

**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 de sciences de la matière



**Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en physique énergétique**

**Option: Modélisation et simulation en énergétique**

**Intitulé :**

***Etude numérique du rafraîchissement passif d'un  
habitat bioclimatique adapté à la zone aride,  
cas du site d'Adrar***

**Soutenu publiquement le 13/06/2016 par : HACINI Khaled**

**Devant le jury composé de :**

<b>Mr. Hammouda Messaoud</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ.Adrar</b>	<b>Président</b>
<b>Mr.Benatiallah Ali</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ.Adrar</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Mr. Kalloum Slimane</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ.Adrar</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. Bentouba Saïd</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ.Adrar</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. Hadjadj Ahmed</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ.Boumerdès</b>	<b>Examineur</b>

### Remerciements

*Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.*

*Notre gratitude est grande, en premier lieu envers mon encadreur, directeur de thèse, le professeur Benatiallah Ali de l'Université d'Adrar, 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.*

*Nos remerciements s'adressent particulièrement à Monsieur Djatout Ahmed Abdeldjabar attaché de recherche à l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieux sahariens(URERMS) d'Adrar pour ses encouragements, ses conseils et son aide , à lui et également à tout le personnel de l'URERMS pour leur accueil et leur gentillesse, en particulier monsieur khelifi pour son aide apportée durant l'élaboration de cette modeste contribution à la recherche scientifique en nous facilitant l'accès à l'information.*

*Mes vifs remerciements vont à Monsieur Hammouda Messaoud, professeur à l'université Ahmed Draïa d'Adrar, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de mémoire.*

*Je remercie vivement Monsieur Kalloum Slimane maître de conférence à l'université d'Adrar, Monsieur Bentouba Saïd maître de conférence à l'université d'Adrar et monsieur Hadjadj Ahmed maître de conférence à l'université de Boumerdès d'avoir accepté de juger ce document.*

*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 mon très cher fils Yassine, qu'Allah le guérisse.*

*A mon nouveau-né Mohammed*

*A ma femme*

*A ma sœur et mes frères*

*A mes neveux et mes nièces*

*A mon ami intime Mohamed Mezough de Beni Rached*

*A tous mes amis d'Adrar et de chlef*

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

*Je dédie ce travail*

**Titre :** Etude numérique du rafraîchissement passif d'un habitat bioclimatique adapté à la zone aride cas du site d'Adrar.

## Résumé

La région d'Adrar, région aride qui se situe au milieu du Sahara algérien, est l'une des régions les plus chaudes en Algérie avec un été qui dure longtemps (plus de 06 mois) et des températures maximales qui peuvent atteindre et parfois dépasser les 50°C pendant la journée.

Ce climat rude provoque le recours systématique à la climatisation ce qui cause un fort pic de consommation électrique et une saturation des réseaux électriques engendrant des coupures intermittentes d'électricité, des émissions de gaz polluants à l'environnement dues aux fuites des fluides frigorigènes caloporteurs sans oublier les nuisances sonores des compresseurs des climatiseurs.

Dans notre travail de recherche, nous allons aborder une étude numérique sur le rafraîchissement passif d'un habitat bioclimatique adapté à la zone d'Adrar. Pour cela nous allons faire recours à une simulation numérique pour déterminer les paramètres de rafraîchissement qui s'adaptent à la région aride du site d'Adrar afin de minimiser la consommation électrique croissante dans la wilaya et par la suite réduire l'impact environnemental.

**Mots clés :** simulation, habitat bioclimatique, géothermie, zone aride, échangeur air-sol

**Title :** Numerical study of the passive cooling of a bioclimatic housing adapted to the dry zone case of the site of Adrar.

## Abstract

The region of Adrar, the dry region, which is situated in the middle of Algerian Sahara is one of the hottest regions in Algeria with a summer which lasts for a long time ( more than 06 months) in which the maximal temperatures can achieve 50°C, or more sometimes, during the day.

This rough climate causes the systematic appeal(recourse) to the air conditioning what causes a strong peak of electric consumption in summer and a saturation of electricity networks engendering usual occasional power cuts, polluting gas emissions due to the flights(leaks) of refrigerants heat transfer fluids used without forgetting the noise pollutions of the compressors of air conditioners.

In our research, we will discuss a numerical study on passive cooling, a bioclimatic habitat suitable for the Adrar area. For this we will use numerical simulation to determine the refresh settings to suit the arid region of the Adrar region to minimize the increasing power consumption in the region and subsequently reduce the environmental impact.

**Keywords:** simulation, bioclimatic housing, geothermal, dry zone, air-to-ground heat exchanger

**العنوان :** دراسة رقمية للتبريد السلبي لمسكن بيئي في منطقة قاحلة حالة منطقة أدرار

## ملخص

منطقة ادرار، منطقة قاحلة تقع في وسط الصحراء الجزائرية، وهي من بين المناطق الأكثر حرارة في الجزائر بصيف يمتد لفترة زمنية طويلة (تتجاوز السنة أشهر) و درجات حرارة قصوى تبلغ وقد تتجاوز أحيانا 50 درجة مئوية خلال النهار.

هذا المناخ القاسي ينجم عنه اللجوء الاضطراري لاستعمال المكيفات الهوائية و هذا ما يسبب استهلاكا قياسيا للكهرباء وتشبعا للشبكات الكهربائية مولدا انقطاعات متكررة للكهرباء، انبعاث غازات ملوثة للمحيط ناجمة عن تسرب الموائع المستعملة في التبريد دون نسيان الضجيج الصوتي الصادر عن محركات هذه المكيفات الهوائية.

في هذا العمل، سنتناول دراسة بالحاكاة حول التبريد السلبي لمسكن بيئي يخص منطقة ادرار. لهذا سنلجأ لمحاكاة رقمية لتعيين وسائط التبريد التي تناسب منطقة ادرار القاحلة بهدف تخفيض الاستهلاك المتزايد للكهرباء بالولاية وبالتالي تخفيض الأثار المضرة بالبيئة.

**الكلمات المفتاحية :** محاكاة , مسكن بيئي، حرارة الأرض، منطقة قاحلة، مبادل هواء-تراب.



## Symboles latins

- $A_a$  : Amplitude des oscillations de la température de l'air ambiant [K]
- $A_g$  : Amplitude des oscillations du rayonnement global incident. [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $a$  : Constantes empirique :  $a=103$  [Pa/K].
- $abs$  : part du rayonnement global incident absorbée par le sol
- $a_s$  : Diffusivité thermique du sol [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ]
- $b$  : Constantes empiriques  $b = 609$  [Pa]
- $CEeq$  : Flux d'échange global [ $\text{W}.\text{m}^{-1}$ ]
- $c$  : Constantes empirique :  $c = 0,0168$  [K/Pa]
- $c_a$  : Capacité calorifique massique de l'air [ $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
- $c_m$  : Capacité thermique massique [ $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
- $c_s$  : Capacité calorifique massique du sol [ $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
- $c_t$  : Capacité calorifique massique du tube [ $\text{J}.\text{Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
- $D$  : Diamètre du tube de l'échangeur air-sol [m]
- $DH$  : Diamètre hydraulique de l'écoulement [m]
- $d$  : Profondeur de pénétration [m]
- $E$  : Efficacité moyenne de l'échangeur air-sol [-]
- $e_t$  : Épaisseur de la paroi du tube [m]
- $f$  : Coefficient de correction empirique, variant entre 0 et 1, caractéristique de la nature et de l'humidité du sol [-]
- $Geo(z)$  : Terme correctif de la température du sol provenant du manteau terrestre dans le sous-sol [K]
- $g$  : Gradient géothermique [K/m].
- $h$  : Coefficient d'échange par convection entre l'air et le tube [ $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
- $h_{cv}$  : Coefficient d'échange par convection entre l'air et le tube [ $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
- $he$  : Variable (Coefficient d'échange) intermédiaire de calcul [ $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
- $heq$  : coefficient d'échange équivalent [ $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
- $hr$  : Variable (Coefficient d'échange) intermédiaire de calcul [ $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
- $hs$  : Coefficient d'échange convectif au niveau de la surface du sol [ $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]
- $L$  : Longueur du tube de l'échangeur [m]
- $LE$  : flux de chaleur latente cédé à l'atmosphère. [ $\text{W}.\text{m}^{-1}$ ]
- $\dot{m}$  : Débit massique de l'air [ $\text{kg}.\text{s}^{-1}$ ]
- $Nu$  : Nombre de Nusselt [-]
- $p$  : Période des oscillations. [s]

**Pr** : Nombre de Prandtl [-]

q : Débit de l'air circulant dans l'échangeur air-sol [m<sup>3</sup>/h].

R : Résistance thermique surfacique [ m<sup>2</sup>.k/w]

**R<sub>cv</sub>** : Résistance thermique de convection entre l'air et le tube [k.w<sup>-1</sup>]

Re : Nombre de Reynolds [-]

**R<sub>t</sub>**: Résistance thermique du tube [k.w<sup>-1</sup>]

R<sub>th</sub> : Résistance thermique totale du tube [k.w<sup>-1</sup>]

**ra** : Humidité relative de l'air [-]

r<sub>ext</sub> : Rayon extérieur du tube [m]

r<sub>int</sub> : Rayon intérieur du tube [m]

SR : Flux de rayonnement incident absorbé [W.m<sup>-1</sup>]

T<sub>a</sub> : Température de l'air ambiant [°C]

$\bar{T}_a$  : Température moyenne de l'air ambiant

T<sub>a max</sub> : Température maximale de l'air ambiant [°C]

T<sub>a min</sub> : Température minimale de l'air ambiant [°C]

**T<sub>a</sub>** : Température de l'air [K]

**T<sub>a</sub>(x)** : Température de l'air à la distance x de l'entrée de l'échangeur [k]

T<sub>s</sub>(0,t) : Température de la surface du sol , au temps t [k]

**T<sub>s</sub>(z,t)** : Température du sol à la profondeur z, au temps t [k]

T<sub>ss</sub>(t) : Température de la surface du sol, au temps t [k]

T<sub>s</sub>(∞,t) : Température du sol à une profondeur infinie, au temps t [k]

$\bar{T}_s$  : Température moyenne de la surface du sol [K]

**t** : Le temps [s]

t<sub>0,g</sub> : Temps où le flux moyen est atteint pour la première fois durant l'année [s]

t<sub>0,T</sub> : Temps où la température moyenne est atteinte pour la première fois[s]

U : Coefficient de transmission surfacique [ w/( m<sup>2</sup>.k)].

v<sub>v</sub> : Vitesse du vent au niveau du sol [m.s<sup>-1</sup>]

v<sub>a</sub> : Vitesse de l'air [m.s<sup>-1</sup>]

x : La distance à partir de l'entrée de l'échangeur air-sol [m]

z : Profondeur sous la surface du sol [m]

## Symboles grecs

$\alpha$  : Diffusivité thermique du sol ( $m^2/s$ ).

$\alpha_a$  : Coefficient en fonction de la vitesse d'air [ ] .

$\alpha_s$  : Coefficient d'albédo de la surface du sol [-]

$\beta$  : Effusivité thermique en  $[J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}]$  .

$\Delta p$  : Différence de pression [Pa]

$\lambda$  : Conductivité thermique en  $w/(m.k)$

$\lambda_a$  : Conductivité thermique de l'air [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]

$\lambda_s$  : Conductivité thermique du sol [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]

$\lambda_t$  : Conductivité thermique du tube [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]

$\mu_a$  : Viscosité dynamique de l'air [ $kg.m^{-1}.s^{-1}$ ]

$\nu_a$  : Viscosité cinématique de l'air [ $m^2.s^{-1}$ ]

$\pi$  : Constante.  $\pi=3,14159265358$  [-]

$\rho$  : Masse volumique [ $kg.m^{-3}$ ]

$\rho_s$  : Masse volumique du sol [ $kg.m^{-3}$ ]

$\rho_a$  : Masse volumique de l'air [ $kg.m^{-3}$ ]

$\Phi$  : Flux du rayonnement global incident en  $w/m^2$

$\bar{\Phi}$  : Flux moyen du rayonnement global incident en  $w/m^2$

$\varphi_g$  : Déphasage du rayonnement global incident en rad.s

$\varphi_a$  : Déphasage (retard) de l'onde thermique (rad.)

$\omega$  : Pulsation des oscillations de la température [ $rad.s^{-1}$ ]

## Abréviations

APPRUE : agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie

CNERIB : centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment.

GES : gaz à effet de serre

MCP : matériau à changement de phase.

PVC : polychlorure de vinyle

VMC : ventilation mécanique contrôlée

Liste des tableaux et figures

1- Liste des tableaux

**Tableau I-1:** Propriétés thermo physiques de quelques matériaux de construction .....11

**Tableau I-2:** valeurs de conductivité thermique des principaux isolants ..... 12

**Tableau I-3 :** Epaisseur des différents matériaux pour un coefficient de transmission thermique  $U = 0,13 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  .....13

**Tableau I-4:** actions de rafraîchissements passifs dans un habitat bioclimatique .....28

**Tableau II-1:**émissions de  $\text{CO}_2$  de différentes énergies fossiles .....32

**Tableau III-1:** valeurs du coefficient d'échange équivalent .....58

**Tableau III-2 :** valeurs du coefficient de correction empirique.....59

**Tableau III-3:** données météorologiques du site d'Adrar.....64

**Tableau III-4:**propriétés du sol (limon argilo-sableux) du site d'Adrar.....64

2- Liste des figures

**Figure I-1:** pivots de l'architecture bioclimatique .....3

**Figure I-2:** interdisciplinarité de l'approche bioclimatique(Olgyay 1963).....4

**Figure I-3 :** stratégie de l'orientation dans un habitat bioclimatique.....5

**Figure I-4:**course du soleil selon la saison.....7

**Figure I-5:**différents type de protection solaires fixes.....8

**Figure I-6:**méthodologie de sélection des matériaux de construction.....9

**Figure I -7 :** Déphasage et amortissement de la température extérieure.....10

**Figure I-8:** quelques ordres de grandeurs de l'effusivité thermique.....11

**Figure I-9:**principe générale de la ventilation.....14

**Figure I-10:**schématisation de la ventilation mono-façade avec une seule ouverture.....16

<b>Figure I-11:</b> schématisation de la ventilation traversante.....	16
<b>FigureI-12:</b> solutions architecturales favorisant la ventilation traversante:.....	17
<b>Figure I-13:</b> schématisation de la ventilation traversante efficace.....	18
<b>Figure I-14 :</b> utilisation de la végétation dans la conception bioclimatique.....	19
<b>Figure I-15 :</b> phénomène d'évapotranspiration.....	20
<b>Figure I-16 :</b> eau et végétation dans la conception de l'habitat .....	20
<b>Figure I-17:</b> piliers du développement durable.....	21
<b>Figure I-18:</b> différents enjeux du développement durable.....	22
<b>Figure I-19:</b> différentes filières des énergies renouvelables. ....	24
<b>Figure I-20:</b> concepts de la stratégie du froid.....	27
<b>Figure II-1 :</b> disponibilité de différents types de géothermie à travers le monde .....	30
<b>Figure II-2 :</b> banc des essais expérimentaux de Moummi et al .....	37
<b>Figure II-3:</b> schéma de principe d'un échangeur air-sol.....	38
<b>Figure II-4:</b> pose des tubes du puits canadien.....	45
<b>Figure II-5:</b> bouche de prise d'air avec filtre.....	45
<b>Figure II-6:</b> schéma d'une ventilation VMC double flux.....	46
<b>Figure II-7:</b> schéma de gestion des condensats.....	48
<b>Figure II-8:</b> tube en méandre.....	51
<b>Figure II-9:</b> tube en boucle.....	51
<b>Figure II-10:</b> faisceau de tubes.....	52
<b>Figure III-1 :</b> Structure du calcul de la température du sol.....	54
<b>Figure III-2 :</b> schéma de l'échangeur air-sol modélisé .....	61
<b>Figure III-3 :</b> variation de la température de l'air dans un segment de l'échangeur .....	62

<b>Figure III-4</b> :signal de température de sol pour différentes profondeurs .....	65
<b>Figure III-5</b> :structure de la simulation de la température de l'air rafraîchissant .....	66
<b>Figure III-6</b> : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différents débits.....	66
<b>Figure III-7</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol le long de l'échangeur pour $q=130\text{m}^3/\text{h}$ .....	67
<b>Figure III-8</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol le long de l'échangeur pour $q=135.65\text{m}^3/\text{h}$ .....	68
<b>Figure III-9</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol le long de l'échangeur pour $q=155.43\text{m}^3/\text{h}$ .....	68
<b>Figure IV-1</b> : Efficacité de l'échangeur air-sol pour différents débits de l'air .....	69
<b>Figure IV-2</b> : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différents débits d'air .....	70
<b>Figure IV-3</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différents débits d'air .....	71
<b>Figure IV-4</b> : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différents diamètres du tube .....	72
<b>Figure IV-5</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différents diamètres du tube.....	72
<b>Figure IV-6</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différents débits ( $D=0.30\text{m}$ ).....	73
<b>Figure IV-7</b> : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes conductivités thermiques du tube .....	74
<b>Figure IV-8</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différentes conductivités thermiques du tube .....	74
<b>Figure IV-9</b> : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes longueurs d'échangeurs .....	75
<b>Figure IV-10</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différentes longueurs d'échangeurs .....	76

<b>Figure IV-10</b> : Evolution de la température le long de l'échangeur air-sol pour différentes profondeurs .....	76
<b>Figure IV-11</b> : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes profondeurs .....	77
<b>Figure IV-12</b> : Evolution de la température le long de l'échangeur air-sol pour différentes profondeurs.....	78
<b>Figure IV-13</b> : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes épaisseurs .....	78
<b>Figure IV-14</b> : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différentes épaisseurs .....	78

## Table des matières

Remerciement .....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	iii
Nomenclature.....	iv
Liste des tableaux et figures .....	vii

## Introduction générale .....1

### Chapitre I : Conception bioclimatique

I.1. Introduction.....	3
I.2 .Principes de l'architecture bioclimatique.....	5
I.2.1 orientation.....	5
I.2.2 fenêtres et vitrages.....	6
I.2.3 protections solaires.....	7
I.2.3.1 Protection solaire fixe.....	7
I.2.3.2 protections solaires mobiles.....	8
I.2.4. matériaux de construction .....	8
I.2.5. Inertie thermique des matériaux.....	9
I.2.5.1 Diffusivité thermique .....	10
I.2.5.2 Effusivité thermique .....	11
I.2.6. Isolation thermique.....	11
I.2.6.1 .conductivité thermique.....	12
I.2.6.2 .résistance thermique.....	12
I.2.7 Ventilation naturelle.....	13



I.2.7.1	Ventilation naturelle mono-façade.....	15
I.2.7.2	Ventilation naturelle traversante.....	16
I.2.7.3	Rafrâichissement par ventilation naturelle nocturne .....	18
I.2.8	Végétation et eau.....	18
I.2.9	Couleur.....	21
I.3.	bioclimatique et développement durable.....	21
I.3.1	Architecture durable.....	22
I.3.2	Principes de l'architecture durable.....	23
I.4	Bioclimatique et énergies renouvelables.....	23
I.4.1	Energie solaire.....	24
I.4.2	Energie éolienne.....	25
I.4.3	Energie hydraulique.....	25
I.4.4	Energie de la biomasse.....	25
I.4.5	Energie géothermique.....	26
I.5	Confort thermique.....	26
I.6.	Conclusion.....	26
<b>Chapitre II : Généralités sur la géothermie</b>		
II.1.	Introduction.....	29
II.2.	Q'est-ce que le géothermie.....	29
II.2.1.	Les types de la géothermie.....	30
II.2.1.1.	La géothermie haute énergie.....	30
II.2.1.2.	La géothermie moyenne énergie.....	31
II.2.1.3.	La géothermie basse énergie.....	31

II.2.1.4.La géothermie très basse énergie.....	31
II.2.2.Impact environnemental de la géothermie.....	32
II.3.Etat de l'art du système de rafraîchissement passif.....	32
II.4.Principe de fonctionnement d'un échangeur air-sol.....	37
II.5.paramètres de dimensionnement du système de rafraîchissement.....	39
II.5.1.Débit d'air nécessaire.....	39
II.5.2. Longueur des tubes.....	39
II.5.3.Nombre et diamètre des tubes.....	40
II.5.4.Distance entre tubes.....	41
II.5.5. Profondeur d'enfouissement des tubes.....	41
II.5.6. Nature du sol et le taux d'humidité.....	41
II.5.7.Vitesse de l'air dans les tubes.....	42
II.5.8.Rugosité intérieure des tubes.....	42
II.5.9.Géométrie de l'échangeur.....	43
II.5.10.Rayonnement solaire.....	43
II.5.11.Propriétés physiques des canalisations.....	43
II.5.12.Influence de la présence d'un bâtiment proche.....	43
II.5.13.Influence de la présence d'une nappe phréatique proche.....	44
II.5.14.Humidité de l'air.....	44
II.6.Installation du système de rafraîchissement.....	44
II.6.1.place disponible pour l'enfouissement du conduit et coût.....	44
II.6.2.Prise d'air.....	45
II.6.3.Ventilation et diffusion de l'air.....	46
II.6.4. système de ventilation.....	47
II.6.5.Gestion des condensats et des infiltrations d'eau.....	47
II.6.6. Qualité de l'air.....	48
II.6.7.Risques liés au radon.....	49
II.6.8.Matériau constitutif des tubes.....	50
II.6.9.Disposition des tubes.....	50
II.7.Conclusion.....	52

## **Chapitre III : Modélisation et simulation du système de rafraîchissement**

III.1.Introduction.....	53
III.2. Modèle thermique du sol.....	53
III.3.Modèle thermique de l'échangeur air-sol.....	60
III.3.1.Description du système de rafraîchissement passif.....	60
III.3.2.Température de l'air le long de l'échangeur.....	61
III.4.Simulation.....	63
III.4.1.Données météorologiques de la ville d'Adrar.....	64
III.4.2.Température du sol.....	64
III.4.3.Température de l'air sortant du système de rafraîchissement.....	65
III.4.4.Validation des résultats .....	66

## **Chapitre IV: Résultats et discussions**

IV.1.Introduction.....	69
IV.2. Efficacité du système de rafraîchissement.....	69
IV.3.Influence de différents paramètres sur le système de rafraîchissement.....	70
IV.3.1. Influence du débit de l'air .....	70
IV.3.2.Influence du diamètre .....	71
IV.3.3.Influence de la conductivité thermique.....	73
IV.3.4. Influence de la longueur .....	75
IV.3.5.Influence de la profondeur d'enfouissement.....	76
IV.3.6.Influence de l'épaisseur.....	78
IV.4.Conclusion .....	80

## **Conclusion générale.....81**

Bibliographie.....	83
Annexe 1.....	87
Annexe 2.....	88

# Introduction générale

## Introduction générale :

La crise énergétique des années soixante-dix causant l'augmentation des prix des hydrocarbures a montré la fragilité de la dépendance mondiale aux énergies fossiles. Cette dernière décennie et notamment après la canicule de l'été 2003 en Europe, la consommation énergétique ne cesse d'augmenter suite à la forte utilisation de la climatisation pour satisfaire une demande accrue de confort thermique due aux températures très élevées.

Depuis, la question énergétique constitue l'une des principales préoccupations mondiales car la situation énergétique et environnementale devient inquiétante. Un des défis majeurs à l'heure actuelle est la gestion des ressources fossiles naturelles épuisables et polluantes. Ces ressources provoquent une pollution thermique à la surface de la terre due au réchauffement climatique causée par les gaz à effet de serre rejetés, tel que le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, ce qui a profondément modifié l'écosystème dans lequel nous vivons. La limitation des émissions de gaz à effet de serre pour réduire les risques du réchauffement climatique et protéger l'écosystème dans lequel nous vivons est une nécessité urgente.

Au niveau mondial, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) représente de 30 à 40% de la consommation d'énergie et une forte part des impacts environnementaux d'origine anthropique [1]. Un enjeu énergétique primordial pour ce secteur, premier consommateur d'énergie, exige en urgence une utilisation rationnelle des ressources traditionnelles et l'application des technologies d'énergies renouvelables non polluantes, inépuisables et qui permettent un développement durable.

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 d'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.

Le sud algérien, une immense région aride, est caractérisé par un climat sec et chaud. Durant la dernière décennie une forte demande de confort d'été, une principale exigence pour le bon

comportement moral et physique pour la personne, a été observée suite à des vagues de chaleur étouffante. Le recours excessif à la climatisation et à la ventilation électrique pour créer des ambiances de confort à l'intérieur des constructions engendre souvent des pics de consommations électriques et par la suite des coupures intermittentes d'électricité.

Face à cette situation de croissance rapide de l'utilisation de la climatisation pendant la saison estivale qui dure longtemps, deux possibilités existent pour limiter les dépenses énergétiques et les appels de puissances électriques qui y sont liées [3] :

- actions sur l'enveloppe des bâtiments.
- utilisation des systèmes de rafraîchissement passif.

De nombreuses solutions de rafraîchissement passif existent pour améliorer les conditions de confort thermique estival intérieur sans système de climatisation ou au moins réduire très fortement les besoins de refroidissement (ventilation naturelle, climatisation solaire, échangeur air-sol ...)

Nous nous intéressons dans notre travail au rafraîchissement passif d'un habitat bioclimatique dans le site d'Adrar par géothermie à très basse température en faisant une étude numérique d'un système de rafraîchissement dit échangeur air-sol.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la conception bioclimatique dans lequel on aborde les principes de l'architecture bioclimatique, la relation entre l'habitat bioclimatique et le développement durable.

Dans le deuxième chapitre, on présente des généralités sur la géothermie ; un état de l'art des échangeurs air-sol, les paramètres de leur dimensionnement et leur mise en œuvre technique.

Le chapitre trois présente la modélisation mathématique thermique de l'échangeur air-sol qui passe par l'utilisation de deux modèles distincts ; un modèle thermique de sol, capable de calculer, à tout instant et en tout point, la température du sol et un modèle thermique d'échangeur air-sol, calculant la température de l'air en sortie d'échangeur en fonction de la température de l'air en entrée d'échangeur et de la température du sol.

Le chapitre quatre présente les résultats et les discussions.

Enfin, dans une conclusion générale, nous concluons en synthétisant nos résultats.

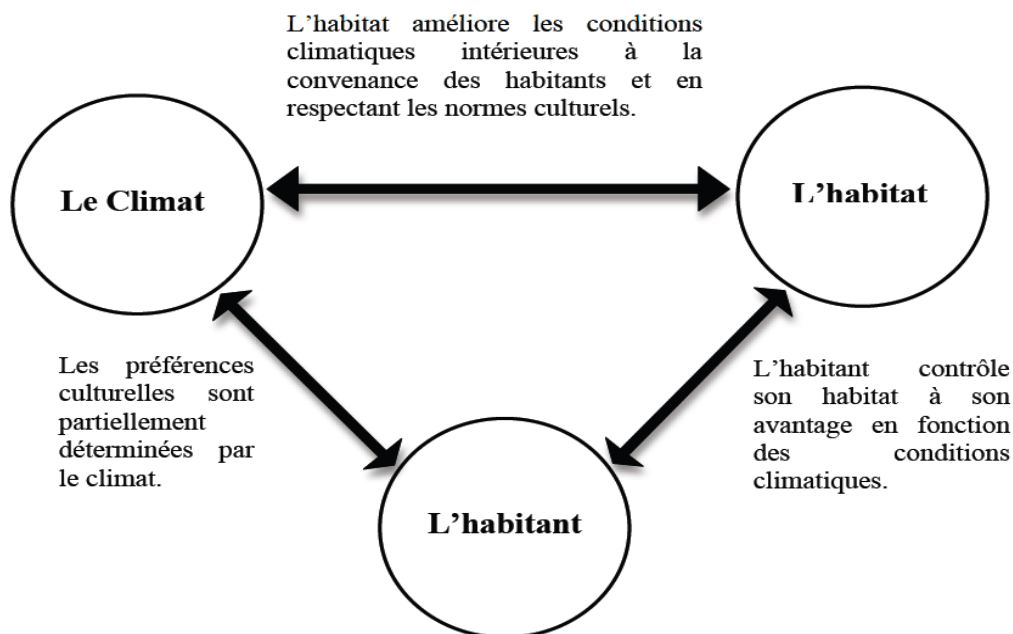
# Chapitre I

## Conception bioclimatique

### I-1. Introduction :

L'architecture bioclimatique n'est pas nouvelle, elle s'inspire de principes très anciens des maisons et habitats vernaculaires. Redécouverte au début des années soixante –dix suite au premier choc pétrolier, ce choc a relancé l'intérêt pour l'architecture bioclimatique.

Le concept bioclimatique fait référence à la bioclimatologie qui est une partie de l'écologie. Elle étudie plus particulièrement les relations entre les êtres vivants et le climat. Elle vise principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière « naturelle » c'est-à-dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables, les effets pervers sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et de fonctionnement. L'intérêt du bioclimatique va donc du plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui fait un élément fondamental de l'art de construire [4].

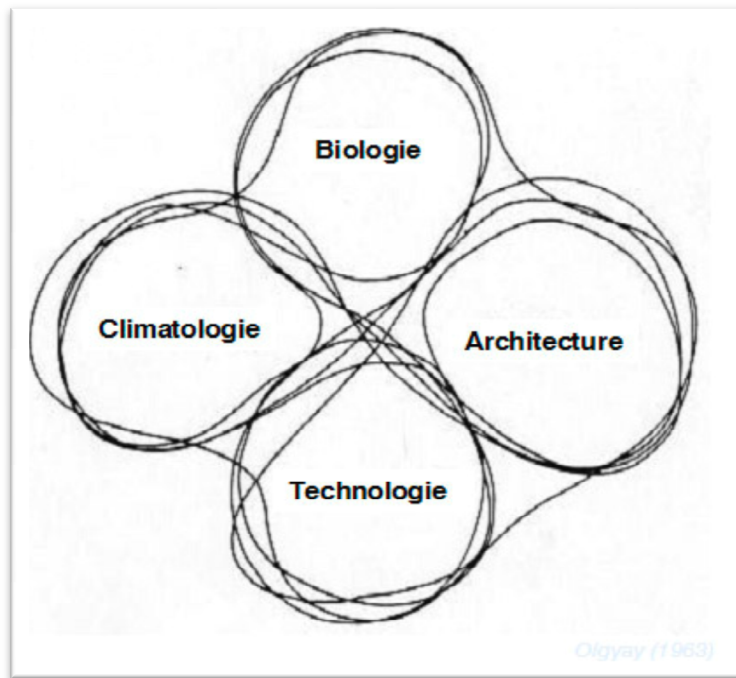


**Figure I-1:** pivots de l'architecture bioclimatique [5].

L'architecture bioclimatique consiste à adapter le bâtiment aux conditions d'ambiances locales (climatiques et visuelles) du milieu géographique, socioculturel et même économique, également à concevoir une ordonnance qui diminue ses besoins de chauffage en hiver et de maintenir une température agréable en été. Son objectif est, donc, d'économiser le plus d'énergie possible grâce à l'architecture de l'habitat adaptée au climat (figure I-1).



Un habitat bioclimatique est une construction dans lequel on cherche la meilleure adéquation entre un site ,le mode de vie des habitants et le climat afin de réduire aux maximum les besoins d'apports énergétiques pour le chauffage et la climatisation .Selon Olgyay (1962) cette symbiose entre l'habitat et son environnement est possible si le concepteur sait maîtriser l'interaction des variables climatiques, biologiques, technologiques et architecturales (figure I-2) [6],[7]



**Figure I-2:** interdisciplinarité de l'approche bioclimatique (Olgyay 1963) [6].

Dans les années quatre-vingt, une nouvelle conception de l'architecture bioclimatique se développa. Avant les objectifs environnementaux étaient plutôt avant-gardistes. Aujourd'hui, la conception architecturale bioclimatique s'inscrit dans la problématique contemporaine liée à l'aménagement harmonieux du territoire et à la préservation du milieu naturel .pour cela ,il faut veiller à [8] :

- préserver les ressources énergétiques fossiles conventionnelles en voie de disparition.
- réduire les couts d'investissements énergétiques, notamment en matière de chauffage et de climatisation.
- réduire l'impact des énergies fossiles sur l'environnement et le dérèglement climatique.
- éviter d'être des acteurs de la ruine et garantir un avenir à nos enfants et nos petits enfants.

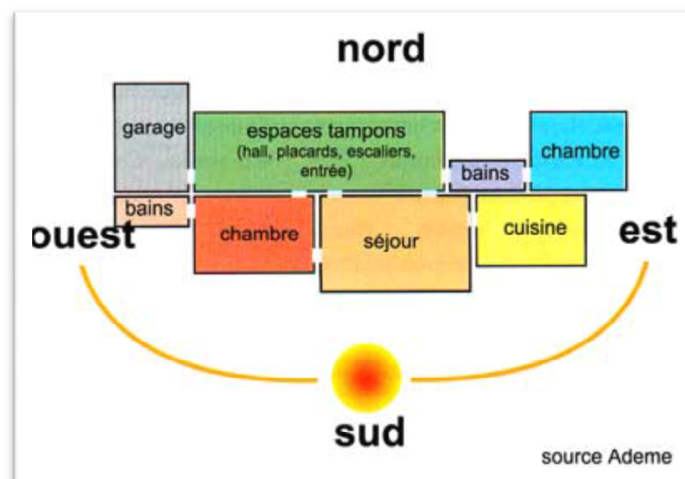
## I-2. Principes de l'architecture bioclimatique :

L'architecture bioclimatique utilise et combine les moyens les plus intelligents de la construction, des plus anciens au plus modernes .elle fait appel à des procédés passifs et ne requiert pas de techniques particulières pour que l'habitat s'autorégule aussi bien en hiver qu'en été.

L'architecture bioclimatique qui tire le meilleur parti des conditions d'un site et de son environnement et qui s'inscrit dans une démarche de développement durable se base sur les principes suivants :

### I-2.1. Orientation :

La conception d'un habitat bioclimatique, son implantation et son orientation influent notablement sur son comportement thermique ,en été ou en hiver. Pendant l'été,il s'agit de limiter les apports solaires et d'évacuer la chaleur alors que pendant l'hiver ,il convient de profiter au maximum des apports solaires et de se protéger des vents dominants .pour cela ,il est préférable d'avoir une exposition principale sud à toute autre exposition . en outre ,une exposition sud apporte évidemment un éclairage satisfaisant .la maison étant éclairée naturellement pendant de longues heures de la journée ce qui garantit en plus une économie d'éclairage .



**Figure I-3** : stratégie de l'orientation dans un habitat bioclimatique (source ADEME) [9].

Les pièces occupées en permanence durant la journée (séjour, salon, bureau ...) devraient de préférence être orientées au sud en profitant du lever du soleil et garderont ainsi leur fraîcheur en fin de journée. Les espaces tampons (entrée, garage, débarras, buanderie, salle de bain ...) peu ou non chauffés, généralement sans fenêtres ou peu vitrés, n'ont pas besoin d'avoir une température confortable seront disposés de préférence côté nord. La cuisine sera plutôt située au sud-ouest, voire même au nord pour éviter les surchauffes dues à la préparation des plats.

### **I.2.2. Fenêtres et vitrages :**

La fenêtre est le composant de l'habitat bioclimatique qui s'est développée le plus rapidement et le plus efficacement à cause de ses multiples fonctions : outre ses qualités d'isolation, elle doit permettre la vue vers l'extérieur, être ouvrable et pouvoir se fermer parfaitement, et en plus elle doit aussi capter un maximum d'énergie solaire [9]. Donc, une bonne conception des ouvertures d'un habitat bioclimatique doit tenir compte à la fois l'éclairage, la chaleur et la fraîcheur.

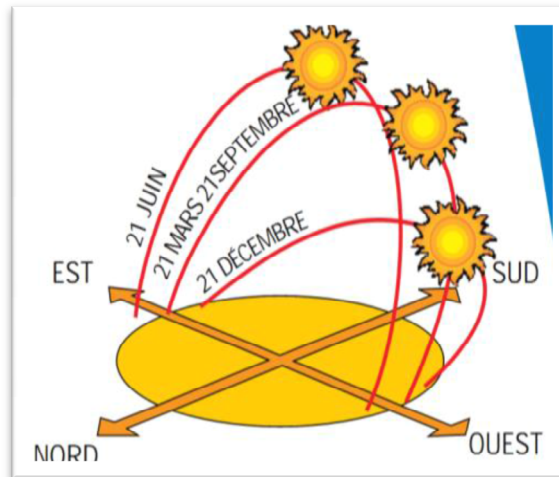
Il est préférable de placer de grandes fenêtres au sud pour capter plus d'énergie pendant l'hiver. Le type du vitrage et sa proportion à la surface totale du mur sont très importants pour créer un confort intérieur désirable. Une surface vitrée au sud de 15 à 50% de la façade permet de réduire la facture de chauffage de 20% dans le nord de l'Algérie [9]. Maintenir les persiennes fermées au moment d'ensoleillement durant l'été rend la charge de climatisation négligeable. Une dimension réduite des fenêtres à l'est, l'ouest et particulièrement au nord entraîne des entrées d'air froid en hiver et minimise la pénétration du rayonnement solaire. Pour le confort d'été, il est recommandé d'ombrer les ouvertures avec des protections solaires qui empêchent l'insolation directe des ouvertures tout en laissant passer la lumière.

### **I.2.3. Protections solaires :**

En été, le rayonnement solaire traverse les surfaces vitrées et les ouvertures (fenêtres et portes) augmentant ainsi la charge thermique de l'habitat. Différents dispositifs de protection solaires permettent de réduire cet impact en bloquant les rayons du soleil mais en les laissant atteindre les vitrages et les ouvertures en hiver. Le dimensionnement de ces protections se fait grâce à des diagrammes qui décrivent la course du soleil (figure I-4) au cours de la journée et pour toute l'année [10].

Un habitat mal protégé du soleil, pendant l'été, est le siège de surchauffes, donc de conditions thermiques inconfortables. La conception de protection estivale efficace est fondamentale pour

qu'un habitat soit performant du côté thermique et énergétique. Les protections solaires s'intègrent structurellement à l'architecture de l'habitat par des porches, vérandas, brise-soleil, débords de toitures où s'appliquent à l'enveloppe (stores, persiennes, volets ...) [11].



**Figure I-4:** course du soleil selon la saison [10]

Dans des régions arides, on utilise des protections à la fois pour vaincre du soleil intense et des vents froids, mais également pour vaincre sable et poussière.

Plusieurs types de protections solaires existent ; fixes et mobiles. La végétation peut servir aussi à la protection solaire de l'habitat bioclimatique. L'efficacité de toute protection solaire dépend de sa typologie, de son orientation et de la période de l'année.

### **I.2.3.1. Protection solaire fixe :**

L'avantage des protections fixes est l'indépendance de leur effet des actions des utilisateurs. Comme les protections solaires fixes sont différentes selon la position du soleil, leur dimensionnement est nécessaire pour une bonne efficacité. Les plus usuelles sont l'auvent, le flanc et le loggia (figure I-5).



**Figure I-5:** différents type de protection solaires fixes

### **I.2.3.2. Protections solaires mobiles :**

Il existe des protections solaires mobiles disposées du côté extérieur de la fenêtre tel que les stores (vénitiens, enroulables, à lamelles ...). Elles permettent une protection solaire en été et des apports solaires en hiver.

D'autres protections solaires mobiles sont disposées du côté intérieur, elles permettent d'éviter le rayonnement solaire direct sur une personne. Elles sont bénéfiques en hiver mais pas efficaces en été puisque le rayonnement solaire entrant dans la pièce se transforme en chaleur.

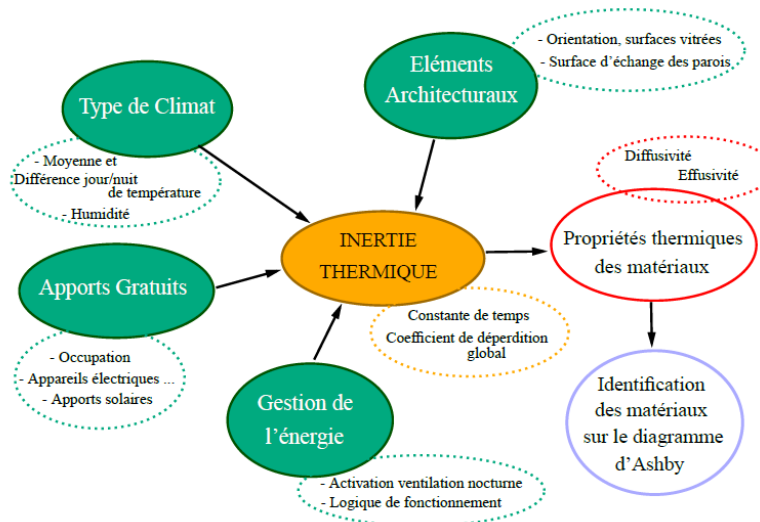
### **I.2.4. Matériaux de construction :**

Les propriétés des matériaux utilisés pour les murs, le sol, le plafond et les fenêtres ont une influence directe sur la consommation d'énergie dans un habitat. Le choix des matériaux se fait en fonction de ceux qui sont disponibles à proximité. Ils sont particulièrement adaptés au climat et le cout de construction sera limité [12] :

- les constructions en pierre locale sont ainsi adaptées au climat à forte variation de température journalière.
- les constructions en bois permettront une rapide montée en température du bâtiment particulièrement adaptées au climat dont l'hiver est très rigoureux (climat de montagne)
- les constructions en terre crue ou sable permettent d'accumuler de fortes radiations solaires et montées en température et ainsi limiter les risques de surchauffes.

La terre crue est un matériau de construction utilisé pour son inertie. Il s'agit également d'un matériau qui peut se charger fortement en vapeur d'eau ; elle se condense lorsque le mur est froid (en libérant de la chaleur) pour se réévaporer lorsque la température augmente. Cet aspect permet donc de faire de la terre crue un matériau doublement intéressant pour le rafraîchissement passif [13].

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



**Figure I-6:** méthodologie de sélection des matériaux de construction [14]

Actuellement la majorité des travaux des systèmes passifs sont orientés sur :

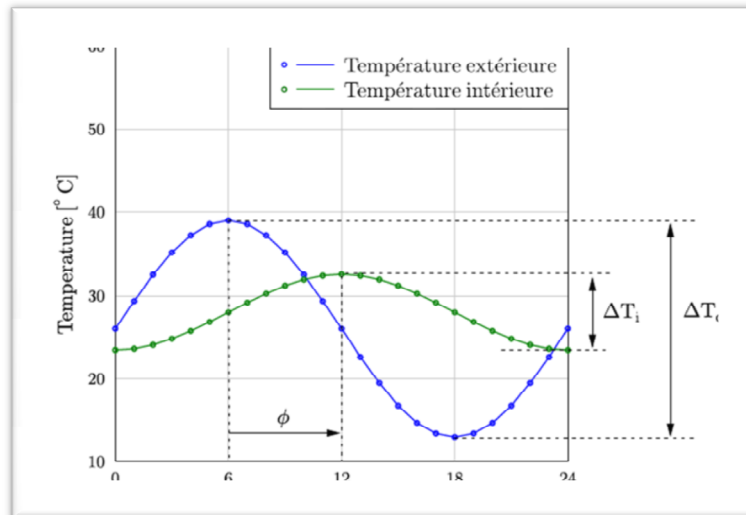
- l'utilisation de MCP intégrés à l'enveloppe des bâtiments pour des applications de chauffage.
- l'intégration de MCP à l'enveloppe de bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer le confort d'été.

### 1.2.5. Inertie thermique des matériaux :

La notion d'inertie thermique est généralement définie comme étant la vitesse avec laquelle le bâtiment réagit à des perturbations extérieures [14]. La forte inertie permet à l'habitat de se réchauffer ou de se refroidir très lentement ainsi une régulation naturelle de la température de l'habitat. L'inertie thermique évite les surchauffes et les chutes trop brutales de températures. Elle est source de confort en été comme en hiver.

En été, plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus la température maximale atteinte est faible et plus les variations de température jour/nuit sont faibles. L'inertie thermique permet donc de lisser les flux thermiques et les températures extrêmes. Elle garantit un meilleur confort en accumulant la chaleur au cours de la journée et en l'évacuant la nuit par la ventilation.

En hiver, l'inertie thermique accompagnée d'une isolation performante permet d'emmagasiner les apports gratuits issus du rayonnement solaire et contribue à les conserver plus longtemps à l'intérieur de l'habitat ce qui réduit les consommations énergétiques liées aux chauffages [14].



**Figure I-7:** Déphasage et amortissement de la température extérieure [14]

L'inertie thermique de l'habitat dépend en grande partie des propriétés thermiques des matériaux qui le constituent : la conductivité thermique, la capacité thermique, la masse volumique, la surface d'échange. Deux notions physiques sont associées à cette inertie : la diffusivité et l'effusivité. Elles désignent la capacité des matériaux à stocker et à véhiculer la chaleur [14].

### I.2.5.1. Diffusivité thermique :

La diffusivité thermique traduit la vitesse de propagation d'un flux de chaleur dans un matériau, c'est-à-dire, décrit la rapidité du déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau. Elle se mesure en mètre carré par seconde ( $m^2/s$ ). elle est calculé par la relation :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (\text{I.1})$$

Le tableau (I.1) donne les propriétés thermophysiques de quelques matériaux de constructions

**Tableau I.1 :** Propriétés thermophysiques de quelques matériaux de construction [14]

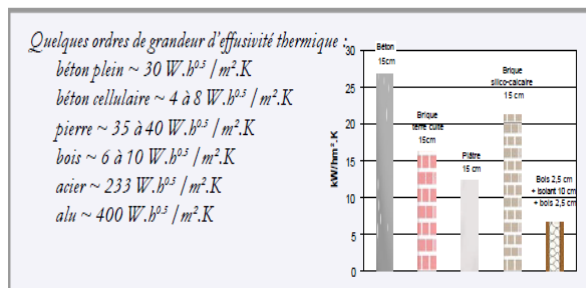
Matériaux de construction	$\lambda$ (W/m.K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c$ (J/kg.K)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)
Béton lourd	1.7	2200	1000	7.72 x 10 <sup>-7</sup>
Béton léger	1.0	1500	1000	6.77 x 10 <sup>-7</sup>
Bloc pierre	1.4	1895	1000	7.38 x 10 <sup>-7</sup>
Brique pleine	1.0	1850	1000	5.4 x 10 <sup>-7</sup>
Bois lourd (hêtre, chêne)	0.2	800	2700	9.25 x 10 <sup>-8</sup>
Bois léger (sapin, épicéa)	0.14	540	2400	1.08 x 10 <sup>-7</sup>
Granite	2.8	2600	1000	1.07 x 10 <sup>-6</sup>

**I.2.5.2. Effusivité thermique :**

L’effusivité thermique traduit la capacité du matériau à absorber de l’énergie et la restituer. Elle se mesure en J·K<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1/2</sup>. Elle est calculée par la relation :

$$\beta = \sqrt{\lambda \rho c} \tag{I.2}$$

Elle décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur.



**Figure I-8:** quelques ordres de grandeurs de l'effusivité thermique [16]

**I.2.6. Isolation thermique :**

L’isolation joue toujours un rôle bénéfique ;en hiver ,elle ralentit la fuite de la chaleur de l’habitat vers l’extérieur. En été au contraire, elle rafraichit l’habitat en limitant les apports de chaleur .l’isolation évite également les condensations très désagréables .tout isolant installé participe à la préservation de l’environnement car il permet des économies de chauffage en hiver, voir de climatisation en été et réduit donc le retour aux énergies non renouvelables.



L'isolation permet de diminuer les apports de chaleur par les parois, mais pour cela elle doit être mise en œuvre par l'extérieur et être couplé à de la ventilation et de l'inertie .si l'isolation est à l'extérieur, le chaud peut rentrer mais reste stocké à l'intérieur car il ne peut plus ressortir .l'isolation par l'extérieur limite également les ponts thermiques et permet de conserver l'inertie des murs [10].

Les principaux paramètres thermophysiques qui caractérisent les matériaux isolant sont la conductivité thermique et la résistance thermique.

### I.2.6.1. Conductivité thermique :

Chaque matériau est caractérisé par un coefficient appelé conductivité thermique de symbole ( $\lambda$ ). Ce coefficient donne la capacité du matériau à transmettre la chaleur par conduction .les matériaux bons conducteurs de chaleur ont des valeurs grandes de  $\lambda$  tandis que les matériaux isolants ont des valeurs petits. La conductivité thermique  $\lambda$  se mesure w/m. k. le tableau (I-2) donne les valeurs de la conductivité thermique des principaux matériaux isolants.

**Tableau (I.2):** valeurs de conductivité thermique des principaux isolants [15].

Isolant	Conductivité $\lambda$ (W/m °C)	Isolant	Conductivité $\lambda$ (W/m °C)
Laine de roche	0.038 – 0.047	Polystyrène expansé	0.036 – 0.058
Laine de verre	0.037 – 0.051	Polystyrène extrudé	0.029 – 0.036
Laine de silice	0.03 – 0.04	Mousse rigide de	
Fibres de bois	0.06 – 0.067	polyuréthane	0.033
Fibres de poly stère	0.05	Perlite	0.035 – 0.045
Laine de mouton	0.041	Vermiculite	0.058
Béton cellulaire	0.16 – 0.33	Liège	0.044 – 0.049
		Aérogel de silice	0.005      0.017

### I.2.6.2. Résistance thermique :

La résistance thermique surfacique d'un matériau est le rapport de l'épaisseur du matériau à sa conductivité thermique .elle est donnée par la relation :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (I-3)$$

$e$  : épaisseur du matériau en mètre

$\lambda$  : conductivité thermique en  $W/(m.k)$

$R$  : résistance thermique en surfacique  $(m^2.k)/W$

L'isolation thermique d'un matériau est caractérisée par le coefficient de transmission surfacique  $U$  qui s'exprime en  $W/(m^2.k)$ . il est calculé par la relation

$$U = \frac{\lambda}{e} \quad (I-4)$$

Il est l'inverse de la résistance thermique. Plus ce coefficient n'est faible, plus le matériau ou la paroi est performante. Le  $U$  moyen de l'enveloppe du bâtiment doit être inférieur à  $0.15 W/(m^2.k)$ , La valeur de  $0.1 W/(m^2.k)$  est conseillé pour respecter les standards de la maison écologique .

Pour  $U=0.13 W/(m^2.k)$ , le tableau(I-3) donne les épaisseurs des différents matériaux .les matériaux se situant en bas du tableau sont acceptables comme isolants .

**Tableau (I.3) :** Epaisseur de différents matériaux pour un coefficient de transmission thermique

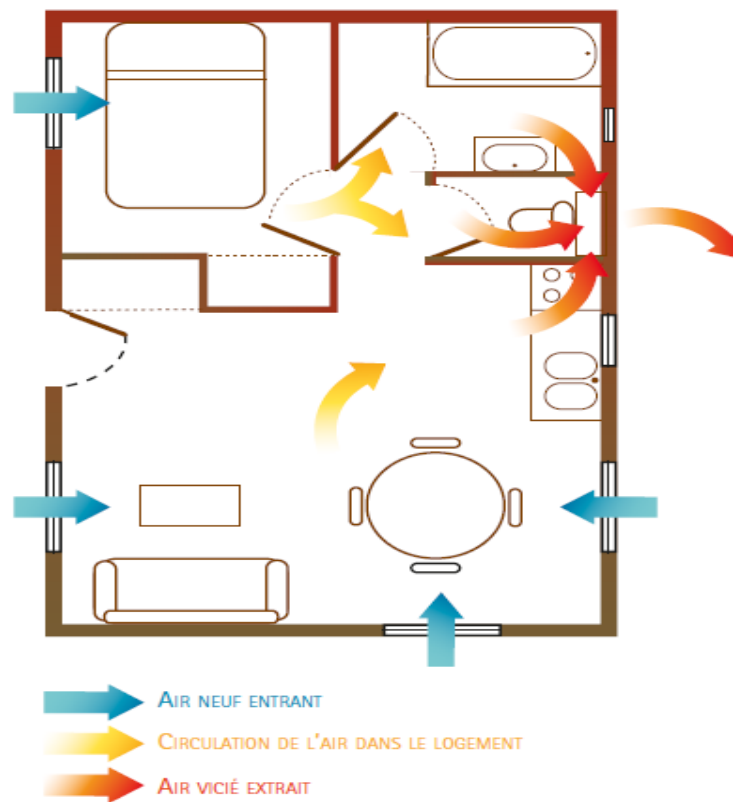
$$U = 0,13 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} [9]$$

Matériau	$\lambda$ Conductivité thermique en $W/m.K$	Epaisseur en mètre pour $U=0.13 \text{ W}/(m^2.K)$
Béton ordinaire	2.100	15.80
Brique	0.800	6.02
Brique aérée	0.400	3.01
Bois de résineux	0.130	0.98
Brique isolante	0.110	0.83
Paille	0.055	0.410
Isolant conventionnel (Laine de verre, cellulose, polystyrène.....)	0.040	0.300
Isolant plus performant (Mousse de polyuréthane)	0.025	0.188
Panneau isolant sous vide	0.015	0.113
	0.008	0.060

### I.2.7. Ventilation naturelle:

On parle de ventilation naturelle quand le renouvellement d'air est provoqué par des forces naturelles qui reposent sur les effets du vent et les variations de la densité de l'air dues aux

différences de températures à travers des ouvertures en l'absence de dispositifs mécaniques. Elle est considérée comme principe de rafraîchissement passif.



**Figure I-9** : principe générale de la ventilation [18]

La ventilation naturelle est utilisée dans une approche bioclimatique, une approche qui permet de profiter du potentiel des forces de la nature afin de créer de meilleures conditions de vie dans l'habitat. Elle est primordiale pour procurer l'air frais nécessaire aux occupants, garantir les besoins en oxygène, limiter la pollution intérieure, évacuer la vapeur d'eau et uniformiser la température intérieure d'une sensation de confort thermique.

Nous passons en général de 70 à 90% de notre temps dans des espaces clos alors que les sources de pollution sont multiples (composés chimiques, tabac, produits d'entretien, composés organiques volatils résultants des matériaux de construction et des éléments de décoration, les animaux et les plantes biocontaminants ...). Ces polluants ont un impact direct sur la santé des occupants [18].

La ventilation naturelle est le moyen le plus simple pour purifier l'air. La circulation de l'air dans l'habitat doit respecter un schéma bien défini ; la ventilation s'opère par balayage depuis les entrées d'air dans les pièces principales (séjour, chambre), jusqu'à la sortie d'air dans les pièces de service (cuisine, salle de bain, w-c, ...). Cette règle empêche le passage des polluants dans les pièces les plus saines. Les systèmes de ventilation doivent satisfaire à des exigences d'hygiène, de confort, de respect de l'environnement et d'économie d'énergie. La ventilation est au service de trois fonctions principales [19] :

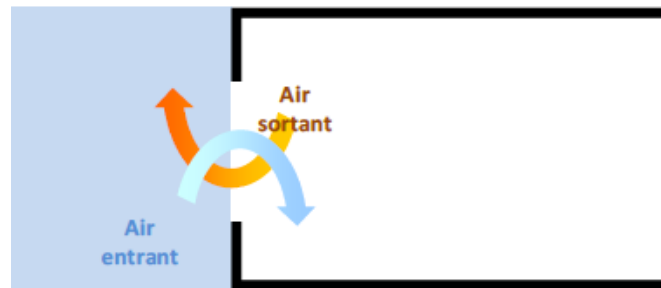
- La ventilation a un rôle hygiénique qui consiste à maintenir une bonne qualité de l'air intérieur. Il s'agit essentiellement de prévenir l'accumulation de polluants gazeux et d'odeurs désagréables au sein de l'habitat.
- La ventilation a un rôle d'entretien qui sert à éviter ou d'éliminer la condensation de la vapeur d'eau sur les parois. Elle permet d'atteindre cet objectif de pérennité du bâti en remplaçant l'air humide par de l'air moins humide. Cette fonction est étroitement liée à la ventilation d'hygiène.
- Le troisième rôle est l'obtention d'un confort d'été en favorisant les échanges thermiques convectifs et évaporatifs. L'augmentation du renouvellement d'air permet d'accroître les échanges avec l'air extérieur et de refroidir le bâtiment lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à celle de l'air intérieur. Le renouvellement d'air doit être limité quand les températures s'inversent.

La ventilation mono-façade, la ventilation traversante sont deux types de ventilation couramment utilisés.

### **I.2.7.1. Ventilation naturelle mono-façade :**

C'est le mode de ventilation le plus simple, il consiste en l'aération d'un espace sur une seule façade permettant à l'air extérieur d'accéder et à l'air intérieur de sortir par la même ouverture ou par une autre ouverture située sur le même mur de façade. La même ouverture sert à la fois comme entrée et sortie d'air. Le sens de l'écoulement est plus difficile à définir, étant donné la possibilité de recirculation et de mélange entre l'air entrant et l'air sortant. Les fenêtres doivent être hautes, ou être munies d'ouvertures en bas ou en haut de la façade, pour favoriser l'établissement d'un tirage

thermique qui permettra à l'air extérieur plus frais d'entrer par les entrées basses et à l'air intérieur de s'extraire par les orifices hauts. Par ailleurs les différences de pression dues au tirage thermique et au ventilation sont réduites à cause de la proximité des zones d'entrées et de sorties de l'air. Les débits de ventilation sont généralement inférieurs à ceux générés par la ventilation traversante.

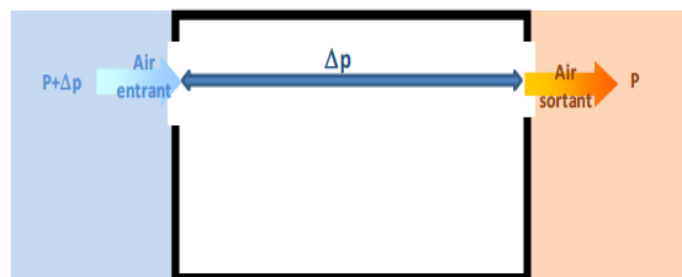


**Figure I-10:** schématisation de la ventilation mono-façade avec une seule ouverture [20],[21]

Le premier avantage de la ventilation mono-façade est que l'application de cette stratégie de ventilation ne demande pas une conception architecturale particulière mais peut s'appliquer à tous les bâtiments à condition que les différentes pièces soient compartimentées. Par ailleurs, la ventilation mono-façade de chaque pièce est indépendante et le réglage est beaucoup plus simple.

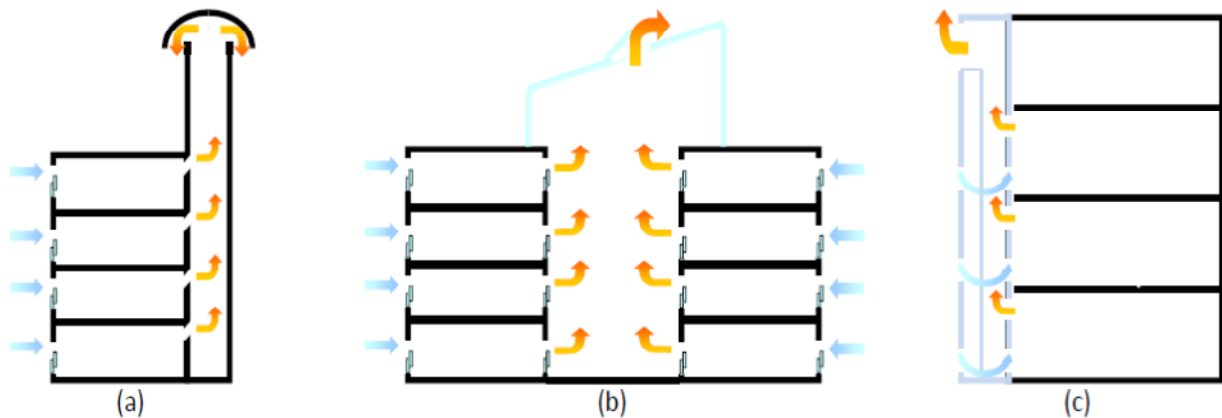
### I.2.7.2. Ventilation naturelle traversante

Dans une ventilation traversante, les ouvertures sont disposées sur deux côtés opposés. Il existe une différence de pression entre les deux ouvertures causée par le vent et/ou par la différence de température entre les deux côtés. Par conséquent s'il n'y a pas d'obstruction importantes à l'écoulement (comme des portes fermées), l'entrée de l'air se fait par les ouvertures du côté en surpression et la sortie par les ouvertures en sous pression.



**Figure I-11:** schématisation de la ventilation traversante [20]

Typiquement, un habitat utilisant cette stratégie de ventilation nécessite d'être conçu de façon particulière, afin de profiter au mieux de l'effet du vent et l'effet thermique. Les configurations les plus courantes font usage d'une cheminée thermique, d'un atrium ou d'une façade double peau avec des ouvertures au sommet (figure I.12), afin de profiter de l'effet cheminée [20].



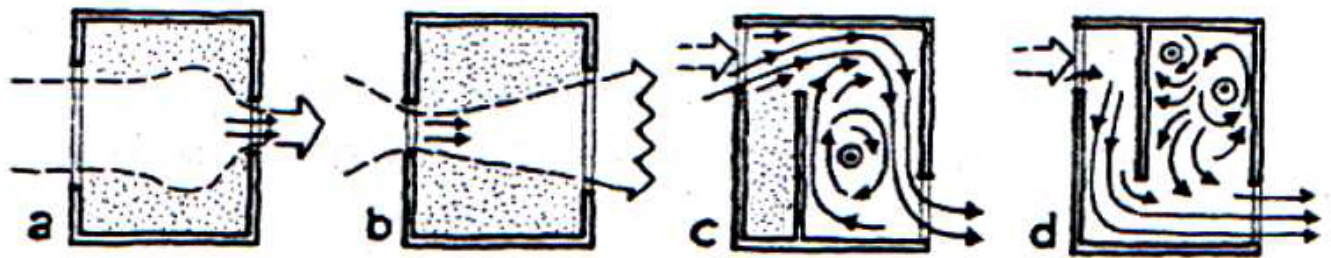
**Figure I-12** : solutions architecturales favorisant la ventilation traversante :

(a) cheminée, (b) atrium, (c) double peau [20]

Dans le cas de la ventilation traversante, plusieurs zones d'un bâtiment sont liées, et la régulation du débit de ventilation dans une zone peut avoir des conséquences sur le débit dans une autre zone. Dans le cas de la ventilation traversante par tirage thermique, la régulation pour chaque étage doit adapter l'ouverture à des hauteurs de tirage thermique différentes. La prise en compte de la position des ouvertures par rapport au vent est importante dans la création du déplacement d'air.

La ventilation traversante dans un local doit réunir deux conditions. La première est que le local porte deux ouvertures, et la deuxième est que celles-ci soit deux façades opposées du local. La différence entre le côté sous le vent de l'habitat et le côté face au vent va entraîner des écoulements d'air d'une ouverture à l'autre. Givoni.B estime que la meilleure condition de ventilation traversante est obtenue lorsque le flux d'air change de direction à l'intérieur de l'espace en se déplaçant de l'entrée vers la sortie [22].

La mise en place de cloisons internes et la position des fenêtres permettent à l'air de s'écouler directement des ouvertures d'entrée vers la sortie. Izard 1993 ; estime qu'une ventilation traversante sera efficace, les ouvertures sur des façades adjacentes ou opposées, sur lesquelles les pressions d'air sont toujours différentes sous l'effet d'un vent de direction donnée (figure I.13).



**Figure I-13:** Schématisation de la ventilation traversante efficace

### I.2.7.3. Rafraîchissement par ventilation naturelle nocturne :

De façon générale, la ventilation est utilisée pour maintenir un niveau acceptable de qualité de l'air intérieur (vent hygiénique) et rafraîchir (surventilation ou ventilation pour le rafraîchissement) afin de réduire ou annuler les besoins de climatisation active.

Le principe de la ventilation nocturne est de refroidir par ventilation la masse thermique de l'habitat pendant la nuit quand les apports internes et les apports solaires sont au minimum. Ce refroidissement permet de stocker la fraîcheur nocturne et de la restituer pendant la journée, afin de compenser les apports internes et solaires et par conséquent, limiter les surchauffes ou diminuer les besoins de refroidissement [20].

D'après Izard, 1993, le principe de ventilation nocturne est intéressant dès lors que la température d'air extérieur s'abaisse, il y a un effet d'abaissement de la température de l'air intérieur [23].

Pour augmenter l'effet de refroidissement nocturne, l'habitat doit être fermé pendant la journée pour éviter d'amener l'air extérieur chaud dans les pièces.

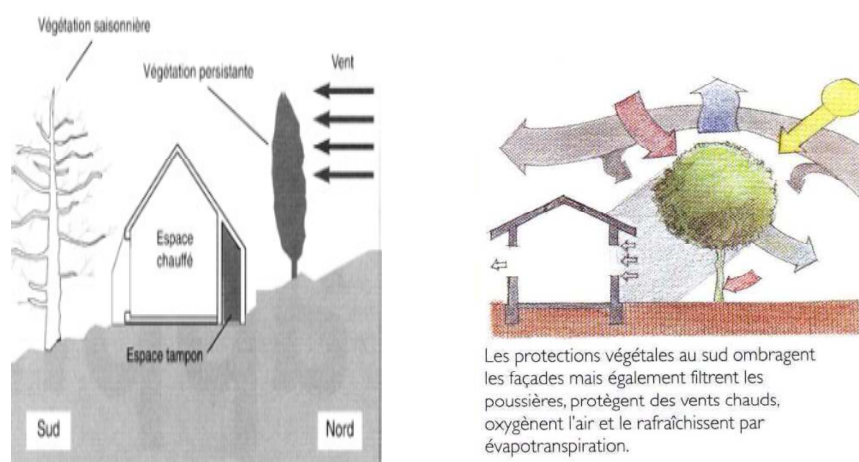
Dans les climats chauds, la ventilation nocturne est une solution adéquate, elle contribue à la réduction des charges de refroidissement. La masse thermique largement utilisée pour l'enveloppe peut maintenir relativement la température à un niveau modéré tout le long de la journée.

### I.2.8. Végétation et eau

La végétation réduit le recours systématique à la climatisation pendant l'été. Elle procure de l'ombrage et réduit donc l'insolation de l'habitat. aux valeurs esthétiques s'ajoute le confort

thermique qu'elle procure par évaporation. Les plantes vertes dans la maison contribuent aussi aux rafraîchissements de l'air intérieur.

Par la végétation (arbres à feuilles caduques, plantes autour de l'habitat), on peut se protéger des rayonnements solaires. Les feuilles persistantes interceptent les rayonnements solaires et les empêchent d'atteindre les façades, de plus elles se comportent comme humidificateur réduisant la température de l'air par évaporation en hiver. Ce type d'arbre perd leur feuillage et laisse pénétrer le rayonnement solaire (figure I-14).



**Figure I-14 :** utilisation de la végétation dans la conception bioclimatique [24]

Les arbres à feuilles caduques représentent une solution de protection solaire saisonnière particulièrement intéressante en fournissant protection pendant les mois d'été tout en permettant à la lumière naturelle et à l'énergie solaire de pénétrer en hiver. L'aptitude des végétaux à modifier le climat réside principalement dans le phénomène d'évapotranspiration. L'évapotranspiration est un phénomène qui couple deux propriétés des végétaux. D'une part, on observe une évaporation au niveau du sol, d'autre part de la transpiration par les pores des feuilles des végétaux (figure I.15). Un arbre peut être considéré comme un climatiseur évaporatif naturel.



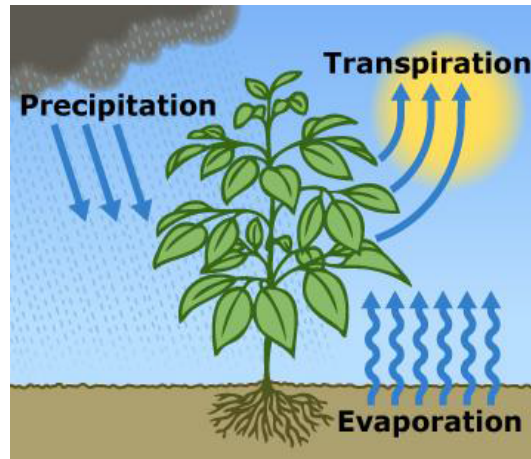


Figure I-15 : phénomène d'évapotranspiration [10]

L'utilisation de l'eau, comme la végétation (figure I-16), influence judicieusement le confort bioclimatique de l'habitat. Les bassins, les étangs, les fontaines et les jets d'eau sont les principaux aménagements urbains basés sur la modification de l'état de l'air ambiant par phénomène d'évaporation ; l'air se rafraîchit du fait de la chaleur latente de vaporisation importante. La présence d'une étendue d'eau augmente l'humidité de l'air ce qui est très bénéfique dans les climats sec.



Figure I-16 : eau et végétation dans la conception bioclimatique [25]

### I.2.9. Couleur :

Un revêtement de couleur sombre est utile en hiver puisqu'il favorise l'absorption du rayonnement solaire entrant dans la pièce par contre, en été, c'est la couleur claire qui réfléchira les rayons solaires les empêchant d'entrer dans l'habitat et pour cette raison le blanc pour les murs est le choix de l'architecture traditionnelle dans tout le bassin méditerranéen connu par des périodes estivales chaudes.

### I.3. Bioclimatique et développement durable :

Selon les experts, la forte utilisation des énergies fossiles a provoqué le réchauffement climatique lié aux gaz à effets de serre [26]. Ce réchauffement conduit à des catastrophes environnementales au niveau de notre planète. Les enjeux énergétiques et climatiques mondiaux qui engagent l'humanité à se sensibiliser, à se mobiliser et à se responsabiliser ont exigés l'élaboration d'une stratégie globale tenant compte des conditions économiques pour faire face au danger qui menace notre vie sur cette planète[5].

Ainsi le concept de développement durable est adopté pour la première fois en 1987 par l'assemblée générale des nations unies dans le rapport de Brundtland intitulé « notre future commun ». Dans ce rapport ce concept est défini comme suit « le développement durable est le développement qui satisfait les besoins de la génération actuelle sans priver les générations futures de la possibilité de satisfaire leurs propres besoins. » [27]

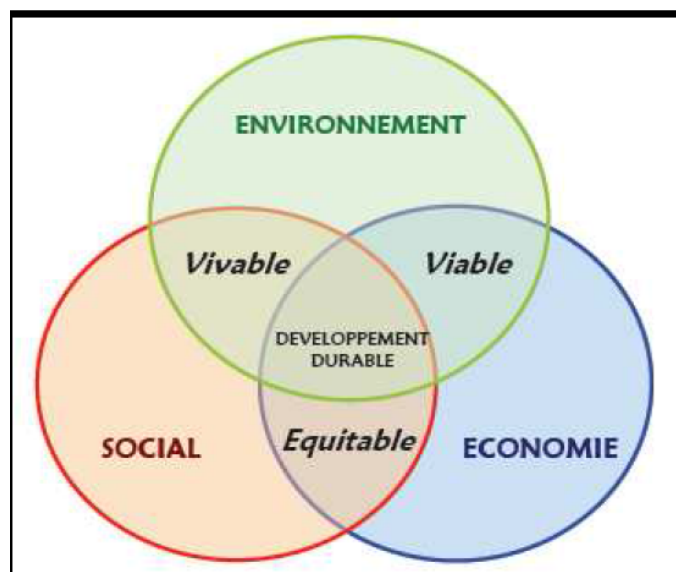


Figure I-17 : piliers du développement durable [28]

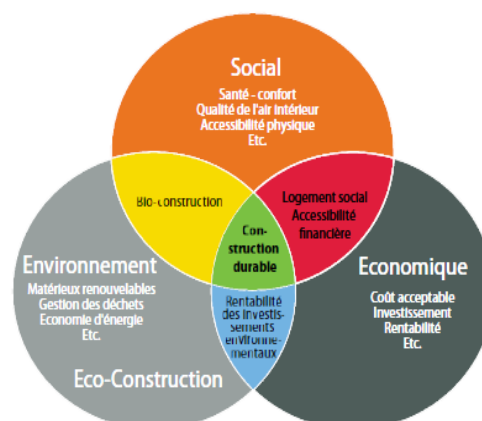
Le concept de développement durable est illustré par un triptyque montrant trois piliers ou pôles : Economique ,Environnement et Social. Chaque pilier à une relation direct avec les deux autres comme le montre la figure (I.17) ce qui mène à une équité sociale, une préservation de l'environnement et une efficacité économique.

### I.3.1. Architecture durable :

Tous les secteurs d'activité sont concernés par le développement durable et notamment le secteur de l'habitat gros consommateur d'énergie et plus polluant par ses gaz à effets de serre rejetés.

D'après un rapport du programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), 20% de la consommation d'énergie et plus de 45 millions de tonnes d'émission de CO<sub>2</sub> par an pourraient être évités par la mise en œuvre de normes plus ambitieuses pour les bâtiments existants et neufs en Europe [26].

Le concept de l'architecture bioclimatique est la pierre angulaire de l'architecture durable. Cette architecture qui réduit au minimum sa consommation des ressources (eau, énergie et matériaux ...), implique d'améliorer au maximum la santé, la sécurité et la qualité de vie de ses habitants [29] .



**Figure I-18** : différents enjeux du développement durable [28]

La construction durable est le concept le plus global, qui respecte la définition du développement durable [28] qui permet l'amélioration de la qualité environnementale et socioculturelle de l'espace habité et ce en réduisant en minimum les conséquences néfastes de celui-ci sur la nature extérieure et en accroissant son rôle de préservation des valeurs culturelles et de l'identité local avec un cout de consommation énergétique réduit ou nul (figure I.18).

### **I.3.2. Principes de l'architecture durable :**

L'habitat durable doit répondre aux besoin de l'homme et améliorer la qualité de sa vie .l'intégration des différents enjeux du développement durable dans le secteur de l'habitat se fait à travers les stratégies et les principes de conception durable, parmi lesquelles on cite [5], [28] :

- Utilisation rationnelle des ressources d'énergie non renouvelables, de l'eau, des matières premières et de l'espace.
- Préservation du confort et de la santé.
- Adaptation de la conception architecturale aux conditions climatiques locales ; journalières et saisonnières.
- Prévention des pollutions telle que le bruit, la pollution intérieure ,les déchets.
- Prise en compte et soin apporté au contexte urbain en termes d'opportunités d'échanges, sociaux, de mobilité douce, de paysage urbain et de biodiversité.

### **I.1.4. Bioclimatique et énergies renouvelables**

L'habitat utilise l'énergie produite des minerais et des combustibles d'origine fossiles pour répondre à ses multiples besoins (éclairage, cuisson, chauffage climatisation ...). Les réserves de la planète de ces minerais et combustibles fossiles, tels que le pétrole, le charbon, le gaz naturel et l'uranium sont limitées. Le recours systématique à ces réserves conduit à un dégagement massif de gaz polluants et de gaz à effet de serre.

Le développement durable dans un habitat bioclimatique a pour objectif de satisfaire les besoins de ses habitants en énergie en se basant sur la gestion rationnelle et efficaces des ressources traditionnelles et aussi l'utilisation des énergies renouvelables tout en conservant et protégeant la qualité environnementale.

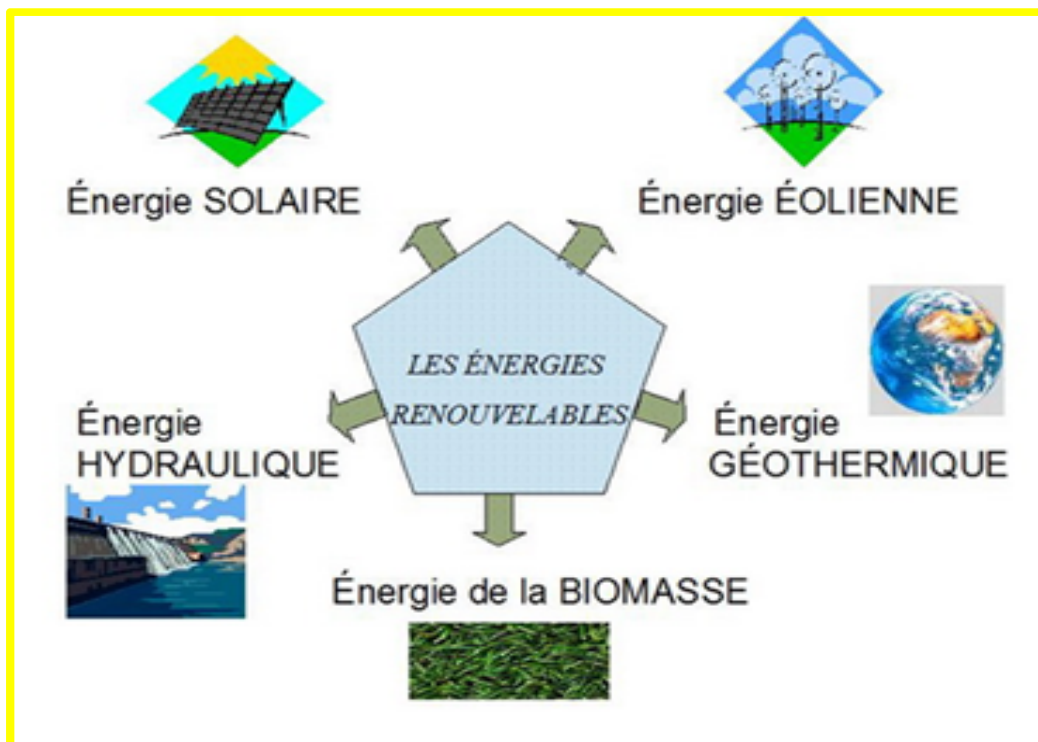
Le recours aux énergies renouvelables pour un développement durable dans nos jours est une nécessité qui s'annonce prometteuse. Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de

source que la nature renouvelle en permanence. Les caractéristiques des énergies renouvelables sont les suivantes :

- Elles sont inépuisables, non polluantes et gratuites.
- Elles sont exploitables sans produire des déchets, ni d'émissions polluantes.
- Elles contribuent ainsi à la lutte et à la réduction de l'effet de serre.

Les énergies renouvelables proviennent de deux grandes sources naturelles ;le soleil ( à l'origine du cycle d'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux) et la terre qui dégage de la chaleur.

Les différentes filières des énergies renouvelables sont :l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse , l'énergie géothermique et l'énergie hydraulique(figure I.19).



**Figure I-19 :** Différentes filières des énergies renouvelables .

#### I.4.1. Energie solaire :

L'énergie solaire est inépuisable, gratuite et non polluante. Le soleil émet à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Elle est utilisée pour la production de la chaleur grâce à des capteurs (solaire

thermique), pour le chauffage direct à travers la lumière du soleil (solaire passive) ou pour produire directement de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques (solaire photovoltaïque).

#### **I.4.2. Energie éolienne :**

La ressource éolienne résulte du déplacement des masses d'air suite à une différence de pression entre des zones chaudes et d'autres zones froides de la planète. La force du vent fait tourner des éoliennes qui produisent de l'électricité.

#### **I.4.3. Energie hydraulique :**

L'origine de l'énergie hydraulique est l'eau des barrages et des cascades. La force mécanique des chutes d'eau fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW soit environ 19% de la puissance électrique mondiale.

#### **I.4.4. Energie de la biomasse :**

La combustion de la matière organique (plantes, arbres, déchets animaux ...) produit de la chaleur ou de l'électricité. La biomasse est répartie en bois énergie, biogaz et biocarburant.

- Le bois énergie : le bois constitue une source d'énergie renouvelable et relativement propre. Un arbre, qui brûle, rejette dans l'atmosphère la même quantité du gaz carbonique qu'il avait absorbé par photosynthèse, en grandissant ainsi, le bilan écologique est neutre.
- Le biocarburant: il existe deux types de biocarburants ; les éthanol et les biodiesel, issus de différentes plantes comme le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre sont destinés aux moteurs à essence. Ils sont obtenus après la fermentation du sucre de la plante. Par contre, les biodiesel sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja ...). Ils entraînent une petite diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsable de l'effet de serre.
- Le biogaz : c'est un mélange composé essentiellement de méthane ( $CH_4$ ) et de gaz carbonique ( $CO_2$ ). Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie des matières organiques animales ou végétales sous l'action de certaines bactéries. Il est utilisé dans la production de la chaleur, de l'électricité, dans la cogénération, comme carburant automobile et peut être injecté dans le réseau de gaz naturel.



### **I.4.5. Energie géothermique :**

La géothermie exploite l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme d'électricité, de chauffage ou de refroidissement. On distingue trois types de géothermie ; la géothermie haute énergie, la géothermie moyenne énergie et la géothermie basse énergie[31].

### **I.5. Confort thermique**

L'approche bioclimatique est une démarche de conception architecturale qui vise à composer entre l'homme et son environnement afin de trouver le meilleur équilibre, en tirant avantage du climat. Victor Olgyay est le premier qui a tenté de rétablir le lien fondamental existant entre environnement bâti et environnement naturel.

La définition du confort thermique est très complexe en raison de l'interaction de plusieurs variables environnementales (physiques) et personnelles (physiologiques et psychologiques). Cependant, on peut le définir comme étant une sensation d'équilibre et de satisfaction exprimé par l'individu à l'égard des conditions thermique de l'ambiance qui l'entoure [5]. c'est la sensation de « bien-être » physique résultant de l'équilibre thermique du corps [16].

L'un des rôles de l'habitat est de protéger le corps humain contre les agressions du climat. Les enjeux d'un habitat bioclimatique s'expriment principalement à travers [32]:

- Le confort des occupants en toute saison, c'est-à-dire une ambiance adaptée aux usages prévues dans le bâtiment et permettent de satisfaire le confort d'hiver comme d'été.
- L'hygiène et la santé des occupants (par rapport aux besoins en oxygène, à l'élimination des odeurs, fumées et gaz nocifs divers.
- La pérennité du bâtiment et des équipements (par rapport aux problèmes de condensation, de mise hors gel,...).
- L'économie liée aux consommations énergétiques.
- La préservation de l'environnement par rapport à l'utilisation des ressources non renouvelables et aux émissions des polluants dans l'atmosphère.

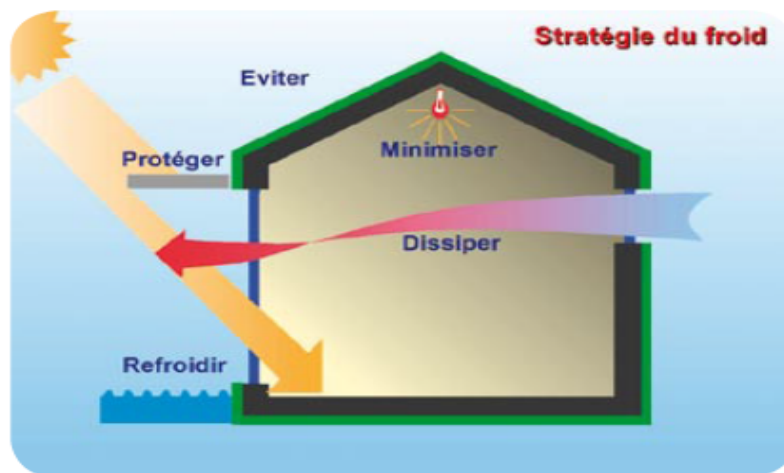
### **I.6. Conclusion :**

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 soutenue par des

normes et des réglementations qui permettent d'assurer la conformité des ambiances intérieures aux exigences du confort thermique.

Le secteur de la construction produit près de 40% des déchets de construction, consomme approximativement 40% des ressources naturelles et représente plus de 40% de la consommation d'énergie. A cela viennent s'ajouter 30% des émissions de CO<sub>2</sub>. Les défis sont de taille, mais les solutions sont disponibles pour faire du secteur de l'habitat un exemple en termes de développement durable .

L'architecture bioclimatique est une conception qui consiste à rechercher une adéquation entre la conception de l'enveloppe habitée, le climat et l'environnement dans lequel le bâtiment s'implante. Construire des bâtiments bioclimatiques, confortables, adaptés aux usagers et performants en énergie, reflète les tendances actuelles de l'architecture contemporaine.



**Figure I-20:** concepts de la stratégie du froid [25].

En été comme en hiver, l'architecture bioclimatique a développé des stratégies passives, profitant des aspects favorables de l'environnement, pour créer une ambiance intérieure confortable.

La stratégie du rafraîchissement naturel de l'approche bioclimatique répond au confort thermique d'été. Il s'agit de se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, de minimiser les apports internes, de dissiper la chaleur en excès et enfin de refroidir naturellement (Figure I.20). Le tableau (I.4) permet d'avoir une vision sur les systèmes de rafraîchissements passifs qui peuvent servir la stratégie du froid. Ce tableau permet de montrer que certains systèmes réalisent plusieurs actions. La végétation par exemple permet à la fois d'apporter du frais par évapotranspiration mais également de minimiser les apports de chaleur puisqu'elle apporte de l'ombre à l'habitat si elle est



placée judicieusement. Certains systèmes peuvent répondre à plusieurs de ces actions, ce qui permet de faire des combinaisons stratégiques.

**Tableau I.4:** actions de rafraîchissements passifs dans un habitat bioclimatique [10]

	Minimiser les apports de chaleur	Apporter de la masse thermique	Ventiler	Humidifier	Rafrâchir
Protections solaires	X				
Isolation	X				
Vitrages	X				
Inertie		X	X		X
Ventilation			X		X
Puits canadien	X		x		X
Eau		X		X	X
Végétation	X	X		X	X
Terre crue		X		X	X

# Chapitre II

## Généralités sur la géothermie

## II.1. Introduction

Au niveau mondial, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) représente de 30 à 40% de la consommation d'énergie et une forte part des impacts environnementaux d'origine anthropique. Le chauffage représente près des deux tiers de ces consommations d'énergie et les systèmes de climatisation connaissent une forte croissance. L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments et une optimisation de leur conception à l'égard du confort d'été deviennent aujourd'hui incontournables.[33]

La maîtrise de la demande énergétique d'un bâtiment passe avant tout par un travail soigné de l'enveloppe qui combine isolation, protection solaire et utilisation de la masse thermique interne. C'est en général une fois ces mesures de bases prises et la gestion des apports internes optimisée que l'appel à des techniques passives de préchauffage ou rafraîchissement prend tout son intérêt. Au-delà des apports solaires, d'autres solutions complémentaires intéressantes permettent de gagner des degrés toujours précieux comme le système de rafraîchissement passif dit échangeur air-sol utilisant la géothermie très basse température.

## II.2. QU'EST-CE QUE LA GEOTHERMIE ?

L'énergie géothermique est l'énergie calorifique stockée sous la surface terrestre. Les profondeurs de la terre recèlent d'énormes quantités de chaleur naturelle, dont l'origine réside essentiellement dans la désintégration d'éléments radioactifs. Selon les connaissances actuelles, les températures culminent à 6000°C dans le noyau et atteignent jusqu'à 1300°C environ dans le manteau supérieur du globe terrestre. Le flux géothermique qui parvient à la surface du globe dépasse 40 milliards de kW.

La géothermie fait partie des énergies dites « renouvelables ». Son principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou d'électricité. A certains endroits, la nature fournit elle-même le système de circulation requis, par exemple les sources thermales. En d'autres lieux, on doit faire appel à des forages avec pompes de production ou à des sondes géothermiques doublées de pompes de circulation. Ainsi, son utilisation dépend du besoin de chacun en fonction de son habitation [34].

L'accroissement de la température en fonction de la profondeur est appelé « gradient géothermique ». En moyenne, la température augmente à partir de la surface terrestre de 3 °C

environ par 100 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient géothermique normal. , le flux d'énergie thermique à l'origine de ce gradient étant de l'ordre de 60 mW/m<sup>2</sup>. En de nombreux endroits du globe, nous constatons toutefois des anomalies géothermiques (dites «positives»), c'est-à-dire des régions présentant des gradients de température nettement plus élevés dans certaines zones instables du globe , par exemple en Islande, en Italie, en Indonésie ou en Nouvelle-Zélande [34],[35].

### II.2.1 Les types de la géothermie

L'énergie produite par la géothermie dépend de la profondeur du sol exploité. Plus elle est faible, moins sera la puissance de l'énergie géothermique. On distingue quatre types de géothermie : la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie.



**Figure II-1:** la disponibilité de différents types de géothermie à travers le monde

#### II.2.1.1. La géothermie haute énergie

Au-delà des différentes utilisations de l'énergie géothermique, la géothermie haute énergie a pour objectif d'exploiter les gisements profonds à des températures très élevées supérieures à 150°C, pour des usages purement industriels.

Des travaux de forage sont obligatoires pour atteindre les réservoirs de chaleur se situant généralement entre 1500 et 3000 mètres de profondeur. La géothermie haute énergie utilise des eaux et des vapeurs à plus de 150 °C, qui entraînent des turbines, qui entraînent à leur tour des générateurs d'électricité.

### **II.2.1.2. La géothermie moyenne énergie**

Se présentant sous forme de vapeur humide ou d'eau chaude à une température comprise entre 90 et 150°C, la géothermie moyenne température se niche dans des zones se trouvant à une profondeur inférieure à 1000 mètres ou dans les bassins sédimentaires situés entre 2000 et 4000 mètres de la croûte terrestre.

La géothermie moyenne énergie utilise des fluides, qui cèdent leur chaleur à un fluide secondaire plus volatil. Ce fluide entraîne alors une turbine qui entraîne un générateur d'électricité capable d'alimenter un réseau électrique d'une habitation pour faire fonctionner des appareils électriques (chauffe-eau, luminaires ...).

### **II.2.1.3. La géothermie basse énergie**

La géothermie basse énergie ou à usage direct exploite les bassins sédimentaires pour produire de la chaleur. Ces derniers recèlent des roches poreuses comme le sable, le conglomérat ou le grès, souvent imprégnées d'eau.

La géothermie basse énergie sert à extraire de l'eau souterraine dans des gisements poreux situés entre 1500 et 2500 mètres de profondeur. La température varie de 30 à 90°C. Le rendement est très faible pour pouvoir produire de l'électricité, mais elle permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, thermalisme...

### **II.2.1.4. La géothermie très basse énergie**

La géothermie très basse température concerne généralement les aquifères d'une profondeur inférieure à 100 mètres. La température exploitée est encore très basse et varie entre 10 et 30°C.

Toutefois, elle est exploitée pour le chauffage et le rafraîchissement des maisons ou des bâtiments collectifs, et aussi pour la production de l'eau chaude sanitaire. La production de chaleur s'effectue à l'aide d'une pompe à chaleur qui prélève dans le sol l'énergie thermique.

### II.2.2. Impact environnemental de la géothermie

Les installations géothermiques utilisées pour la production de chaleur permettent la substitution d'énergies « classiques », fossiles ou nucléaire, qui, en plus d'être fortement polluantes en termes de rejets atmosphériques ou de déchets produits, présentent des ressources limitées. L'énergie géothermique, quant à elle, est non seulement gratuite et quasiment inépuisable si correctement exploitée, mais elle ne génère aucune pollution [35].

**Tableau II- 1:** émissions de CO<sub>2</sub> de différentes énergies fossiles[35].

Énergie	g de CO <sub>2</sub> émis/kWh <sup>2</sup>
Gaz naturel	205
Électricité, contenu moyen	180
Électricité, contenu marginal	500
Fioul domestique	271
Gaz propane	231

Le tableau (II- 1 ) présente les émissions de CO<sub>2</sub> des différentes énergies fossiles émises lors de leur utilisation ou de leur production (électricité) :

En ce qui concerne la production d'électricité, une installation fonctionnant à partir d'une source géothermique permettra de substituer une partie de l'électricité produite et évitera ainsi le rejet d'une certaine quantité de CO<sub>2</sub>/kWh.

### II.3.État de l'art des systèmes de rafraîchissement passif :

Le système de rafraîchissement passif qui exploite la géothermie très basse température dit échangeur air/sol est appelé communément « puits canadien » en France et parfois « puits provençal ». Cette technique peut être utilisée tant pour le préchauffage hivernal du renouvellement d'air que pour son rafraîchissement estival. Ils ont pour but de limiter les consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation, ou même éviter l'installation d'un système de climatisation. Cette

technique qui est jusqu'à présent non exploitée dans notre pays, connaît un développement important depuis quelques années.

Au moins une quinzaine d'études abordent la technologie des échangeurs air-sol, soit en tant que sujet principal, soit en tant que qu'élément d'une étude plus vaste sur le rafraîchissement de bâtiments. Les structures à rafraîchir sont soit des bâtiments, soit des serres.[36]

A.Trombe et B.Bourret (1993) de l'INSA Toulouse [37] proposent une modélisation d'un échangeur air-sol suivie de sa validation expérimentale. Le modèle est construit grâce au principe de superposition permettant de chercher des solutions séparées pour les différentes sollicitations thermiques subies par la terre, la solution étant la somme des solutions séparées. Dans notre cas la terre est soumise à un échange thermique au niveau de la surface et à la charge imposée par le échangeur air-sol.

Le modèle prend en compte tous les phénomènes de transfert de chaleur à l'exception des échanges radiatifs et latents au niveau de la surface et des échanges latents dans le puits. Les échanges radiatifs sont principalement l'ensoleillement reçu par le sol et dans une moindre mesure les radiations émises par le sol vers le ciel la nuit. Les échanges latents sont relatifs à l'évaporation de l'eau. Les échanges latents dans les puits, en l'absence d'infiltrations sont négligés. L'avantage de ce modèle est d'être analytique. Il évite ainsi un maillage de la terre qui est délicat étant donné la géométrie du problème. Cependant, la présence de fonctions mathématiques dans les formules est susceptible d'augmenter nécessairement le temps de calcul. En outre, le principe de superposition peut être extrapolé à plusieurs puits facilement alors que c'est très délicat dans le cas des modélisations numériques par maille. L'expérimentation est présentée en trois expériences distinctes.

Le modèle développé montre qu'à 2 mètres de profondeur la différence de température entre un terrain ensoleillé et un terrain à l'ombre est de 4°C en été et de 2°C en hiver alors que les courbes de simulation et de mesure se correspondent bien lorsqu'on le prend en compte. Ainsi, suivant la situation du terrain le pouvoir de rafraîchissement du puits variera dans des proportions importantes.

Bojic et al (1997) [38] propose un modèle plus simple encore, unidimensionnel en faisant une discrétisation 1D de l'équation de la chaleur avec huit mailles de sol horizontales. Il étudie un échangeur avec plusieurs tubes parallèles et coplanaires en ne considérant pas la géométrie cylindrique du système. Ce modèle prend en compte dans l'équation de bilan à la surface du sol le rayonnement ainsi que les échanges convectifs par un coefficient d'échange global par contre Le

profil de température variable le long des tubes et l'influence du bâtiment proche ne sont pas pris en compte. Le raccordement entre le modèle de sol et la nappe de tubes se fait par l'intermédiaire d'un flux source dans une maille qui est calculé à partir de la différence de température entre le sol et l'air circulant dans les tubes. cette étude considère bien le couplage de l'échangeur au bâtiment.

La thèse de doctorat de Hollmuller [3] constitue aujourd'hui l'une des principales références pour la thermique des échangeurs air-sol. Cette thèse universitaire est une étude réalisée sur sept ans. Elle traite des échangeurs air-sol en général et des échangeur air-sols en particulier dans la dernière partie. En s'appuyant sur une modélisation théorique analytique approfondie mais aussi sur de nombreuses mesures in-situ, l'auteur y établit des règles simples pour le dimensionnement des échangeurs air-sol en fonction de leur utilisation.

La dynamique de l'échange et l'influence des différentes caractéristiques physiques du sol et de l'air sur cet échange sont étudiées dans un cas idéal (un seul tube enfoui dans le sol). Après une adimensionnalisation du problème, l'étude aboutit à des solutions analytiques complètes permettant de simuler les échanges de chaleurs intervenant entre un tube et le sol qui l'entoure. La dynamique du stockage thermique réalisé dans le sol est analysée : l'échangeur est considéré comme un filtre intervenant sur le signal thermique constitué par la température de l'air entrant. L'auteur analyse les capacités d'amortissement et de déphasage du signal en fonction de la fréquence de variation de ce dernier. Pour caractériser le phénomène, il utilise la notion de *profondeur de pénétration*, représentant l'épaisseur de sol où la température est fortement influencée par une variation de température de l'air circulant dans le tube.

L'intérêt du calcul analytique effectué par Pierre Hollmuller est qu'il permet d'étudier d'autres configurations et modes de fonctionnements pour les échangeur air-sols. l'approche adoptée dans cette thèse apporte de nombreux éclairages sur les échangeur air-sols en choisissant un cadre théorique large et grâce à l'exploitation de plusieurs expériences et du modèle numérique construit. Il donne des critères de choix entre les échangeur air-sols et d'autres systèmes de rafraîchissement ou de préchauffage. Il fournit également des règles de dimensionnement simple des échangeur air-sols (règle du pouce) et de leur emplacement en fonction du type d'utilisation et du lieu d'implantation.

Il faut noter que les transferts de chaleur par migration d'eau dans le sol, les transferts par conduction dans la direction de la longueur, l'effet de l'interposition de la paroi du tube entre l'air et le sol ont été négligés dans cette étude. Néanmoins, les échanges thermiques latents (évaporation ou



condensation d'eau) ont été intégrés au modèle numérique à éléments finis mis en oeuvre avec le logiciel TRNSYS.

Ce modèle comporte 2 095 mailles, pour un échangeur composé de 14 tubes placés sur trois niveaux de profondeur différents ; la définition du maillage est directement liée à la structure de l'échangeur modélisé.

Badescu (2007) [39] propose un modèle de transfert thermique dans le sol en deux dimensions, s'appuyant sur un bilan thermique à la surface du sol, et un modèle d'échangeur simple monotube. Le modèle de Badescu (2007) propose un découpage en tranches perpendiculaires aux tubes. Sur chacune de ces tranches, la résolution de l'équation de la chaleur est réalisée par la méthode de formulation en volume de contrôle. Le recollement entre les différentes tranches se fait au niveau de l'air circulant dans le tube (aucun flux axial n'est considéré dans le sol). Ce modèle présente l'avantage de comporter un maillage réduit (22 mailles). Par contre, le système d'équations non-linéaire doit être résolu via un outil de résolution d'équations différentielles aux dérivées partielles.

La thèse de doctorat de Stéphane THIERS (2008)[36] est aussi une référence principale dans le domaine d'échangeurs air-sol. Le modèle de Thiers considère un modèle construit comme la superposition de trois phénomènes indépendants : la conduction dans le sol du signal de température provenant de la surface du sol (effet des conditions atmosphériques, dont la prise en compte des effets du vent), la conduction du flux thermique provenant d'un bâtiment situé à proximité de la portion de sol considérée (influence du bâtiment sur la température du sol) et enfin la conduction d'un flux thermique en provenance du sous-sol (flux géothermique). L'auteur a réalisé un modèle mathématique très avancé qui donne la température du sol à tout instant et à toute profondeur, en prenant en considération le comportement thermique du sol, ce modèle est l'un des meilleurs modèles qui simule parfaitement cette température. Pour le modèle numérique de l'échangeur, l'auteur a choisi la méthode des différences finies pour l'appliquer sur un modèle comportant 80 mailles pour un échangeur composé de quatre tubes. Pour la résolution l'auteur a utilisé un outil informatique dit « COMFIE ». COMFIE est un logiciel de simulation thermique multi zones qui a été développé au sein du Centre Énergétique et Procédés de l'École des Mines de Paris.

Dans sa thèse[26], Pierre Tittelin a proposé un modèle d'échangeur air-sol basé sur un découpage en tranches perpendiculaires au tube propose de réduire le problème de conduction 2D par la méthode convolutive des facteurs de réponse. Chaque facteur de réponse est calculé à partir

d'un logiciel qui résout l'équation de la chaleur par éléments finis. L'intérêt est d'obtenir un modèle détaillé pouvant prendre en compte une géométrie quelconque et présentant des temps de calcul raisonnables.

L'intérêt de ces modèles se situe dans leur intégration à des simulations plus globales du comportement du bâtiment. Le but du chapitre suivant est de montrer le couplage entre différents modèles de façon à caractériser leurs effets sur le comportement de bâtiments basse consommation.

L'objectif principal des études menées par Moumni et al [40],[41] du Laboratoire de Génie Mécanique de l'Université de Biskra est de mettre en évidence l'impact que joue l'utilisation des techniques de production et de maîtrise des énergies (solaire et géothermique) sur l'économie nationale pour la mise en place d'un programme de recherche dans ce domaine, puis établir une démarche de maîtrise de l'énergie par la valorisation des énergies renouvelables en Algérie.

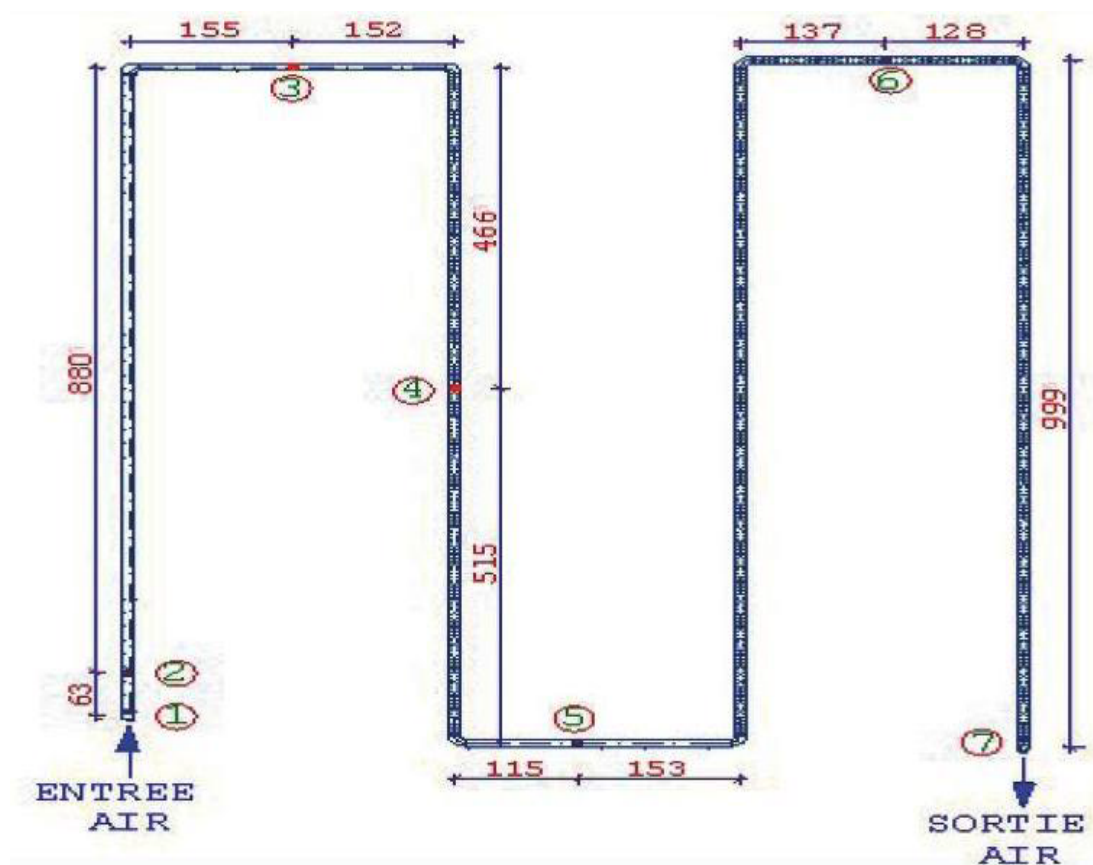


Figure II-2 : banc des essais expérimentaux de Moumni et al [40]

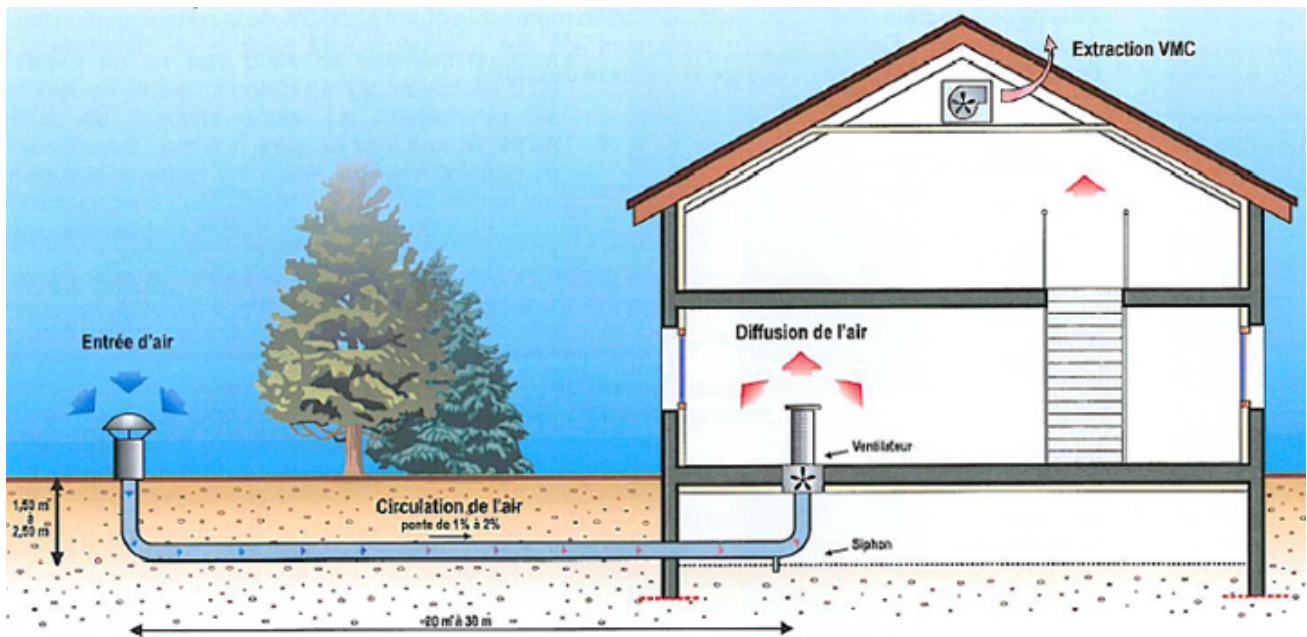
L'étude entreprise, concernant le rafraîchissement par la géothermie, Cette technique a pour support un échangeur air/sol enterré dit 'échangeur air-sol. Dans ce travail, Moumimi et al a mené en premier lieu, une étude théorique pour l'établissement d'un modèle qui traduit le mieux l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction de différents paramètres structurels conceptuels et d'utilisation. En deuxième étape, les résultats théoriques obtenus sont comparés avec ceux obtenus expérimentalement.

Le banc des essais expérimentaux (figure II-2) est monté sur site à l'université de Biskra. Il s'agit d'un réseau de quatre traçons d'une longueur totale d'environ 60 m. Le diamètre interne du tube est de 110 mm. L'ensemble est placé à une profondeur de 3 m sous une pente de 2 %. Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 2 m.

Une fosse de réception en béton est construite à la sortie de l'échangeur. Un extracteur d'air de débit variable est placé à l'entrée de l'échangeur. Une série de sondes thermiques a été placées le long de l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie. Les sondes sont reliées à une centrale d'acquisition. Les tests sont effectués le 28 juin 2009.

#### **II.4. Principe de fonctionnement du système de rafraîchissement passif**

L'échangeur air-sol est un système géothermique qui utilise l'énergie présente dans le sol à proximité de sa surface pour chauffer ou refroidir l'air neuf de ventilation des habitats. Le principe de l'échangeur air-sol est de faire circuler l'air neuf de ventilation dans un conduit formé d'un ensemble de tubes ou éventuellement un tube unique enterré à l'horizontale sous le bâtiment (ou à côté de celui-ci), grâce à un ventilateur, avant de l'insuffler dans le bâtiment.



**Figure II-3:** schéma de principe d'un échangeur air-sol [34]

Le but du système est d'amortir l'oscillation météo journalière ou saisonnière portée par l'air, en tirant parti de l'inertie thermique du sous-sol. En hiver, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré. L'échangeur air /sol est alors dit échangeur air-sol. En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à la température extérieure. L'échangeur air /sol est alors dit puits provençal.

Le système se compose d'une entrée d'air, munie de filtres pour empêcher les rongeurs de pénétrer dans le puits, d'une canalisation enterrée sur 30-50m, lisse et pentue pour l'écoulement des eaux de condensation, enterrée à une profondeur moyenne de 2.5m à 3.5m, d'un siphon ou d'un regard pour leur récupération, et d'un ventilateur pour l'insufflation dans une ou plusieurs pièces. Donc, les quatre principaux éléments sont :

- Entrée d'air neuf
- Conduit
- Système d'évacuation des condensats
- Ventilateur et système de régulation du puits

## II.5. Paramètres de dimensionnement d'un échangeur air-sol [32],[33],[42],[43]

Les performances du échangeur air-sol dépendent de nombreux paramètres physiques relatifs à la canalisation elle-même, au flux d'air et au sol. L'analyse approfondie de la littérature consultée a permis d'identifier ces nombreux paramètres influant sur le comportement thermique de l'échangeur air-sol et d'en distinguer les plus prépondérants. Ces paramètres sont à considérer pour le dimensionnement assez délicat d'un échangeur air-sol, et par conséquent pour sa modélisation.

Certains paramètres sont peu cités dans la littérature consultée. Pourtant, une partie d'entre eux semblent jouer un rôle important dans le comportement de l'échangeur air-sol. Il s'agit par exemple de la rugosité intérieure des canalisations, les propriétés physiques des canalisations, la géométrie globale du échangeur air-sol, l'impact du rayonnement solaire sur la température du sol, le régime de fonctionnement du échangeur air-sol.

### II.5.1. Débit d'air nécessaire

Le débit total de l'air circulant dans l'échangeur doit assurer l'ensemble des besoins de renouvellement d'air des pièces à ventiler. Le régime de ventilation peut varier selon le mode de fonctionnement (réduit en préchauffage, plus élevé en rafraîchissement).

Ce débit intervient simultanément sur l'échange convectif entre l'air et la canalisation et sur la puissance thermique apportée au bâtiment. Un optimum est à déterminer, le débit global devant surtout correspondre – au moins en partie – aux besoins de renouvellement d'air de la pièce ou de la zone à ventiler. La détermination du débit d'air total maximal constitue le premier paramètre de dimensionnement de l'échangeur.

Le volume du bâtiment combiné aux débits réglementaires est déterminant pour connaître le débit d'air nécessaire. En été, un rafraîchissement significatif peut être obtenu avec des débits faibles : de l'ordre de 2 vol/h dans un très grand volume (atrium, hall...), de l'ordre de 4 à 6 vol/h dans des espaces intermédiaires (classe, restaurant...), et de 4 à 8 vol/h dans des pièces ou des logements.

### II.5.2. Longueur des tubes

La longueur doit s'accorder aux dimensions que permet le terrain. Il semble difficile de mettre en œuvre un puits plus long. La longueur optimale du puits va dépendre du débit dans les canalisations. En effet, la bibliographie montre que pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échangeur ne tempère plus

l'air : il a atteint sa limite d'efficacité. Par contre, plus le débit augmente et plus cette longueur limite croît.

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. Ainsi, au-delà d'une certaine longueur, le rallongement des tubes n'apporte aucune amélioration de l'échange. Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur, liée à la longueur caractéristique de l'échange thermique,  $l$ , qui peut être obtenue en confrontant le surcoût économique de l'échangeur (constant avec la longueur) à l'économie d'énergie apportée par l'allongement des tubes. Par conséquent, il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un ou deux tubes beaucoup plus longs. Dibowski (2005) et Hollmuller (2002) fournissent des règles de dimensionnement simples permettant d'ajuster les quatre paramètres précédents en fonction du débit total de ventilation.

La longueur de chaque tube est habituellement de l'ordre de 30 à 50 m afin de limiter les pertes de charge. La longueur totale du conduit est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique (température extérieure tout au long de l'année) et du type d'installation choisie. S'il est nécessaire de créer un réseau en augmentant le nombre de conduits. Dans ce cas, les conduits doivent être espacés entre eux d'une distance d'environ 5 fois leur diamètre pour un bon échange thermique de chaque tube avec le sol. Le réseau de conduits peut être enfoui aux abords du bâtiment ou bien sous celui-ci.

### II.5.3. Nombre et diamètre des tubes

Le nombre et le diamètre des tubes définissent la section totale de tubes par laquelle va circuler l'air. Ils influent à la fois sur la vitesse d'écoulement de l'air et sur la surface de contact entre l'air et le sol. Ces paramètres sont ajustés en fonction du débit nominal de ventilation.

En pratique, pour les installations domestiques, le diamètre utilisé se situe entre 16 cm et 20 cm (20 centimètres étant un bon compromis coût / performance) ce qui augmentera la surface d'échange et le transfert thermique, mais il peut être bien supérieur sur des installations de grande taille. Le nombre de tubes est conditionné par l'espace disponible pour l'installation de l'échangeur. Le conduit du puits peut être constitué d'un seul tube posé en méandre ou en boucle autour du bâtiment ou être organisé sous la forme d'un réseau de tubes parallèles installés entre des collecteurs afin d'augmenter le débit d'air circulant dans le puits (boucle de Tichelmann).

#### II.5.4. Distance entre tubes

L'influence de la distance entre les tubes sur les performances de l'échangeur est peu abordée dans la littérature. Pourtant, il semble important d'assurer une distance minimale afin de limiter l'interaction entre deux tubes adjacents et d'optimiser ainsi l'exploitation de l'inertie du sol qui assure la fonction de stockage et d'amortisseur thermique du puits par la couche de sol se trouvant en contact ou à proximité de chaque canalisation, l'épaisseur de sol concernée dépendant de la période des phénomènes mis en jeu (Hollmuller, 2002). D'après Hollmuller aussi, une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour des variations journalières. Par contre, un stockage thermique saisonnier nécessiterait un espacement de l'ordre de 3 m, qui n'est généralement pas envisageable en pratique. Alors qu'il est préférable qu'il soit supérieur à 3 fois le diamètre des tubes afin de garantir un bon échange thermique de chaque tube avec le sol.

#### II.5.5. Profondeur d'enfouissement des tubes

Pour un échangeur air-sol, le sol joue le rôle d'isolant et de tampon thermique entre l'atmosphère et les canalisations enterrées. La profondeur d'enfouissement qui correspond au point le plus haut des canalisations influe sur la qualité de cette isolation.

la profondeur préconisée est souvent comprise entre 1,5 et 3 m. A ces profondeurs, la température du sol varie bien moins que la température de l'air extérieur entre l'été et l'hiver (entre 5 et 15 °C en moyenne en France). Il est cependant possible d'enfouir les tubes plus profondément mais cela augmente les contraintes Réglementaires de terrassement (sécurisation du chantier) et les coûts de réalisation et de pose du conduit donc il est plus judicieux d'installer le puits pendant les travaux de fondation d'un bâtiment que pour équiper un bâtiment existant.

Hollmuller (montre que les variations de température de l'air extérieur sont d'autant plus amorties et déphasées par le sol que la profondeur est grande Au-delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne dépend quasiment plus des conditions atmosphériques.

#### II.5.6. Nature du sol et taux d'humidité

La température du sol à une profondeur donnée correspond à un état d'équilibre résultant de l'échange entre la couche de surface et la terre. Cet échange est fonction des propriétés thermiques du sol (variables selon la composition chimique des sols). La capacité calorifique et la conductivité du sol ont une influence importante sur l'efficacité du système. La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules (ponts d'eau très *conducteur*) ainsi que de sa



teneur en air (faiblement *conducteur*). Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide.

La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau. L'eau possède une capacité et une conductivité thermiques supérieures à celles des autres constituants du sol. Ainsi, un sol humide emmagasine mieux la chaleur qu'un sol sec et la transmet plus facilement à l'air dans les canalisations de l'échangeur. Cet effet est mis à profit pour augmenter temporairement la performance des échangeurs thermiques air-sol en humidifiant le sol par arrosage car L'eau possédant une capacité et une conductivité thermiques supérieures à celles des autres constituants du sol, un sol humide est plus inertielle qu'un sol sec et transmettra plus facilement sa chaleur ou sa fraîcheur à l'air dans les canalisations du puits. Cet effet peut être mis à profit pour augmenter la performance des échangeurs thermiques air/sol. La conductivité thermique d'un sol peut également changer dans le temps, notamment en fonction des variations de sa teneur en eau due au changement de saison. Ce phénomène entraîne une accélération ou une diminution du transfert de chaleur par effet conductif. En régime dynamique la pénétration de l'onde thermique dans le sol est respectivement de l'ordre de 3 m en fréquence annuelle et 20 cm en fréquence journalière.

### II.5.7. Vitesse de l'air dans les tubes

La vitesse de l'air dans les tubes a une influence importante sur l'échange. Cette vitesse ne constitue pas un paramètre indépendant, puisqu'elle découle directement du choix des trois paramètres précédents. Néanmoins, elle impose le type d'écoulement (laminaire, turbulent) et influence donc non seulement sur la valeur du coefficient d'échange convectif entre l'air et les tubes, mais aussi sur les pertes de charges mécaniques qui doivent être compensées par le ventilateur. En été, quand la vitesse augmente, le coefficient d'échange air/terre augmente donc l'échange est amélioré. Afin de limiter les pertes de charge, un maximum d'efficacité sera obtenu avec un débit d'air proche de 3 m/s.

### II.5.8. Rugosité intérieure des tubes

La rugosité intérieure des tubes favorise le transfert thermique par convection en créant de la turbulence, cependant elle favorise aussi les pertes de charges hydrauliques le long de chaque tube.



Des pertes de charge élevées sont indésirables car elles entraînent un surdimensionnement des systèmes de ventilation et des pertes énergétiques supplémentaires. De plus, les irrégularités de l'intérieur des tubes favorisent la stagnation d'eau condensée, ce qui peut dégrader à terme la qualité de l'air ventilé (développement de micro-organismes). L'intérieur des tubes doit donc être le plus lisse possible. Ainsi, une légère pente de l'ensemble des tubes permet l'évacuation de l'eau condensée sans intervention extérieure.

### II.5.9. Géométrie de l'échangeur

L'échangeur est généralement constitué d'une nappe de tubes placés parallèlement et regroupés en entrée et en sortie par des collecteurs. Les coudes, les bifurcations induisent des pertes de charges supplémentaires, à éviter dans la mesure du possible. Une disposition verticale pourrait tirer profit de la meilleure stabilité de la température du sol à plusieurs mètres sous sa surface, mais cette disposition est déconseillée suite aux contraintes techniques et économiques indésirables lors de sa réalisation.

### II.5.10. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire capté à la surface du sol selon son coefficient d'albedo chauffe ce dernier en surface. Il s'agit d'un apport énergétique *majeur* dont l'effet sur la température du sol est important surtout à faible profondeur. On constate que, pour une profondeur supérieure à 1 m, on peut considérer la température du sol comme constante sur une journée. Les modèles ne prenant pas en compte le rayonnement solaire fournissent des résultats dont l'erreur sur l'évaluation de la température du sol peut atteindre plusieurs degrés, bien que souvent négligé dans les rapports consultés.

### II.5.11. Propriétés physiques des canalisations

Les capacités et conductivité thermiques des canalisations sont généralement négligées dans l'ensemble des documents consultés, la faible épaisseur des canalisations rendant ces dernières peu influentes sur le comportement général du puits. Pourtant ces propriétés peuvent avoir un impact sur le comportement dynamique de l'échangeur, et il est nécessaire les prendre en compte.

### II.5.12. Influence de la présence d'un bâtiment proche

Un bâtiment peut échanger de la chaleur avec le sol et entraîner une perturbation locale de la température du sol. Cette interaction a une influence sur les performances globales de l'échangeur

air-sol implanté à proximité du bâtiment. Malgré son importance, seuls Hollmuller (2002) Benkert et Heidt (2000) font mention de ce phénomène.

### **II.5.13. Influence de la présence d'une nappe phréatique proche**

L'implantation de L'échangeur air-sol au milieu d'une nappe phréatique modifie localement les propriétés du sol (taux d'humidité) et constitue, lorsqu'elle est circulante, une source de température stable. La température du sol est alors influencée par sa présence. Hollmuller , Benkert et Heidt ]sont les seuls à intégrer la présence d'une nappe phréatique à leur modèle. Néanmoins, des simulations réalisées sur le logiciel GAEA indiquent une influence limitée sur la température en sortie d'échangeur (variation de quelques dixièmes de degrés Celsius).

### **II.5.14. Humidité de l'air**

Les taux d'hygrométrie de l'air extérieur et de l'air extrait ne sont pris en compte que par les modèles intégrant les échanges latents . pour les climats tempérés, Sur une année, ces phénomènes sont donc peu fréquents et leur influence sur le comportement de l'échangeur reste très limitée dans le temps. Sous climat tropical humide, un échangeur air-sol implanté à 3 m de profondeur permet d'abaisser la température de 6 °C et de déshumidifier sensiblement l'air intérieur, ce qui participe aussi à l'amélioration du confort thermique .

## **II.6. Installation d'un échangeur air-sol**

le recours à un échangeur air-sol/provençal est particulièrement intéressant dans les régions ayant un différentiel de température important entre l'été et l'hiver (>20 °C). (Régions continentales et régions arides par exemple)

### **II.6.1. Place disponible pour l'enfouissement du conduit et coût :**

lors de la conception d'un échangeur air-sol/provençal, il est préférable pour l'enfouissement du conduit de disposer d'une surface importante et dégagée. De plus, le coût d'installation d'un échangeur air-sol/provençal dépend fortement du coût de terrassement. Ces deux éléments font qu'il est plus judicieux d'installer le puits pendant les travaux de fondation d'un bâtiment que pour équiper un bâtiment existant.



**Figure II-4:** pose des tubes de l' échangeur air-sol

### II.6.2. Prise d'air

L'air neuf entre dans le puits via une bouche extérieure installée sur une borne, ou un édicule surélevé. pour le bon fonctionnement du puit canadien , Cette bouche doit avoir les caractéristiques suivantes :

Type d'entrée : il s'agit généralement d'une bouche extérieure pour le secteur résidentiel et d'un plénum pour le secteur tertiaire nécessitant de plus gros volumes de renouvellement d'air.



**Figure II-5:** bouche de prise d'air avec filtre

- ✓ Hauteur de la prise d'entrée d'air neuf : elle doit être supérieure à 1,10 m pour limiter l'encrassement.
- ✓ Chapeau de protection : il permet d'éviter les infiltrations d'eau de pluie à l'intérieur du puits.
- ✓ Grille de protection à fin maillage : elle est indispensable pour éviter l'intrusion de rongeurs, oiseaux, insectes. Elle doit être facilement accessible pour nettoyage.
- ✓ Filtres : il est conseillé de munir les entrées d'air des échangeur air-sols/provençaux d'un filtre. La classe du filtre à utiliser dépend de la densité et du type de poussières à proximité de l'entrée d'air. Il est recommandé d'inspecter et de changer régulièrement les filtres (3 à 4 fois par an en moyenne) car un filtre encrassé contribue à augmenter les pertes de charge du puits et donc la consommation du ventilateur.
- ✓ Positionnement de l'entrée d'air neuf : celle-ci doit être implantée loin des sources de pollution (voirie, parking, poubelles) et loin de toute végétation pouvant produire des pollens allergisants.

### II.6.3. Ventilation et diffusion de l'air

Le flux d'air doit être maintenu grâce à un ventilateur dimensionné en fonction du débit d'air à traiter et des pertes de charges de l'installation car la simple mise en dépression du bâtiment ne suffit pas à faire fonctionner un échangeur air-sol. Le système d'évacuation de l'air vicié (VMC) doit fonctionner à un débit légèrement inférieur à celui du échangeur air-sol.

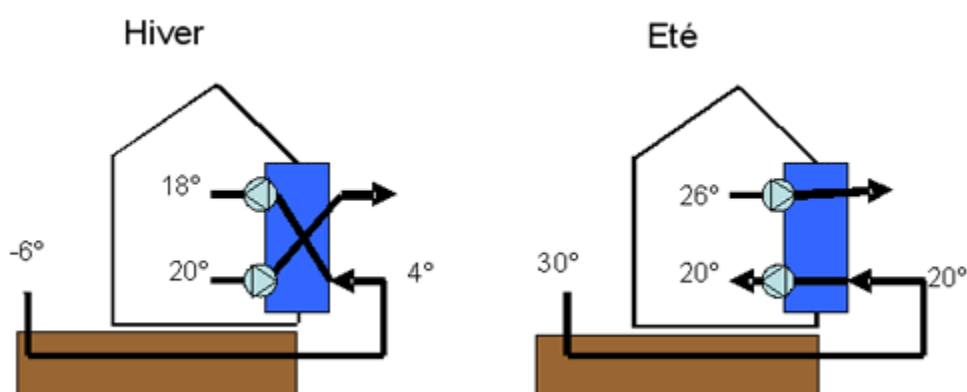


Figure II-6: schéma d'une ventilation VMC double flux

L'air réchauffé ou rafraîchi peut être diffusé dans le bâtiment en un seul point du bâtiment ou bien distribué en plusieurs points par l'intermédiaire d'un réseau de conduits isolés. La diffusion se fait généralement par une grille qui peut être située en applique des parois verticales, sur une colonne ou un caisson menuisé et surélevé ou bien encore par le sol depuis un caisson formant plénum.

Pour optimiser le système de diffusion il faut éviter les coudes et donc les pertes de charges que l'on compense par la puissance du ventilateur.

#### II.6.4. Système de ventilation :

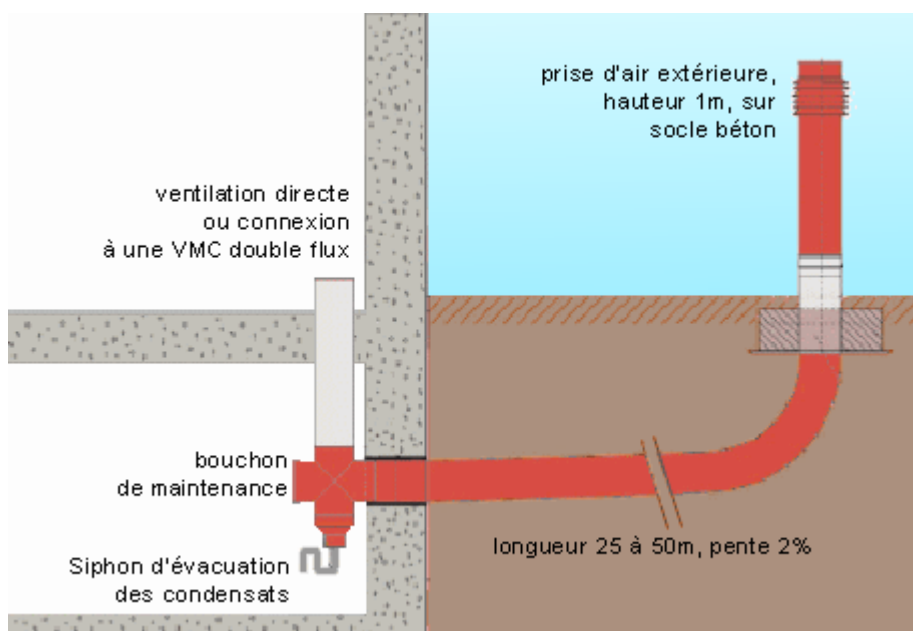
L'air stagnant dans le tuyau, surtout l'été, où il est plus frais, donc plus lourd que l'air extérieur, il est nécessaire de l'extraire mécaniquement. On peut se servir de la VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) si le bâtiment en est équipé, mais cela suppose une étanchéité parfaite de l'enveloppe, ce qui n'est ni réaliste, ni souhaitable, une panne d'électricité devenant dangereuse. La solution généralement adoptée est d'équiper le système d'un ventilateur, de préférence à l'extérieur, en tête du circuit, l'air étant ainsi pulsé. Son débit est à calculer, en fonction du diamètre du tuyau, de la capacité calorifique de la terre qui l'entoure et du volume à « climatiser », en général dix fois ce volume par heure.

- ✓ Performance : le ventilateur doit être dimensionné en fonction du débit d'air neuf nécessaire. Il doit avoir un rendement suffisant pour ne pas dégrader le facteur de performance du puits.
- ✓ By-pass et thermostat : en intersaison, lorsque la température extérieure est comprise entre 10 et 20 °C, le recours au échangeur air-sol/provençal n'est pas judicieux. En effet, la température extérieure est bien souvent proche de la température de confort intérieur se situant entre 18 et 22 °C, il est donc préférable de déconnecter le puits par un by-pass afin de ne pas rafraîchir l'habitation. Le by-pass permet alors de contourner le puits par une prise directe d'air neuf. Il est généralement piloté par un servomoteur, couplé à un thermostat positionné à l'extérieur du bâtiment, ce qui permet de faire varier la nature de l'injection d'air neuf : injection d'air provenant du puits ou injection directe d'air extérieur en fonction de la pertinence du passage par le puits.

#### II.6.5. Gestion des condensats et des infiltrations d'eau

La vapeur d'eau contenue dans l'air qui circule dans le conduit enterré peut se condenser en fines gouttelettes lorsque celui-ci est en contact avec les parois intérieures froides du puits. La stagnation de cette eau de condensation au sein du puits favorise le développement de germes et de bactéries,

peut perturber la circulation et altérer la qualité de l'air neuf dans le puits. Afin d'éviter ces phénomènes, le parcours des conduits doit avoir une pente de 1 à 3% orientée dans le sens d'écoulement de l'air. Au point bas du parcours avant la fin du conduit, un siphon doit permettre l'évacuation des condensats. Si le puits est situé à proximité d'une nappe souterraine peu profonde, un soin particulier doit être apporté à l'étanchéité du dispositif pour éviter l'infiltration d'eau dans les conduits. »



**Figure II-7:** schéma de gestion des condensats

Il convient donc lors du terrassement de faire attention à la pente et de prévoir impérativement des conduits lisses. Avant la première mise en service, un nettoyage des conduits peut permettre de contrôler l'écoulement de l'eau.

### II.6.6. Qualité de l'air

L'entrée d'air doit être implantée loin des sources de pollution (voirie, parking, poubelles,...) et à une hauteur suffisante pour éviter l'aspiration de la poussière. Elle doit être accessible pour le nettoyage. Si des filtres à particules (2-5 micromètres) sont installés, un entretien régulier de ces derniers doit être effectué environ tous les 4 mois. Eviter également de placer l'entrée d'air au milieu d'une végétation dont les pollens sont allergisants.

L'idéal est de respirer un air d'une qualité au moins équivalente à l'air extérieur, meilleure si possible. Lorsque le échangeur air-sol est couplé avec une VMC double flux, il est important de bien entretenir les filtres car la qualité de l'air en dépend. Certaines grandes installations (plus de 2 000 m<sup>3</sup>/h) n'ont d'ailleurs plus de filtration par crainte des pollutions de l'air dues à des filtres encrassés.

Voici quelques recommandations qui permettront d'obtenir un air le plus sain possible :

- Utilisez un matériau faiblement émissif (vapeur, odeur...) pour l'entrée du échangeur air-sol (alu, tôle...).
- Protégez au minimum l'entrée à l'aide d'une grille fine pour éviter que des animaux (rongeurs, moustiques...) y pénètrent.
- Si vous optez pour un filtre (2 à 5 micromètres), pensez à le nettoyer tous les quatre mois. Préférez une filtration de plus en plus fine, de l'extérieur vers l'intérieur.
- Placez l'entrée à une hauteur suffisante (1,20 m minimum) pour éviter d'aspirer de la poussière, et loin des sources de pollution (route, compost...).
- Avant la première mise en route, nettoyez le tuyau, vous pourrez ainsi contrôler l'écoulement de l'eau.

Pour freiner la prolifération microbienne source de mauvaise odeur dans les bâtiments et de dégradation de la qualité de l'air intérieur, les tubes du conduit peuvent avoir subi un traitement anti-microbien. L'emploi de sel d'argent est par exemple un excellent traitement antimicrobien.

### II.6.7. Risques liés au radon

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle. Il provient de la désintégration de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre. Il est présent partout à la surface de la planète et provient surtout des sous-sols granitiques et volcaniques ainsi que de certains matériaux de construction. Le radon peut s'accumuler dans les espaces clos, et notamment dans les bâtiments. Le radon peut être introduit dans la maison par l'intermédiaire du puits si le conduit apportant l'air extérieur n'est pas étanche.

Les moyens pour diminuer les concentrations de radon dans les bâtiments sont les suivants :

- aérer et ventiler les bâtiments, leurs sous-sols et les vides sanitaires,
- améliorer l'étanchéité des murs et des planchers



- Utiliser un échangeur thermique sur le échangeur air-sol pour ne pas utiliser l'air transitant par le puits comme air neuf. Cet échangeur peut permettre d'évacuer tout problème bactériologique qui serait du à la condensation.

### II.6.8. Matériau constitutif des tubes :

le choix du matériau est important car il impacte directement sur les échanges thermiques sol/puits. L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits. Les matériaux utilisés doivent également avoir une bonne tenue à l'enfouissement (une classe de rigidité minimale de 8 kN/m<sup>2</sup> est conseillée). Les tubes entrant dans la composition des échangeur air-sols/provençaux actuellement en fonctionnement sont généralement en PVC, en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide. Certains tubes sont constitués de matières plastiques (PVC structurés ou gaines type TPC) emprisonnant des bulles d'air, ce qui diminue l'échange thermique sol/conduit. Le recours à ce type de tube est donc déconseillé.

Les conduits doivent avoir une stabilité et une résistance à la pression suffisante pour supporter l'enfouissement dans la terre. Par ailleurs, L'étanchéité des conduits doit permettre d'éviter l'infiltration des eaux souterraines et la propagation de bactéries. Il faut également veiller aux raccordements des différents conduits et privilégier des raccords par joints à lèvres, éviter de coller les raccords pour limiter le risque de rupture lors du remblai et surtout le risque de dégagement de vapeurs nocives dû aux colles. Le matériau utilisé ne doit pas dégager de vapeurs nocives. L'entretien du ventilateur est identique à tous les systèmes courants de ventilation.

Le matériau utilisé ne doit pas dégager de vapeurs nocives comme cela peut être le cas pour le PVC par exemple lorsqu'il est soumis à des températures élevées (supérieures à 30 °C).

### II.6.9. Disposition des tubes :

Afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter son entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes. Deux dispositions sont majoritairement utilisées lorsque le puits ne comporte qu'un seul tube en méandre (figure II-8) ou en boucle (figure II-9) alors que La disposition souvent utilisée lorsque le puits est constitué d'un Faisceau de tubes est montrée à la figure (II-10):



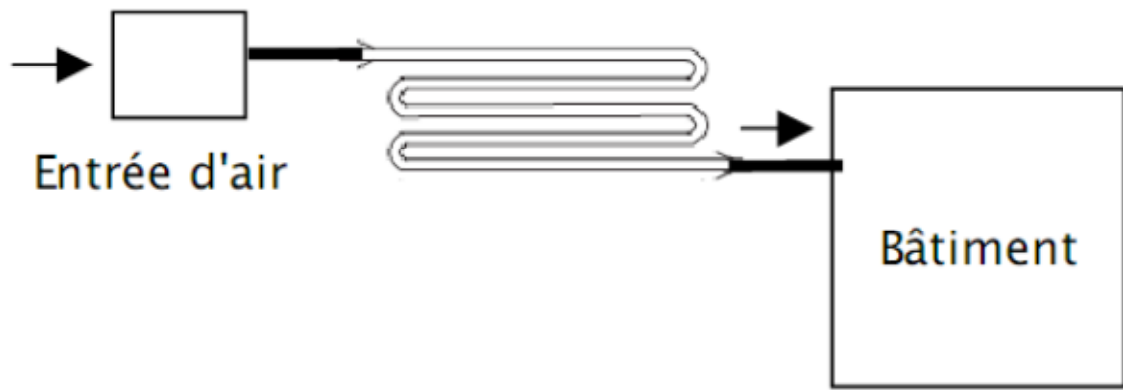


Figure II-8: tube en méandre

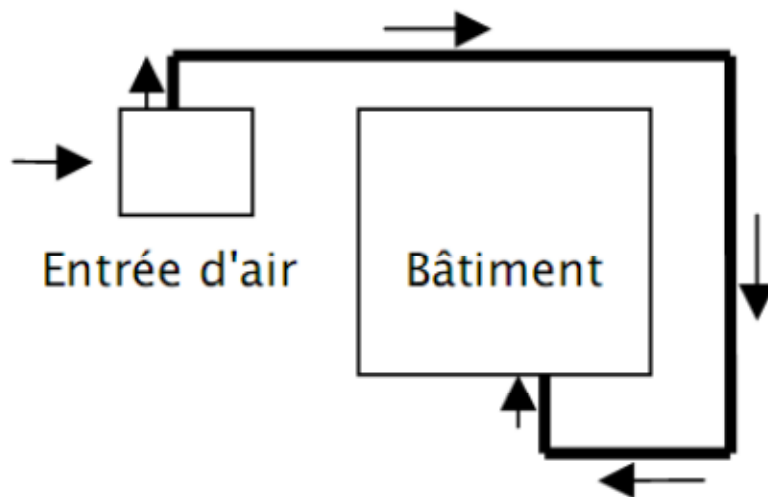


Figure II-9: tube en boucle

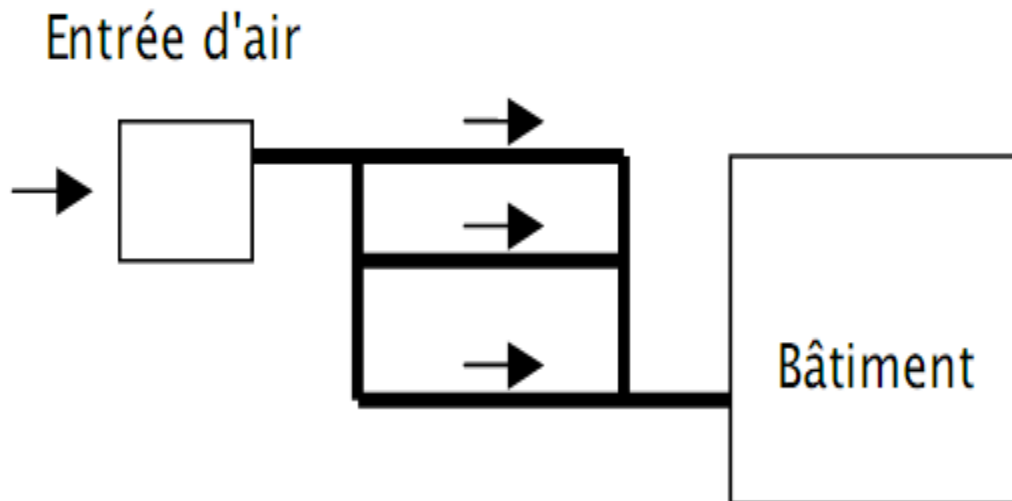


Figure II-10: faisceau de tubes

## II.7. Conclusion

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.

De nombreux modèles d'échangeurs air-sol ont été développés récemment. Il existe des modèles analytiques ainsi que des modèles numériques. Parmi les modèles analytiques, on peut trouver des modèles simples comme celui de Tzaferis et al. (1992), dans lesquels on considère que la température est uniforme le long de la surface extérieure du tube. La température de sol est évaluée analytiquement par la résolution 1D bien connue de l'équation de la chaleur dans un milieu semi infini ou encore prise constante chaque mois. La température en sortie du tube est évaluée elle aussi analytiquement par une expression qui la relie à la température d'entrée, à la température de surface du tube et qui fait intervenir une exponentielle décroissante en fonction de la longueur du tube. Un modèle analytique plus élaboré (Hollmuller, 2003) considère qu'une partie du sol autour du tube est sollicitée par l'échangeur.

Parmi les modèles numériques, certains considèrent que seul une partie du sol est influencée par l'échangeur (Mihalakakou et al., 1994; Thiers et al., 2008). D'autres modèles numériques prennent en compte la géométrie complète du problème en 2D (Bojic et al., 1997) voire en 3D (Hollmuller, 2002) par éléments finis ou différence finies.

Chapitre III  
Modélisation et simulation du  
système de rafraîchissement  
passif

### III.1.Introduction

L'échangeur air /sol est un système de ventilation du bâtiment qui exploite l'inertie thermique du sol. Comme tout échangeur thermique, l'échangeur air-sol met en contact thermique deux sources de températures différentes. Dans le cas de l'échangeur air-sol, l'une de ces sources est l'air qui circule dans les tubes et l'autre est le sol placé au contact des tubes. Durant la saison chaude, la source chaude est l'air et la source froide le sol. Ceci s'inverse durant la saison froide. La température de l'air dans les tubes et la température du sol au contact des tubes constituent donc les deux variables d'entrée de l'échangeur. [35]

La température de l'air en entrée d'échangeur correspond à la température de l'air extérieur. Elle est facilement mesurable ou accessible à partir de bases de données météorologiques horaires. Par contre, la température du sol ne peut être connue sans l'usage d'un dispositif de mesure difficile à mettre en oeuvre (sonde thermique placée à la profondeur d'enfouissement des tubes). Il n'existe aucune base de données à même de fournir cette température, c'est pourquoi une modélisation est nécessaire.

Ainsi, la modélisation de l'échangeur air-sol passe par l'utilisation de deux modèles distincts :

- Un modèle thermique de sol, capable de calculer, à tout instant et en tout point, la température du sol ;
- Un modèle thermique d'échangeur air-sol, calculant la température de l'air en sortie d'échangeur en fonction de la température de l'air en entrée d'échangeur et de la température du sol.

### III.2. Modèle thermique du sol

Le modèle thermique de sol utilisé ici consiste très simplement à considérer le sol comme un massif semi-infini, excité en surface par un signal de température sinusoïdal (Mermoud, 2001) [44] .

Un milieu semi-infini est une paroi d'épaisseur suffisamment grande pour que la perturbation appliquée sur une face ne soit pas ressentie par l'autre face. Un tel système représente l'évolution d'un mur d'épaisseur finie pendant un temps suffisamment court pour que la perturbation créée sur une face n'ait pas atteint l'autre face (vrai tout le temps que la température de l'autre face n'a pas varié). Sur les cotés et en profondeur, on impose la condition d'un flux de chaleur nul, laquelle traduit un gradient de température nul.

Le modèle de transfert de la chaleur par conduction dans un massif semi-infini propose une solution analytique de même fréquence que l'excitation [45] lorsque la température en surface du

massif est sinusoïdale. En conséquence, toutes les sollicitations du problème doivent être ramenées à des constantes ou à des fonctions sinusoïdales du temps.

Le sol y est considéré comme un milieu homogène et invariable, caractérisé par une conductivité thermique  $\lambda_s$ , une masse volumique  $\rho_s$  et une capacité calorifique massique  $c_s$ . La variation temporelle du taux d'humidité du sol – due à l'infiltration d'eau – est négligée et aucune nappe phréatique n'est prise en compte sous la zone d'implantation de l'échangeur.

La Figure III-1 représente schématiquement l'enchaînement des calculs depuis les sollicitations jusqu'à la température du sol à une profondeur donnée.

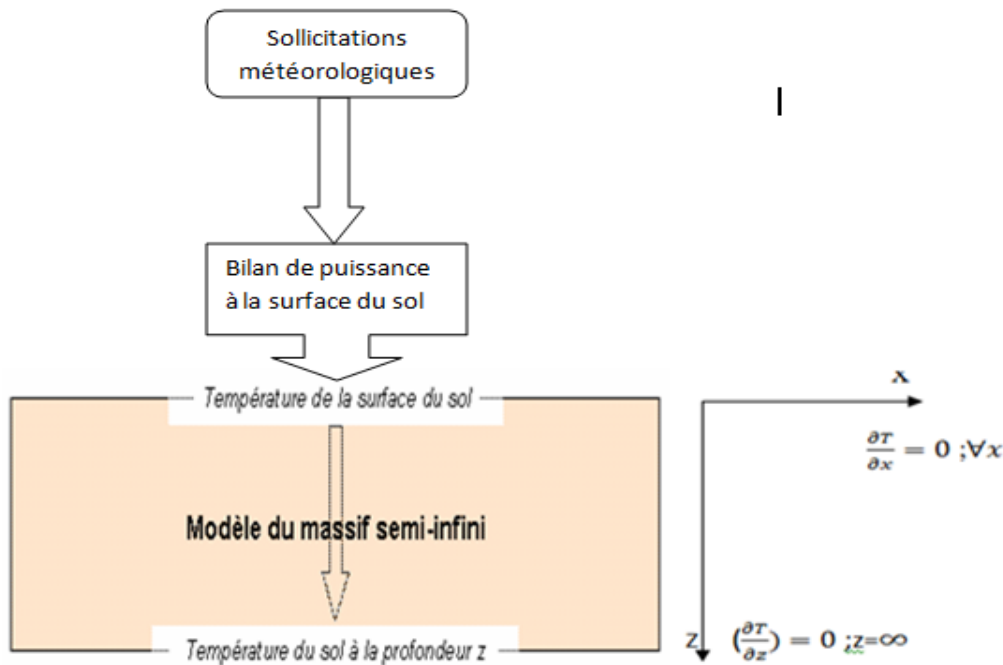


Figure III-1 : Structure du calcul de la température du sol

On présentera ici la méthode , appliquée à la température de l'air extérieur. Le même raisonnement est réalisé sur le flux de rayonnement solaire global incident à la surface du sol.

La température de l'air ambiant,  $T_a$ , peut être exprimée sous la forme d'un signal sinusoïdal:

$$T_a(t) = \bar{T}_a + A_a \sin(2\pi ft + \varphi_a) \tag{III-1}$$

Avec

$\bar{T}_a$  : La température moyenne de l'air ambiant identifiée par simple intégration des données de températures fournies par la base de données météorologiques mesurées sur un année.

$$\bar{T}_a = \frac{1}{1 \text{ an}} \int_0^{1 \text{ an}} T_a(t) dt \quad (\text{III-2})$$

soit à partir de données horaires :

$$\bar{T}_a = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} T_{a,i} \text{ (mesurée)} \quad (\text{III-3})$$

où à partir de données mensuelles (faute de données météorologiques horaires):

$$\bar{T}_a = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{a,i} \text{ (mesurée)} \quad (\text{III-4})$$

$A_a$  : amplitude des oscillations de la température, (k).

$$A_a = \frac{T_{a \text{ max}} - T_{a \text{ min}}}{2} \quad (\text{III-5})$$

f : fréquences des oscillations.

$$f = \frac{1}{p} = \frac{1}{365j} = \frac{1}{8760h} \quad (\text{III-6})$$

p : période des oscillations.

$\varphi_a$  : déphasage (retard) de l'onde thermique

$$\varphi_a = 2\pi f t_{0,T} \quad (\text{III-7})$$

( $t_{0,T}$  : le temps où la température moyenne est atteinte pour la première fois)

L'équation de la chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{III-8})$$

appliquée sur le sol (milieu semi-infini) avec les conditions aux limites :

$$T_s(0, t) = T_a(t) = \bar{T}_a + A_a \sin(2\pi f t + \varphi_a) \quad (\text{III-9})$$

$$T_s(\infty, t) \text{ est finie} \quad (\text{III-10})$$

Possède la solution suivante (Hilleul 1982) :

$$T_s(z, t) = T_a(t) = \bar{T}_a + A_a \cdot e^{-\frac{z}{d}} \cdot \sin(2\pi f t + \varphi_a - \frac{z}{d}) \quad (\text{III-11})$$

Avec :

$$d = \sqrt{\frac{a_p}{\pi}} \quad (\text{III-12})$$

$d$ : profondeur de pénétration

$a_s$ : diffusivité thermique du sol

$\lambda_s$ : conductivité thermique du sol

$\rho_s$ : masse volumique du sol

$C_s$ : capacité thermique du sol

La méthode de l'analyse spectrale de type Fourier permet d'exprimer  $T_a(t)$  sous forme d'une somme de fonctions sinusoïdales :

$$T_a(t) = \bar{T}_a + \sum_{j=1}^{j=N} a_{j,T} \sin(j\omega t) + \sum_{j=1}^{j=N} b_{j,T} \cos(j\omega t) \quad (\text{III-13})$$

En se limitant à la fondamentale ( $N=1$ ) où la précision est largement suffisante dans ce cas on aura :

$$T_a(t) = \bar{T}_a + a_{1,T} \sin(\omega t) + b_{1,T} \cos(\omega t) \quad (\text{III-14})$$

Avec :

$$\bar{T}_a = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{a,i} \text{ (mesurée)} \quad (\text{III-15})$$

$$a_{1,T} = \frac{2}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{a,i} \text{ (mesurée)} \sin\left(\frac{2\pi}{12} i\right) \quad (\text{III-16})$$

$$b_{1,T} = \frac{2}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{a,i} (\text{mesurée}) \cos\left(\frac{2\pi}{12}i\right) \quad (\text{III-17})$$

les paramètres  $A_a$ ,  $\varphi_a$  de l'équation (III-1) sont calculés comme suit :

$$A_a = \sqrt{a_{1,T}^2 + b_{1,T}^2} \quad (\text{III-18})$$

$$\varphi_a = \arctan\left(\frac{b_1}{a_1}\right) \quad (\text{III-19})$$

Le flux du rayonnement global incident peut être exprimé sous forme d'un signal sinusoïdal à partir d'une base de données météorologiques (moyennes mensuelles mesurées pour chaque mois de l'année.

$$\Phi = \bar{\Phi} + A_g \sin(2\pi ft + \varphi_g) \quad (\text{III-20})$$

Avec :

$\bar{\Phi}$  : flux moyen du rayonnement global incident

$A_g$  : amplitude des oscillations du rayonnement global incident.

$$\varphi_g : \text{déphasage}, \quad \varphi_g = 2\pi ft_{0,g} \quad (\text{III-21})$$

$t_{0,g}$  : le temps où le flux moyen est atteint pour la première fois)

En utilisant la méthode de l'analyse spectrale de type Fourier :

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \Phi_{a,i} (\text{mesurée}) \quad (\text{III-22})$$

$$a_{1,g} = \frac{2}{12} \sum_{i=1}^{12} \Phi_{a,i} (\text{mesurée}) \sin\left(\frac{2\pi}{12}i\right) \quad (\text{III-23})$$

$$b_{1,g} = \frac{2}{12} \sum_{i=1}^{12} \Phi_{a,i} (\text{mesurée}) \cos\left(\frac{2\pi}{12}i\right) \quad (\text{III-24})$$

les paramètres  $A_g$ ,  $\varphi_g$  sont calculés comme suit :

$$A_g = \sqrt{a_{1,g}^2 + b_{1,g}^2} \quad (\text{III-25})$$

$$\varphi_g = \arctan\left(\frac{b_{1,g}}{a_{1,g}}\right) \quad (\text{III-26})$$



La température de la surface du sol constitue la sollicitation qui sera imposée comme condition à la limite supérieure du sol considéré comme un massif semi-infini. un bilan de puissance, exprimé à la surface du sol s'écrit comme suit [37]:

$$CE_{eq} + SR - LE = 0 \quad (III-27)$$

avec :

$CE_{eq}$  : flux d'échange global.

$SR$  : flux de rayonnement incident absorbé .

$LE$  : flux de chaleur latente cédé à l'atmosphère.

Les expressions détaillées des trois flux sont les suivantes :

$$CE_{eq}(t) = h_{eq} \cdot (Ta(t) - Ts(t)) \quad (III-28)$$

$$SR(t) = (1 - \alpha) \cdot \Phi(t) = abs \cdot \Phi(t) \quad (III-29)$$

$$LE(t) = c \cdot f \cdot h_{sur} \cdot [(a \cdot Ts(t) + b) - ra \cdot (a \cdot Ta(t) + b)] \quad (III-30)$$

$h_{eq}$ : coefficient d'échange équivalent constant (tableau III-1) qui dépend de l'exposition du sol au vent

**Tableau III-1:** valeurs du coefficient d'échange équivalent

Exposition du sol au vent	$h_{eq}$ ( $w \cdot m^{-2} \cdot k^{-1}$ )
Sol abrité du vent	12.5
Sol moyennement exposé au vent	20
Sol particulièrement exposé au vent	50

$abs$  : la part du rayonnement global incident qui est absorbée par le sol,  $abs=1-\alpha$  ( $\alpha$  : albédo de la surface du sol)

$f$  : un coefficient de correction empirique variant entre 0 et 1 en fonction du type de sol considéré et de l'état de sa surface.

Tableau III-2 : valeurs du coefficient de correction empirique

Nature du sol	Aride	Sec	Humidité	Saturé
Paramètre f	0.1-0.2	0.4-0.5	0.6-0.8	1

$h_{sur}$  : le coefficient d'échange par convection du sol avec l'air calculé par la formule :

$$h_{sur} = 0,5 + 1,2 \cdot \sqrt{v} \quad (\text{III-31})$$

$v$  : la vitesse du vent au niveau du sol (m/s)

$a$ ,  $b$  et  $c$  trois constantes :  $a = 103 \text{ Pa/K}$ ,  $b = 609 \text{ Pa}$ ,  $c = 0,0168 \text{ K/Pa}$

$ra$  : l'humidité relative de l'air.

De plus, l'expression des solutions de ce bilan fait appel aux deux coefficients d'échange suivants :

$$hr = c \cdot f \cdot h_{sur} \cdot a \cdot ra + heq \quad (\text{III-32})$$

et

$$he = c \cdot f \cdot h_{sur} \cdot a + heq \quad (\text{III-33})$$

Ces paramètres sont tous considérés comme des valeurs moyennes annuelles qui ne varient pas durant l'année.

La température à la surface du sol résultant du bilan de l'équation a la forme suivante :

$$Ts(t) = \bar{T}_s + A1 \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_a) + A2 \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_g) \quad (\text{III-34})$$

$$Ts(0, t) = \bar{T}_s + A1 \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_a) + A2 \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_g) \quad (\text{III-35})$$

Où :

$$\bar{T}_s = \frac{(h_r + h_e) \cdot \frac{b_l}{a_l} + h_r \cdot \bar{T}_a + (1 - \alpha) \phi}{h_e} \quad (\text{III-36})$$

$$A1 = \frac{h_r \cdot Aa}{h_e} \quad (\text{III-37})$$

$$A_2 = \frac{(1-\alpha).A_g}{h_e} \quad (\text{III-38})$$

la température  $T_s(z,t)$  du sol, au temps  $t$  et à la profondeur  $z$ , est de la forme :

$$T(z,t) = \bar{T}_s + A_1 \cdot e^{-\frac{z}{d}} \cdot \sin\left(2\pi ft + \varphi_a - \frac{z}{d}\right) + A_2 \cdot e^{-\frac{z}{d}} \cdot \sin\left(2\pi ft + \varphi_g - \frac{z}{d}\right) \quad (\text{III-39})$$

De plus dans la présente modélisation, un terme  $Geo(z)$  est ajouté à cette solution dû à une puissance géothermique provenant du manteau terrestre dans le sous-sol. En pratique, l'effet géothermique peut être représenté par une fonction linéaire, indépendante du sol :

$$Geo(z) = g \cdot z \quad (\text{III-40})$$

Avec

$g$ , le gradient thermique en K/m.

Ce coefficient pourra être pris égal à 0,07 K/m [46]. En raison de la faible profondeur d'enfouissement d'un échangeur air-sol, ce terme aura un effet assez réduit sur la température du sol (quelques dixièmes de degré tout au plus).

La solution retenue sera finalement :

$$T(z,t) = \bar{T}_s + A_1 \cdot e^{-\frac{z}{d}} \cdot \sin\left(2\pi ft + \varphi_a - \frac{z}{d}\right) + A_2 \cdot e^{-\frac{z}{d}} \cdot \sin\left(2\pi ft + \varphi_g - \frac{z}{d}\right) + 0.07 \cdot z \quad (\text{III-41})$$

Ce modèle de température du sol prend en compte plusieurs spécificités du lieu d'implantation de l'échangeur air-sol étudié. Son calcul dépend donc de la température de l'air extérieur, du flux de rayonnement global incident, de l'humidité du sol, de la vitesse du vent, de l'humidité relative moyenne de l'atmosphère ainsi de l'effet géothermique.

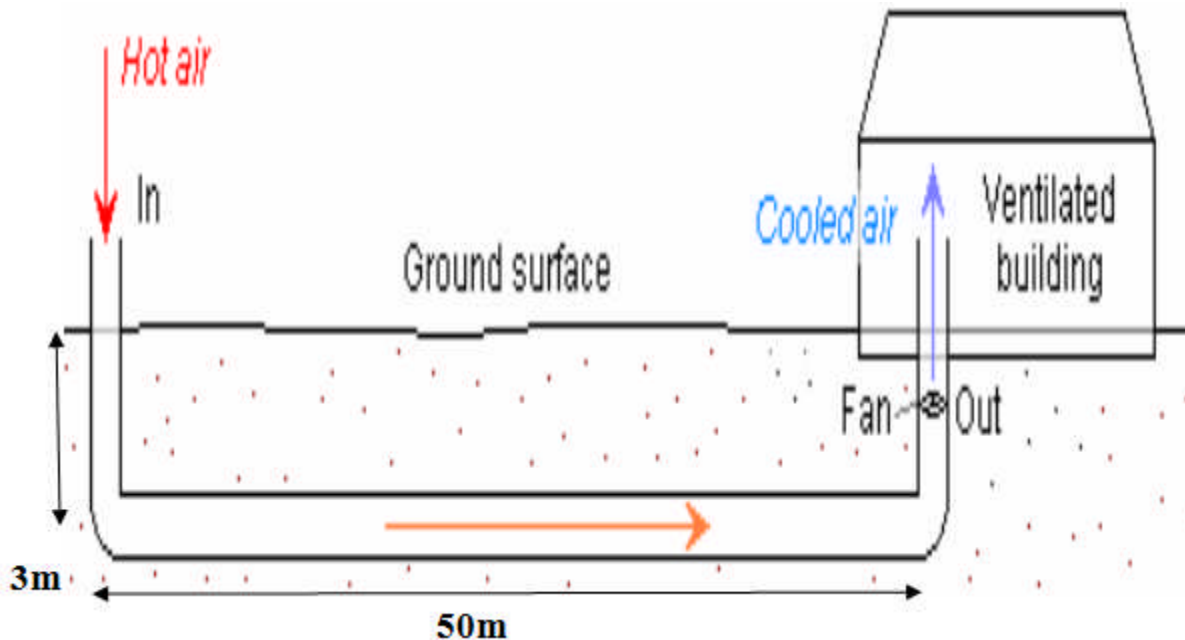
### III.3. Modèle thermique de l'échangeur air-sol

#### III.3.1. Description du système de rafraîchissement passif

L'échangeur air-sol qui va être modélisé ici possède les caractéristiques suivantes (figure III-2):

- Une entrée d'air verticale située entre la surface du sol ( $z=0$ ) et le niveau d'enfouissement de l'échangeur ( $z=3\text{m}$ ).

- Une canalisation de 50 mètres disposée horizontalement sous la terre à la profondeur ( $z=3\text{m}$ ).
- Une sortie d'air verticale située entre le niveau d'enfouissement de l'échangeur ( $z=3\text{m}$ ) et la surface du sol ( $z=0$ ).



**Figure III-2** : schéma de l'échangeur air-sol modélisé

Le modèle présenté ci-dessus peut être simplifié par des hypothèses thermiques comme suit :

- l'analyse est unidimensionnelle.
- le débit d'air à l'intérieur est identique (hypothèse de l'écoulement 'piston').
- les dimensions et propriétés physiques sont identiques.
- le sol environnant présente des propriétés thermiques homogènes et identiques.
- L'échange de chaleur à l'intérieur du tube où circule l'air caloporteur se fait par convection forcée.

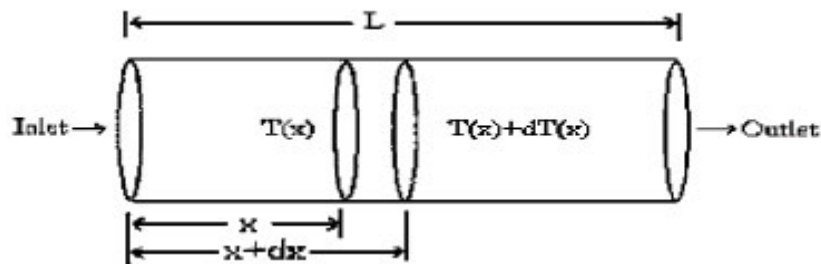
### III.3.2. Température de l'air le long de l'échangeur air-sol

Le modèle consiste à trouver à partir de l'équation de bilan énergétique, en considérant la température du sol constante, l'expression analytique qui traduit l'évolution de la température de l'air, le long de l'échangeur en fonction des paramètres suivants:

- La température extérieure (ambiante) de l'air;
- La température du sol à la profondeur considérée;

- Les caractéristiques thermo physiques du sol;
- La géométrie et la nature du tube;
- Le débit d'air.

L'échangeur air-sol est représenté par un tube rectiligne d'une longueur  $L$  égale à 50 mètres (figure III-2) . On suppose que la température du sol n'est plus perturbée par le débit d'air et qu'elle varie seulement selon l'équation établie. Prenons un élément de tube, entre  $x$  et  $x + dx$  (Figure III-3).



**Figure III-3** : variation de la température de l'air dans un segment de l'échangeur

Le bilan thermique pour ce tube est:

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot (T(x + dx) - T(x)) = \frac{dx}{R_{th}} \times (T_s(z, t) - T(x)) \quad (\text{III-42})$$

$$R_{th} = R_{cv} + R_t \quad (\text{III-43})$$

$$R_{cv} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{int} \cdot h_{cv}} \quad (\text{III-44})$$

$$R_t = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{tube}} \cdot \ln \left( \frac{r_{ext}}{r_{int}} \right) \quad (\text{III-45})$$

$$-\dot{m} C_p \cdot \frac{dT(x)}{dx} = \frac{(T(x) - T_s(z,t))}{R_{th}} \quad (\text{III-46})$$

$$\frac{dT(x)}{(T(x) - T_s(z,t))} = - \frac{dx}{\dot{m} C_p R_{th}} \quad (\text{III-47})$$

$$T(x) = A. \exp\left(\frac{-x}{\dot{m} c_p R_{th}}\right) + B \quad (\text{III-48})$$

A,B sont des constantes à déterminer en se servant des conditions aux limites .

- quand x tend vers l'infini ,T(x)= T(z,t) donc B= T(z,t) .
- Pour x=0, T(x)=T<sub>a</sub> donc A=T<sub>a</sub> (t) - T(z,t) .

Finalement on obtient :

$$T(x) = (T_a(t) - T(z,t)). \exp\left(\frac{-x}{\dot{m} c_p R_{th}}\right) + T(z,t) \quad (\text{III-49})$$

Cette équation traduit l'évolution de la température de l'air, le long de l'échangeur air-sol.

### III.4.Simulation

La simulation est faite à l'aide du code de calcul MATLAB R2012b. MATLAB est un logiciel de calcul numérique et de visualisation graphique. Destiné aux ingénieurs, aux techniciens et aux scientifiques, c'est un outil très utilisé, dans les universités comme dans le monde industriel, qui intègre des centaines de fonctions mathématiques et d'analyse numérique (calcul matriciel, traitement de signal, traitement d'images, visualisations graphiques, etc.), dont le nom est la contraction du terme anglais matrix laboratory et a été conçu par Clever Moler à la fin des années 1970. Il est développé et commercialisé par la société américaine The Mathworks, dédié particulièrement aux applications scientifiques.

### III.4.1. Données météorologiques de la ville d'Adrar

La ville d'Adrar est située au Sud-Ouest de l'Algérie. Son site est caractérisé par une altitude de 264 m au dessus de la mer, une longitude de  $0.17^{\circ}W$ , une latitude de  $27.53^{\circ}N$  et d'un albédo de 35 %. La durée du jour maximum correspondant au solstice d'été est 13 h 46 mn, tandis que la durée du jour minimum correspondant au solstice d'hiver 10 h 14 mn.

Vu l'indisponibilité des données horaires d'une année entière pour la ville d'Adrar, on a utilisé les moyennes mensuelles illustrés dans le Tableau III-3. Les données de température ambiante ont été obtenues de la station météorologique d'Adrar. En ce qui concerne les données estimatives du rayonnement solaire, elles ont été obtenues de l'Atlas Solaire d'Algérie. Le tableau III-4 donne les propriétés du sol limon –argileux-sableux du site d'Adrar [47],[48], [49],[50] :

**Tableau III-3:** données météorologiques du site d'Adrar

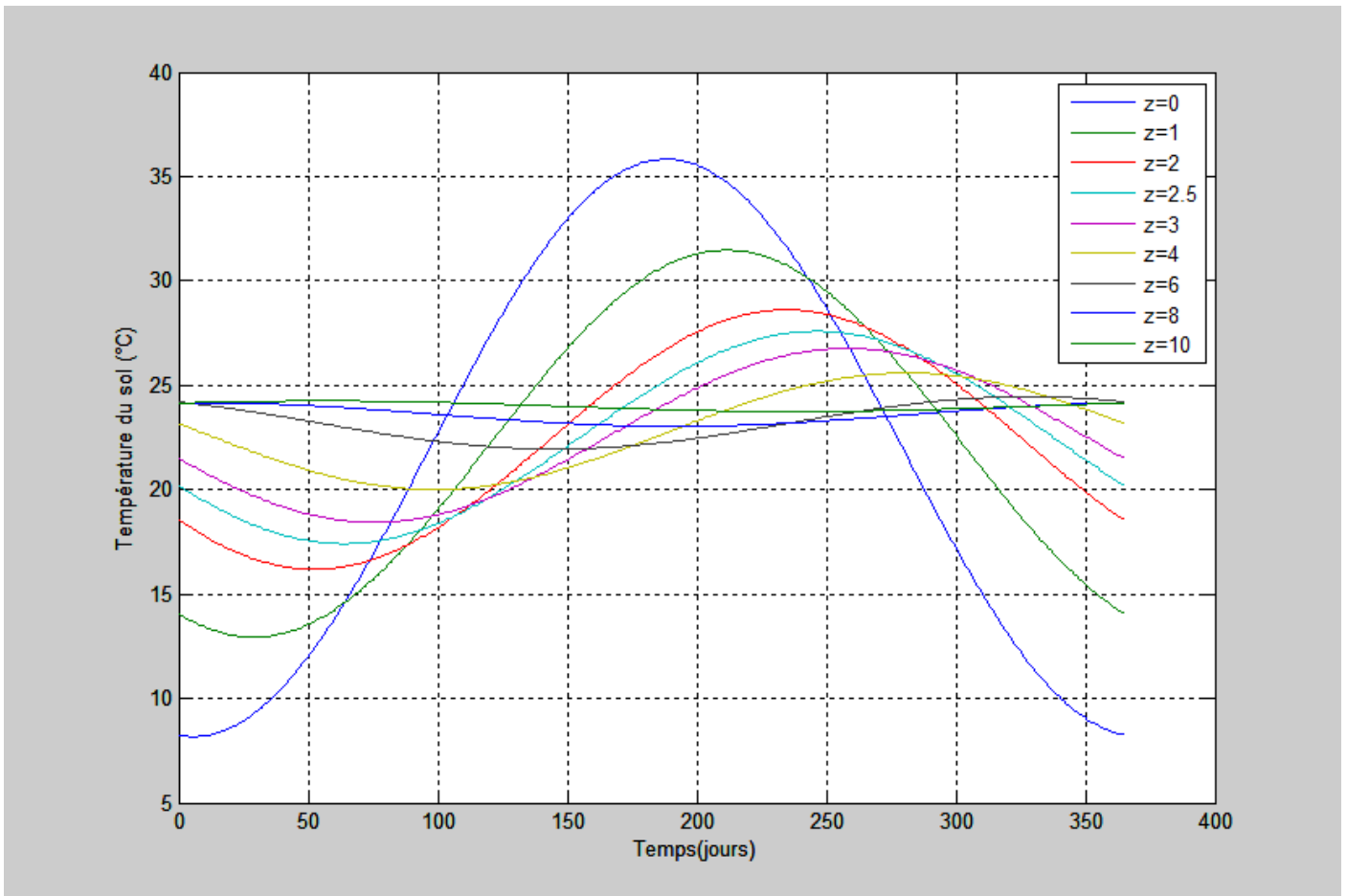
Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	juin	Juil	Aout	Sep	Oct	nov	Déc
Temp.moy(°C)	12.1	15.4	19.6	24.3	28.4	34.4	36.5	36.0	31.8	24.5	17.2	13.2
H.rel.moy(%)	46	40	32	25	23	20	23	29	39	48	50	50
R.sol.moy( $w/m^2$ )	361.67	445.50	561.67	639.67	661.17	683.5	675.08	626.00	548.83	454.17	369.17	327.67
$V_{vent}.moy(m/s)$	5.6	5.3	7.1	7.8	6.0	7.3	8.1	6.5	4.5	4.6	5.8	5.8

**Tableau III-4:** propriétés du sol (limon argilo-sableux) du site d'Adrar

Masse volumique $\rho_s (Kg/m^3)$	Capacité calorifique (J/Kg.K)	Conductivité thermique $\lambda_s (w.m/K)$	Diffusivité thermique ( $m^2/s$ )	Profondeur de pénétration d(m)	Albédo $\alpha$
1800	1340	1.5	$6.22 \times 10^{-7}$	2.5	0.35

### III-4-2. Température du sol :

La figure III-4 montre la variation de la température du sol en fonction des jours de l'année pour différentes profondeurs. Il est clair que la température du sol à une profondeur déterminée suit une variation sinusoïdale.



**Figure III-4:** signal de température de sol pour différentes profondeurs

On remarque que :

- L'amplitude des oscillations décroît rapidement lorsqu'on s'éloigne de la surface du sol.
- l'amplitude de la variation de température diminue de manière exponentielle avec la profondeur.
- Le déphasage augmente avec la profondeur.
- la moyenne de la température et sa période restent inchangées en profondeur,

### III.4.3. Température de l'air sortant du système de rafraîchissement

La figure III-5 représente schématiquement l'enchaînement des calculs depuis les sollicitations météorologiques du site d'Adrar jusqu'à la température de l'air à la sortie de l'échangeur air-sol.



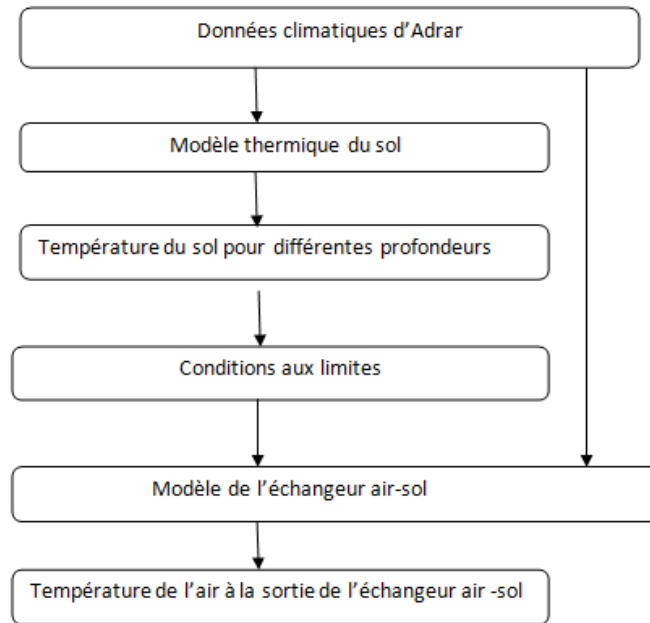


Figure III-5: structure de la simulation de la température de l'air rafraîchissant

**III.4.4. Validation des résultats :**

Les courbes de la figure III-6 montrent l'évolution selon le modèle analytique utilisé dans l'équation (III-54), l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie.

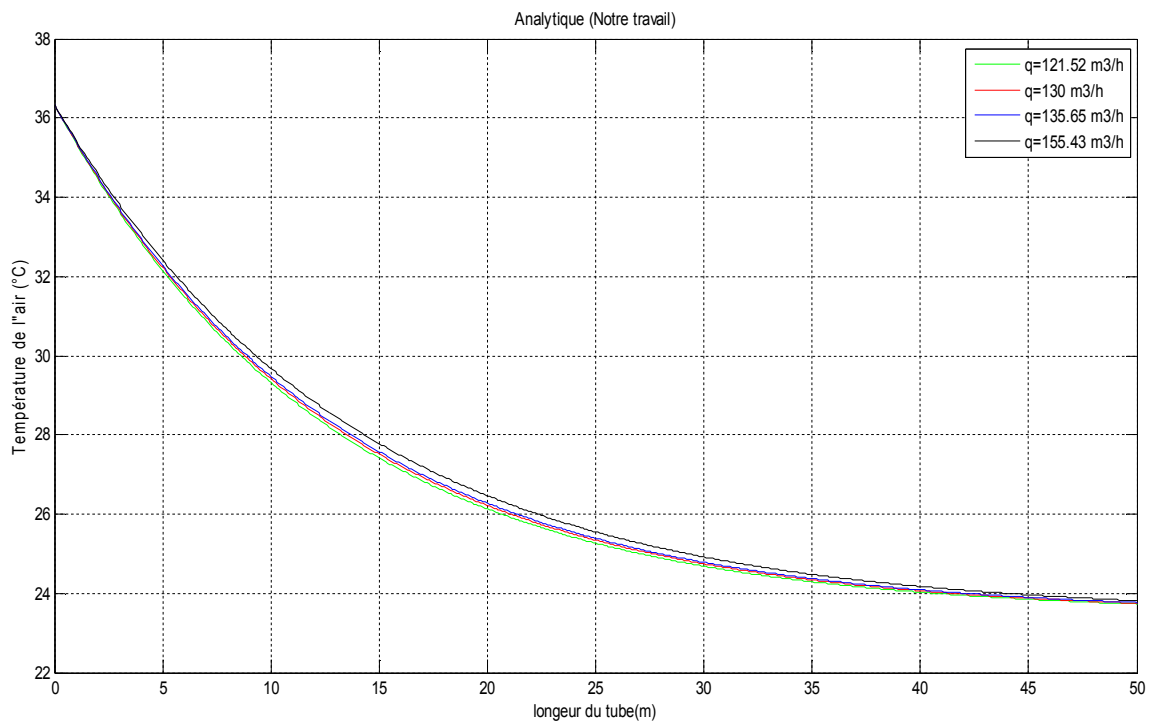
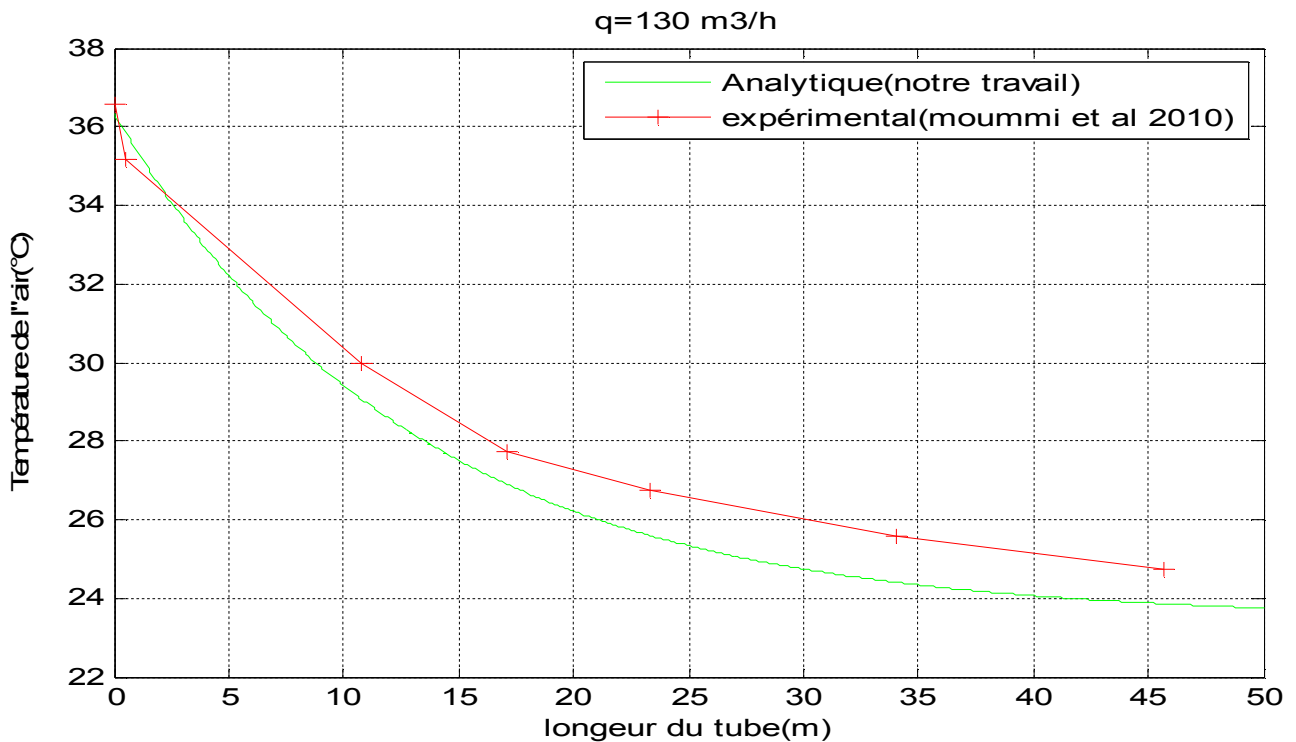


Figure III-6 : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différents débits

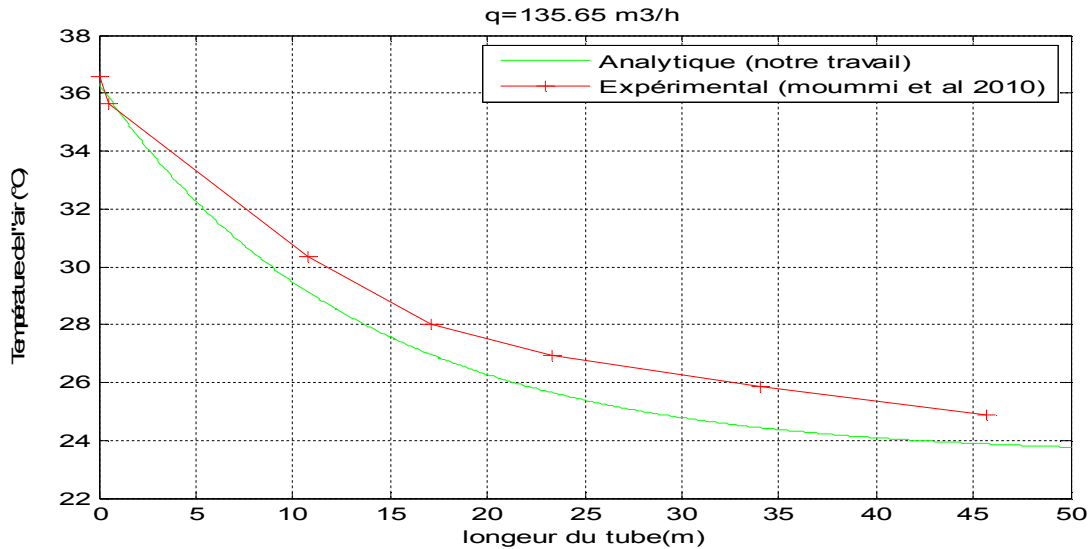
Nous observons que pour des débits simulés de  $q=121.52\text{m}^3/\text{h}$  à  $q=155.43\text{m}^3/\text{h}$ , la température de sortie de l'échangeur air/sol avoisine la valeur de  $23.8\text{ }^\circ\text{C}$ .

Pour tester la fiabilité du modèle analytique utilisé, nous avons validé nos résultats concernant la température de l'air dans l'échangeur, en été, avec les travaux expérimentaux de Moumami *et al.*, 2010 [40],[41]. Les tests sont effectués le 28 juin 2009, c'est-à-dire durant le 179<sup>ème</sup> jour de l'année concernée.

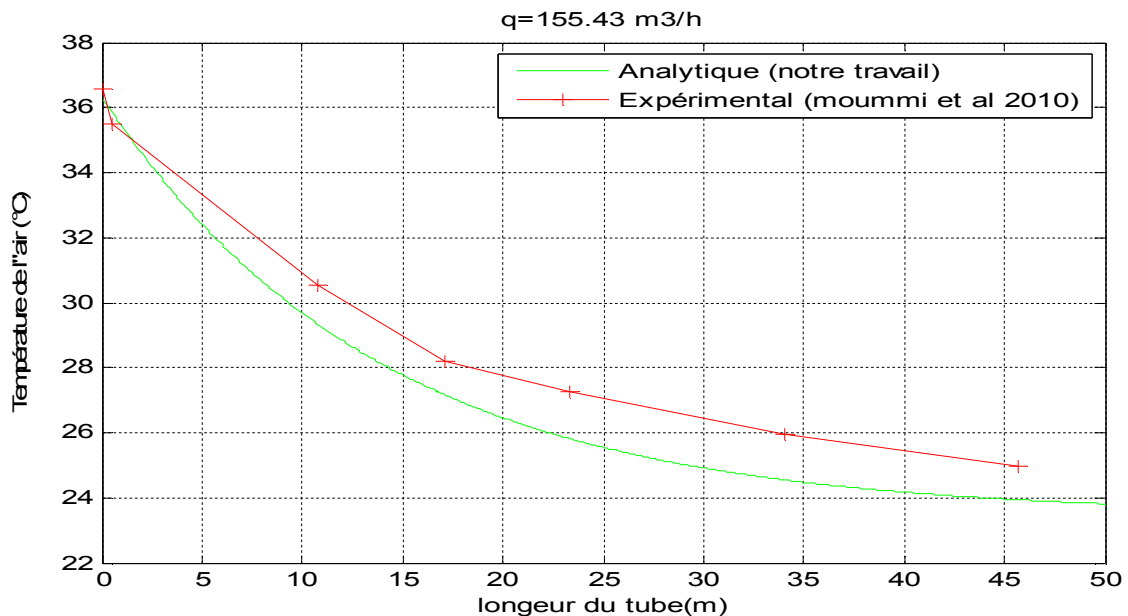
Les figures III-7, III-8 et III-9 montrent trois exemples de comparaison pour les débits suivants  $q = 130\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $q = 135,65\text{ m}^3/\text{h}$  et  $q = 155.43\text{ m}^3/\text{h}$  respectivement.



**Figure III-7 :** Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol le long de l'échangeur pour  $q=130\text{m}^3/\text{h}$



**Figure III-8 :** Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol le long de l'échangeur pour  $q=135.65 \text{ m}^3/\text{h}$



**Figure III-9 :** Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol le long de l'échangeur pour  $q=155.43 \text{ m}^3/\text{h}$

Nous observons que la validation de notre modèle analytique utilisé pour les différents trois débits  $q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $q = 135,65 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $q = 155.43 \text{ m}^3/\text{h}$  respectivement donne une bonne concordance avec l'expérimental de Moumami et al, avec une erreur moyenne relative de l'ordre de 10 % c'est-à-dire un écart de  $1^\circ\text{C}$  sur toute la longueur de l'échangeur air-sol. Nous pouvons nous servir de ce modèle afin de choisir un échangeur air-sol typique pour le site d'Adrar qui sert à rafraîchir un habitat.

# Chapitre IV

## Résultats et discussions

### IV.1.Introduction

Après avoir validé notre modèle analytique qui a donnée une bonne concordance avec l'expérimental de Moumimi et al , avec une erreur moyenne relative de l'ordre de 10 % c'est-à-dire un écart de 1°C sur toute la longueur de l'échangeur air-sol.

nous l'utiliserons pour déterminer son efficacité et étudier l'influence de différents paramètres sur la température de l'air sortant de l'échangeur air –sol qui sert à rafraîchir un habitat afin de choisir un échangeur typique pour le site d'Adrar. On s'intéresse à la période estivale du 1<sup>er</sup> mai au 10 octobre c'est-à-dire de la 120<sup>ème</sup> à la 280<sup>ème</sup> jour de l'année.

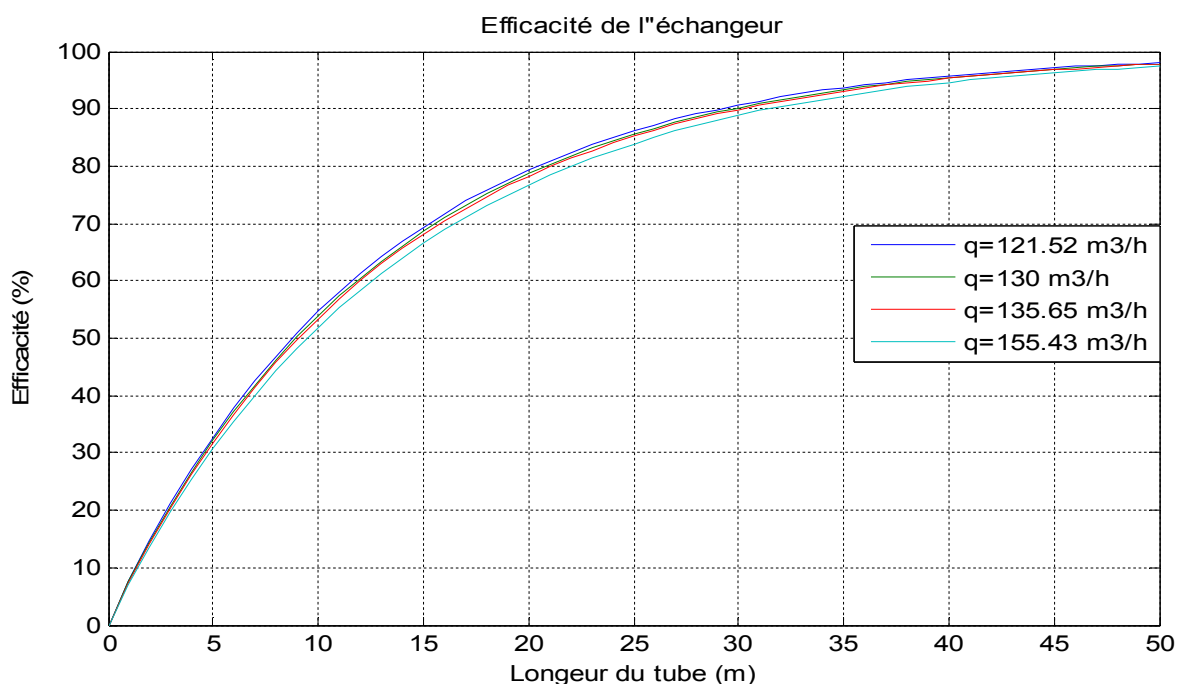
### IV.2.L'efficacité de l'échangeur air-sol

L'efficacité de l'échangeur enterré sera alors déterminée à l'aide de l'équation

$$E = \frac{T_{out} - T_a}{T(z,t) - T_a} \quad (IV-1)$$

$$E = 1 - \exp\left(\frac{-x}{\dot{m}c_a R_{th}}\right) \quad (IV-2)$$

La figure IV-1 représente l'évolution de l'efficacité de l'échangeur en fonction de sa longueur. On constate que l'efficacité augmente d'une manière logarithmique avec la longueur. A partir de 50 m, elle devient maximale et demeure constante figure (IV-1) ce qui signifie que la température de l'air à la sortie de l'échangeur air-sol est celle du sol à la profondeur considérée (3m). Ces résultats traduisent le bon fonctionnement de l'échangeur.



**Figure IV-1** : Efficacité de l'échangeur air-sol pour différents débits de l'air

### IV.3. Influence de différents paramètres sur l'échangeur air-sol :

#### IV.3.1. Influence du débit de l'air :

Pour juger l'influence du débit de l'air sur la température de sortie, nous présentons l'évolution de la température durant l'année dans la figure IV-2 et son évolution à différentes profondeurs pour différents débits d'air dans la figure IV-3 . D'après les résultats présentés sur ces figures, on constate que la température de l'air est moins tempérée et que l'efficacité de l'échangeur diminue pour un débit plus élevé (une vitesse plus élevée) car l'air n'a pas suffisamment assez de temps pour dégager la chaleur stockée vers sol. Donc on peut conclure que, ce paramètre a un effet important sur le régime d'écoulement de l'air dans le tube, c'est à dire sur l'efficacité de l'échange par convection entre l'air et le tube. Par contre un débit faible peut être insuffisant pour aérer le local à rafraîchir.

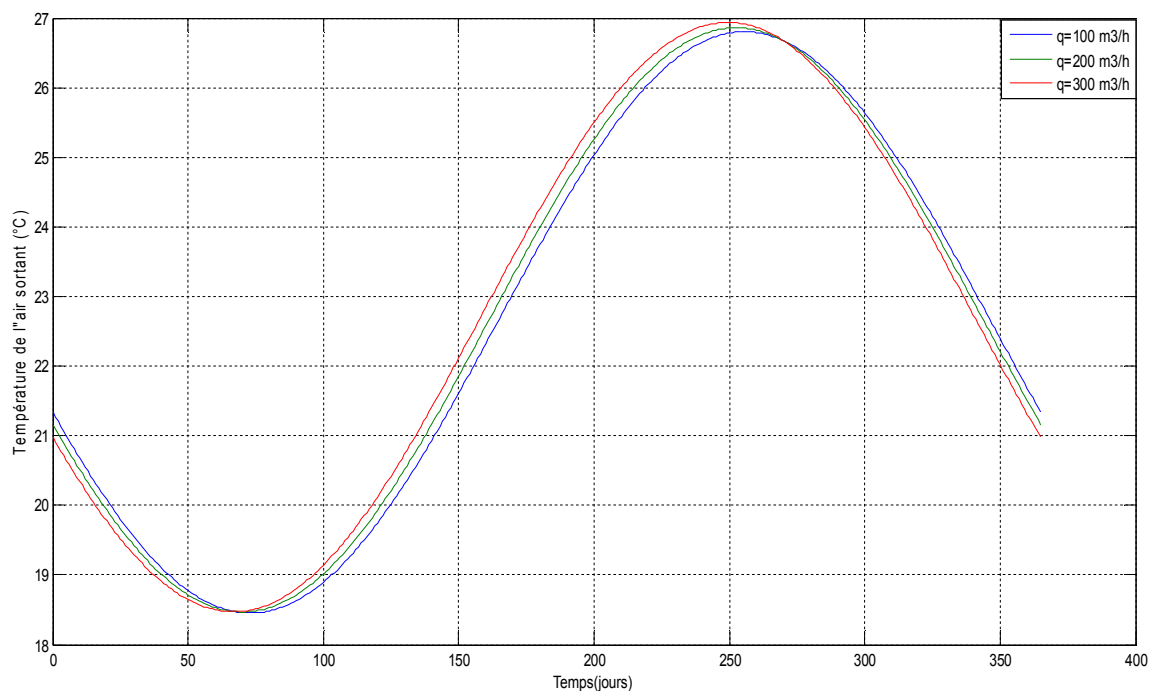
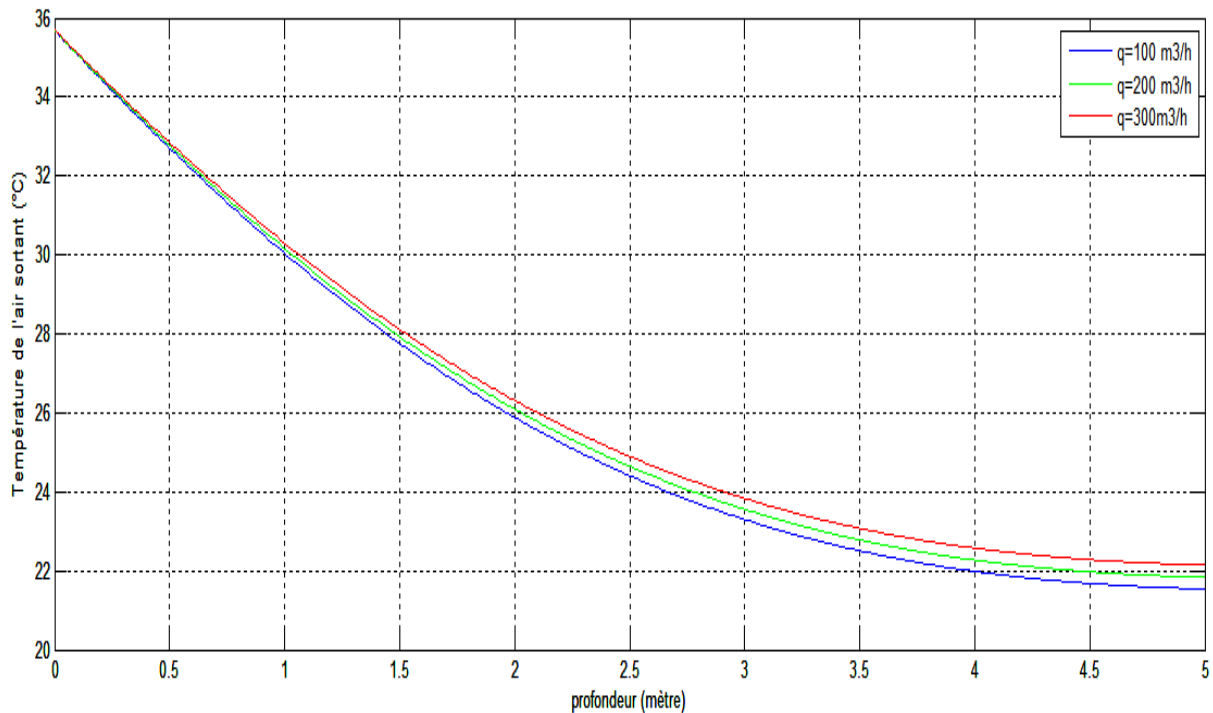


Figure IV-2 : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différents débits d'air



**Figure IV-3** : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différents débits d'air

### IV.3.2. Influence du diamètre de l'échangeur :

Pour juger l'influence de diamètre sur la température de sortie, nous présentons l'évolution annuelle de cette température dans la figure IV-4, ainsi, son évolution à différentes profondeurs pour différents longueurs diamètres pour différents diamètres dans la figure IV-5. On constate une décroissance exponentielle de la température de l'air pour tous les différents diamètres étudiés. On remarque aussi, que la température de l'air croit au fur et mesure en augmentant le diamètre et cela pour un même débit  $q=300\text{m}^3/\text{h}$ , elle atteint une valeur de  $27.5\text{ }^\circ\text{C}$  pour un diamètre de  $0.30\text{ m}$ .

D'après la figure IV-6 ,nous constatons que l'augmentation du diamètre du tube qui augmente la surface de contact de l'échangeur avec le sol nécessite un débit d'air élevé adéquat, pour permettre un échange thermique plus important et par la suite diminuer la température de sortie. Donc l'efficacité de l'échangeur augmente avec l'augmentation du diamètre du tube et le débit d'air circulant. Par contre le grand diamètre du tube, diminue sa résistance à la pression du sol.

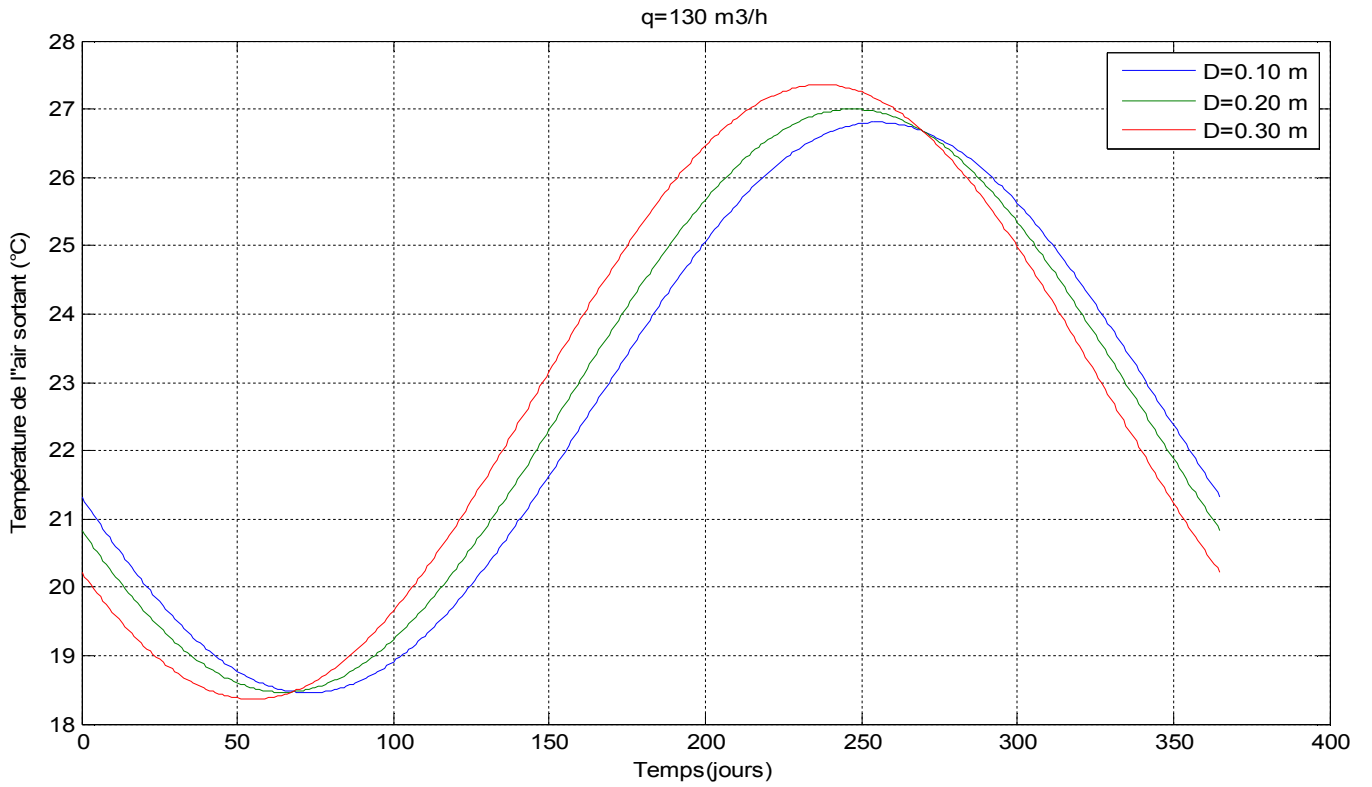


Figure IV-4 : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol différents diamètres du tube

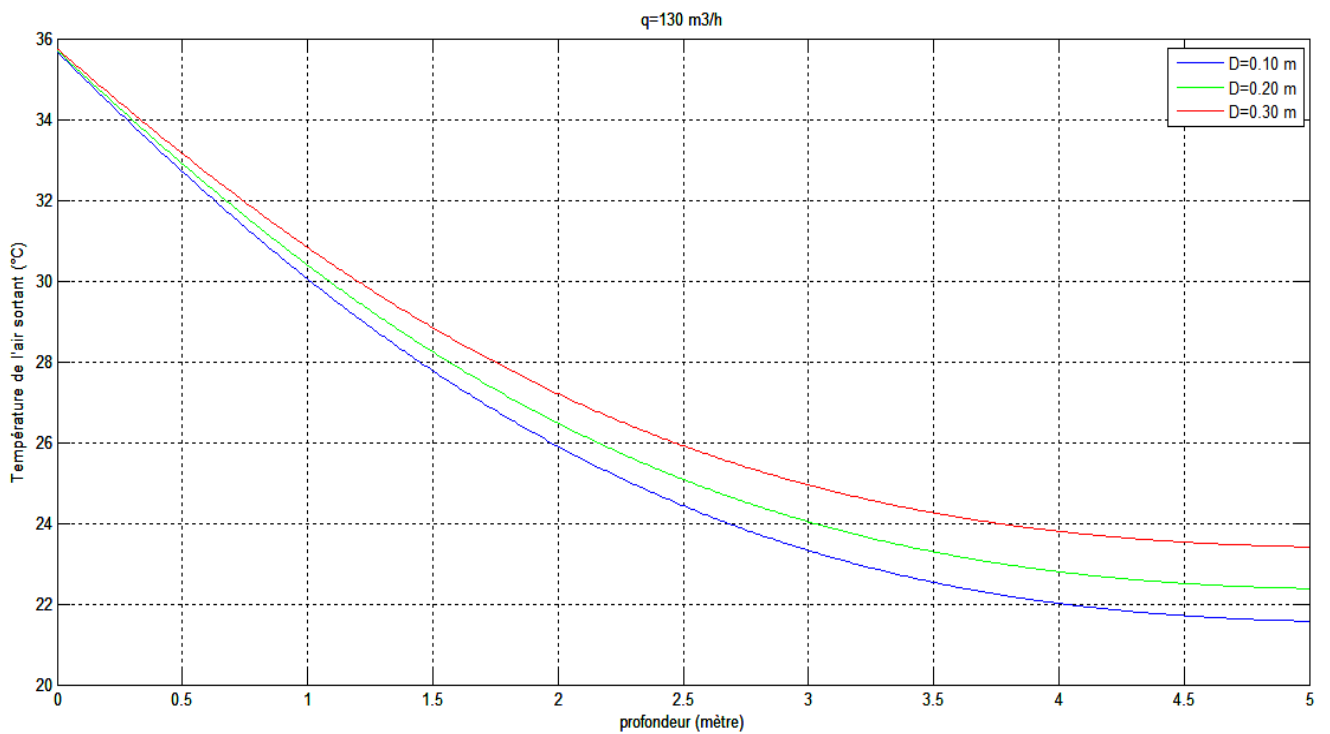


Figure IV-5 : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différents diamètres



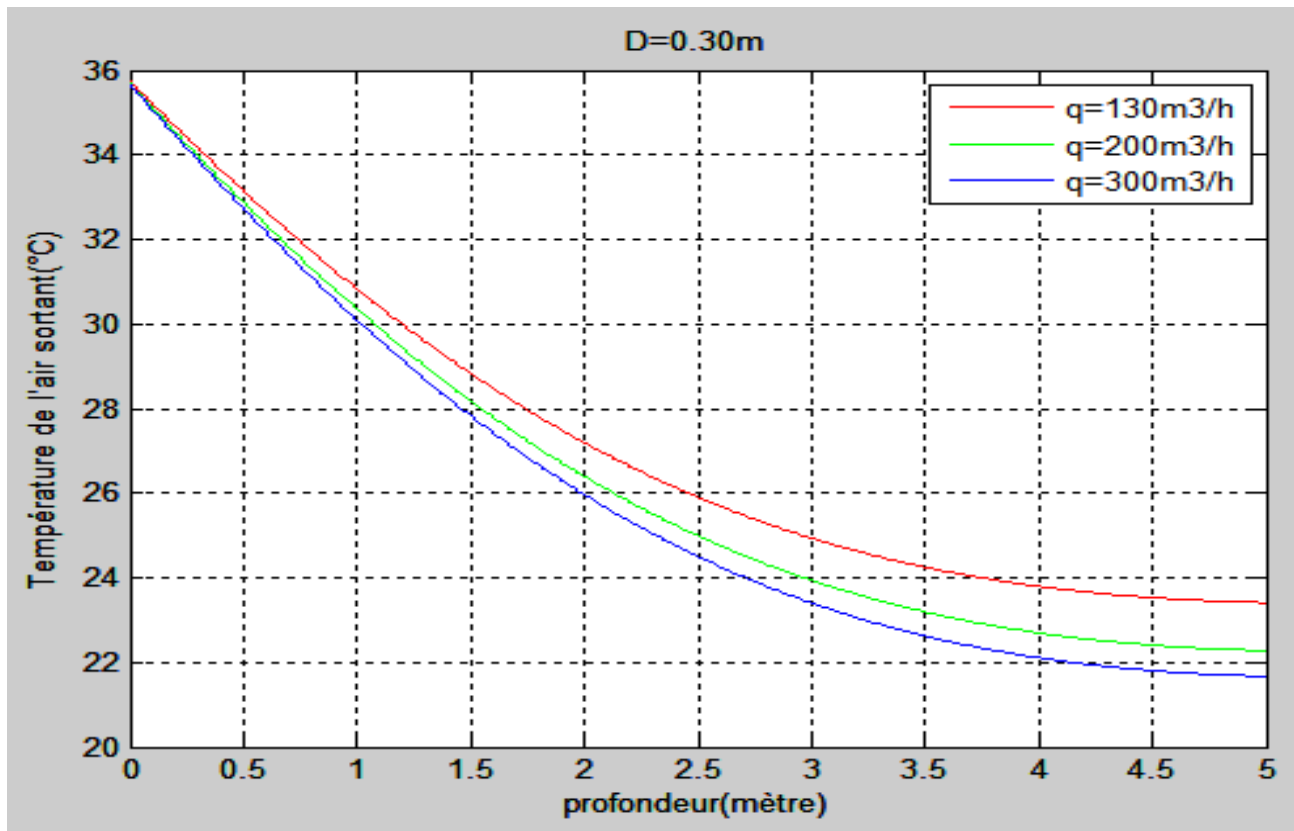


Figure IV-6: évolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différents débits (D=0.30m)

### IV.3.3. Influence de la conductivité thermique de l'échangeur :

On constate que l'influence de ce paramètre n'est plus significative sur la température de l'air sortant de l'échangeur air-sol comme le prouve les figures (IV-7) et (IV-3), mais joue fortement sur l'efficacité de l'échange, en particulier pour des valeurs faibles. Une faible conductivité thermique des tubes réduit l'échange thermique entre l'air et le sol, ce qui explique que, dans ce cas, l'inertie thermique du sol est moins sollicitée et les variations journalières de la température extérieure sont moins amorties que lorsque la conductivité des tubes est élevée.

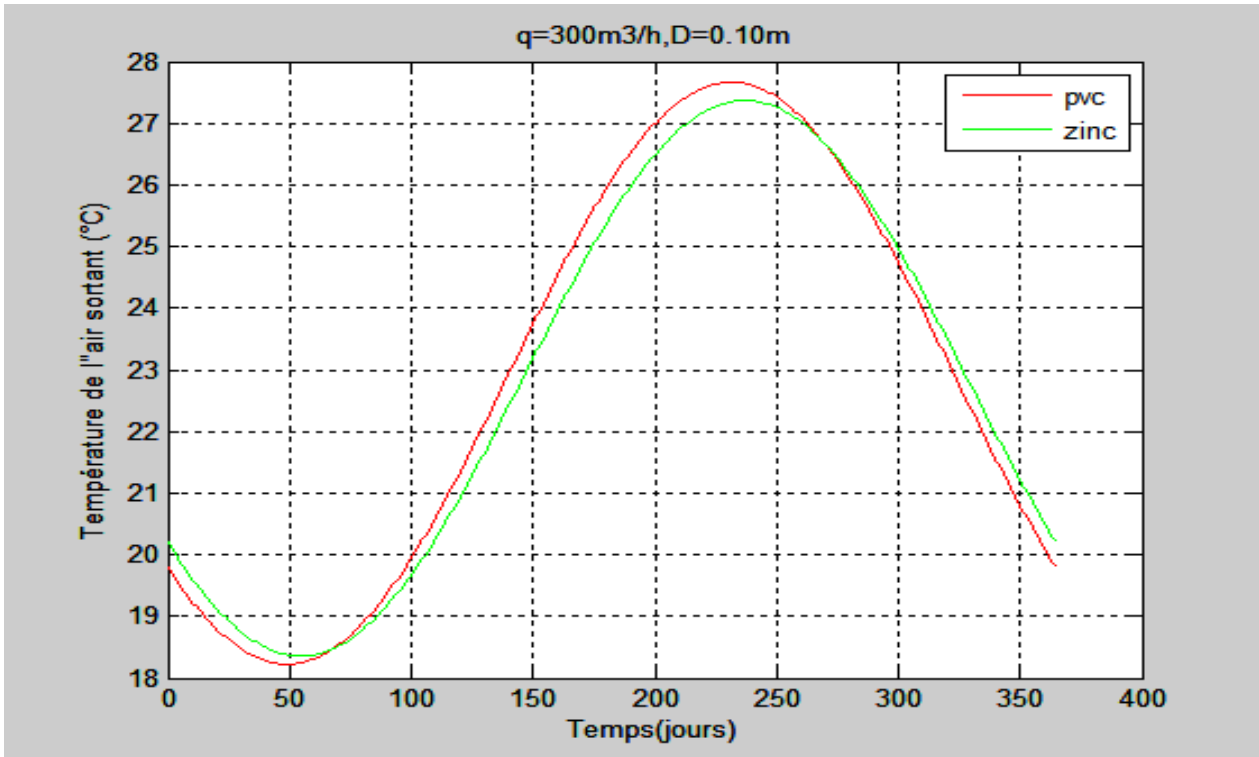


Figure IV-7 : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes conductivités thermiques de l'échangeur

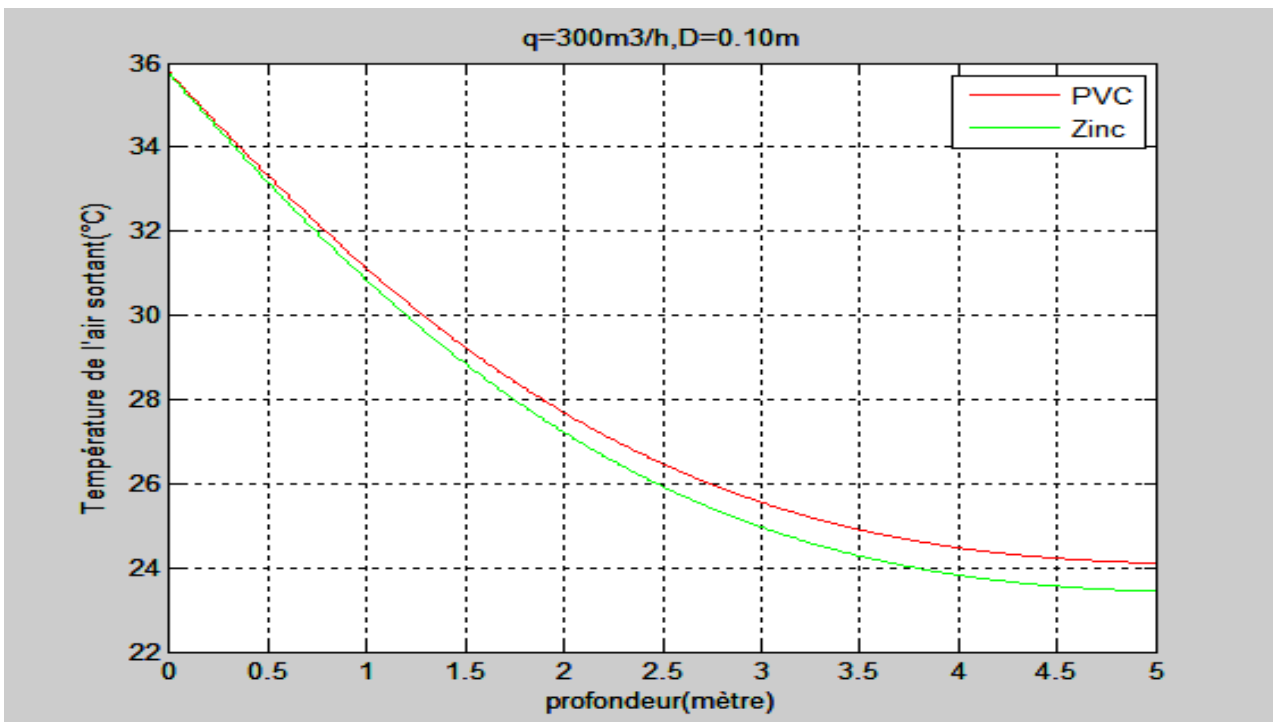


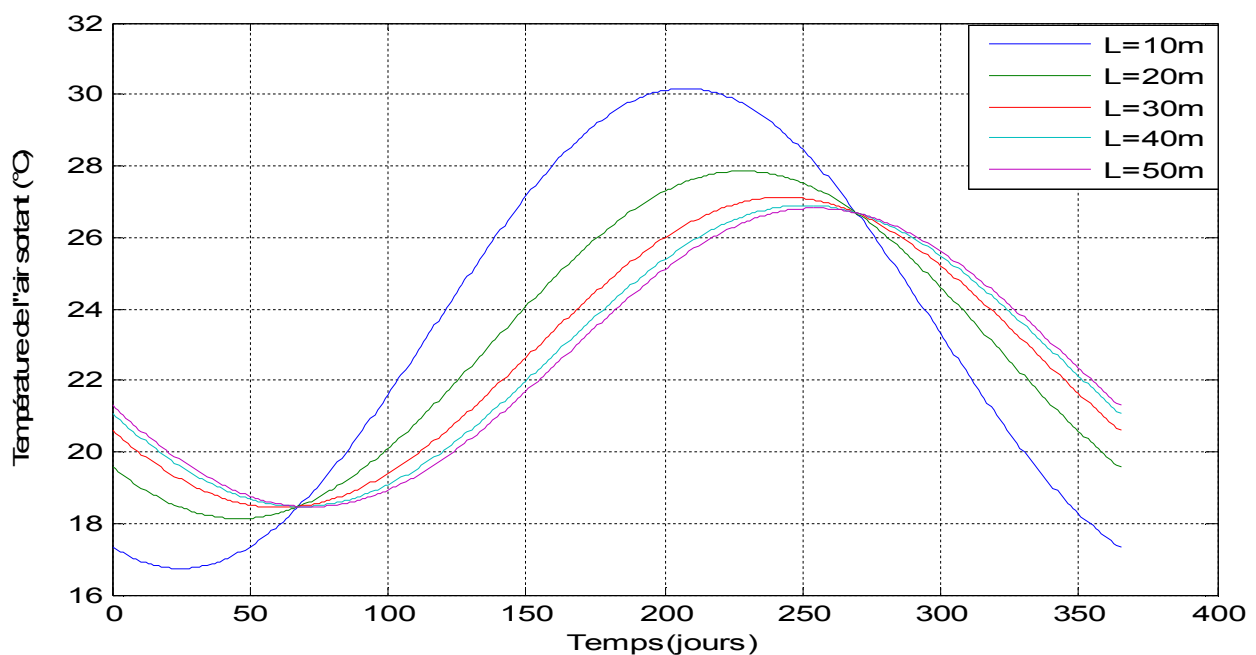
Figure IV-8 : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différentes conductivités thermiques.

#### IV.3.4. Influence de la longueur de l'échangeur :

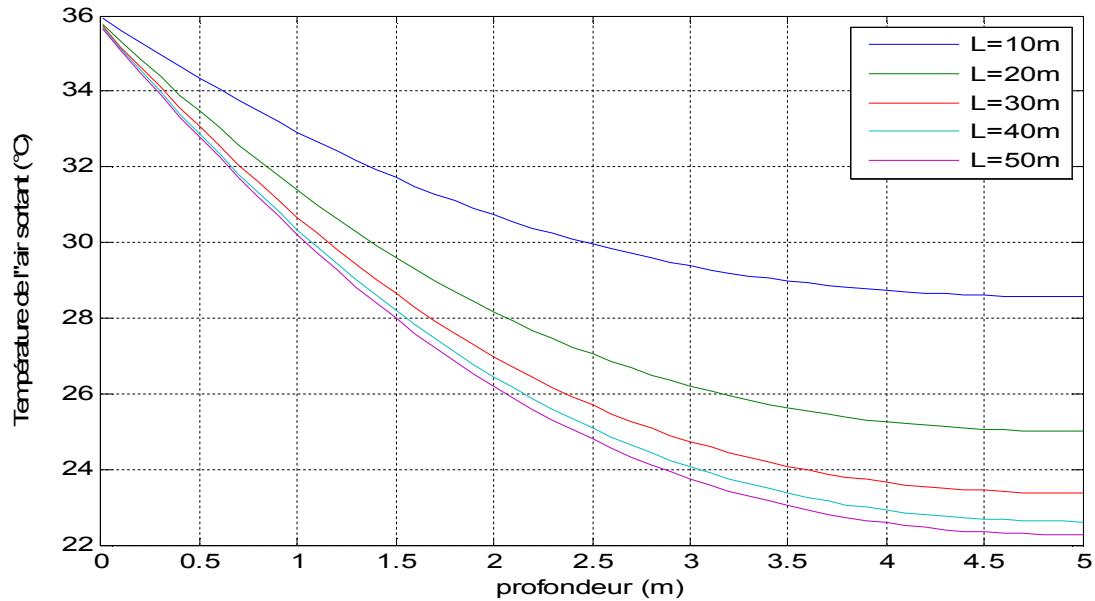
La figure IV-6 montre l'évolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes longueurs de l'échangeur. La figure 12 illustre l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction de la profondeur pour différentes longueurs. On constate une décroissance de température pour toutes les configurations simulées.

La longueur de l'échangeur est l'un des facteurs les plus influant sur le comportement de l'échangeur air/sol, pour une longueur prolongée, l'air dans l'échangeur a largement du temps et de surface d'échange qui lui permettent d'échanger beaucoup plus de la chaleur emmagasinée dans le sol.

On remarque qu'il y a un écart de 2.5 degrés entre une nappe de 20m et une autre de 50 m de longueur. Ce pendant, l'influence de ce paramètre n'est plus significative au-delà d'une certaine valeur (environ 40 m). On peut conclure que la longueur de l'échangeur doit être comprise entre 40 et 50 mètres.



**Figure IV-9 :** Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes longueurs d'échangeurs air-sol.

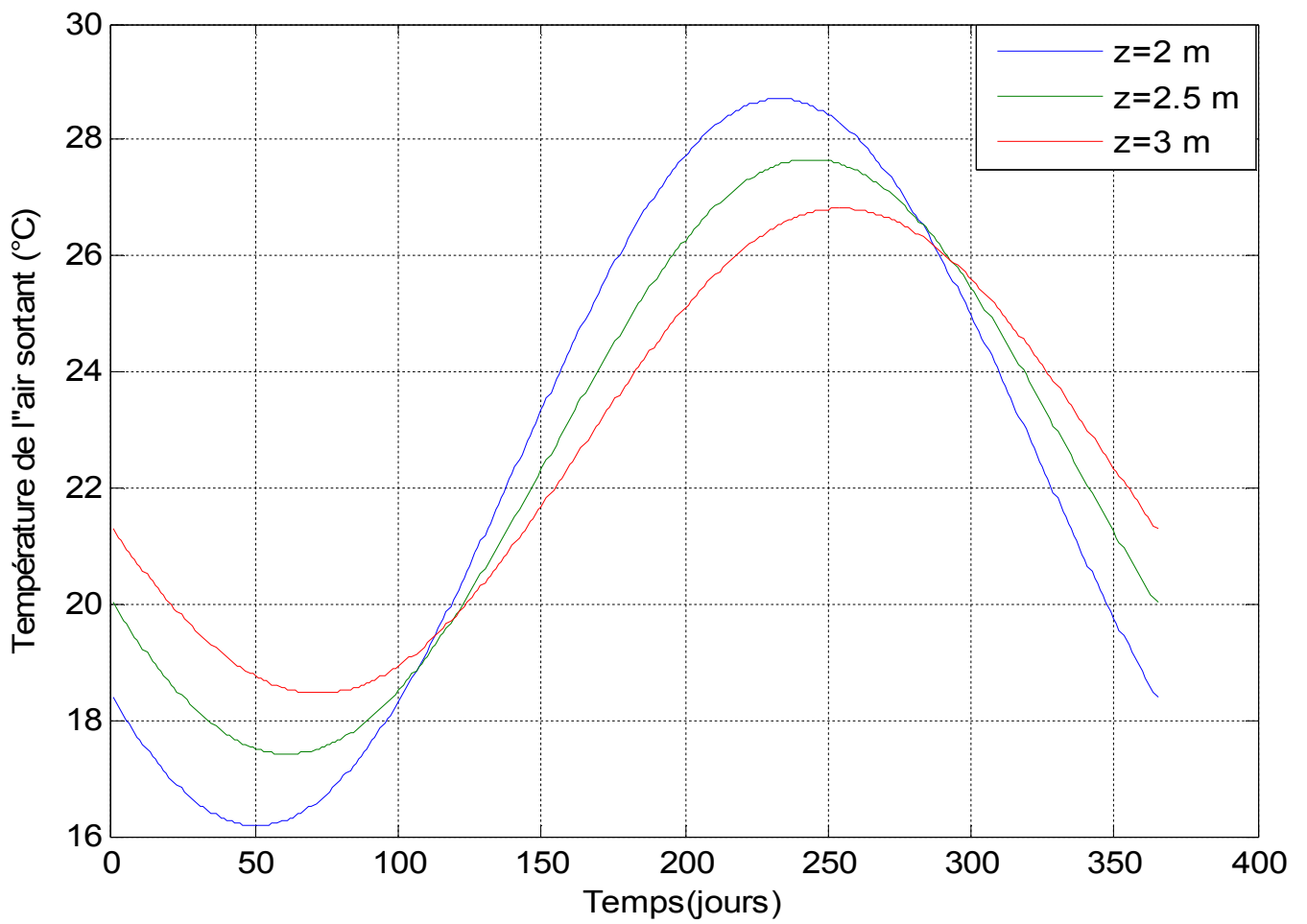


**Figure IV-10 :** Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différentes longueurs d'échangeurs air-sol.

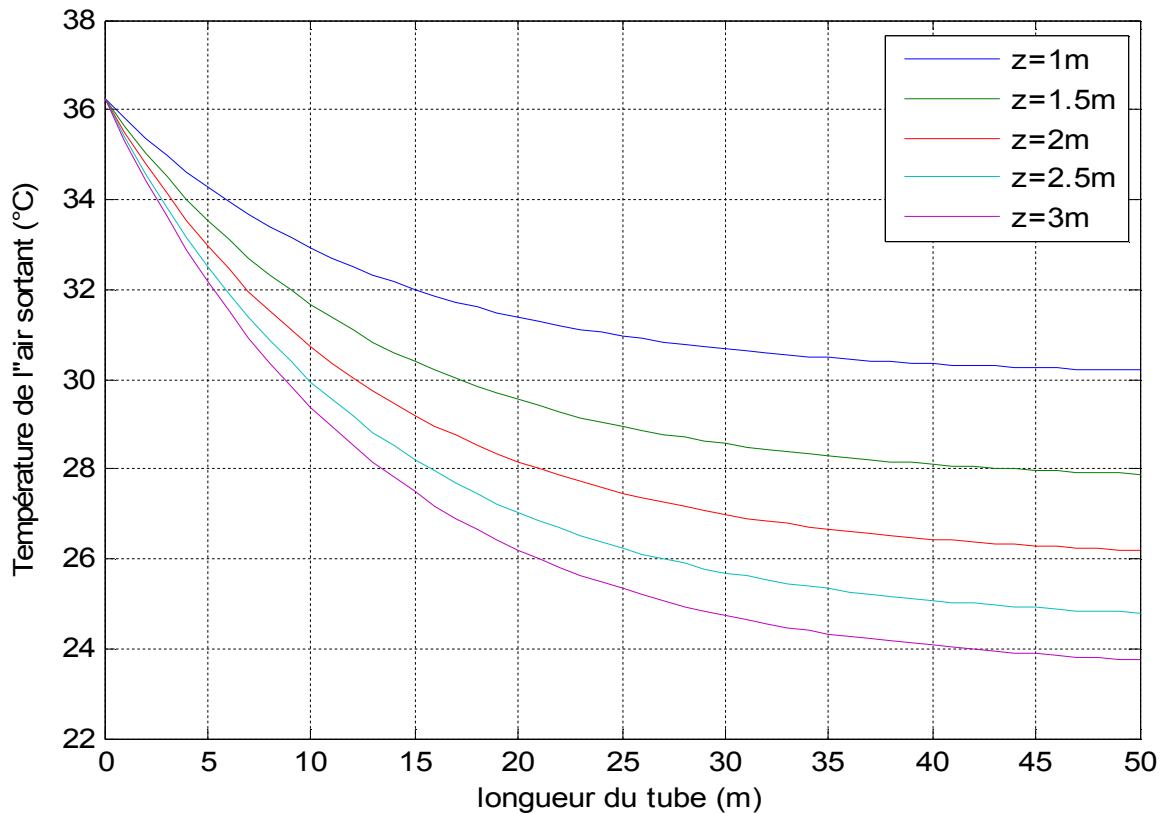
#### IV.3.5. Influence de la profondeur d'enfouissement:

Le résultat présenté sur la figure IV-11 montre que pendant la période la plus chaude de la saison, la température de l'air à la sortie de l'échangeur chute quand la profondeur d'enfouissement augmente, mais cette chute est négligeable pendant la périodes moins chaude de la saison, et ça est dû à l'amortissement de l'amplitude des sollicitations du signal de température, à cause de l'inertie du sol

La figure IV-12 représente la variation de la température de sortie en fonction de la longueur de l'échangeur pour différentes profondeurs de l'entrée de l'échangeur jusqu'à la sortie. On remarque que pour toutes les profondeurs étudiées, la température de l'air décroît de l'entrée correspondante à la température extérieure ambiante jusqu'à la sortie de l'échangeur. Cependant on note un écart de température de 1°C à la sortie de l'échangeur entre les profondeurs de 2.5 et 3mètres.



**Figure IV-11** : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes profondeurs



**Figure IV-12** : Evolution de la température le long de l'échangeur air-sol pour différentes profondeurs

#### IV.3.6. Influence de l'épaisseur de l'échangeur :

Pour juger l'influence de diamètre sur la température de sortie, nous présentons, l'évolution de la température pour différents épaisseurs du tubes dans les figures IV-13 et IV-14. On constate que l'augmentation de l'épaisseur du tube augmente la température de l'air à la sortie de l'échangeur d'une valeur non significative ; quelques dixièmes de degrés entre une épaisseur de 5mm et une autre de 15mm.

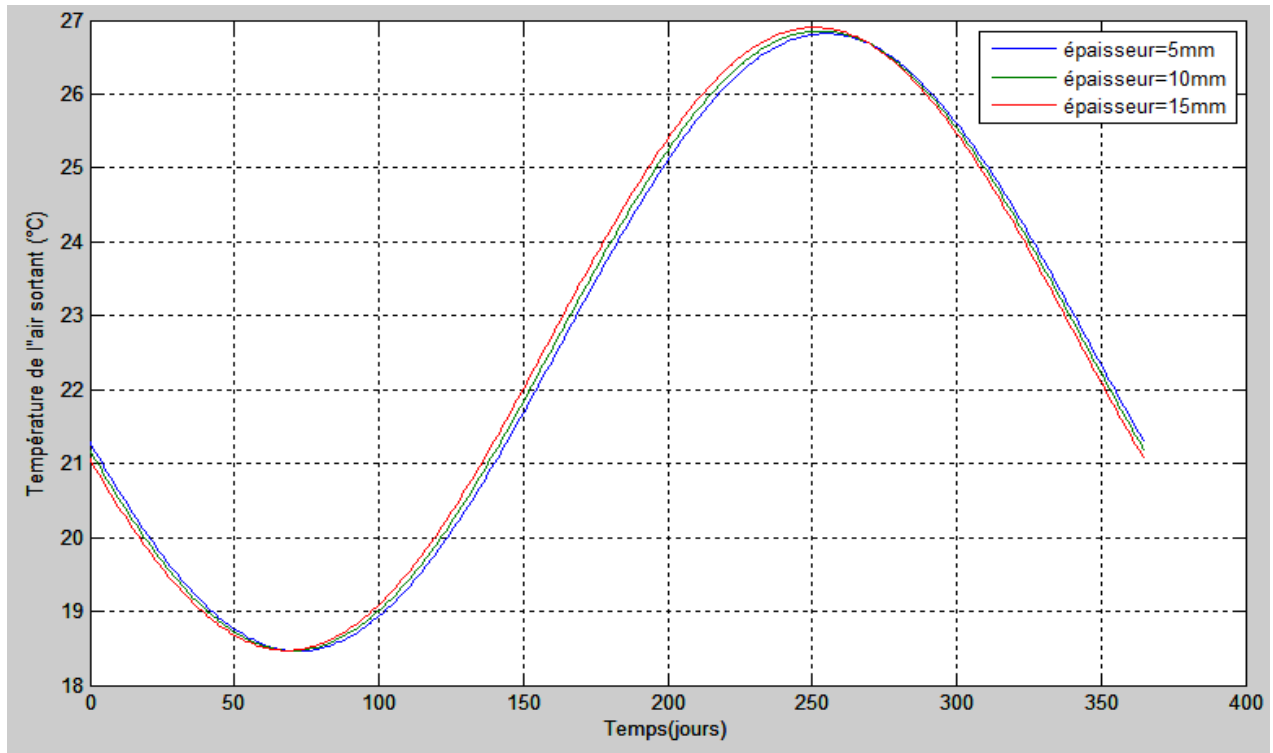


Figure IV-13 : Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol pour différentes épaisseurs

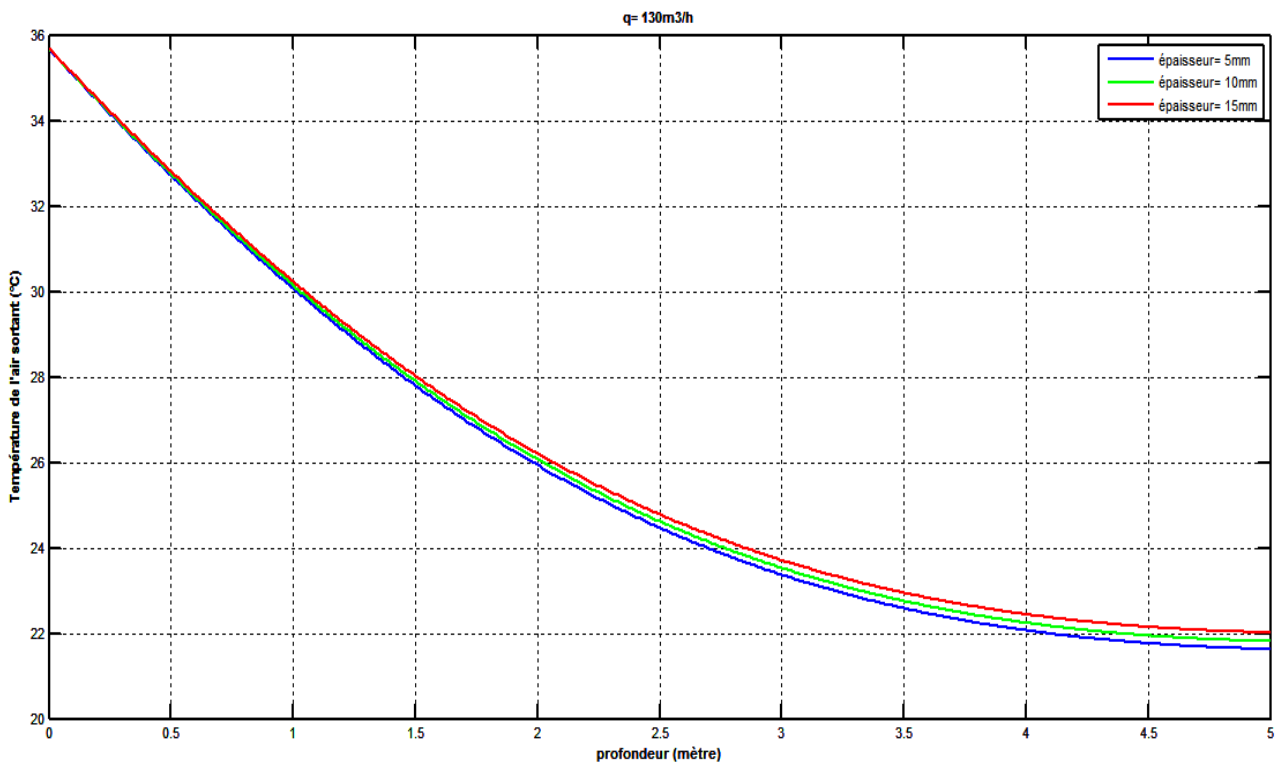


Figure IV-14 : Evolution de la température à la sortie de l'échangeur air-sol à différentes profondeurs pour différentes épaisseurs.

#### IV.4. Conclusion

La validation du modèle thermique d'échangeur air-sol, calculant la température de l'air en sortie d'échangeur en fonction de la température de l'air en entrée d'échangeur et de la température du sol avec le travail expérimental de Moumni et al effectué dans le site de Biskra, site similaire par ses sollicitations météorologique à celui d'Adrar a montré une bonne concordance. La simulation numérique a montré que l'efficacité de cet échangeur dépend essentiellement des facteurs suivants :

- Profondeur d'enfouissement.
- Longueur du tube.
- Débit volumique de l'air circulant dans le tube.
- Diamètre du tube.

Et aussi, mais d'un effet moins, des facteurs suivants :

- la conductivité thermique du tube
- épaisseur du tube



# Conclusion générale

### Conclusion générale

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 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.

Avec l'intérêt grandissant pour le développement durable et la lutte contre le changement climatique suite émissions de gaz à effet de serre (GES), la réduction de la consommation énergétique du secteur du bâtiment est devenue une priorité. Cette réduction doit passer par une diminution de la consommation associée à une production d'électricité issue des énergies non renouvelables.

L'échangeur air /sol est un système de ventilation du bâtiment qui exploite l'inertie thermique du sol et qui permet d'apporter une économie en matière de consommation d'énergie. Ce système de géothermie à énergie renouvelable en plein développement pouvant être intégré à l'habitat dans le site aride d'Adrar.

Notre étude de la performance d'un échangeur air/sol, exploité pour le rafraîchissement, a commencé 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 à même de fournir cette température, c'est pourquoi une modélisation est nécessaire. Ce modèle se base sur les caractéristiques du sol du site et sur la base de données météorologique. Il prend en compte plusieurs spécificités du lieu d'implantation de l'échangeur air-sol étudié. Son calcul dépend donc de la température de l'air extérieur, du flux de rayonnement global incident, de l'humidité du sol, de la vitesse du vent, de l'humidité relative moyenne de l'atmosphère ainsi de l'effet géothermique.

L'étude menée dans ce travail, nous a permis de simuler un modèle qui traduit l'évolution de la température de l'air en fonction des paramètres principaux. Ce modèle pourra servir en absence de données expérimentales pour dimensionner un échangeur air/sol.

D'après nos résultats de simulation obtenus, l'échangeur air-sol qui convient mieux pour un rafraîchissement efficace dans le site d'Adrar et ceux qui ont des caractéristiques similaires, doit avoir les paramètres physiques suivants :

- Un tube de P.V.C. de 35 à 50 mètres de longueur et de 10 à 40 cm de diamètre.
- Enterré 2.5 à 3.5 mètres sous sol.
- L'épaisseur du tube est de 5 à 10 mm.
- Le débit d'air doit être suffisant pour l'aération de l'habitation à rafraîchir mais elle ne doit pas dépasser une certaine valeur faute de nuire le confort thermique de l'habitant.

# Bibliographie

### Bibliographie

- [1] C. Daverat, étude expérimentale de la convection naturelle en canal vertical à flux de chaleur imposée; application au rafraîchissement passif de composants actifs de l'enveloppe des bâtiments, thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon,2012
- [2] Recueil de textes législatifs et réglementaires sur la maîtrise de l'énergie, L'agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APPRUE), ministère de l'énergie et des mines République Algérienne Démocratique et Populaire,. , Edition 2010.
- [3] P. Hollmuller, Utilisation des échangeurs air-sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique, Thèse de doctorat, université de Genève,2002.
- [4] P. Lavigne, Architecture climatique une contribution au développement durable Tome1 : bases physiques, EDISUD 1994.
- [5] M.Haj Hussein, Investigation sur la qualité des ambiances hygrothermiques et lumineuses des habitats palestiniens, La cour: contribution environnementale et socioculturelle, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, université Bordeaux 1, Thèse de doctorat,2012
- [6] V.Olgyay et al, Design with Climate – A Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, Princeton University Press, 1963.
- [7] H.Boivin « la ventilation naturelle, Développement d'un outil d'évaluation du potentiel de la climatisation passive et d'aide à la conception architecturale », mémoire de maîtrise, université Laval, Québec, 2007
- [8] S.Foura, Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie, mémoire de doctorat en sciences, université Mentouri de Constantine, 2008.
- [9] M.Boukli Hacène, Aspects Energétiques, Economiques et Environnementaux d'une Habitation Ecologique, thèse de doctorat, université de Tlemcen,2012.
- [10] O.Dupperon, Modélisation thermique dynamique du rafraîchissement passif, *ENTPE,VA Bâtiment* , Promotion 56 , 2011.
- [11] F.Sam, réhabilitation thermique d'un local dans une zone aride-cas de ghardaïa, mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou,2012.
- [12] L'architecture bioclimatique, *Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF), Organisation internationale de la Francophonie, Belgique,2008,8p.*
- [13] T.Salomon et S.Bedel, la maison des [néga] 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] B.Moujalled, « Modélisation dynamique du confort thermique », thèse de doctorat, présentée à l'institut des sciences appliquées de Lyon .France. 2007
- [16] P.Severin, traitement des ambiances ;application à l'habitat et aux locaux professionnels de l'hôtellerie-restauration, sciences et technologie de l'habitat et de l'environnement, IUFM de Toulouse, Biotechnologie B.
- [17] A.Degiovanni, Transmission de l'énergie thermique – Conduction ,technique de l'ingénieur,Be 8200,1999
- [18] Conseil d'architecture, d'urbanisme et l'environnement (CAUE) de la vendée collection conseils pratiques d'écoconception la pour la maison individuelle, 2011.
- [19] Z. Akchiche, Etude de comportement d'une cheminée solaire en vue de l'isolation thermique, Mémoire de Magister: Energétique et Procédés, Université de Ouargla, 2011.
- [20] M.Caciolo ,Analyse expérimentale et simulation de la ventilation naturelle mono-façade pour le rafraîchissement des immeubles de bureaux ,thèse de doctorat, l'École nationale supérieure des mines de Paris,2011
- [21] A.Dhalluin, Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire ,these de doctorat,UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE,2013
- [22] M.Mazari ,Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'Architecture de Tamda (Tizi-Ouzou),mémoire de magister Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou,2012
- [23] K.Benhalilou, Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment :cas du climat semi aride, Mémoire de Magister : Architecture bioclimatique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [24] U.jorck ,La maison passive en climat méditerranéen, Formation HQE, mémoire de fin de stage, école d'architecture de Lyon, janvier 2007.
- [25] A. Liébard A. De Herde : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Ed. Le Moniteur, Paris 2005.
- [26] P.Tittlein. *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique de bâtiments basse consommation*. PhD thesis, Université de Savoie, 2008.
- [27] S.boulfekhar, «L'architecture vernaculaire comme modèle pour assister la conception environnementale des bâtiments», Mémoire de Master,école Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy,Université Henri Poincaré (Nancy1),Institut National Polytechnique de Lorraine,2011.
- [28] La construction durable pour l'entreprise de construction ; des soltions pour réaliser des batiments plus durables sont à portée de vos mains!,manuel pratique,Confédération Construction Bruxelles Capitale,190p, 2011.

- [29] R.Hyde ,Bioclimatic housing ;innovative designs for warm climates ,Earthscan, London • Sterling, VA.476p, 2008.
- [30] Guide des énergies renouvelables *Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables* ,Ministère de l'Énergie et des Mines, République Algérienne Démocratique et Populaire, *Édition 2007*.
- [31] O.Salima, étude géothermique du sud de l'Algérie, mémoire de magister, université M'hamed Bouguerra de Boumerdès, 2006.
- [32] Le confort thermique, Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opérations de constructions publiques, Certu,France,juillet 2003.
- [33] Les puits canadiens/provençaux, Guide d'information, Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques «CETIAT», France, (2008).
- [34] S.Laporthe ,Petit guide des pompes à chaleur géothermales, centre scientifique et technique du batiment, sophia-antipolis Cedex,23p, 2004,
- [35]La géothermie,usage résidentiel et collectif,guide du conseil générale des landes ,21p, Axenne,France,21p,2008
- [36] S. Thiers, 'Bilans énergétique et environnementaux de bâtiment à énergie positive' Thèse de Doctorat, L'école national supérieur des mines de Paris, 2008
- [37] T.Salomon et al , Dimensionnement du pt climatique ; Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits « canadiens » ou « provençaux », Rapport final PREBAT ADEME 04 04C 000 1,Région Languedoc-Roussillon,2009
- [38] M.Bojic, "Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building." *Energy* 22(12): 1151-1158,(1997).
- [39] V,Badescu,. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house, *Renewable energy*. Vol 32 (5). pp. 845–855, (2007)
- [40] N. Moumami et al, Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3*, pp. 399 – 406 (2010)
- [41] H. Benfatah, , Etude théorique et expérimentale du rafraichissement par la géothermie, application à l'habitat, Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Énergétique, SIGCLE, Constantine, (2010).
- [42] D.Amitrano, Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits Canadien ». Université J. Fourier, Grenoble, (2006)
- [43] Puits climatique ,conception et dimensionnement, programme d'accompagnement des professionnels, BRENELLE ENVIRONNEMENT ,France,2015.
- [44] A.Mermoud, Cours de physique du sol. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,2003.

[45] Y.Jannot, « Transferts thermiques » Ecole des mines de Nancy (France), cours de 2<sup>ème</sup> année,.2011

[46] S. Ouali et al .Etude géothermique du sud de l'Algérie, *Revue des Energies Renouvelables Vol.9 N°4 (2006) 297 – 306*

[47]M. Benhammou1 et B. Draoui , Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar - Effet de la nature du sol, *Revue des Energies Renouvelables Vol.14 N°2 (2011) 219 – 228*

[48] K. Messaitfa et T. Chergui, l'eau, l'énergie et le vent à travers la région d'Adrar, (URER/MS), Algérie

[49] M.R.Yaiche,A.Bouhanik,atlas solaire algérien,centre de développement des énergies renouvelables (CDER) , Alger,2002.

[50] B. Mebarki et al, Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 465 – 478.*



# Annexes

## Annexe I : Analyse de Fourier

Soit un signal quelconque continu,  $S(t)$ , échantillonné avec un pas horaire, sur une année. L'analyse de Fourier du signal consiste à exprimer  $S(t)$  comme une somme de fonctions sinus et cosinus dont les périodes sont les multiples d'une même période fondamentale  $\omega$  [36].

$$S(t) = \bar{S} + \sum_{j=1}^{+\infty} (a_j \sin j \cdot \omega \cdot t + b_j \cos j \omega \cdot t.)$$

Les paramètres à déterminer sont la moyenne  $\bar{S}$ , les coefficients de Fourier  $a_j$  et  $b_j$ , et la pulsation fondamentale  $\omega$ .

Pour un signal de période fondamentale annuelle, échantillonné sur un pas horaire sur une année, la pulsation fondamentale correspondante  $\omega$  exprimée en  $\text{rad} \cdot \text{h}^{-1}$  vaut :

$$\omega = \frac{2\pi}{8760}$$

La valeur moyenne du signal  $S$  est la moyenne arithmétique des données horaires ( $S_{\text{mesuré}}(h)$ ).

$$\bar{S} = \frac{1}{8760} \cdot \sum_{h=1}^{8760} S_{\text{mesuré}}(h)$$

Les coefficients de Fourier,  $a_j$  et  $b_j$ , se calculent, à partir des données horaires, comme suit :

$$a_j = \frac{2}{8760} \cdot \sum_{h=1}^{8760} S_{\text{mesuré}}(h) \cdot \sin(j \cdot \frac{2\pi}{8760} \cdot h) \quad \text{et}$$

$$b_j = \frac{2}{8760} \cdot \sum_{h=1}^{8760} S_{\text{mesuré}}(h) \cdot \cos(j \cdot \frac{2\pi}{8760} \cdot h)$$

Enfin, il est facile d'exprimer  $S(t)$  à l'aide des seules fonctions sinus :

$$S(t) = \bar{S} + \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \sin(j \cdot \omega \cdot t + \varphi_j)$$

Avec

$$A_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \quad \text{et} \quad \varphi_j = \text{Arctan}\left(\frac{b_j}{a_j}\right)$$

## Annexe II : Evaluation du coefficient d'échange convectif

Le coefficient d'échange par convection entre l'air et le tube,  $h_{cv}$ , est l'un des paramètres fondamentaux des échangeurs air/sol. La thermohydraulique propose à cet effet trois nombres adimensionnés, caractérisant le fluide, son écoulement et son comportement thermique.

Le **nombre de Reynolds**,  $Re$ , caractérise le régime de l'écoulement (laminaire, turbulent ou mixte). Il est défini comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. :

$$Re = \frac{v \cdot D_H}{\nu_a} = \frac{\rho_a \cdot v \cdot D_H}{\mu_a}$$

Le **nombre de Prandtl**,  $Pr$ , caractérise le comportement thermique du fluide. Il est défini comme le rapport de la viscosité cinématique du fluide sur sa diffusivité thermique :

$$Pr = \frac{\nu_a}{\alpha_a} = \frac{\nu_a}{\lambda_a} \rho_a c_a = \frac{\mu_a \cdot c_a}{\lambda_a}$$

Le **nombre de Nusselt**,  $Nu$ , qui correspond à un coefficient d'échange convectif adimensionné, vaut :

$$Nu = \frac{h_{cv} \cdot D_H}{\lambda_a}$$

Ce nombre peut être calculé à partir des deux précédents par diverses formules empiriques dont la littérature abonde. Dans un échangeur air-sol l'écoulement est le plus souvent turbulent et le diamètre de la conduite est petit devant sa longueur. La formule simplifiée retenue est celle proposé par Hollmuller (2002) :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$

Le coefficient d'échange convectif vaut donc :

$$h_{cv} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{D_H}$$