{(T_{se} - T_{si})} \dots\dots\dots (8) ; \text{et : } \lambda = \frac{\varphi_{cnv} * e}{(T_{se} - T_{si})} \dots\dots\dots (9)$$

Après les calculs, les résultats présentés dans le tableau.III.5 sont intégrés dans la simulation Trnsys pour valider les résultats expérimentaux. Les données météorologiques utilisées dans cette simulation sont obtenues à partir du logiciel Métronome V7.13, de type .TM2 [9]. La simulation est effectuée dans certains jours, qui sont le (25 mai 2016, 16 octobre 2016 et 28 mai 2017) lorsque nous avons utilisé des briques d'entrefer, FPD et PPD, respectivement.

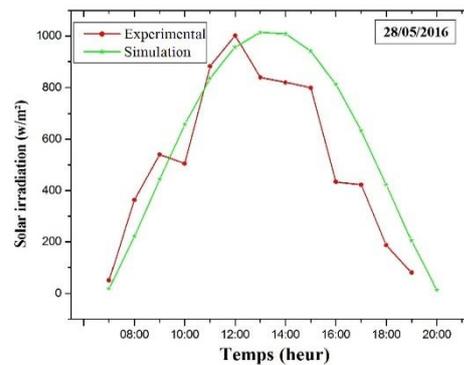
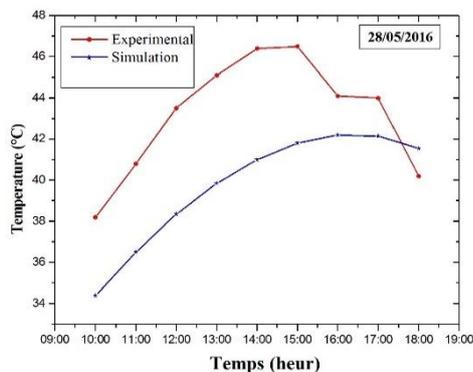
Tableau.III.5 Caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans chaque prototype.

	Unité utilisé	Prototype (a)	Prototype (b)	Prototype (c)	Prototype (d)
Toiture	-	Polystyrène	Lame d'air	T _{FPD}	T _{PPD}
	λ(Kj/h.m.K)	10.368	9.036	6.084	15.336
	e(m)	0.10	0.15	0.15	0.15
	R (h.m ² /Kj)	0.00964	0.0166	0.02465	0.0097

III.4.3. Validation entre les résultats théoriques et expérimentaux :

a- Température extérieure et irradiation solaire :

La figure.III.15 présente une comparaison entre les résultats obtenus à partir du travail empirique et ceux que nous avons calculé par simulation. Nous avons présenté la variation de la température ambiante et l'irradiation solaire simulée et mesurée pendant trois jours en période estivale. La température extérieure, l'irradiation solaire globale sont illustrées dans la figure.III.15, les résultats concernant trois jours en période d'été (28 mai 2016, le 16 octobre 2016 et le 25 mai 2017). Les résultats montrent que l'erreur moyenne qui concerne le rayonnement solaire est d'environ 33,96% et 7,55 % pour la température ambiante. Les résultats de la simulation trouvés sont en bon accord avec le travail expérimental, la différence maximale de l'irradiation solaire entre les deux résultats est de 380 w / m² à 16h00, de plus la différence de température maximale trouvée est de 5,25 ° C à 13h00 le 28 mai 2016. Pour les deux jours restants (le 16 octobre 2016 et le 25 mai 2017) il existe une corrélation significative entre les simulations et les valeurs expérimentaux du rayonnement solaire, alors il y a une augmentation de la température obtenue durant la période de simulation (après-midi), parce que les résultats de la simulation sont affectés à partir des données métrologique moyenne de dix ans.



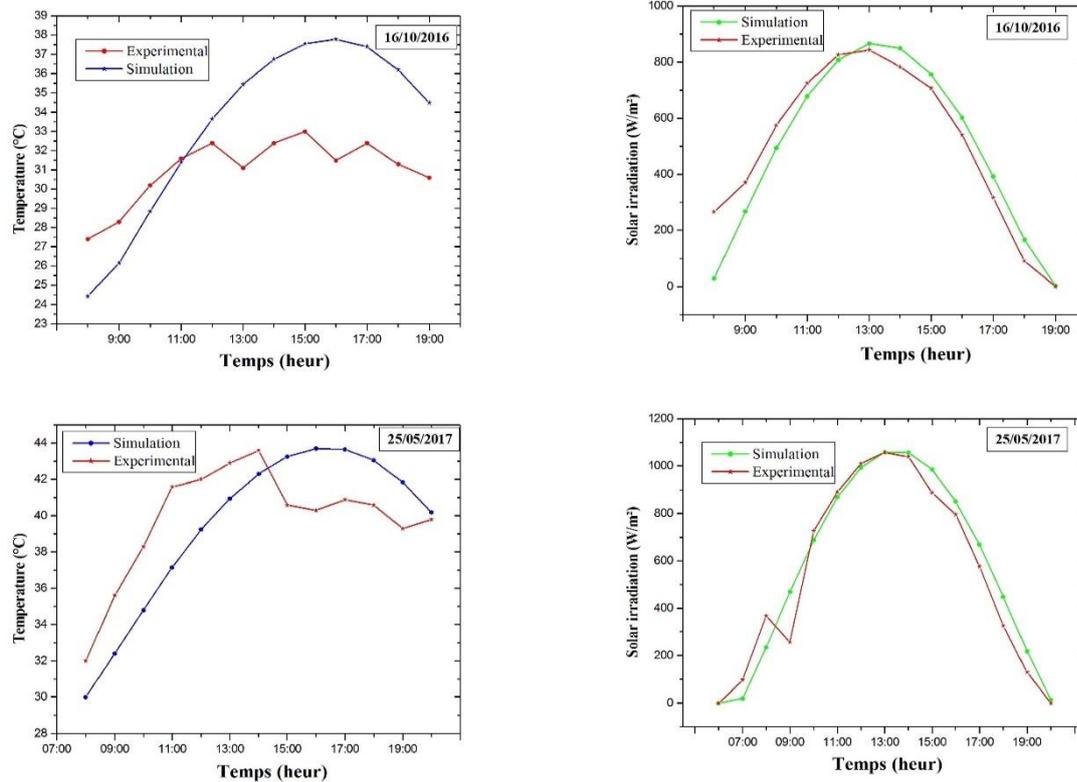


Figure. III 15. Variation de la température extérieure et l'irradiation solaire de la région Adrar.

b- Variations de température de surface interne et externe :

Généralement nous avons une grande compatibilité entre les simulations et les résultats expérimentaux comme montre la figure.III.16 qui présente la variation de la température de la surface externe et la surface interne trouvées par étude expérimentale et validée par une simulation par Trnsys. L'utilisation du polystyrène dans l'expérience justifie la réduction de la température de surface jusqu'à 17.4 ° C à 15h00 pour la date de (28 mai 2016). L'utilisation de la FPD (16 octobre 2016) s'est révélée très efficace par rapport à d'autres types d'isolation, le rapport entre la température de surface externe et interne atteint 30,1 ° C, tandis que dans la pièce sans isolation ; la température atteint 24,8 ° C à 11h45. De plus, l'utilisation de la PPD pour la date de (25 mai 2017), nous a donné une réduction de la température de surface de 19,3 ° C dans la chambre PPD et une réduction de 14,3 ° C à 14h45 pour la chambre sans isolant.

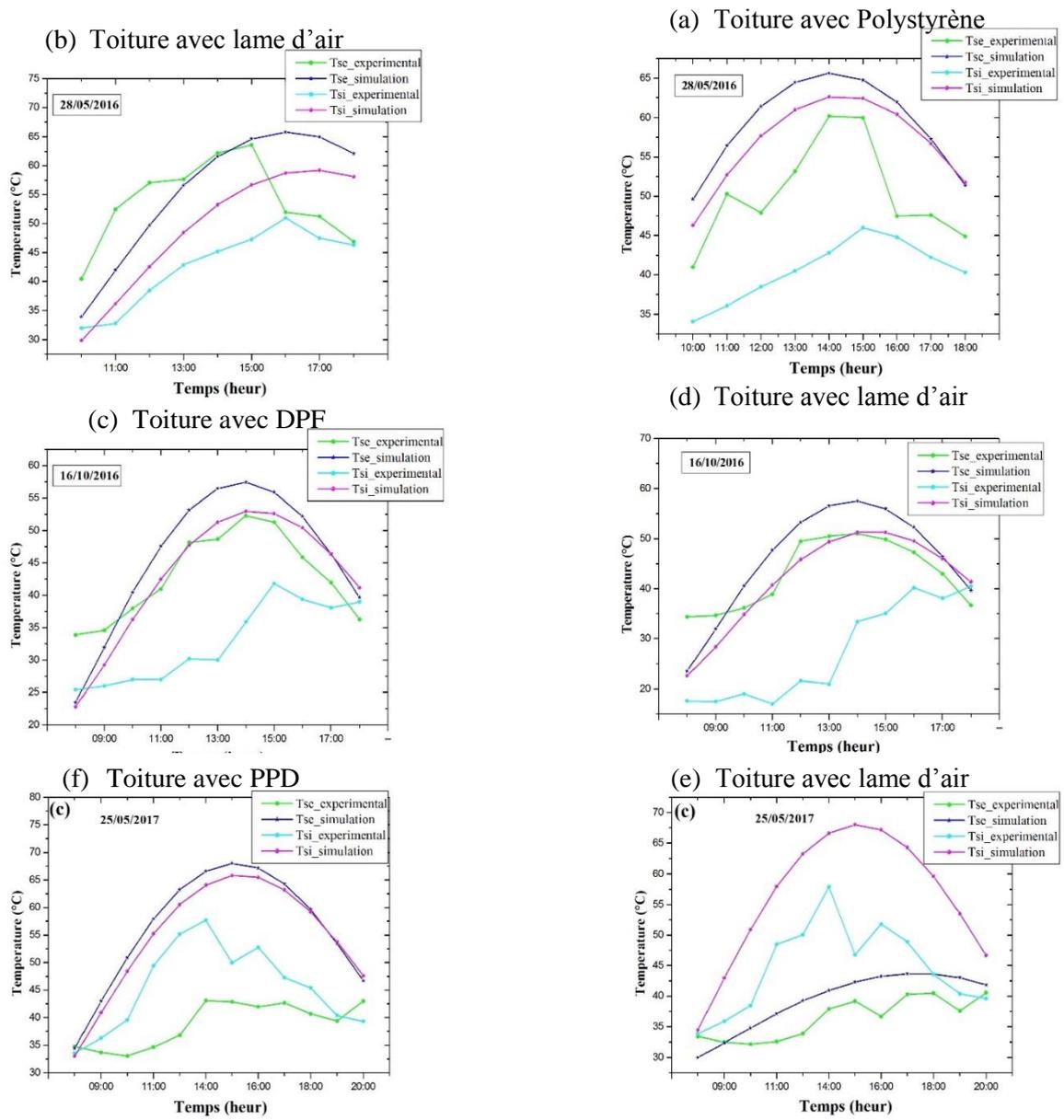


Figure.III.16. Variations de la température de surface externe et interne.

c- Variation de température intérieure :

La variation de la température ambiante dans les pièces dépend des changements de climat journalier et du type d'isolation thermique, les résultats obtenus à partir des expériences des trois jours sont présentés dans la figure.III.17. Nous avons remarqué que l'utilisation de la fibre de palmier donne de bon résultats contrairement au polyester et du pétiole de palmier dont les résultats sont plutôt faibles. Les résultats montrent que la plus grande différence de la température entre les pièces est de 8.2° C, 5° C et 4.5 ° C pour les pièces construites par fibre de palmier, polyester et pétiole de palmier comparés à une pièce construite en briques, respectivement. Le toit construit par les fibres garde la chaleur interne, c'est-à-dire la température ambiante interne reste élevée et reflète le stockage thermique. Le système d'isolation maintient l'énergie thermique et empêche la pénétration de la chaleur à l'extérieur, ceci explique l'augmentation de la température à la fin de la journée.

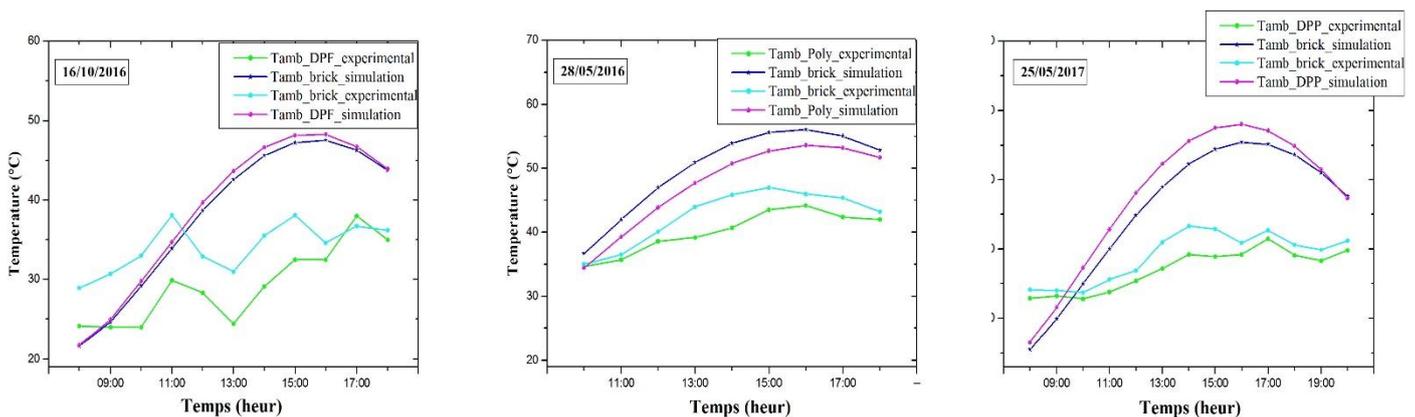


Figure.III.17. Variation de température intérieure dans chaque prototype.

III.5. Conclusion :

Ce chapitre vise à comparer les types de matériaux locaux situés dans le sud-ouest de l'Algérie 'Adrar'. Cette partie est divisée en trois sections principales. Une étude expérimentale pour extraire les propriétés de (07) sept échantillons avec deux types d'isolations thermiques (fibres de palmier dattier, épillet de palmier dattier), la simulation est effectuée pour évaluer la performance de ces matériaux afin de réduire la consommation d'électricité dans la région d'Adrar pendant la période d'été. Des prototypes sont réalisés pour tester l'effet des isolations sur les toits du bâtiment et les comparer aux résultats obtenus avec la simulation. Nous avons extrait la valeur de la conductivité thermique pour deux types différents constituant les palmiers. Les meilleurs résultats ont été respectivement de 0,380 w/m.K et 0,106 w/m.K avec un taux de 1,36% de fibre de palmier et un taux de 1,34% de l'épillet de

palmier. Ces résultats ont été introduit dans une simulation afin d'étudier l'effet de l'utilisation de ces matériaux sur le confort thermique des bâtiments. Les trois chambres (a), (b) et (c) construites avec du sable argileux, de la fibre de palmier et des épillets de palmiers, respectivement. Les résultats montrent que l'utilisation d'argile et du sable entraînent une consommation d'électricité de 1,5 kWh à 3,4 kWh, ainsi les fibres de palmier de 1 kWh, à 1,8 kWh et les épillets de palmiers de 0 kWh, à 1 kWh, ce qui explique l'efficacité de l'isolation thermique de l'épillet plutôt que d'autres matériaux utilisés dans cette simulation. En exploitant les résultats de la variation de température surfacique dans les trois pièces, nous avons prouvé que le toit de la pièce est la partie la plus exposée au soleil et là plus polarisée au transfert de chaleur, ce qui nous a conduit à utiliser un prototype pour étudier l'isolation thermique des matériaux dans la toiture. Nous avons obtenu de bon résultats dans une large mesure pour réduire la température à environ 4° C pour les fibres de palmier dattier et à 7 ° C pour le pétiole de palmier dattier. Le plus grand écart entre les résultats expérimentaux et de simulation a été évalué à 16,22% correspond à l'expérience du 16 octobre 2016 à 16h00.

Référence:

- [1]: P. Hilton, H112N Thermal Conductivity of Building Material | Heat Transfer Teaching Equipment. Available at: <http://www.p-a-hilton.co.uk/products/H112N-Thermal-Conductivity-of-Building-Material>, © 2011 P.A.Hilton Ltd. Accessed August 10, 2017.
- [2]: Chikhi, M. (2016). Young's modulus and thermophysical performances of bio-sourced materials based on date palm fibers. *Energy and Buildings*, 129, 589-597.
- [3]: Al-Saadi, S. N., Zhai, Z. J. (2015). A new validated TRNSYS module for simulating latent heat storage walls. *Energy and Buildings*, 109, 274-290.
- [4]: I.Suárez, M. M.Prieto, I. Salgado. Dynamic evaluation of the thermal inertia of a single-family house: Scope of the retrofiting requirements to comply with Spanish regulations. *Energy and Buildings*, 153,(2017) 209-218.
- [5]: Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- [6]: TECHNIQUE, Rapport. Document Technique Règlementaire, 'Règlement Thermique des Bâtiments d. Habitation-Règles de Calcul des Apports Calorifiques des Bâtiments'', DTR C3-4, 1998.
- [7]: S. Bouadila, S. Kooli, S. Skouri, M. Lazaar, A Farhat (2014). Improvement of the greenhouse climate using a solar air heater with latent storage energy. *Energy*, 64, 663-72.
- [8]: A.-b. Cherki, B Remy, A.-b. Khabbazi (2014). Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite. *Construction and Building Materials* 54, 202-209.
- [9]: Meteonorm, irradiation data for every place on Earth, <http://www.meteonorm.com>

Chapitre IV

Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

IV.1. Introduction :

Un échangeur de chaleur air/sol est constitué d'un ou plusieurs tuyaux enterrés pour rafraîchir les bâtiments en été et les chauffer en hiver. L'air ambiant est utilisé pour la ventilation et aussi pour réduire ou remplacer la demande d'énergie afin de maintenir le confort thermique dans les bâtiments ou les maisons résidentielles [1-2]. L'échangeur de ce type se caractérise par un grand potentiel d'économie d'énergie et une maintenance réduite. Le phénomène physique est simple et dépend de la différence de température entre le sol et l'air ambiant. En été, la température du sol est inférieure à celle de l'air ambiant. La température du sol reste également presque constante tout au long de l'année à une profondeur donnée sous le niveau du sol. Cependant, le profil de la température du sol est en fonction de la profondeur et dépend de d'autres facteurs tels que les propriétés physiques du sol et les conditions climatiques [3]. Ce chapitre est divisé en deux sections, la première section présente la modélisation et la simulation d'un échangeur de chaleur air/sol, utilisé comme dispositif de rafraîchissement passif des bâtiments dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie. Dans la deuxième section, nous présentons la simulation d'un nouveau modèle de refroidissement passif dans un échangeur de chaleur air/sol assisté par un échangeur de chaleur air/végétal. Les tuyaux enfouis dans le sol avec l'ombre d'un mur vert peuvent offrir des avantages considérables en termes d'économie d'énergie hors contexte. Le puits canadien est un tuyau simple placé en deux parties, la première partie à l'intérieur de sol (entre 20 et 40 m de longueur), puis la deuxième partie est placée à l'intérieur d'un mur végétalisé (5m) et reliée avec le mur sud, cela permet de réguler significativement le confort intérieur et de réaliser des économies d'énergie. Dans ce cas, nous essayons d'étudier l'effet des paramètres sur la performance thermique de l'échangeur de chaleur air/sol tels que la longueur du tuyau, le diamètre du tuyau, la profondeur du tuyau enterré, le débit d'air, sans et avec l'ajout de mur végétalisé très crucial pour assurer que le confort thermique peut être atteint.

IV.2. Modélisation mathématique:

L'échangeur air /sol est un système de ventilation du bâtiment qui exploite l'inertie thermique du sol, ce système se compose principalement d'un tuyau de PVC (chlorure de polyvinyle) enterré dans le sol. Le diamètre du tuyau est généralement de 40-80 mm. Le principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur air-sol est de pomper l'air à l'endroit ciblé (la maison) dans le tuyau souterrain enterré à l'aide d'un ventilateur. L'air est refroidi en transférant la chaleur au sol qui est à une température plus basse (Figure.IV.1).

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

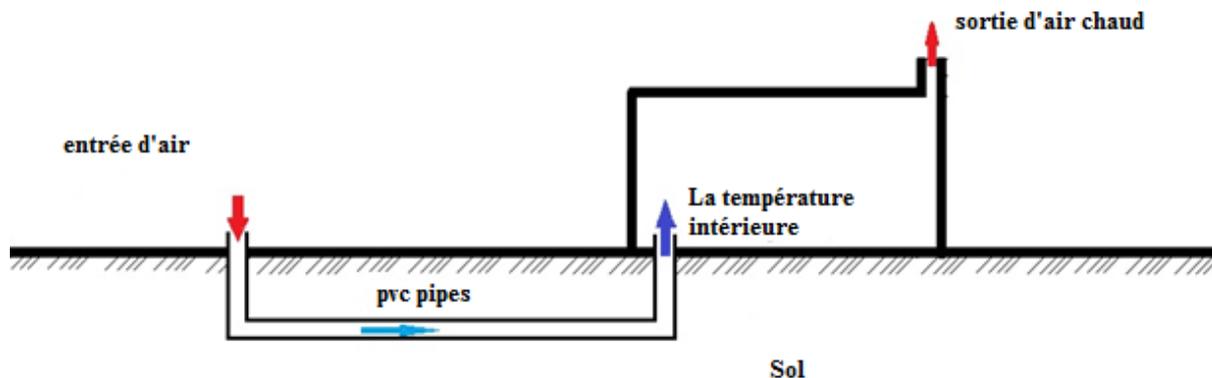


Figure.IV.1 système de rafraîchissement passif utilisant un échangeur de chaleur à air.

L'air refroidi, est ensuite injecté dans le bâtiment. Les propriétés thermiques et physiques de l'air, du sol et des conduites utilisées dans cette simulation sont représentées dans le tableau.IV.1.

Tableau.IV.1. Propriétés thermiques et physiques de l'air, des tuyaux et du sol dans ce travail [4] :

Matériel	Densité (kg/m ³)	Capacité thermique (J/kg.k)	Conductivité thermique (W/m.K)
L'air	1.1774	1005.7	0.02624
Sol	2050	1840	0.52
PVC	1380	900	0.16

Tandis que les paramètres de l'échangeur de chaleur air/ sol sont résumés dans le tableau.IV.2.

Tableau.IV.2. Paramètres de l'échangeur de chaleur air/sol utilisés dans la simulation :

Paramètres	Données
Longueur de tube (L)	45 m
diamètre intérieur (Di)	80 mm
Epaisseur de tube (e)	4 mm
Vitesse de l'air (V)	1 m/s
Profondeur de tube (p)	5 m

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

La configuration décrite ci-dessus peut encore être simplifiée en considérant un flux d'air uniforme à l'intérieur du tuyau. Le sol environnant est considéré comme ayant des propriétés thermiques uniformes et constantes, les dimensions et les propriétés physiques du tuyau étant considérées comme constantes. Les températures maximales et minimales mensuelles utilisées dans la simulation du site étudié sont indiquées au tableau.IV.3

Tableau.IV.3. Températures maximales et minimales mensuelles du site à Adrar [5].

Mois	Température maximale (° C)	Température minimale (° C)
Janvier	20.5	3.8
Février	23.2	6.6
Mars	27.7	10.5
Avril	33.2	15.5
Mai	37.2	25.5
Juin	43.2	27.7
Juillet	46.0	26.6
Aout	44.3	23.8
Septembre	40.5	17.1
Octobre	33.2	10.5
Novembre	25.5	5.5
Décembre	15.5	5.5

Notre modèle est basé sur les équations d'équilibre lorsque la température du sol est constante. L'équation qui décrit la variation de la température de l'air le long de l'échangeur de chaleur air/sol prend en compte les paramètres suivants:

- Température extérieure (air ambiant).
- Température du sol aux propriétés thermo-physiques du sol.
- Géométrie et type de tuyau et vitesse de l'air.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

IV.2.1 Modélisation de la température du sol :

Le modèle mathématique de la température du sol est basé sur la théorie de la conduction thermique appliquée à un solide homogène semi-infini. La conduction thermique dans le sol est donnée par [6]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \times \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$T(0, t) = T_{\text{mean}} + A_s \times \cos(\omega(t - t_0)) \quad (2)$$

$$T(\infty, t) = T_{\text{mean}} \quad (3)$$

Où : la diffusivité thermique du sol est donnée par: $\alpha = \lambda / (\rho \times C_p)$.

Les tuyaux sont placés dans une position horizontale avec une inclinaison minimale pour éliminer les vapeurs condensées d'eau. Pour simuler l'échangeur de chaleur de l'air terrestre, il est nécessaire de connaître la profondeur d'installation optimale des conduites souterraines dans la région étudiée, c'est-à-dire Adrar. La température du sol a été calculée à l'aide de l'équation suivante [6]:

$$T(z, t) = T_{\text{mean}} + A_s \times (\text{Exp}^{-z\sqrt{\pi/365\alpha}} \times \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \times (t - t_0) - (z/2) \times \sqrt{365/\pi\alpha} \right\}) \quad (4)$$

La Figure.IV.2 présente la variation de température du sol de la région d'Adrar à différentes profondeurs (1 m à 5 m). Avec une augmentation de la profondeur souterraine, les fluctuations de la température s'affaiblissent et le sol a une valeur de température constante à 5m de profondeur, nous permettent d'utiliser le sol comme source de chaleur (froid / chaud).

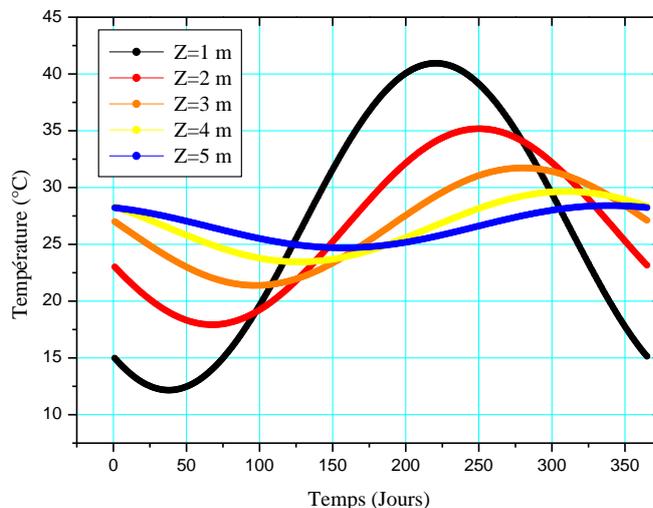


Figure.IV.2. La variation de température du sol dans la région de l'Adrar à différentes profondeurs.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

IV.2.2 Modélisation de l'échangeur de chaleur air/sol :

L'échangeur de chaleur simulé se compose d'un tuyau de 45 m de longueur. On suppose que la température est plus influencée par l'équation (4). La Figure.IV.3 montre un diagramme schématique de l'échangeur air/sol utilisé dans la simulation.

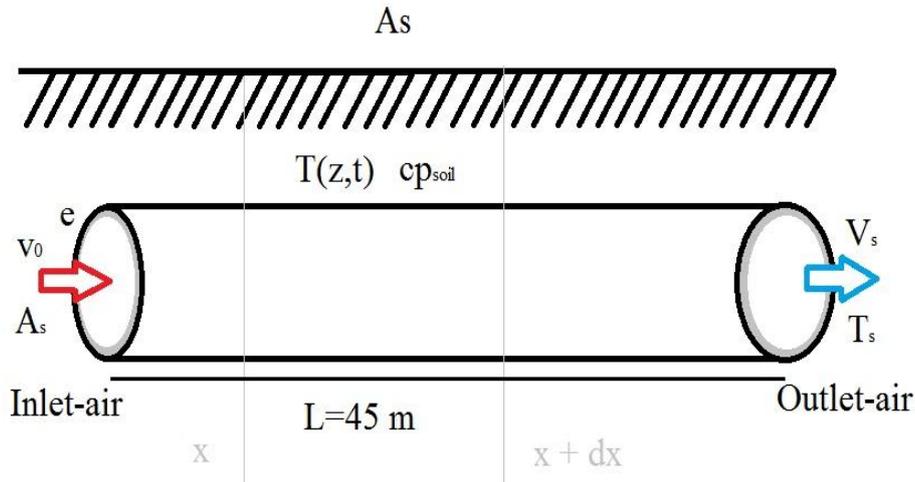


Figure.IV.3. Schéma de principe de l'échangeur de chaleur sol simulé.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection dans un tube est défini par [7]:

$$h_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu} \times \lambda}{D} \quad (5)$$

Le nombre de Nusselt a été calculé par la corrélation suivante:

$$\text{Nu} = 0,0214 \times (\text{Re}^{0,8} - 100) \times \text{Pr}^{0,4} \quad (6)$$

Le nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl à l'intérieur du tuyau sont donnés par:

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{air}} \times D_i}{\nu} \quad (7)$$

$$\text{Pr} = \frac{v \times \rho \times c_p}{\lambda} \quad (8)$$

La chaleur peut être exprimée comme suit [6]:

$$\phi = \dot{m} \times C_{p_f} \times dT(x) = \frac{dx}{R_{\text{conv}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}}} \times (T(z, t) - T(x)) \quad (9)$$

La résistance thermique du tuyau peut être exprimée comme:

$$R_{\text{pipe}} = \frac{1}{\lambda_{\text{pipe}} \times 2 \times \pi} \times \ln(r_e | r_i) \quad (10)$$

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

Le transfert de chaleur par convection entre l'entrée du tuyau et le tuyau :

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{r_i \times h_{\text{conv}} \times 2 \times \pi} \quad (11)$$

La résistance thermique du sol peut être exprimée comme:

$$R_{\text{soil}} = \frac{1}{\lambda \times 2 \times \pi} \times \ln(R_{(z,t)} | r_e) \quad (12)$$

La résistance thermique totale de l'échangeur est donnée par:

$$R_{\text{Tot}} = \frac{1}{(R_{\text{conv}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}})} \quad (13)$$

Combinaison des équations (9) à (13) :

$$\frac{dT(x)}{T(z,t) + T(x)} = \frac{R_{\text{Tot}}}{\dot{m} \times C_{p_f}} \times dx \quad (14)$$

L'intégrale de l'équation (14) est:

$$-\ln(T(z, t) + T(x)) = \frac{R_{\text{Tot}}}{\dot{m} \times C_{p_f}} \times x + Cte \quad (15)$$

L'équation limite à la surface du sol est [8]:

$$T(0) = T_{\text{amb}} \quad (16)$$

En remplaçant la Cte dans l'équation (15) par son expression déduite de la condition aux limites de l'équation (16), on obtient:

$$\ln(T(x) - T(z, t) / (T_{\text{amb}} - T(z, t))) = \frac{-R_{\text{Tot}}}{\dot{m} \times C_{p_f}} \times x \quad (17)$$

A $x = L$, la température de sortie de l'air est la suivante:

$$T_s = T_{\text{amb}} + (T(z, t) - T_{\text{amb}}) \times (1 - e^{\frac{-R_{\text{Tot}}}{\dot{m} \times C_{p_f}} \times x}) \quad (18)$$

Le débit massique d'air est donné par l'expression suivante:

$$\dot{m} = \rho_a V_a \pi D_i^2 / 4 \quad (19)$$

La variation horaire de la température ambiante peut être représentée en utilisant une série de Fourier [9]:

$$T_{\text{amb}}(t) = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} + \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{12}(t - 14)\right) \quad (20)$$

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

L'efficacité thermique moyenne mensuelle de l'échangeur est calculée selon l'expression suivante [10]:

$$\eta_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (T_{\text{amb}}(i) - T_{\text{out}}(i))}{\sum_{i=1}^{24} (T_{\text{amb}}(i) - T_{\text{soil}})} \quad (21)$$

Le potentiel de refroidissement moyen journalier est donné par l'équation suivante [11]:

$$Q_{\text{cool}} = \sum_{i=1}^{24} \dot{m} C_p (T_{\text{amb}}(i) - T_{\text{out}}(i)) \quad (22)$$

IV.2.3. Validation du modèle :

Avant d'effectuer l'étude paramétrique, le modèle a été également validé par Bansal et al [12] à différentes températures ambiantes. Les paramètres d'entrée utilisés pour l'étape de validation sont présentés au tableau.IV.4. L'écart relatif absolu entre nos résultats et les données expérimentales de Bansal et al. [12] est inférieur à 9,5%. Lorsque le débit est à 2 m / s, l'écart relatif absolu entre nos résultats et les données expérimentales [12] est toujours inférieur à 1%. Par conséquent, on peut conclure que notre modèle peut facilement prédire les performances thermiques du système échangeur air/sol.

Tableau.IV.4. Les paramètres utilisés pour la validation par rapport aux données expérimentales de Bansal et al. [12].

Paramètres	Données
Longueur de tube (L)	23.42 (m)
diamètre intérieur (Di)	0.15 (m)
Densité du sol	2050 (kg/m ³)
Capacité thermique spécifique au sol	1840 (J/Kg.K)
Conductivité thermique du sol	0.52 (W/m. °C)
Température du sol	26.7 (°C)

Tableau.IV.5. Résultats de la validation d'un modèle par rapport aux données expérimentales de Bansal et al. [12].

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

Paramètres	L= 23.42 m; Di = 0.15 m, T _{sol} = 26.7 °C (pipe in PVC)			
vitesse In (m/s)	Température In	Température Out		
		Expérimentale data de Bansal et al. [12]	Résultat de notre modelé	
Vin	Tin (°C)	Tout (°C)	Tout (°C)	Errer relative %
2	43.4	33.1	33.4	0.8
3	42.5	33.1	35.3	6.5
4	42.3	33.5	36.6	5.0
5	42.2	34.2	37.4	9.4

IV.2.4 Modélisation de l'échangeur de chaleur air/végétal :

Dans le cas d'utilisation d'un mur végétalisé du côté sud de notre maison et à partir l'équation (18) Ts est la température à l'entrée du mur végétal. Dans la deuxième partie de notre système, air/végétal est représenté par un tuyau ayant une hauteur H égale à (5m) de la longueur du système de tuyauterie.

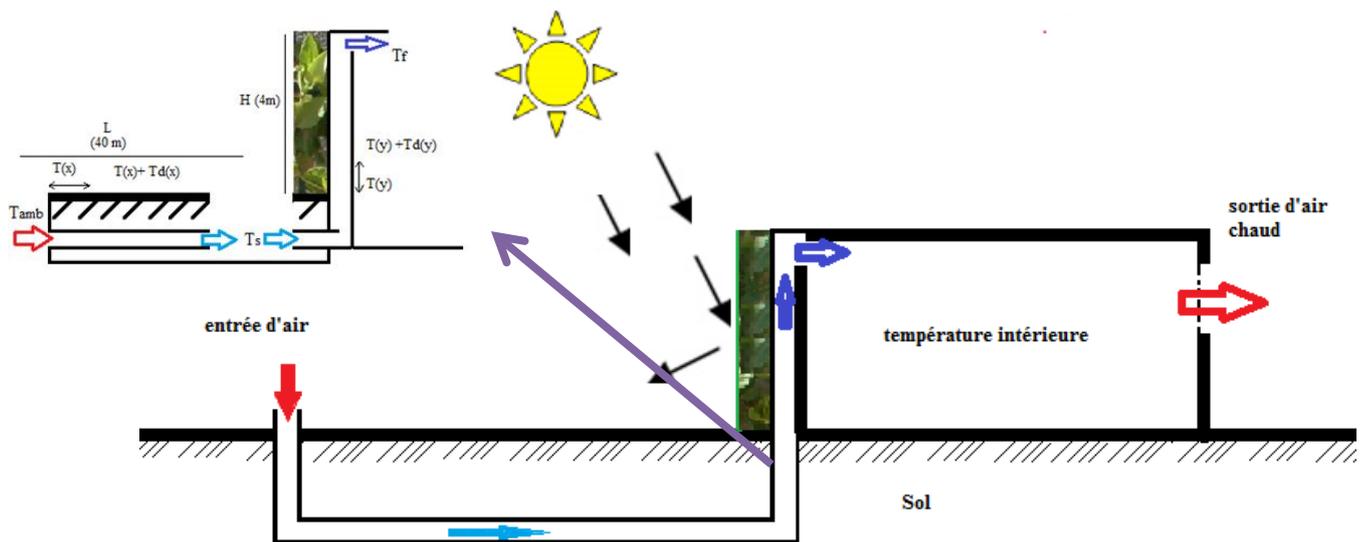


Figure.IV.4. Schéma d'un échangeur air/sol couplé avec échangeur air/végétal.

Sur la base des mesures dans le cas d'un mur végétalisé dans la ville d'Adrar, nous avons trouvé que la température imposée $T_{veg} = 23,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ sur le mur sud est la température de mur aux moments de la simulation. [14]

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

Le bilan thermique pour la deuxième partie du tuyau est :

$$\dot{m} \times C_{p_{air}} \times (T(y) + dT(y) - T(y)) = \frac{dy}{R_{conv} + R_{pipe}} \times (T(veg) - T(y)) \quad (23)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{r_i \times h_{conv} \times 2 \times \pi} \quad (24)$$

$$R_{pipe} = \frac{1}{\lambda_{pipe} \times 2 \times \pi} \times \ln(r_e / r_i) \quad (25)$$

Après (24) et (25):

$$R_B = (R_{conv} + R_{pipe}) \quad (26)$$

A partir le bilan thermique (23):

$$\frac{dT(y)}{T(veg) + T(y)} = \frac{dy}{\dot{m} \times C_{p_{air}} \times R_B} \quad (27)$$

Après l'intégrale de l'équation (27), nous avons trouvé:

$$-\ln(T(veg) + T(y)) = \frac{y}{\dot{m} \times C_{p_{air}} \times R_B} + C \quad (28)$$

Pour $y=0$:

$$T(0) = T_s \rightarrow C = \ln(T(veg) + T_s) \quad (29)$$

Nous remplaçons C en l'équation (28) par la valeur de l'équation (29), nous avons trouvé:

$$\ln(T(y) - T(veg) / (T_s - T(veg))) = \frac{-y}{\dot{m} \times C_{p_{air}} \times R_B} \quad (30)$$

Pour $y=H$, après l'intégration:

L'équation de la température de l'échangeur de chaleur dans la deuxième partie sera :

$$T_{sf} = T_s + (T(veg) - T_s) \times (1 - e^{\frac{-H}{\dot{m} \times C_{p_{air}} \times R_B}}) \quad (31)$$

IV.3. Résultats de simulation :

IV.3.1 Effet de la profondeur sur les performances de l'échangeur :

La Figure.IV.5 montre la variation de la température à l'intérieur de l'échangeur en fonction de la longueur du tube à différentes profondeurs du sol. Initialement, la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur diminue considérablement jusqu'à que la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur devienne égale à la température du sol. A une profondeur de 5 m, on note que la température intérieure diminue depuis la température ambiante maximale de 46 °C qui correspond au mois de juillet dans la région d'Adrar jusqu'à atteindre la température du sol qui est d'environ 25 °C. De plus, quand la profondeur diminue, la température de l'air sortant de l'échangeur s'élève. Par exemple, dans le cas de 1m de profondeur, la différence de température de l'air entrant et de la sortie de l'échangeur est seulement autour de 7°C ce qui n'est pas suffisant pour rafraîchir les bâtiments. Elle est également connue comme la température de l'air à l'intérieur de la terre à une valeur de longueur constante $L = 35$ m.

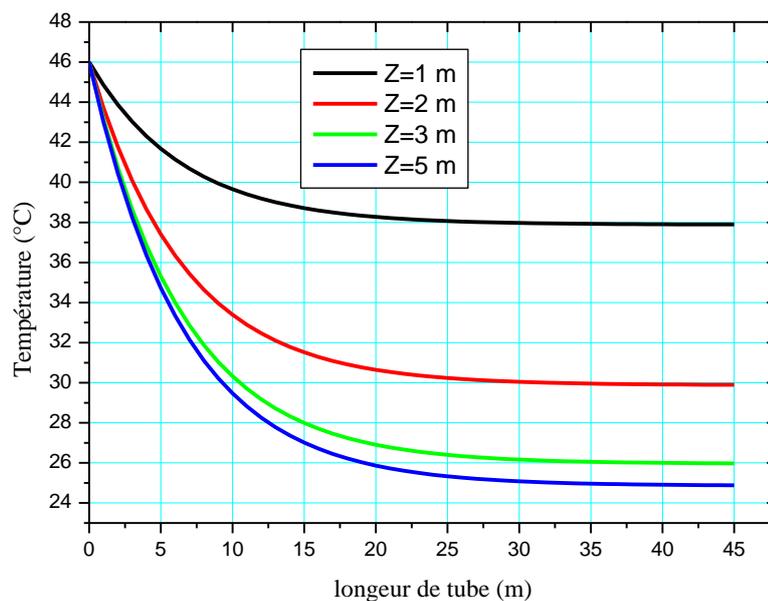


Figure.IV.5. Température de l'air le long du tube à différentes profondeurs.

IV.3.2 Variation annuelle de la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur :

La Figure.IV.6 montre les profils de températures mensuelles d'une année de l'air ambiant, l'air sortant de l'échangeur de chaleur de et la différence de température entre les deux. On peut en déduire que les performances de l'échangeur utilisé comme dispositif de climatisation seront principalement influencées à la fois par la température du sol et la température de l'air ambiant car ces

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

deux paramètres varient d'un mois à l'autre. On peut également voir que la différence de température maximale de l'air entre l'entrée et la sortie de l'échangeur est d'environ $20,7^{\circ}\text{C}$ et $18,4^{\circ}\text{C}$ pour les mois de juillet et août, respectivement, alors que la différence de température minimale entre l'air entrant est d'environ $1,7^{\circ}\text{C}$ et de $2,9^{\circ}\text{C}$ pour les mois de mars et de novembre, respectivement. De ces résultats, on peut conclure que ce système est plus efficace en été.

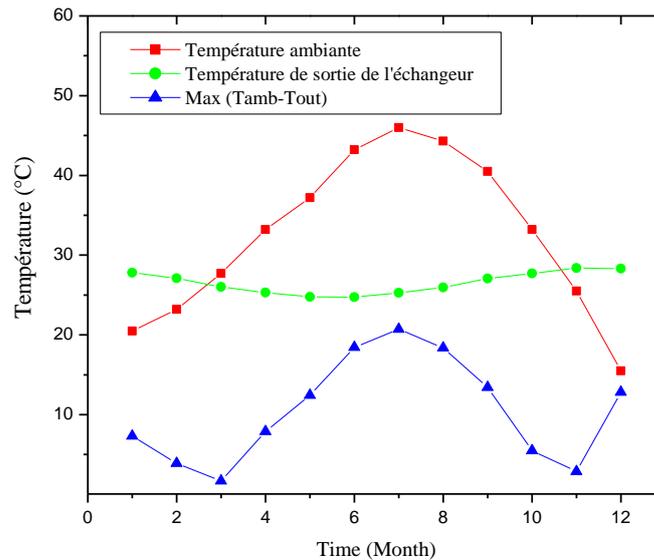


Figure.IV.6. Profils de température mensuels sur une année de l'air ambiant, de l'air à la sortie de l'échangeur et de la différence de température entre les deux.

IV.3.3. Influence de la longueur du tube sur la différence de température de l'échangeur :

La Figure.IV.7 montre la différence de température de l'air à l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur air /sol pour le mois de juillet lorsque la température ambiante maximale est de 46°C , en fonction de la longueur du tube de l'échangeur de chaleur. On peut observer sur la Figure.IV.6 que la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie de l'échangeur augmente significativement sur la longueur, mais au-delà d'une longueur d'environ 35 m, l'augmentation de la différence de température n'est pas considérable et on observe une température de l'air presque constante de 19°C .

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

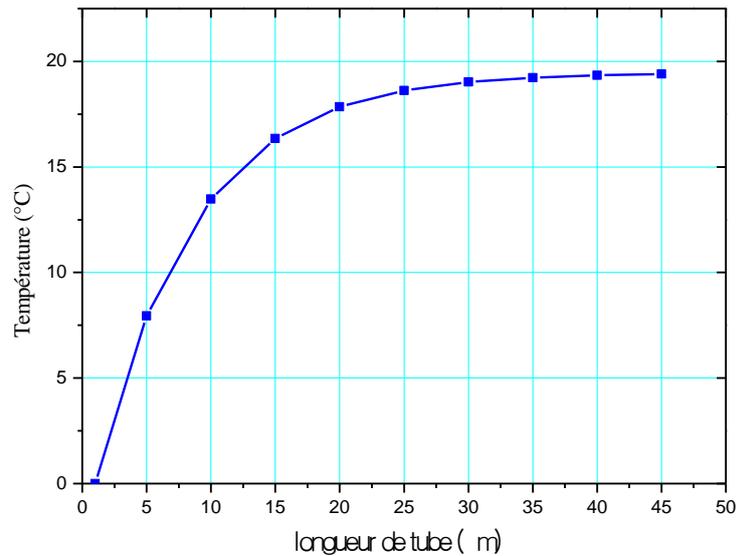


Figure.IV.7. Influence de la température du tuyau sur la différence de température entre l'entrée et la sortie.

IV.3.4 Variation de l'efficacité moyenne et le refroidissement potentiel journalier en fonction de la longueur de tuyau de l'échangeur :

La Figure.IV.8 montre la variation de l'efficacité moyenne et la capacité de refroidissement potentiel journalier de l'échangeur de chaleur d'air/sol en fonction de la longueur de tuyau enfoui. On peut observer sur cette figure qu'au début, les deux paramètres augmentent significativement en fonction de la longueur, mais après 35 m, cette augmentation est presque insignifiante. Le potentiel de capacité de refroidissement quotidien atteint une valeur maximale de refroidissement d'environ 1,7 kWh.

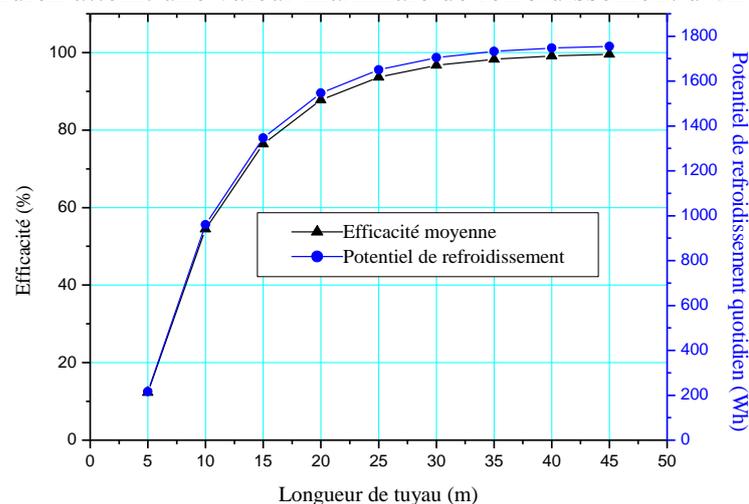


Figure.IV.8. Variation de l'efficacité et du potentiel de refroidissement journalier de l'échangeur en fonction de la longueur.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

IV.3.5 La variation mensuelle de la température ambiante et du potentiel de refroidissement :

La Figure.IV.9 montre la température mensuelle de l'air ambiant et le potentiel de refroidissement de l'échangeur sur une année. On peut voir que le potentiel de capacité de refroidissement journalier présente un pic de 1,73 kWh correspondant au mois de juillet lorsque la température ambiante est au maximum. Une valeur minimale de 0,46 kWh pour le potentiel de capacité de refroidissement de l'échangeur est obtenue en octobre. Les valeurs négatives du potentiel de capacité de refroidissement indiqué sur le graphique représentent le potentiel de chauffage journalier lorsque la température du sol est supérieure à la température de l'air ambiant. Les valeurs maximales sont de 1,07 et 0,61 kWh correspondant aux mois de décembre et janvier lorsque la température ambiante est au minimum. De plus, les valeurs minimales de potentiel de chauffage sont de 0,24 et 0,33 kWh correspondant aux mois de novembre et février.

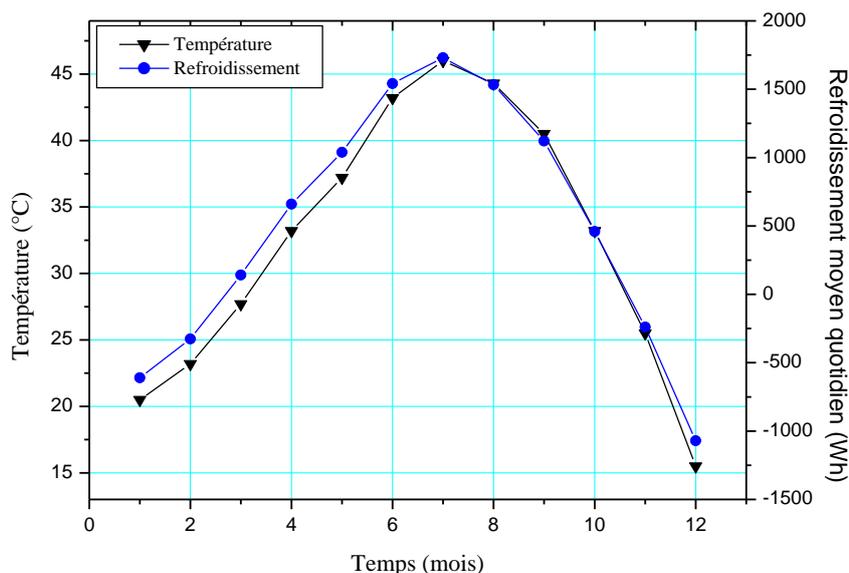


Figure.IV.9. Variation mensuelle pendant un an de la température ambiante et du potentiel de capacité de refroidissement.

IV.3.6. Influence de la végétation sur la performance d'un échangeur air/sol :

Dans cette partie nous présenterons le résultat obtenu, après l'optimisation pour choisir la meilleure configuration concernant l'échangeur de chaleur air/sol pour l'accoupler avec la paroi végétale. Le tableau.IV.6 illustré les paramètres proposés de l'échangeur dans cette simulation puis nous choisissons le meilleur paramètre.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

Tableau.IV.6 Paramètres de l'échangeur de chaleur air/sol proposé dans la simulation.

Paramètre	Valeur
Longueur de tuyau (L)	20-40 m
Longueur de mur-vert (L)	5 m
Diamètre intérieur (Di)	80-200 mm
Vitesse de l'air (V)	1-4 m/s
Profondeur de tuyau	1-5 m

a. Effet de la végétation sur la température de la sortie d'air en fonction du diamètre de l'échangeur :

L'effet du diamètre sur la performance de l'échangeur air/sol est présenté dans la Figure.IV.10, la diminution de diamètre du tuyau conduit à diminuer la température de sortie ; nous pouvons expliquer cela, parce que la diminution du diamètre du tuyau conduit à l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur par convection à l'intérieur de la surface du tuyau. Comme remarque nous n'avons pas une grande différence entre la température de sortie concernant les diamètres 80, 120m ($\Delta T = 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$).

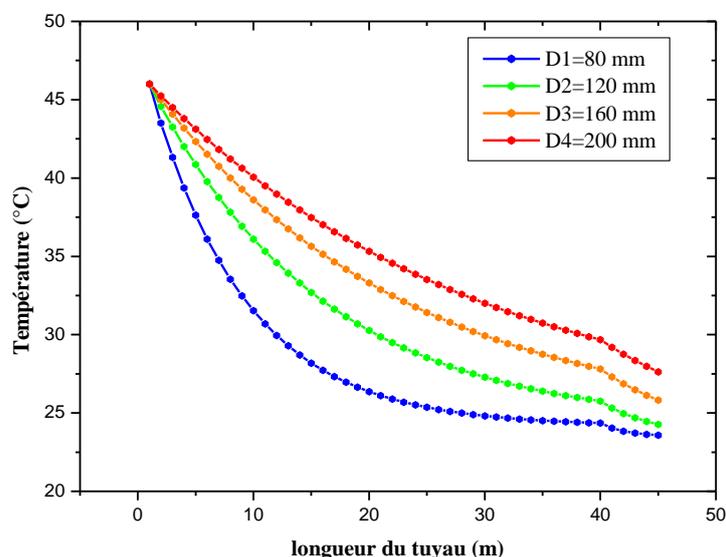


Figure.IV.10. La variation de la température de la sortie en fonction du diamètre.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

b. L'effet de la végétation sur la température de la sortie d'air en fonction de la vitesse sur l'échangeur :

Dans le résultat précédent, nous choisissons le diamètre optimal utilisé, $D = 120$ mm. Comme montré sur la Figure.IV.11, la température de sortie diminue avec la diminution de la vitesse de l'air dans le tuyau. Aux conditions de température d'entrée de 46°C , diamètre du tuyau de 12 cm, longueur de tuyau de 40 m, on trouve une différence de température de 21.73°C pour une vitesse de l'air de 1 m/s alors qu'elle est réduite à 13.49°C pour une vitesse de 4 m/s . Ceci peut s'expliquer par le fait que la faible vitesse dans le tuyau augmente le temps d'échange qui augmente le taux de transfert de chaleur entre l'air circulant et le tuyau.

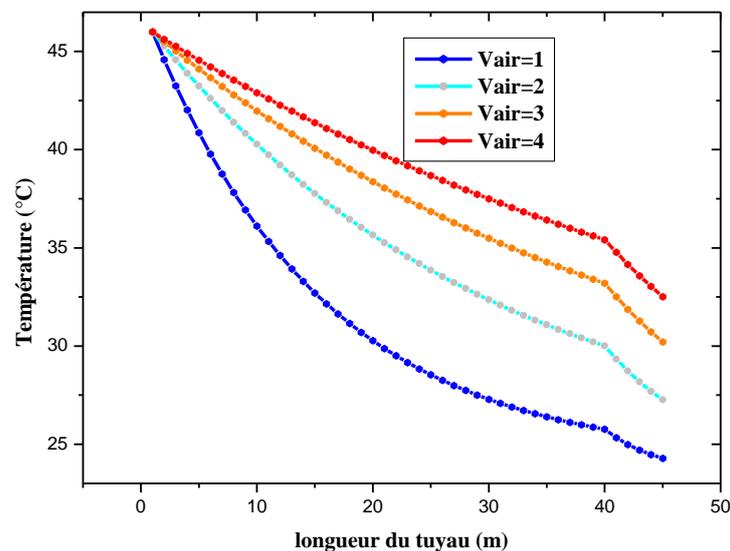


Figure.IV.11. La variation de la température de la sortie d'air en fonction de la vitesse.

c. L'effet la végétation sur la température de la sortie d'air en fonction de la profondeur de sol :

La Figure.IV.12 montre que l'utilisation de la végétation a un bon effet sur la température de sortie du système dans la simulation, comme nous le voyons sur la Figure.IV.12 l'utilisation de la végétation nous donne la possibilité de réduire la profondeur de l'échangeur. En raison de l'addition de la végétation sur le système ; on remarque une augmentation de l'échange de chaleur entre l'air et les tuyaux dans le cas des expériences à 3 m et 4 m, mais pour celle de 5 m l'échange diminuera. Ensuite, ont conclu que la profondeur optimale pour des performances élevées a un faible coût économique lorsque la profondeur variée entre 1m à 2 m.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

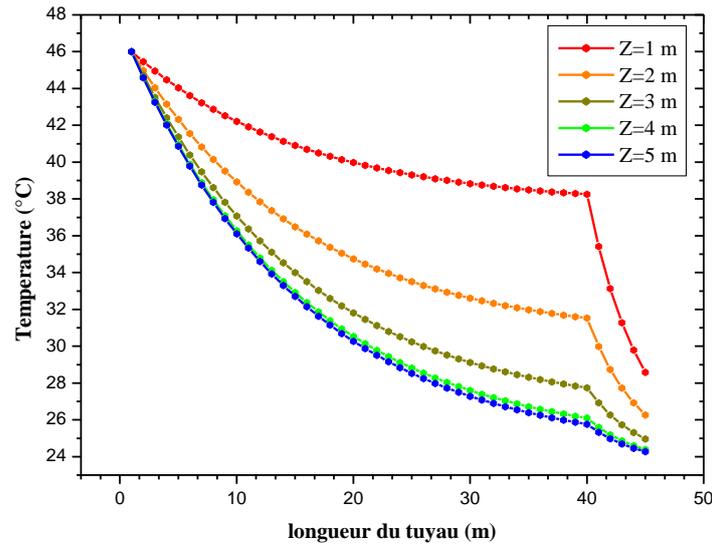


Figure.IV.12. La variation de la température de la sortie d'air en fonction de la profondeur.

d. L'effet de la végétation sur la température de la sortie d'air en fonction de la longueur de l'échangeur :

La Figure.IV.12 présente l'impact de l'utilisation du mur végétalisé proposée sur la température de la sortie du système, comme nous le remarquons sur la Figure.IV.8, l'utilisation de la paroi verte nous donne la possibilité de réduire de la longueur excédentaire de l'échangeur. En raison de l'addition de la paroi verte sur le système ; on constate une augmentation de l'échange de chaleur entre l'air et les tuyaux. Ceci implique une longueur optimale pour une haute performance et un faible coût économique qui sera entre 30m à 35 m.

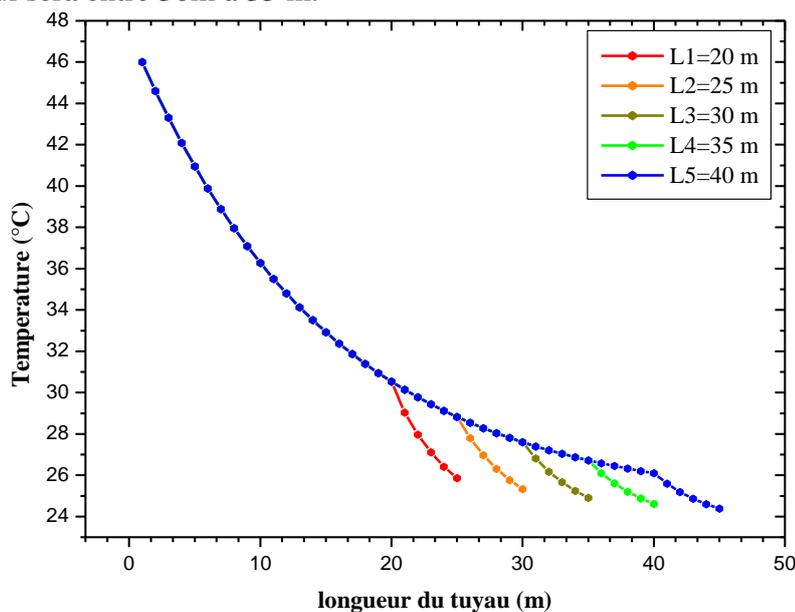


Figure.IV.13. La variation de la température de la sortie d'air en fonction de la longueur.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

En fin de compte nous trouvons le paramètre optimal pour coupler l'échangeur de chaleur air/sol avec mur végétalisé (air/végétal) ; le résultat est présenté dans le tableau.IV.7

Tableau.IV.7 Meilleure configuration de l'échangeur utilisée avec le mur végétalisé.

Paramètres	Les valeurs optimales
Longueur de tuyau (L)	35 m
Diamètre intérieur (Di)	120 mm
Vitesse de l'air (V)	1 m/s
Profondeur de tuyau	4 m

IV.4. Conclusion :

La profondeur optimale est de 5 m pour les échangeurs de chaleur air-sol utilisés dans les applications de climatisation dans la région d'Adrar située dans le Sahara algérien, Ceci est identifié sur la base d'un critère de MATLAB spécifique à une température annuelle constante du sol. L'échangeur a été simulé en utilisant les conditions climatiques de l'Adrar. Le modèle développé a été d'abord validé à partir des données expérimentales issues de la littérature. Une analyse paramétrique a été ensuite effectuée afin d'évaluer et étudier l'effet de la longueur du tuyau enterré et du débit d'air sur la température de l'air à la sortie du tube. Les principales conclusions sont résumées ici :

- ✚ Initialement, la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur diminue considérablement jusqu'à ce que la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur devient égale à la température du sol sur une longueur d'environ 35 m le long du tuyau.
- ✚ À une profondeur de 5 m, la température de l'air diminue à partir de la température ambiante maximale de 46 °C en juillet jusqu'à ce qu'elle atteigne la température du sol à environ 25 °C.
- ✚ Une différence de température maximale d'environ 20,7 °C entre l'air ambiant et l'air à la sortie de l'échangeur est obtenue en juillet.
- ✚ L'échangeur utilisé dans cette étude présente un potentiel de puissance de refroidissement journalier maximal de 1,73 kWh en juillet. Les économies d'énergie pour le refroidissement sont d'environ 246,82 kWh sur une période d'un an. Les résultats obtenus sont très prometteurs pour les bâtiments résidentiels à petite échelle.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

- ✚ La longueur, la profondeur, le diamètre et la vitesse de l'air des tuyaux enterrés à 35 m, 4 m, 120 mm et 1 m / s, respectivement sont la configuration optimale pour réduire la température de l'air de sortie en utilisant la végétation.
- ✚ L'effet de la végétation est clairement indiqué dans l'abréviation de longueur, profondeur et diamètre.
- ✚ L'utilisation du mur végétalisé pour couvrir les tuyaux peut réduire efficacement le besoin de charges de refroidissement.

Chapitre IV Etude théorique par simulation numérique de la climatisation passive utilisant un puits canadien.

Références

- [1]: A. Tzaferis, D. Liparakis, M. Santamouris, A. Argiriou. Analysis of the Accuracy and Sensitivity of Eight Models to Predict the Performance of Earth-To-Air Heat Exchangers. *Energy and buildings*, 1992, 18, 35–43.
- [2]: T. Magraner, A. Montero, S. Quilis, J.F. Urchueguía Comparison between design and actual energy performance of a HVAC-ground coupled heat pump system in cooling and heating operation. *Energy and Buildings*, 2010, 42, 1394–1401.
- [3]: A. Argiriou. Ground cooling. In: Santamouris M, Asimakopoulos D, editors. *Passive cooling of buildings*. London: James & James, 2001, 360-401.
- [4]: V. Bansal, R. Misra, GD. Agrawal, J. Mathur. Performance analysis of earth–pipe– air heat exchanger for winter heating. *Energy Building*, 2009, 41, 1151–1154.
- [5]: Algerian National Weather Office.
- [6]: H. Ben Jmaa Derbel, O. Kanoun. Investigation of the ground thermal potential in Tunisia focused towards heating and cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30, 1091–1100.
- [7]: L. Ozgener, O. Ozgener. An experimental study of the exergetic performance of an underground air tunnel system for greenhouse cooling. *Renewable Energy*, 2010, 35, 2804-2811.
- [8]: D. Yang, Y. Guo, J. Zhang. Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) in a harmonic thermal environment. *Energy Conversion and Management*, 2016, 109, 184–194.
- [9]: H. Wu, S. Wang, D. Zhu. Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air- pipe systems. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48, 1462–1471.
- [10]: S. Thiers, *Energy and environmental assessments of positive energy buildings*, PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2008.
- [11]: TS. Bisoniya, A. Kumar, P. Baredar. Energy metrics of earth–air heat exchanger system for hot and dry climatic conditions of India. *Energy and Buildings*, 2015, 86, 214–221.
- [12]: V. Bansal, R. Mishra R, GD. Agarwal, J. Mathur. Performance analysis of integrated earth–air-tunnel- evaporative cooling system in hot and dry climate. *Energy and Buildings*, 2012, 47, 525–532. [13]: V.P. Boñgolan-Walsh, J. Duan, P. Fischer, T. Özgökmen, T. Iliescu, Impact of boundary conditions on entrainment and transport in gravity currents, *Appl. Math. Modell.* 31 (2007) 1338-50.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail entrepris dans le cadre de cette thèse est une contribution à l'optimisation et l'amélioration de l'isolation d'une habitation utilisant une source renouvelable dans les zones arides. Le secteur du bâtiment devient de plus en plus important en matière de consommation d'énergie. Les besoins énergétiques dans le bâtiment ne cessent de croître pour faire face aux exigences de l'homme vis-à-vis du confort des ambiances intérieures. L'architecture bioclimatique apparaît comme l'une des solutions pour réduire les consommations énergétiques et donc les émissions de gaz à effet de serre (CO₂) en profitant au maximum des apports bénéfiques de l'environnement et en utilisant des éléments favorables du milieu pour la satisfaction du confort et du bien-être de l'homme. L'isolation thermique joue un rôle très important sur l'enveloppe des bâtiments et crée un microclimat bénéfique pour le confort thermique extérieur et intérieur. Le puit canadien est un système de rafraîchissement du bâtiment qui abuse l'inertie thermique du sol et qui permet d'apporter une économie en matière de consommation d'énergie. Ce système géothermique à énergie renouvelable en plein développement pouvant être intégré dans les habitats résidentiels à la région d'Adrar.

Notre étude de la performance de l'isolation thermique par matériaux locaux et d'un échangeur air/sol, exploité pour le rafraîchissement, a commencé par une étude expérimentale pour évaluer la conductivité thermique de certains matériaux, puis une modélisation et simulation numérique pour trois chambres utilisant ces matériaux. Une étude expérimentale pour extraire les propriétés de (07) sept échantillons avec deux types d'isolations thermiques (fibres de palmier dattier, épillet de palmier dattier), la simulation effectuée pour évaluer la performance de ces matériaux afin de réduire la consommation d'électricité dans la région d'Adrar pendant la période d'été. Des prototypes pour tester l'effet des isolations sur les toits du bâtiment et les comparer aux résultats obtenus avec la simulation. Nous avons extrait la valeur de la conductivité thermique pour deux types différents des parties palmiers et nous avons obtenu des résultats satisfaisants. Les meilleurs résultats ont été respectivement de 0,380 w/m.K et 0,106w/m.K pour la fibre de palme avec un pourcentage de (1,36%) et pour l'épillet de palmier (1,34%), puis on a fait une simulation pour étudier l'effet de l'utilisation de ces matériaux sur le confort thermique des bâtiments. Les trois chambres (a), (b) et (c) construites avec du sable argileux, de la fibre de palme et des épillets de palmiers, respectivement. Les résultats montrent que l'utilisation d'argile et du sable entraîne une consommation d'électricité de 1,5 kWh à 3,4 kWh, ainsi les fibres de palmier de 1 kWh à 1,8 kWh et les épillets de palmiers de 0 kWh à 1 kWh, ce qui explique l'efficacité de l'isolation thermique de l'épillet plutôt que d'autres matériaux utilisés dans cette simulation. A partir des résultats de la

variation de température surfacique dans les trois pièces, nous avons prouvé que le toit de la pièce est la partie la plus exposée au soleil et plus polarisée au transfert de chaleur, ce qui nous a conduit à utiliser un prototype pour étudier l'isolation thermique des matériaux dans la toiture. Nous avons obtenu de bons résultats dans une large mesure de réduire la température à environ 4 et 7 ° C, lorsque nous avons utilisé les fibres de palmier dattier et le pétiole de palmier dattier, respectivement. Le plus grand écart entre les résultats expérimentaux et de simulation a été trouvée à 16,22% correspondant au 16 octobre 2016 à 16h00.

Dans le dernier chapitre ; nous avons réalisé

Une étude théorique par l'utilisation d'un modèle mathématique, qui donne la température du sol, pour toute profondeur et à n'importe quel jour de l'année car il n'existe aucune base de données qui fournit cette température, c'est pourquoi une modélisation est nécessaire, l'échangeur air-sol qui convient mieux pour un rafraîchissement efficace dans le site d'Adrar et les régions dont les caractéristiques sont similaires, doit avoir les paramètres physiques suivants :

Dans le cas sans végétation :

- Un tube de PVC de 35 à 50 mètres de longueur et de 10 à 40 cm de diamètre.
- Enterré 3 à 5 mètres sous-sol.

Le potentiel de puissance de refroidissement journalier maximal de l'échangeur est 1,73 kWh en juillet. Les économies d'énergie pour le refroidissement sont d'environ 246,82 kWh sur une période d'un an. Les résultats obtenus sont très prometteurs pour les bâtiments résidentiels à petite échelle.

Dans le cas avec végétation :

- En peut réduire la longueur du tube PVC de 30 à 35 mètres.
- La profondeur optimale pour des performances élevées et un faible coût économique est de 1 à 2 mètres.

Comme perspectives de notre travail de thèse, une réalisation d'une habitation à énergie positive en utilisant l'énergie photovoltaïque et la géothermie comme sources d'énergie, et les matériaux locaux comme des isolants passifs serait très intéressante dans vision de développement durable d'un habitat à énergie positive.

Publications et communications

Internationale Publication :

- Belatrache, Djamel, Bentouba, Saïd, Bourouis, Mahmoud. (2017). Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates. International Journal of Hydrogen Energy, Elsevier, Science Direct ; 2017. 42(13), 8898-04

Les communications internationales Présentées :

- BELATRACHE Djamel & BENTOUBA Saïd & BOUROUIS Mahmoud, “Numerical Simulation of earth air heat exchangers in arid climates”; 3rd International Conference on Automation, Control Engineering and Computer Science ; Tunis ; March 20-22, 2016

Les communications nationales Présentées :

- BELATRACHE Djamel & BENTOUBA Saïd. Journée Portes Ouverts sur la Recherche' 14, 30 Mai 2014, Université d'Adrar.
- BELATRACHE Djamel & BENTOUBA Saïd, L'effet de l'utilisation de toiture sur le confort thermique des Bâtiments dans les zones arides. Premier Workshop sur la Promotion des Systèmes de Sécurité dans les Zones Pétrolières et Gazières 3-4 Décembre 2014, Université de Ghardaïa.
- BELATRACHE Djamel & BENTOUBA Saïd & BOUROUIS Mahmoud, L'effet de la végétation sur le confort thermique des Bâtiments. La Conférence Nationale: Energie Hydrocarbure et Environnement 3-4 Décembre 2014, Université d'Adrar.

Annexes

Annexe I : Projet de Trnsys_Software

TRNBuild 2.0.208

* BUILDING DESCRIPTIONS FILE TRNSYS
* FOR BUILDING: C:\Users\Djamel\Desktop\ Graphs\Project_Trnsys\Part_1\Room (a)\Trnsys
project_room(a)\BuildingProject1.b17
* GET BY WORKING WITH TRNBuild 1.0 for Windows

*
*-----

* Comments

*-----

- *#C ----- TYPES ----- *
*#C
*#C -----LAYERS ----- *
*#C
*#C ----- INPUTS ----- *
*#C
*#C -----SCHEDULES ----- *
*#C
*#C ----- WALLS ----- *
*#C
*#C ----- WINDOWS ----- *
*#C
*#C ----- GAINS ----- *
*#C
*#C ----- COMFORT----- *
*#C
*#C ----- INFILTRATION ----- *
*#C
*#C ----- VENTILATION ----- *
*#C
*#C ----- HEATING ----- *
*#C
*#C ----- ORIENTATIONS ----- *

```
*#C ----- ZONES ----- *
*#C
*#C ----- BUILDING ----- *
*#C
*#C ----- GEOSURF ----- *
*#C
*#C ----- OUTPUTS ----- *
*#C
*
-----
-----
-----
-----
```

* Project

```
*
-----
-----
-----
```

```
-----
*+++ PROJECT
*+++ TITLE=UNDEFINED
*+++ DESCRIPTION=UNDEFINED
*+++ CREATED=UNDEFINED
*+++ ADDRESS=UNDEFINED
*+++ CITY=UNDEFINED
*+++ SWITCH=UNDEFINED
*
-----
-----
-----
```

* Properties

```
*
-----
-----
-----
```

PROPERTIES

DENSITY=1.204 : CAPACITY=1.012 : PRESSURE=101325.000 : HVAPOR=2454.0 : SIGMA=2.041e-007 : RTEMP=293.15

*-- alpha calculation -----

KFLOORUP=7.2 : EFLOORUP=0.31 : KFLOORDOWN=3.888 : EFLOORDOWN=0.31

KCEILUP=7.2 : ECEILUP=0.31 : KCEILDOWN=3.888 : ECEILDOWN=0.31

KVERTICAL=5.76 : EVERTICAL=0.3

*

```
*+++++
+++++
+++++
+++++
+++++
+++++
+++++
```

TYPES

```
*+++++
+++++
```

++++
++++
++++
++++

*
*-----

* Layers

*-----

LAYER BRICK
CONDUCTIVITY= 3.2 : CAPACITY= 1 : DENSITY= 1800
LAYER CONCRETE
CONDUCTIVITY= 7.56 : CAPACITY= 0.8 : DENSITY= 2400
LAYER STONE
CONDUCTIVITY= 5 : CAPACITY= 1 : DENSITY= 2000
LAYER PLASTER
CONDUCTIVITY= 5 : CAPACITY= 1 : DENSITY= 2000
LAYER FLOOR
CONDUCTIVITY= 0.252 : CAPACITY= 1 : DENSITY= 800
LAYER SILENCE
CONDUCTIVITY= 0.18 : CAPACITY= 1.44 : DENSITY= 80
LAYER GYPSUM
CONDUCTIVITY= 0.756 : CAPACITY= 1 : DENSITY= 1200
LAYER INSUL
CONDUCTIVITY= 0.144 : CAPACITY= 0.8 : DENSITY= 40
LAYER SANDCLAY
RESISTANCE= 0.035

*-----

* Inputs

*-----

INPUTS CNAT_1 T_COOL_ON MS_N_180_90 MS_S_0_90 MS_E_270_90 MS_W_90_90 BRIGHT

*-----

* Schedules

*-----

HFRONT = 11 : HBACK= 11
 WALL INTFLOOR
 LAYERS = FLOOR STONE SILENCE CONCRETE

THICKNESS= 0.005 0.06 0.04 0.24
 ABS-FRONT= 0.8 : ABS-BACK= 0.4
 EPS-FRONT= 0.9 : EPS-BACK= 0.9

HFRONT = 11 : HBACK= 11
 WALL ROOF

LAYERS = INSUL SANDCLAY INSUL
 THICKNESS= 0.08 0 0.08
 ABS-FRONT= 0.35 : ABS-BACK= 0.75

EPS-FRONT= 0.9 : EPS-BACK= 0.9
 HFRONT = 11 : HBACK= 64

*-----

* Windows

*-----

WINDOW DOUBLE

WINID=2001 : HINSIDE=11 : HOUTSIDE=64 : SLOPE=90 : SPACID=0 : WWID=0.77 : WHEIG=1.08 :
 FFRAME=0.2 : UFRAME=8.17 : ABSFRAME=0.6 : RISHADE=0 : RESHADE=0 : REFLISHADE=0.5 :
 REFLOSHADE=0.5 : CCISHADE=0.5 : EPSFRAME=0.9 : EPSISHADE=0.9 : ITSHADECLOSE=648 :
 ITSHADEOPEN=576

WINDOW SIMPLE

WINID=1001 : HINSIDE=11 : HOUTSIDE=64 : SLOPE=90 : SPACID=0 : WWID=0 : WHEIG=0 :
 FFRAME=0.15 : UFRAME=8.17 : ABSFRAME=0.6 : RISHADE=0 : RESHADE=0 : REFLISHADE=0.5 :
 REFLOSHADE=0.1 : CCISHADE=0.5 : EPSFRAME=0.9 : EPSISHADE=0.9 : ITSHADECLOSE=648 :
 ITSHADEOPEN=576

WINDOW DOOR

WINID=1001 : HINSIDE=11 : HOUTSIDE=64 : SLOPE=90 : SPACID=0 : WWID=0 : WHEIG=0 :
 FFRAME=0.15 : UFRAME=8.17 : ABSFRAME=0.6 : RISHADE=0 : RESHADE=0 : REFLISHADE=0.5 :
 REFLOSHADE=0.1 : CCISHADE=0.5 : EPSFRAME=0.9 : EPSISHADE=0.9 : ITSHADECLOSE=648 :
 ITSHADEOPEN=576

WINDOW WINDOW

WINID=1001 : HINSIDE=11 : HOUTSIDE=64 : SLOPE=90 : SPACID=0 : WWID=0 : WHEIG=0 :
 FFRAME=0.15 : UFRAME=8.17 : ABSFRAME=0.6 : RISHADE=0 : RESHADE=0 : REFLISHADE=0.5 :
 REFLOSHADE=0.1 : CCISHADE=0.5 : EPSFRAME=0.9 : EPSISHADE=0.9 : ITSHADECLOSE=648 :
 ITSHADEOPEN=576

*-----

* Default Gains

*-----

*-----

* Other Gains
*-----

GAIN PER_SP
CONVECTIVE=0 : RADIATIVE=0 : HUMIDITY=0.058
GAIN LIGHT_SP
CONVECTIVE=INPUT 0*BRIGHT : RADIATIVE=INPUT 0*BRIGHT : HUMIDITY=0
GAIN GAIN_SP
CONVECTIVE=0 : RADIATIVE=0 : HUMIDITY=0
*-----

* Comfort
*-----

* Infiltration
*-----

INFILTRATION LEAKY
AIRCHANGE=0.2
*-----

* Ventilation
*-----

VENTILATION VENTZONE1
TEMPERATURE=OUTSIDE
AIRCHANGE=INPUT 3*CNAT_1
HUMIDITY=OUTSIDE

VENTILATION VENTMECH
TEMPERATURE=20
AIRCHANGE=SCHEDULE 0*USE
HUMIDITY=50

*-----

* Cooling

*-----

COOLING COOL1
ON=28
POWER=999999999
HUMIDITY=100

*-----

* Heating

*-----

HEATING HEAT1
ON=SCHEDULE 7*SETOFF+15
POWER=5760
HUMIDITY=0
RRAD=0

*-----
*-----

* Zones

*-----

ZONES ROOM_A

*-----

* Orientations

*-----

 HEMISPHERE NORTHERN

ORIENTATIONS N_180_90 S_0_90 E_270_90 W_90_90 H_0_0

*

*+++++
 ++++++
 ++++++
 ++++++
 ++++++
 ++++++
 ++++++

BUILDING

*+++++
 ++++++
 ++++++
 ++++++
 ++++++
 ++++++

*

*-----

 * Zone ROOM_A / Airnode ROOM_A

*

 ZONE ROOM_A

RADIATIONMODE

BEAM=STANDARD : DIFFUSE=STANDARD : LONGWAVE=STANDARD : GEOMODE=MANUAL
 : FSOLAIR=0

AIRNODE ROOM_A

WALL =OUTWALL : SURF= 1 : AREA= 13.4 : EXTERNAL : ORI=N_180_90 : FSKY=0.5 :
 GEOSURF=0.1

WINDOW=WINDOW : SURF= 6 : AREA= 1 : EXTERNAL : ORI=N_180_90 : FSKY=0.5

WINDOW=DOOR : SURF= 7 : AREA= 1.6 : EXTERNAL : ORI=N_180_90 : FSKY=0.5

WALL =OUTWALL : SURF= 2 : AREA= 16 : EXTERNAL : ORI=S_0_90 : FSKY=0.5 :

GEOSURF=0.1

WALL =OUTWALL : SURF= 3 : AREA= 16 : EXTERNAL : ORI=E_270_90 : FSKY=0.5 :

GEOSURF=0.1

WALL =OUTWALL : SURF= 4 : AREA= 16 : EXTERNAL : ORI=W_90_90 : FSKY=0.5 :

GEOSURF=0.1

WALL =ROOF : SURF= 8 : AREA= 16 : EXTERNAL : ORI=H_0_0 : FSKY=0.5

REGIME

GAIN = PER_SP : SCALE= SCHEDULE 16*USE : GEOPOS= 0

GAIN = LIGHT_SP : SCALE= SCHEDULE 16*LIGHT : GEOPOS= 0

GAIN = GAIN_SP : SCALE= SCHEDULE 16*USE : GEOPOS= 0

INFILTRATION= LEAKY

COOLING = COOL1

Abs2 0.190 0.192 0.198 0.201 0.200 0.199 0.199 0.185 0.117 0.000 0.191
 Abs3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Abs4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Abs5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Abs6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Rfsol 0.266 0.262 0.260 0.262 0.269 0.286 0.326 0.422 0.621 1.000 0.314
 Rbsol 0.215 0.209 0.207 0.210 0.219 0.237 0.272 0.356 0.560 0.999 0.260
 Tvis 0.706 0.710 0.701 0.688 0.670 0.635 0.556 0.403 0.188 0.000 0.590
 Rfvis 0.121 0.115 0.114 0.118 0.132 0.163 0.228 0.376 0.649 1.000 0.203
 Rbvis 0.103 0.096 0.093 0.096 0.108 0.132 0.179 0.286 0.520 0.999 0.162
 SHGC 0.589 0.593 0.591 0.586 0.574 0.551 0.505 0.405 0.218 0.000 0.518
 SC: 0.55
 Layer ID# 9052 9065 0 0 0 0
 Tir 0.000 0.000 0 0 0 0
 Emis F 0.840 0.140 0 0 0 0
 Emis B 0.840 0.840 0 0 0 0
 Thickness(mm) 4.0 4.0 0 0 0 0
 Cond(W/m2-C) 225.0 225.0 0 0 0 0
 Spectral File None None None None None None
 Overall and Center of Glass Ig U-values (W/m2-C)
 Outdoor Temperature -17.8 C 15.6 C 26.7 C 37.8 C
 Solar WdSpd hcout hrout hin
 (W/m2) (m/s) (W/m2-C)
 0 0.00 12.25 3.25 7.62 1.54 1.54 1.31 1.31 1.35 1.35 1.47 1.47
 0 6.71 25.47 3.21 7.64 1.62 1.62 1.36 1.36 1.40 1.40 1.53 1.53
 783 0.00 12.25 3.39 7.99 1.69 1.69 1.54 1.54 1.51 1.51 1.54 1.54
 783 6.71 25.47 3.30 7.81 1.79 1.79 1.63 1.63 1.58 1.58 1.59 1.59
 WINDOW 4.1 DOE-2 Data File : Multi Band Calculation
 Unit System : SI
 Name : TRNSYS 15 WINDOW LIB
 Desc : Single, 5.8
 Window ID : 1001
 Tilt : 90.0
 Glazings : 1
 Frame : 11 2.270
 Spacer : 5 Class5 0.000 1.000 0.000
 Total Height: 1219.2 mm
 Total Width : 914.4 mm
 Glass Height: 1079.5 mm
 Glass Width : 774.7 mm
 Mullion : None
 Gap Thick Cond dCond Vis dVis Dens dDens Pr dPr
 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Angle 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 Hemis
 Tsol 0.830 0.829 0.827 0.823 0.813 0.792 0.744 0.632 0.384 0.000 0.749
 Abs1 0.095 0.096 0.098 0.101 0.105 0.109 0.114 0.117 0.114 0.000 0.106

```

Abs2  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
Abs3  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
Abs4  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
Abs5  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
Abs6  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
Rfsol 0.075 0.074 0.075 0.076 0.082 0.099 0.142 0.251 0.502 1.000 0.135
Rbsol 0.075 0.074 0.075 0.076 0.082 0.099 0.142 0.251 0.502 1.000 0.135
Tvis  0.901 0.901 0.900 0.897 0.890 0.871 0.824 0.706 0.441 0.000 0.823
Rfvis 0.081 0.081 0.082 0.083 0.090 0.108 0.155 0.271 0.536 1.000 0.146
Rbvis 0.081 0.081 0.082 0.083 0.090 0.108 0.155 0.271 0.536 1.000 0.146
SHGC  0.855 0.855 0.853 0.849 0.841 0.821 0.774 0.663 0.414 0.000 0.777
SC: 0.78

```

```

Layer ID#      9052      0      0      0      0      0
Tir           0.000      0      0      0      0      0
Emis F        0.840      0      0      0      0      0
Emis B        0.840      0      0      0      0      0
Thickness(mm)  4.0      0      0      0      0      0
Cond(W/m2-C ) 225.0      0      0      0      0      0
Spectral File  None  None  None  None  None  None
Overall and Center of Glass Ig U-values (W/m2-C)
Outdoor Temperature      -17.8 C   15.6 C   26.7 C   37.8 C
Solar  WdSpd hcout hrout hin
(W/m2) (m/s) (W/m2-C)
0      0.00 12.25 3.42 8.23 5.27 5.27 4.95 4.95 4.94 4.94 5.53 5.53
0      6.71 25.47 3.33 8.29 6.26 6.26 5.73 5.73 5.68 5.68 6.46 6.46
783    0.00 12.25 3.49 8.17 5.25 5.25 4.58 4.58 5.24 5.24 5.66 5.66
783    6.71 25.47 3.37 8.27 6.25 6.25 5.53 5.53 5.95 5.95 6.57 6.57
*** END OF LIBRARY ***

```

```

*****
*****

```

```

*WinID  Description                Design    U-Value g-value T-sol Rf-sol T-vis
*****
*****

```

```

2001  Waermeschutzglas,Ar, 1.4 71/59      4/16/4      1.4 0.589 0.426 0.266 0.706
1001  Single, 5.8                          4           5.68 0.855 0.83 0.075 0.901

```

```

_EXTENSION_WINPOOL_END_
_EXTENSION_BuildingGeometry_START_
_EXTENSION_BuildingGeometry_END_
_EXTENSION_VirtualSurfaceGeometry_START_
_EXTENSION_VirtualSurfaceGeometry_END_
_EXTENSION_ExternalShadingGeometry_START_
_EXTENSION_ExternalShadingGeometry_END_
_EXTENSION_GeoPositionGeometry_START_
_EXTENSION_GeoPositionGeometry_END_
_EXTENSION_VAMPARAMS_START_
_EXTENSION_VAMPARAMS_END_

```

Publication

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/hydro

Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates



Djamel Belatrache^a, Saïd Bentouba^a, Mahmoud Bourouis^{b,*}

^a Laboratory of Sustainable Development and Computing (LDDI), University of Adrar, 01000 Adrar, Algeria

^b Department of Mechanical Engineering, Universitat Rovira i Virgili, Av. Paísos Catalans No. 26, 43007 Tarragona, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 May 2016

Received in revised form

30 July 2016

Accepted 31 August 2016

Available online 28 September 2016

Keywords:

Geothermal energy

Earth air heat exchanger

Passive cooling

Arid climate

ABSTRACT

This paper presents the modeling and simulation of an earth air heat exchanger (EAHE), employed as an air-conditioning device for buildings in the climate conditions of the south of Algeria. The earth tubes buried in the ground can offer considerable advantages in terms of energy savings. The appropriate depth of the buried tubes was calculated taking into account the physical properties of the soil in the region under study and using a specific program developed by the authors. A parametric analysis was carried out taking into account the length and the radius of the pipe and the velocity of the air in the pipe. The results of performance and overall energy savings are presented. The maximum daily cooling capacity of the EAHE studied was 1.755 kWh. Results showed that a simple EAHE system can provide 246.815 kWh in a period of one year.

© 2016 Hydrogen Energy Publications LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Introduction

An earth air heat exchanger (EAHE) consists of one or more pipes laid underground to supply air conditioning in buildings for cooling in summer and heating in winter. The ambient air is used for ventilation and also to reduce or partially replace the energy demand so as to maintain thermal comfort in buildings or houses [1,2]. EAHEs are characterized by their large potential for energy saving and low maintenance.

The physical phenomenon is simple and depends on the temperature difference between the soil and the ambient air. In summer, the soil temperature is lower than that of the ambient air. Soil temperature also remains almost constant throughout the year at a given depth below ground level. However, the soil temperature profile is a function of the

depth involved and depends on other factors such as the physical properties of the soil and the climatic conditions [3].

To understand the thermal performance of EAHEs, several mathematical models, methods and computer tools were developed and used in the open literature. Krarti et al. [4] analyzed the heat transfer process in an EAHE and proposed an analytical model for the EAHE system. A physical model to simulate the EAHE was developed and validated by Mihalakakou et al. [5,6]. Benkert et al. [7] highlighted the lack of optimization criteria when analyzing EAHEs and developed a specific computer tool based on a physical model which was experimentally validated. Al-Ajmi et al. [8] developed an analytical model of an earth air heat exchanger to predict the air outlet temperature and the potential of these cooling devices in a hot arid climate. In their model, the thickness of the disturbed layer of the soil was taken as equal to the radius of

* Corresponding author. Fax: +34 977 55 96 91.

E-mail address: mahmoud.bourouis@urv.cat (M. Bourouis).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.221>

0360-3199/© 2016 Hydrogen Energy Publications LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Nomenclature

α	thermal diffusivity of the soil, m^2/day
C_p	specific heat capacity of the soil, $\text{J}/\text{kg K}$
λ	thermal conductivity of the soil, $\text{W}/\text{m K}$
ρ	density of the soil, kg/m^3
φ	heat flow, kJ
R_{conv}	thermal resistance of the convective heat exchange between the air and the pipe, $\text{m.K}/\text{W}$
R_{pipe}	thermal resistance of the buried pipe, $\text{m K}/\text{W}$
R_{soil}	thermal resistance of the soil, $\text{m K}/\text{W}$
r_i	inside radius of the buried pipe, m
r_e	outer radius of the buried pipe, m
ω	annual temperature frequency, rad/day
t	day of the year
t_0	day of maximum surface temperature (i.e. 198)
A_s	amplitude of the soil surface temperature variation, $^\circ\text{C}$
T_{mean}	mean annual temperature, $^\circ\text{C}$
Z	depth from the earth surface, m
D	pipe diameter, m
h	heat transfer coefficient, $\text{W}/\text{m}^2 \text{C}$
\dot{m}	mass flow rate, kg/s
Nu	Nusselt number, –
Pr	Prandtl number, –
Q	heat flow, W
Ra	Rayleigh number, –
Re	Reynolds number, –
T	temperature, $^\circ\text{C}$
η	mean efficiency of the EAHE, %
Q_{cool}	average daily cooling potential, Wh

the underground pipe and the thermal resistance of the pipe material was neglected. After validation with other published works, the model was integrated into the TRNSYS environment to investigate the thermal performance of an EAHE in a residential house in Kuwait weather. It was found that the EAHE can provide 30% of the cooling energy demand in summer. A complete analytical solution for the heat diffusion of a cylindrical air/soil heat exchanger with isothermal boundary conditions was proposed by Hollmuller [9]. De Paepe and Janssens [10] proposed a 1-D model to analyze the influence of the design parameters of an earth air heat exchanger on the thermal hydraulic performance. Badescu [11] developed a simple and precise model of an earth air heat exchanger based on a 2-D numerical transient approach which allowed the calculation of the soil temperature at the surface and at different depths. The authors analyzed the potential of EAHEs for heating and cooling applications in domestic buildings under the climate conditions of Rhineland-Palatinate in Germany. Bansal et al. [12] evaluated the deterioration in the thermal performance of an earth air tunnel heat exchanger in a transient regime at climate conditions of Ajmer (India) using an experimental approach and CFD (computational fluid dynamics) modeling.

The objective of the present paper is to evaluate the impact of earth air heat exchangers on thermal comfort in domestic

buildings in summer and hence the comfort of individuals. This work aims to demonstrate that a simple pipe placed underground and connected to a building can significantly regulate indoor thermal comfort and thus help in energy savings in hot arid climate conditions. The study was conducted in the month of July, in which the highest cooling demand is registered over a year, and the climatic conditions were those of the region of Adrar in the Algerian Sahara.

Mathematical modeling

An earth air heat exchanger (EAHE) consists mainly of a PVC (polyvinyl chloride) pipe buried in the ground. The geometric parameters of the buried pipe used in the thermal analysis are: length, inside diameter and thickness which is usually 4 mm.

The principle of operation of an earth air heat exchanger (EAHE) is such that the hot outdoor air is pumped into the underground buried pipe with the help of an adequate fan. The air is cooled by transferring heat to the soil which is at a lower temperature (Fig. 1). The cooled air is then injected into the building. The thermal and physical properties of air, soil and pipe used in this simulation are represented in Table 1, while the parameters of the earth air heat exchanger are summarized in Table 2.

The configuration described above can be further simplified by considering a uniform airflow inside the pipe. The surrounding soil is considered to have uniform and constant thermal properties, the dimensions and physical properties of the pipe are considered constant. The monthly maximum and minimum temperatures used in the simulation of the site under study are shown in Table 3.

The model is based on the energy balance equations when the soil temperature is constant. The equation that describes the variation in air temperature along the earth air heat exchanger takes into account the following parameters:

1. Outdoor temperature (ambient air).
2. Soil temperature at given depth taking into account the thermophysical properties of the soil.
3. Geometry and type of the pipe and air velocity.

Modeling of the soil temperature

The mathematical model of the soil temperature is based on the heat conduction theory applied to a semi-infinite homogeneous solid. Heat conduction in the soil is given by Ref. [15]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \times \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$T(0, t) = T_{\text{mean}} + A_s \times \cos(\omega(t - t_0)) \quad (2)$$

$$T(\infty, t) = T_{\text{mean}} \quad (3)$$

where the soil thermal diffusivity is given by: $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \times C_p}$.

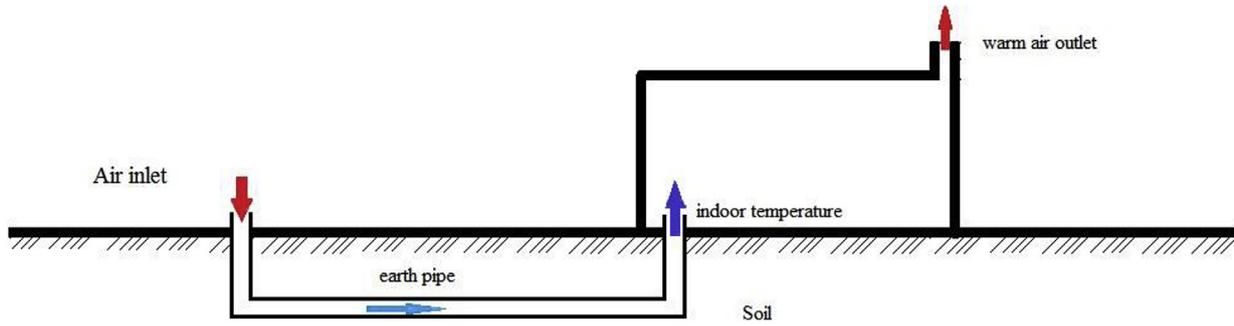


Fig. 1 – Schematic diagram of a passive air-conditioning system using earth air heat exchanger.

Table 1 – Thermal and physical properties of air, pipe and soil used in this work [13].

Material	Density (kg/m ³)	Heat capacity (J/kg.K)	Thermal conductivity (W/m.K)
Air	1.1774	1005.7	0.02624
Soil	2050	1840	0.52
PVC	1380	900	0.16

Table 2 – Parameters of the earth air heat exchanger used in the simulation.

Parameter	Reference value
Pipe length (L)	45 m
Inside diameter (Di)	80 mm
Pipe thickness (e)	4 mm
Air velocity (V)	1 m/s
Pipe depth	5 m

Table 3 – Monthly maximum and minimum temperatures of the site in Adrar [14].

Months	Maximal ambient air temperature (°C)	Minimal ambient air temperature (°C)
January	20.5	3.8
February	23.2	6.6
March	27.7	10.5
April	33.2	15.5
May	37.2	25.5
June	43.2	27.7
July	46.0	26.6
August	44.3	23.8
September	40.5	17.1
October	33.2	10.5
November	25.5	5.5
December	15.5	5.5

The pipes are placed in a horizontal position with a minor inclination to remove the condensed vapors of water. To simulate the earth air heat exchanger, it is necessary to know the optimal installation depth of the underground pipes in the region under study, i.e. Adrar. The soil temperature was calculated using the following equation [15]:

$$T(z, t) = T_{mean} + A_s \times \left(\text{Exp}^{-\left(\frac{z}{\sqrt{365\alpha}}\right)} \times \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \times (t - t_0) - \left(\frac{z}{2}\right) \times \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right\} \right) \tag{4}$$

Fig. 2 shows the soil temperature of the region of Adrar at different depths (1–5 m). With an increase in the underground depth, fluctuations of the sine wave of the soil temperature decrease until the temperature reaches a relatively constant value at 5 m depth, allowing us to use the soil as a heat source (cold/hot).

Modeling of the earth air heat exchanger

The earth air heat exchanger simulated consists of a straight pipe of 45 m length. It is assumed that the soil temperature is more influenced by the air flow and that it varies only according to Equation (4). Fig. 3 shows a schematic diagram of the EAHE used in the simulation.

The convective heat transfer coefficient in a tube is defined by Ref. [16]:

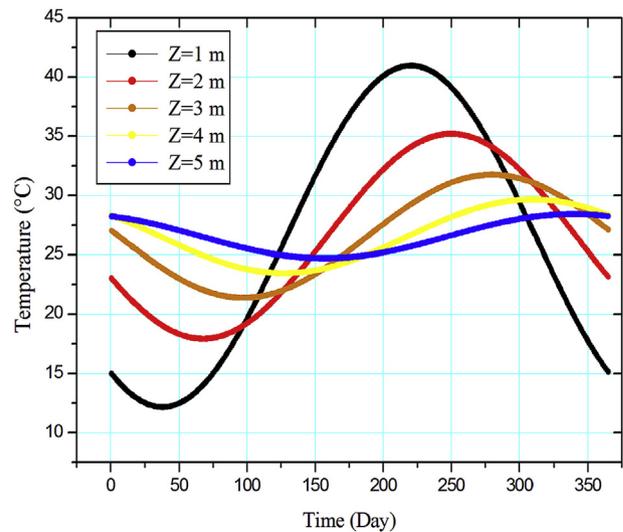


Fig. 2 – Soil temperature in the region of Adrar at different depths.

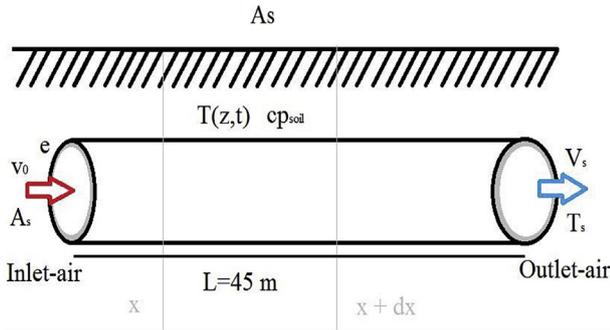


Fig. 3 – Schematic diagram of the earth air heat exchanger simulated.

$$h_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu} \times \lambda}{D} \quad (5)$$

The Nusselt number was calculated by the following correlation:

$$\text{Nu} = 0,0214 \times (\text{Re}^{0,8} - 100) \times \text{Pr}^{0,4} \quad (6)$$

The Reynolds number and Prandtl number inside the pipe are given by:

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{air}} \times D_i}{\nu} \quad (7)$$

$$\text{Pr} = \frac{v \times \rho \times \text{cp}}{\lambda} \quad (8)$$

The heat transferred along the buried pipe can be expressed as follows [15]:

$$\phi = \dot{m} \times \text{Cp}_f \times dT(x) = \frac{dx}{R_{\text{conv}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}}} \times (T(z, t) - T(x)) \quad (9)$$

The thermal resistance of the pipe can be expressed as:

$$R_{\text{pipe}} = \frac{1}{\lambda_{\text{pipe}} \times 2 \times \pi} \times \ln(r_e/r_i) \quad (10)$$

The convective thermal resistance between the internal surface of the pipe and air in the pipe is:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{r_i \times h_{\text{conv}} \times 2 \times \pi} \quad (11)$$

The thermal resistance of the soil can be expressed as:

$$R_{\text{soil}} = \frac{1}{\lambda \times 2 \times \pi} \times \ln(R_{(z,t)}/r_e) \quad (12)$$

The total thermal conductance of the EAHE is then given by:

$$G_{\text{Tot}} = \frac{1}{(R_{\text{conv}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}})} \quad (13)$$

Combining Equations (9)–(13), the energy balance can be expressed as follows

$$\frac{dT(x)}{T(z, t) - T(x)} = \frac{G_{\text{Tot}}}{\dot{m} \times \text{Cp}_f} \times dx \quad (14)$$

The integral of Equation (14) is then:

$$-\ln(T(z, t) - T(x)) = \frac{G_{\text{Tot}}}{\dot{m} \times \text{Cp}_f} \times x + \text{Cte} \quad (15)$$

The boundary equation at the surface of the ground is [17]:

$$T(0) = T_{\text{amb}} \quad (16)$$

Replacing the Cte in Equation (15) by its expression deduced from the boundary condition of Equation (16), we obtain:

$$\ln(T(x) - T(z, t)/(T_{\text{amb}} - T(z, t))) = \frac{-G_{\text{Tot}}}{\dot{m} \times \text{Cp}_f} \times x \quad (17)$$

At $x = L$, the air outlet temperature is as follows:

$$T_s = T_{\text{amb}} + (T(z, t) - T_{\text{amb}}) \times \left(1 - e^{\frac{-G_{\text{Tot}}}{\dot{m} \times \text{Cp}_f} \times x}\right) \quad (18)$$

The air mass flow rate is given by the following expression:

$$\dot{m} = \rho_a V_a \pi D_i^2 / 4 \quad (19)$$

The hourly variation of the ambient temperature can be represented by using a Fourier series [18]:

$$T_{\text{amb}}(t) = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} + \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{12}(t - 14)\right) \quad (20)$$

The mean monthly thermal efficiency of the EAHE is calculated according to the following expression [19]:

$$\eta_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (T_{\text{amb}}(i) - T_{\text{out}}(i))}{\sum_{i=1}^{24} (T_{\text{amb}}(i) - T_{\text{soil}})} \quad (21)$$

The daily average cooling potential is given by the following equation [20]:

$$Q_{\text{cool}} = \sum_{i=1}^{24} \dot{m} \text{Cp} (T_{\text{amb}}(i) - T_{\text{out}}(i)) \quad (22)$$

The earth air heat exchanger was divided into 45 sections each of 1 m in length and the previous governing equations were solved sequentially for each section from the inlet to the outlet of the EAHE.

Model validation

Before performing the parametric study, the model was validated using the experimental data reported by Bansal et al. [21] at different ambient temperatures. The input parameters used for the validation step are presented in Table 4 and the results are tabulated in Table 5. It can be seen that the absolute relative deviation between our results and the

Table 4 – Input parameters for validation against the experimental data from Bansal et al. [21].

Parameter	Reference value
Pipe length	23.42 (m)
Pipe diameter	0.15 (m)
Soil density	2050 (kg/m ³)
Soil specific heat capacity	1840 (J/Kg.K)
Soil thermal conductivity	0.52 (W/m.°C)
Soil temperature	26.7 (°C)

Table 5 – Results of model validation against the experimental data from Bansal et al. [21].

EAHE parameters		L = 23.42 m; Di = 0.15 m, Tsoil = 26.7 °C (pipe in PVC)			
Inlet air velocity (m/s)	Inlet air temperature	Experimental data from Bansal et al. [21]		Results of present model	
		T _{inlet} (°C)	T _{out} (°C)	T _{out} (°C)	Relative error %
V _{inlet}	T _{inlet} (°C)	T _{out} (°C)	T _{out} (°C)	Relative error %	
2	43.4	33.1	33.4	0.8	
3	42.5	33.1	35.3	6.5	
4	42.3	33.5	36.6	5.0	
5	42.2	34.2	37.4	9.4	

experimental data of Bansal et al. [21] is below 9.5%. When the air flowing inside the pipe is pumped with a velocity of 2 m/s, the absolute relative deviation between our results and the experimental data of reference [21] is even lower than 1%. Therefore, it can be concluded that our model can properly predict the thermal performance of an EAHE system.

Results of the operation in summer time

Effect of the depth in the ground on the performance of the EAHE

Fig. 4 shows the variation of the air temperature inside the EAHE along the tube length at different ground depths. Initially, the air temperature inside the heat exchanger drops significantly and decreases until the air temperature inside the exchanger becomes equal to the soil temperature. At a depth of 5 m, it is noted that the air temperature decreases from the maximum ambient temperature of 46 °C corresponding to the month of July in the region of Adrar until it reaches the soil temperature which is about 25 °C. Also, as the depth is decreased, the temperature of the air leaving the EAHE is higher. For instance, in case of 1 m depth the temperature difference of the air between the entrance and exit of

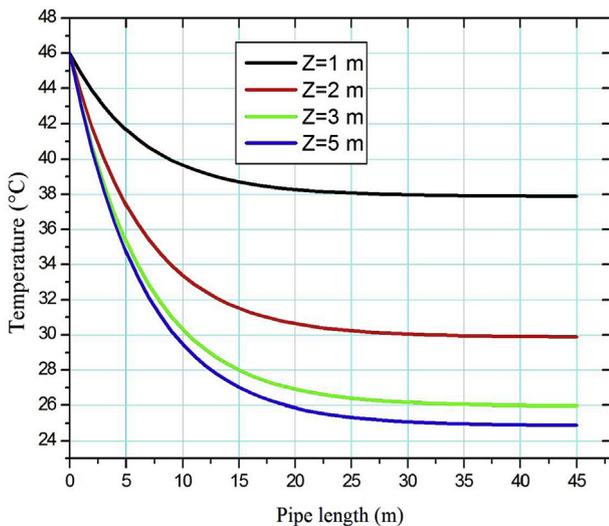


Fig. 4 – Air temperature along the tube length at different depths.

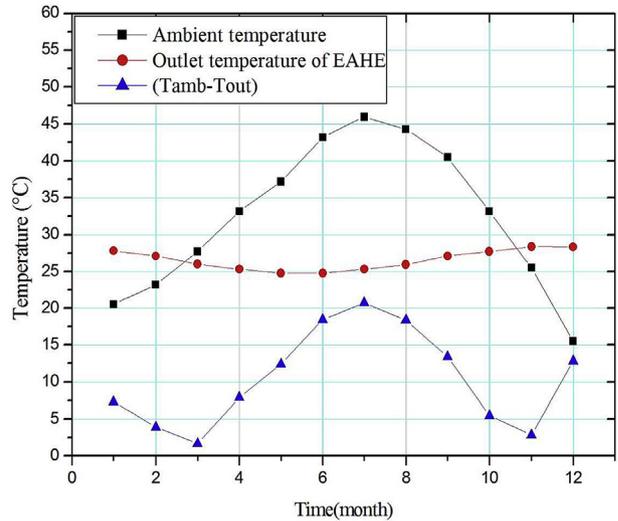


Fig. 5 – Monthly temperature profiles over a year of the ambient air, air at the EAHE exit and the temperature difference between both.

the EAHE is only around 7 °C which is not sufficient to supply cooling in buildings. It is also noticed that the air temperature inside the earth air heat exchanger is at a constant value beyond a length L = 25 m.

Yearly variation of air temperature inside the exchanger

Fig. 5 shows the monthly temperature profiles over a year of the ambient air, the air leaving the earth air heat exchanger and the temperature difference between both. It can be deduced that the performance of the EAHE used as an air conditioning device will be mainly influenced by both the soil temperature and the ambient air temperature because these two parameters vary from one month to another. It can also be seen that the maximum temperature difference of air between the inlet and the outlet of the EAHE is around 20.7 °C and 18.4 °C for the months of July and August, respectively, while the minimum temperature difference between the air entering and leaving the EAHE is about 1.7 °C and 2.9 °C for the months of March and November, respectively. From these results, it can be concluded that this system is more efficient in summer.

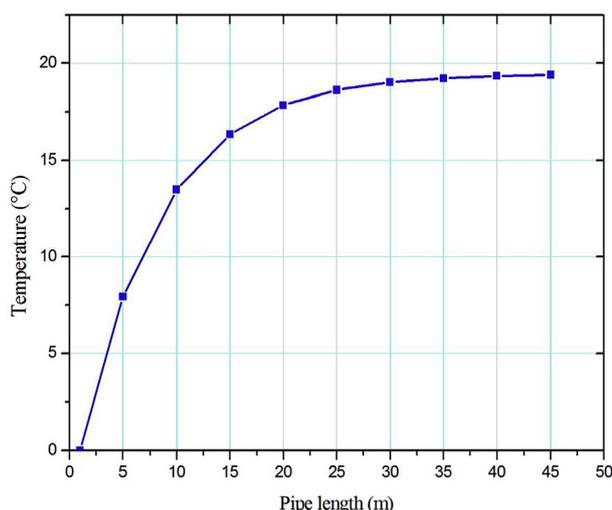


Fig. 6 – Influence of the pipe length on the air temperature difference between the entrance and exit of the EAHE ($T_{\text{amb}} = 46 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Influence of the pipe length on the temperature difference along the buried pipe of the EAHE

Fig. 6 shows the temperature difference of air between the inlet and outlet of the earth air heat exchanger for the month of July when the maximum ambient temperature is $46 \text{ }^{\circ}\text{C}$, as a function of the tube length of the heat exchanger. It can be observed in Fig. 6 that the air temperature difference between the inlet and outlet of the EAHE increases significantly along the length, however beyond a length of about 25 m the increase in the temperature difference is not considerable and an almost constant air temperature of $19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ is observed.

Variation of mean efficiency and daily cooling potential depending on the pipe length of the EAHE

Fig. 7 shows the variation of the mean efficiency and daily cooling capacity potential of the earth air heat exchanger as a

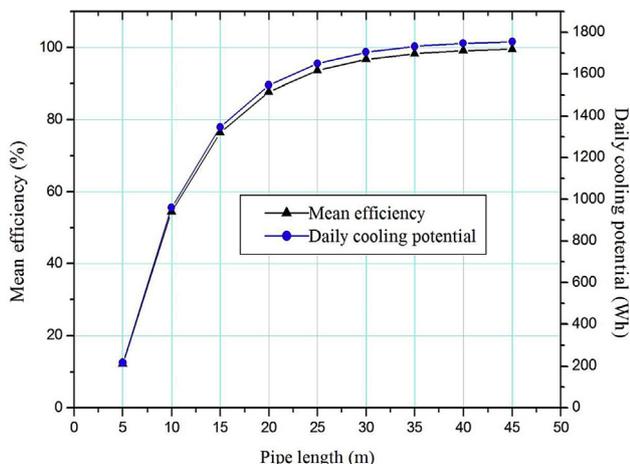


Fig. 7 – Variation of the mean efficiency and daily cooling potential of the EAHE depending on the pipe length.

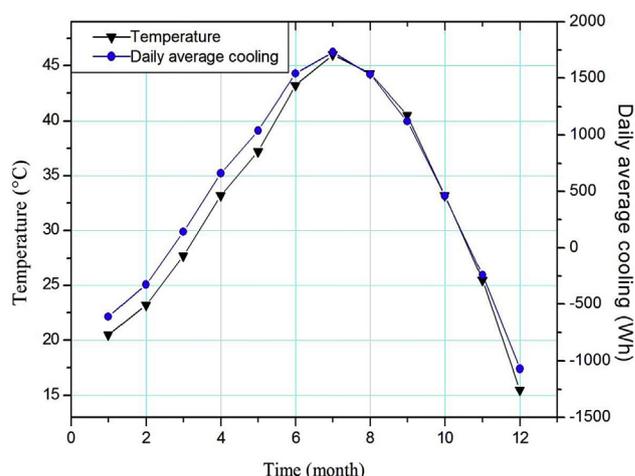


Fig. 8 – Monthly variation over a year of the ambient air temperature and cooling capacity potential.

function of the buried pipe length. It can be observed in this figure that initially both parameters increase significantly along the length, however after 25 m this increase is almost insignificant. Regarding the daily cooling capacity potential, the constant value in the flat region is about 1.7 kWh.

Monthly variation of the ambient temperature and daily cooling capacity potential

Fig. 8 shows the monthly ambient air temperature and cooling capacity potential of the EAHE over a year. It can be seen that the daily cooling capacity potential presents a peak of 1.73 kWh corresponding to the month of July when the ambient temperature is at a maximum. A minimum value of 0.46 kWh for the cooling capacity potential of the EAHE is obtained in October. The negative values of the potential for cooling capacity shown on the graph represent the daily heating potential when the temperature of the ground is greater than the ambient air temperature. The maximum values are 1.07 and 0.61 kWh corresponding to the months of December and January when the ambient temperature is at a minimum. Also, the minimum values of heating potential are -0.24 and -0.33 kWh corresponding to the months of November and February.

Conclusions

An optimum depth of 5 m for earth air heat exchangers used in air conditioning applications in the region of Adrar located in the Algerian Sahara was obtained based on the criterion of a constant annual soil temperature using a specific MATLAB program.

An EAHE was then simulated using the climatic conditions of Adrar. The model developed was first validated using experimental data from the literature. A parametric analysis was then performed to evaluate and investigate the effect of the length of the buried pipe and the air flow rate on the temperature of the air at the tube exit. The main conclusions are herein summarized.

- Initially, the air temperature inside the EAHE drops significantly and decreases until the air temperature inside the exchanger becomes equal to the soil temperature at a length of about 25 m along the pipe.
- At a depth of 5 m, the air temperature decreases from the maximum ambient temperature of 46 °C in July until it reaches the soil temperature at about 25 °C.
- A maximum temperature difference of about 20.7 °C between the ambient air and air at the EAHE exit is obtained in July.
- The EAHE used in this study presents a maximum daily cooling capacity potential of 1.73 kWh in July. Energy saving for cooling is about 246.82 kWh in a period of one year. The results obtained are very promising for small scale residential buildings.

REFERENCES

- [1] Tzaferis A, Liparakis D, Santamouris M, Argiriou A. Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers. *Energy Build* 1992;18:35–43.
- [2] Magraner T, Montero A, Quilis S, Urchueguía JF. Comparison between design and actual energy performance of a HVAC-ground coupled heat pump system in cooling and heating operation. *Energy Build* 2010;42:1394–401.
- [3] Argiriou A. Ground cooling. In: Santamouris M, Asimakopoulos D, editors. *Passive cooling of buildings*. London: James & James; 2001. p. 360–401.
- [4] Krarti M, Kreider JF. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel. *Energy Convers Manag* 1996;37:1561–74.
- [5] Mihalakakou G, Santamouris M, Asimakopoulos D. Modelling the thermal performance of earth-to air heat exchangers. *Sol Energy* 1994;53:301–5.
- [6] Mihalakakou G. On estimating soil surface temperature profiles. *Energy Build* 2002;34:251–9.
- [7] Benkert S, Heidt FD, Scholer D. Calculation tool for earth heat exchangers GAEA. In: *Proceeding of building simulation*, vol. 2; 1997. Prague: Fifth International IBPSA Conference.
- [8] Al-Ajmi F, Love day DL, Hanby VI. The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. *Build Environ* 2006;41:235–44.
- [9] Hollmuller P. Analytical characterization of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers. *Int. J Heat Mass Transf* 2003;46:4303–17.
- [10] De Paepe M, Janssens A. Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchanger. *Energy Build* 2003;35:389–97.
- [11] Badescu V. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renew Energy* 2007;32:845–55.
- [12] Bansal V, Misra R, Das Agarwal G, Mathur J. 'Derating Factor' new concept for evaluating thermal performance of earth air tunnel heat exchanger: a transient CFD analysis. *Appl Energy* 2013;102:418–26.
- [13] Bansal V, Misra R, Agrawal GD, Mathur J. Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating. *Energy Build* 2009;41:1151–4.
- [14] Algerian National Weather Office.
- [15] Ben Jmaa Derbel H, Kanoun O. Investigation of the ground thermal potential in Tunisia focused towards heating and cooling applications. *Appl Therm Eng* 2010;30:1091–100.
- [16] Ozgener L, Ozgener O. An experimental study of the exergetic performance of an underground air tunnel system for greenhouse cooling. *Renew Energy* 2010;35:2804–11.
- [17] Yang D, Guo Y, Zhang J. Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) in a harmonic thermal environment. *Energy Convers Manag* 2016;109:184–94.
- [18] Wu H, Wang S, Zhu D. Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems. *Energy Convers Manag* 2007;48:1462–71.
- [19] Thiers S. *Energy and environmental assessments of positive energy buildings* [PhD thesis]. France: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris; 2008.
- [20] Bisioniya TS, Kumar A, Baredar P. Energy metrics of earth-air heat exchanger system for hot and dry climatic conditions of India. *Energy Build* 2015;86:214–21.
- [21] Bansal V, Mishra R, Agarwal GD, Mathur J. Performance analysis of integrated earth-air-tunnel-evaporative cooling system in hot and dry climate. *Energy Build* 2012;47:525–32.