



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Génie mécanique  
Option : installation énergétique et turbomachines

Thème  
Etude des performances thermique d'un échangeur de chaleur  
(conduite enterrée) air/sol

Proposé et encadré par :  
Mr.lafri djamel

Réalisé par :  
Boumedjane Alaeddine  
Ghezal Abdelmadjid

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail aux deux  
êtres qui  
me sont les plus chères au monde :  
mon père et  
ma mère, que dieu me les garde pour  
toujours  
(inchallah).*

*A mes frères et sœurs.*

*A toute la famille de Département  
de Génie Mécanique.*

*Et à tous ceux que je connais de près  
ou de loin*

# *Remerciements*

*« Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant de me donner l'occasion de poursuivre mes études à l'université de Blida 1 »*

*Ce travail a été mené au sein du département de mécanique, faculté des technologies, Université de Blida 1.*

*J'exprime mes sincères remerciements à Mr LAFRI DJAMEL d'être le promotor de mon mémoire*

*Je remercie tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis mes premiers jours à l'école jusqu'aujourd'hui.*

*Je remercie aussi les membres de jury, d'avoir accepté de participer au jury et pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce mémoire.*

## Liste de la figure

### Chapitre I

Figure ( I.1 ) : Les profondeurs et les températures de sol.....	4
Figure ( I.2 ) : La distribution de température aux niveaux du sol.....	4
<b>Figure ( I.3 )</b> : les différents types de géothermie et leurs utilisations.....	6
<b>Figure ( I.4 )</b> : la variation de la température en fonction de profondeur et les saisons.....	6
<b>Figure ( I.5 )</b> : Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau .....	8
<b>Figure ( I.6 )</b> : Description d'un puits canadien.....	9
Figure ( I.7 ) : Modélisation analytique par transformée de Fourier d'un échangeur air/sol à condition au bord adiabatique, étude paramétrique.....	14
<b>Figure ( I.8 )</b> : schéma de principe de l'échangeur thermique de Romillé.....	15
<b>Figure (I.9 )</b> : Evolution de la température au cours des campagnes d'enregistrement.....	16
<b>Figure ( I.10 )</b> : Evolution des températures les plus chaudes d'été et les plus froides d'hiver.....	17
Figure (I.11 ) : Représentation de l'échangeur géothermique à air.....	18
Figure (I.12 ) : Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juin.....	18
Figure (I.13 ) : Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction du diamètre du tube .....	19
Figure (I.14) : Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction de la vitesse moyenne de l'air dans le tube.....	19
<b>Figure (I.15 )</b> : Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour la 200ième journée de l'année.....	20
<b>Figure (I.16)</b> : Comparaison résultats expérimentaux et analytique pour $q_v=121.52 \text{ m}^3/\text{h}$ ...	20
<b>Figure (I.17)</b> : Evolution annuelle de la température à la sortie de l'échangeur.....	21
<b>Chapitre II</b>	
<b>Figure (II.1 )</b> : Structure du modèle d'échangeur air/sol enterré.....	24
<b>Figure (II.2)</b> : Schématisation du Problème Physique.....	24

**Figure (II.3) :** Evolution de la température du sol théorique en fonction du temps et de la profondeur  $z$  dans le cas d'un sol argileux.....26

**Figure (II.4) :** Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré.....28

**Figure (II.5) :** Evolution de la température théorique en fonction de la longueur de l'échangeur air/sol pour les 3jours (site de blida) à différent température d'entrée pour une profondeur de 3m .....29

### Chapitre III

**Figure (III-1) :** Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur  $z$  dans le cas d'un sol sableux sec ( $\rho =1650 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda=0.27 \text{ W/m.K}$ ,  $C_p=805 \text{ J/kg.K}$ ).....32

**Figure (III-2) :** Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur  $z$  dans le cas d'un sol sableux humide ( $\rho =1750 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda=0.58 \text{ W/m.K}$ ,  $C_p=1000 \text{ J/kg.K}$ ).....33

**Figure (III-3) :** Evolution de la température du sol en fonction du temps pour trois types de sol pour une profondeur de 0.5 m.....33

**Figure (III-4) :** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents matières de construction du tube échangeur, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m,  $V=3 \text{ m/s}$ .....34

**Figure (III-5) :** Evolution de l'efficacité théorique de l'échangeur air/sol géothermique en fonction de la longueur pour différentes matières de constructions utilisées.....36

**Figure (III-6) :** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur d'échange, tube échangeur en PVC, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, dont le vitesse de  $V=3 \text{ m/s}$ .....36

**Figure (III-7) :** Efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur tube échangeur en PVC,  $d =150 \text{ mm}$  enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, de vitesse  $V=3 \text{ m/s}$ .....37

**Figure (III-8) :** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différent vitesse d'air injectés dans l'échangeur (PVC ,  $d=150 \text{ mm}$  ) enterré à une profondeur de 03 m, sol argileux, température à l'extérieur  $T_e = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .....38

**Figure (III-9) :** Evolution Efficacité de l'échangeur pour différents débits, Echangeur en PVC ,  $d= 150 \text{ mm}$ , profondeur de 03 m, température à l'extérieur  $T_e=35^\circ\text{C}$ .....38

**Figure (III-10) :** Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour différentes épaisseurs du tube échangeur en PVC,  $d=150\text{mm}$ , sol argileux, profondeur 03m,  $V =3\text{m/s}$ .....40

**Figure (III-11)** : Efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur pour différent épaisseur de tube échangeur en PVC,  $d=150\text{mm}$ , sol argileux, profondeur 03 m,  $V=3\text{m/s}$ .....40

**Figure(III.12)** Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour différentes diamètre du tube échangeur en PVC, sol argileux, profondeur 03m,  $V =3\text{m/s}$ .....41

## Chapitre IV

**Figure IV-1** : schéma et représentatif les positions des thermocouples suivant la profondeur sol a 2.75m.....43

**Figure. IV.2** schéma explicatif de l'implantation des thermocouples pour différent profondeur de l'échangeur air/sol.....43

Figure **IV-3** fosse a 0.75m.....44

Figure **IV-4** fosse a 1.75m.....44

Figure **IV-5** fosse a 2.70 m.....44

Figure **IV-6** montage parallèle pour les trois conduites a même ventilateur pour un vitesse constante 1.5 m/s.....45

Figure **IV-7** résultats expérimental pour les profile des température en fonction de profondeur et le temps.....45

Figure **IV-8** Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur  $z$  dans le cas d'un sol argileux .....46

## Liste des tableaux

### Chapitre I

<b>Tableau (I.1)</b> Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol.....	8
<b>Tableau (I.2)</b> les résultats obtenu par logiciel GAEA.....	13
<b>Tableau ( I.3 )</b> Gains thermique de l'changeur testé.....	16
<b>Tableau ( I.4 )</b> Rendement de l'échangeur à 25 m et à mi-longueur en fonction de la saison.....	17

### Chapitre III

<b>Tableau III-1 :</b> Efficacité de l'échangeur pour différentes matières de constructions utilisées dans les échangeurs air/sol géothermiques .....	35
<b>Tableau (III-2) :</b> Efficacité de l'échangeur pour différents vitesses (échangeur en PVC , d=150 mm ) profondeur = 03 m, sol argileux, température à l'extérieur $T_e=35\text{ }^\circ\text{C}$ .....	39
<b>Tableau (III-3) :</b> Efficacité de l'échangeur pour différent épaisseurs de tube échangeur en PVC, d=150 mm, sol argileux, profondeur 03 m, $V= 3\text{m/s}$ .....	41

### Chapitre IV :

<b>Tableau IV-1</b> la température expérimentale de l'échangeur air/sol en fonction de temps à 0.75m.....	46
<b>Tableau IV-2 :</b> la température théorique de l'échangeur air/sol en fonction de temps à 0.75m.....	46

# Nomenclature

---

## Nomenclature

Symboles	Désignation	unité
C	capacité thermique	j/k
$\lambda$	conductivité thermique	w/m.k
$\dot{m}$	débit massique d'air	kg/s
T	la température	k
$T_e$	la température de l'air entrée	k
$T_{sol}$	la température du sol	k
A	amplitude de température	k
t	temps	s
$t_0$	jour de l'année de la température de surface minimale	jour
$T_i$	La température du sol à une profondeur infinie	k
Z	Profondeur	m
l	longueur	m
$C_{pair}$	chaleur spécifique de l'air	j/k.kg
$\varepsilon$	L'efficacité de l'échangeur	
$\rho_{air}$	masse volumique de l'air	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{sol}$	masse volumique du sol	kg/m <sup>3</sup>
V	vitesse entrée de l'air	m/s
S	surface de section	m <sup>2</sup>
$R_{cd}$	résistance du tub	m <sup>2</sup> .k/w
$R_{cv}$	résistance convectif	m <sup>2</sup> .k/w
$R_t$	résistance total	m <sup>2</sup> .k/w
R	rayon extérieure du tube	m
r	rayon intérieure du tube	m
$Re$	nombre de reynolds	
Nu	nombre de nusselt	

## Nomenclature

---

Pr	nombre de prandtl	
$\alpha$	Diffusivité thermique du sol	$m^2/s$
$\nu$	viscosité cinématique	$m^2/s$
hcv	coefficient d'échange convectif	$w/m^2.k$
d	diamètre du tube	m

## Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>Chapitre I : Analyse théorique et étude bibliographique.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition .....	3
I.2.1 Gradient géothermique .....	4
I.2.2 Les sources de chaleur interne .....	5
I.2.3 Les types de géothermie .....	5
I.3 La distribution de température à la zone géothermie très basse .....	6
I.4 Propriétés thermique des sols .....	7
I.4.1 Capacité calorifique .....	7
I.4.2 Conductivité thermique .....	7
I.5 Les puits canadien .....	8
I.5.1 Le fonctionnement d'un puits canadien.....	9
I.5.2 L'entrée d'air .....	10
I.5.3 La canalisation .....	10
I.5.4 Diamètre, longueur et profondeur .....	11
I.5.5 Les Condensats .....	11
I.5.6 Les périodes intermédiaires.....	11
I.5.7 Ventilation et qualité d'air intérieure .....	11
I.5.8 Recommandations à prendre durant la réalisation d'un puits canadien .....	12
I.5.10 Exemple du calcul par logiciel GAEA .....	13

I.6 Principaux travaux de recherche réalisés sur le procédé du rafraîchissement par géothermie.....13

**Chapitre II: Modélisation de la température du sol et de l'air**

**à la sortie de l'échangeur (air/sol) enterré.....22**

II .1 Introduction..... 22

II .2 Analyse des paramètres à modéliser..... 22

II .2.1 Débit d'air..... 22

II .2.2 Longueur du conduit échangeur.....23

II .2.3 Diamètre du conduit échangeur..... 23

II .2.4 Distance entre les canalisations..... 23

II .2.5 La profondeur d'enfouissement des canalisations.....23

II.3 La distribution de la température en fonction du temps pour différentes profondeurs ...24

II.4 Calcul de la température de l'air à la sortie de l'échangeur enterré.....26

II.5 L'efficacité de l'échangeur air/sol.....30

**Chapitre III: Analyse des paramètres intervenant dans le dimensionnement d'un échangeur (air/sol) enterré.....31**

III-1. INTRODUCTION.....31

III-2.Effet de la nature et de type du sol.....32

Sol sableux sec ..... 32

Sol sableux humide ..... 33

III.3- Effet de la matière de construction du tube échangeur enterré.....34

III.4- Effet de la longueur d'échange.....36

III.5- Effet du débit d'air injecté dans l'échangeur.....37

III.6- Effet de l'épaisseur du tube échangeur enterré .....39

III.7- Effet de diamètre du tube échangeur enterré .....41

**Chapitre IV : étude expérimentale et validation le code de calcul.....42**

## Sommaire

---

IV-1 Introduction.....	42
<i>IV-2</i> description du dispositif expérimental.....	42
<i>IV-3</i> la température de sol.....	43
<i>IV-4</i> Les résultats expérimental et théorique.....	45
<i>IV-4-1</i> La température du sol .....	45
<i>IV-4-2</i> La température de sortie de l'échangeur .....	46
Conclusion Générale.....	48

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Annexes

### INTRODUCTION GENERALE

L'augmentation de la consommation mondiale énergétique augmente au détriment de l'environnement. En effet, les énergies fossiles [charbon, pétrole, gaz naturel] sont utilisées de manière abusive. Ces énergies sont polluantes et limitées. Ceci est responsabilité du réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets indésirable sur les équilibres physiques, économiques sociaux et politiques de notre planète politiques de notre planète.

Le recours à des énergies propres pour les besoins énergétiques et le développement économique et social devient incontournable. Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique et énergie géothermique qui présente la quantité d'énergie assez grande. L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et les moins chères du monde entier.

Les utilisations de cette énergie sont multiples. Elles vont des utilisations telles que le chauffage des serres, la balnéothérapie, la production de l'électricité et le rafraîchissement de l'air.

Pour le chauffage et la climatisation des locaux l'utilisation d'un échangeur air/sol, système appelé communément « puits canadien» et parfois « puits provençal » lorsqu'il sert à rafraîchir l'habitation, connaît un développement important depuis quelques années. Il consiste à utiliser comme entrée pour la ventilation de la maison, de l'air qui a préalablement circulé dans un tube enterré à une certaine profondeur. La température du sous-sol étant moins variable que celle de l'air extérieur cela permet d'avoir une entrée d'air plus tempérée.

En hiver, l'air est réchauffé avant de pénétrer dans la maison ; en été il est rafraîchit. Il s'agit ainsi du système de géothermie le plus simple qui soit, avec une consommation électrique réduite à la celle du ventilateur utilisée pour la circulation de l'air.

Le dimensionnement d'un puits canadien s'appui sur un grand nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de tubes, profondeur d'enfouissement, distance entre les tubes, débit de ventilation. Le présent travail est basé sur des simulations numériques d'échanges thermiques par convection dans un tube enterré. Ceci permet de mettre en évidence l'effet du diamètre, de la longueur, du débit volumétrique de la différence de température entre le sol et l'air entrant sur le flux thermique fourni par le puits canadien

Dans ce premier chapitre qui traite le principe de fonctionnement de la géothermie, une technique destinée pour le rafraîchissement en été et le réchauffement en hivers. D'autre part, un aperçu sur les principaux travaux théoriques et expérimentaux réalisés sera exposé, où on essayera de présenter pour chaque travail réalisé, les objectifs quelques résultats à travers des courbes et des tableaux.

## INTRODUCTION GENERALE

---

A travers le deuxième chapitre on exposera la problématique de notre étude et puis la démarche mathématique adoptée pour l'établissement des différents modèles mathématique qui décrivent le comportement de la température à la sortie de l'échangeur en fonction des différents paramètres, géométriques, physiques et thermo physiques, l'objectif principal est de trouver pour chaque cas d'utilisation le modèle mathématique adéquat.

Dans le troisième chapitre, on présentera les résultats qui seront issus de la simulation numérique, et de voir l'influence de chacun des paramètres considérés sur la distribution de la température de l'air depuis l'entrée de l'échangeur jusqu'à sa sortie, ainsi que l'impact des paramètres qui influent directement sur les performances thermiques principalement l'efficacité de l'échangeur.

Le dernier chapitre on à présenté un travail expérimentale d'un échangeur air/sol qui réalisé aux niveaux de université Saad dahleb Blida et comparé avec les résultats théorique.

En fin, une conclusion générale dans laquelle seront récapitulés les principaux résultats obtenus.

---

Analyse théorique et étude bibliographique

---

## I.1 Introduction

Aujourd'hui la recherche des nouvelles sources d'énergie est une obligation et n'est pas un choix, ces sources doivent obéir à des conditions de point de vue économique, écologique telles que :

- L'abondance et la disponibilité des sources (et si la source est renouvelable il sera mieux)
- Le coût d'exploitation de ces énergies doit être acceptable.
- L'exploitation elle-même ne représente pas un danger sur l'environnement

Parmi ces sources : l'énergie solaire, biomasse, hydraulique, géothermie, celle-ci est l'objet de cette partie.

Nous nous tenons dans cette étude, le rafraîchissement et réchauffement par la géothermie, à travers des modalisations et des simulations des performances de ces systèmes, nous essayerons de poser en évidence l'impact que jouent ces énergies sur l'économie nationale. La mise en place d'un programme de recherche dans ce domaine, permet d'établir une démarche globale de maîtrise des énergies renouvelables .

Dans cette étude théorique du phénomène du rafraîchissement des habitations par l'énergie géothermique, il s'agit d'un procédé qui est jusqu'à maintenant non utilisé dans notre pays. Dans le but est de connaître l'évolution de la température de l'air ambiant à la sortie de l'échangeur qu'on pourra avoir dans divers contextes structurels Dans ce premier chapitre qui traite le principe de fonctionnement de la géothermie, une technique destinée pour le rafraîchissement en été et le réchauffement en hivers. D'autre part, un aperçu sur les principaux travaux théoriques et expérimentaux réalisés sera exposé, où on essayera de présenter pour chaque travail réalisé, les objectifs quelques résultats à travers des courbes et des tableaux.

## I.2 Définition :

La géothermie, du grec géo (« la Terre ») et thermos (« la chaleur »), désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur . [1]

### I.2.1 Gradient géothermique :

Le gradient de température n'est pas le même entre le centre de la terre et la couche terrestre, où on peut atteindre plusieurs centaines de degrés pour de faibles profondeurs et inversement. Plus l'on fore profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente. En moyenne, l'augmentation de température atteint 20 à 30 degrés par kilomètre. Ce gradient thermique dépend beaucoup plus de la région du globe considérée. Il peut varier de 3°C par 100 m (régions sédimentaires) jusqu'à 15°C ou même 30°C (régions volcaniques, zones de rift comme en Islande ou en Nouvelle-Zélande). [2]

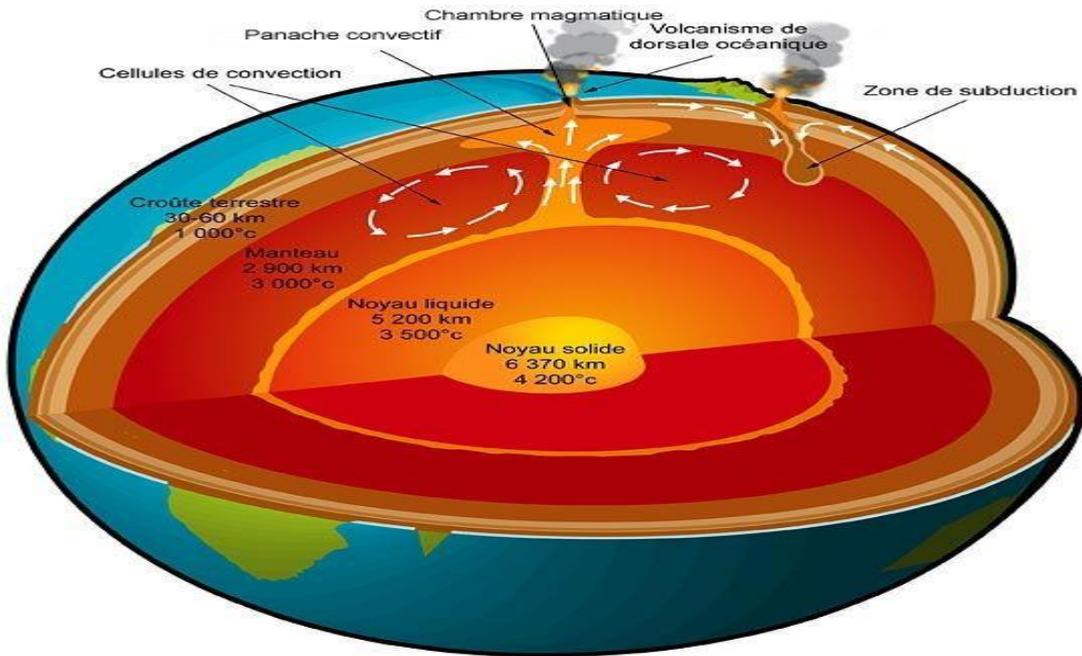


Figure ( I.1 ) : Les profondeurs et les températures de sol [3]

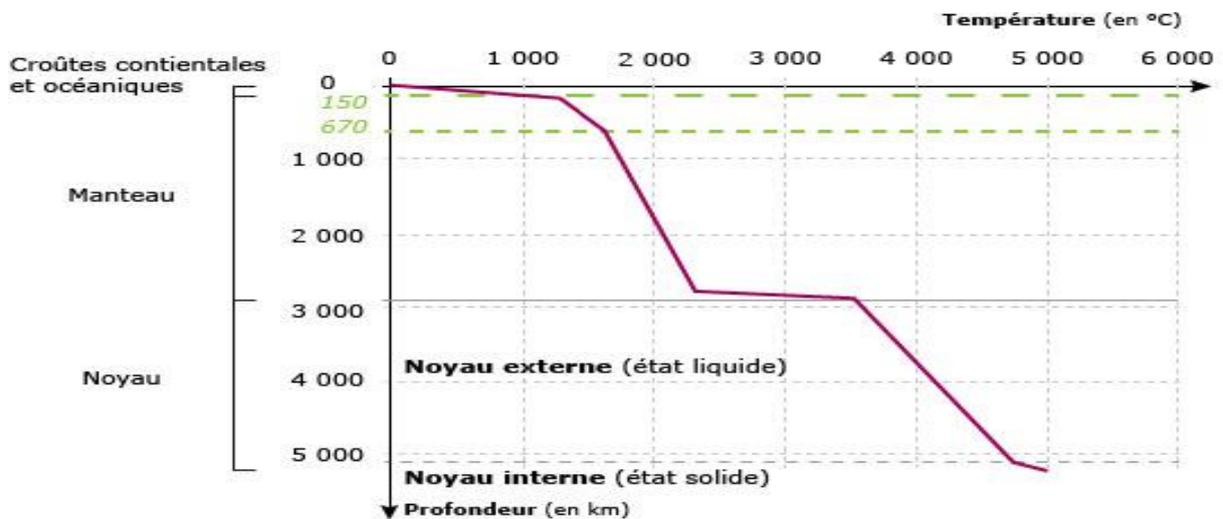


Figure ( I.2 ) : La distribution de température aux niveaux du sol [4]

### I.2.2 Les sources de chaleur interne :

Il existe quatre sources de chaleur, mais on ne sait pas quelle est leur contribution précise.

- Première source : La principale source provient de la désintégration de quatre isotopes radioactifs présents dans le sous-sol : thorium 232, uranium 238, uranium 235, potassium 40.
- Deuxième source : Il y a aussi l'énergie accumulée lors de la formation du système solaire il y a 4,56 milliards d'années. L'agglomération sous l'effet de la gravitation de poussières en blocs de plus en plus gros et les impacts qui ont suivi ont généré de la chaleur. Celle-ci est restée confinée dans les profondeurs terrestres.
- Troisième source : la cristallisation de la partie liquide du noyau terrestre. Ce dernier, mélange de fer et de nickel, est constitué d'une partie solide (la graine) et d'une enveloppe liquide des mêmes métaux. La solidification de celle-ci est exothermique (elle dégage de la chaleur) .
- Quatrième source : la terre est chauffée ou refroidie en même temps par: le soleil, l'air, le vent et l'eau de pluie. Donc le sol constitue un réservoir qui reçoit en permanence de l'énergie sous forme de calories. [5]

### I.2.3 Les types de géothermie :

On distingue 4 types différents de géothermie :

- La géothermie haute énergie va jusqu'à 4000 mètres de profondeur et est également utilisée pour produire de l'électricité. On peut donc l'associer à la géothermie moyenne. Elle se trouve aussi donc dans les régions volcaniques mais aussi à la frontière des plaques tectoniques. Cette technique permet d'atteindre des températures allant de 180 à 350° et utilise la vapeur sous pression pour alimenter les turbines des centrales géothermiques.
- La géothermie moyenne énergie se situe entre 2500 et 4000 mètres de profondeur. Elle est utilisée pour produire de l'électricité et elle consiste à atteindre une température comprise entre 100 et 180°C. On la retrouve essentiellement dans les régions volcaniques où les réservoirs sont à moins de 1000 mètres ou dans les bassins sédimentaires dans des réservoirs de 2500 à 4000 mètres de profondeur. Cette technique se sert de la vapeur sous pression pour alimenter les turbines.
- La géothermie basse énergie se situe entre 1000 et 2500 mètres de profondeur. Il s'agit de la technique utilisée pour les réseaux de chauffage urbains. Elle permet d'atteindre les nappes phréatiques et les réservoirs là où la température de l'eau est comprise entre 30° et 100°C. Si l'eau est à bonne température et qu'elle est assez pure elle peut être envoyée directement dans les radiateurs. Dans le cas contraire, il suffit d'utiliser une pompe à chaleur.
- La géothermie très basse énergie (celle qui nous intéresse) qui se situe à la surface de la terre . Elle récolte la chaleur à faible profondeur là où la température se situe entre 10° et 30°. Il s'agit de la méthode conseillée aux particuliers grâce à sa facilité d'accès.

Elle permet de chauffer sa maison et d'avoir de l'eau chaude à l'aide d'une pompe à chaleur.

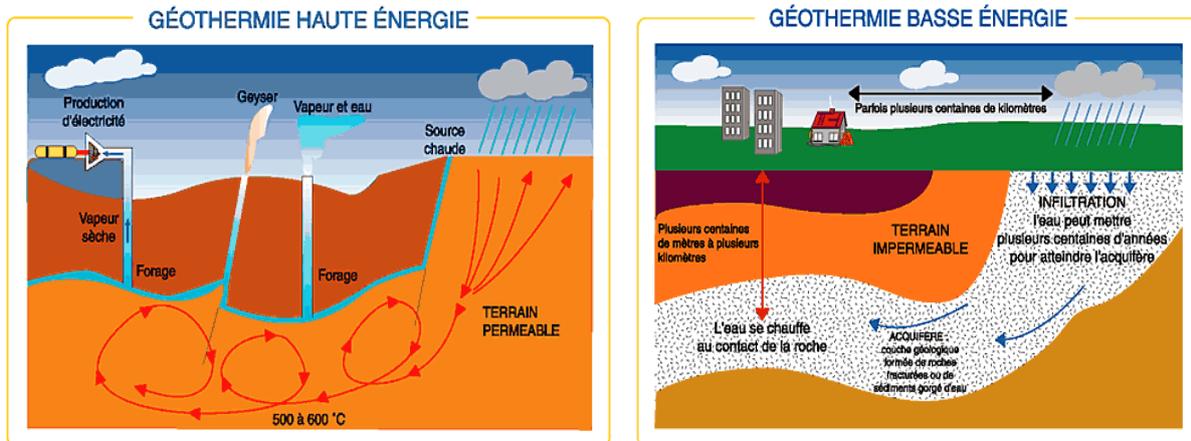


Figure ( I.3 ) : les différents types de géothermie et leurs utilisations [6]

### I.3 La distribution de température à la zone géothermie très basse :

La température de l'air extérieur dans la plupart des pays européens peut varier de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+40^{\circ}\text{C}$  tout au long de l'année, alors que la température du sol à quelques mètres de profondeur reste plus stable, entre  $5$  et  $15^{\circ}\text{C}$  en moyenne.

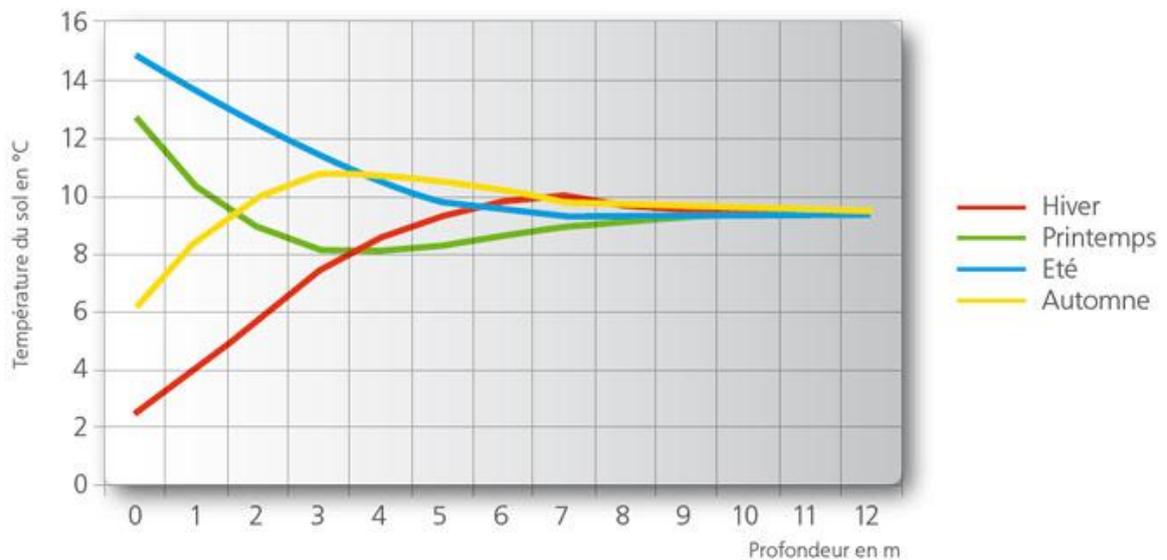


Figure ( I.4 ) : la variation de la température en fonction de profondeur et les saisons[7]

### I.4 Propriétés thermique des sols :

On trouvera les coefficients de conductivité thermique et capacité calorifique ainsi que la masse volumique de la plupart des matériaux de construction homogène dans des tables ou directement intégrés dans des logiciels d'énergétique du bâtiment.

Le cas des sols naturels, un peu moins connu par les thermiciens, sera brièvement traité ici sur la base d'un ouvrage de référence.

#### I.4.1 Capacité calorifique :

La capacité thermique  $C_s$  d'un sol s'exprime par une moyenne pondérée des capacités calorifiques respectives de ses constituants (minéraux, matière organique, air, eau) :

$$C_s = \sum_i x_i \rho_i c_i \quad (\text{I.1})$$

où  $x_i, \rho_i, c_i$  représentent respectivement la teneur (en m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> total), la masse volumique et la capacité calorifique d'un des constituants. Ainsi, comme l'eau et la matière organique se distinguent par une capacité calorifique supérieure à celle des éléments minéraux (Tab. 9), un sol humide emmagasinerà mieux la chaleur qu'un sol sec, effet parfois utilisé pour accroître la performance d'échangeurs air/sol

Soit dit en passant, ce phénomène a également son importance en agriculture, où le réchauffement printanier d'un sol sera d'autant plus lent que sa teneur en eau et sa teneur en matière organique seront élevées. Par ailleurs, pour un sol sec, ce réchauffement sera d'autant plus rapide que sa porosité est grande. Ces quelques considérations soulignent l'intérêt d'un drainage efficace à la sortie de l'hiver, un réchauffement accéléré du sol permettant en effet un démarrage plus précoce des cultures et allongeant d'autant la période végétative, ce qui favorise le développement des plantes .

#### I.4.2 Conductivité thermique :

D'autre part, la conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition (teneur en matières minérales et organiques, dont on trouve les coefficients de conductivité dans le Tab. I.1), mais également de l'arrangement et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules (ponts d'eau), ainsi que de sa teneur en air (faiblement conducteur). Le sol apparaît ainsi comme conducteur de chaleur d'autant meilleur qu'il est humide (Figure I.4), effet qui se cumule au précédent et milite, lorsque c'est possible, pour l'humidification d'un sol utilisé dans un échangeur air/sol

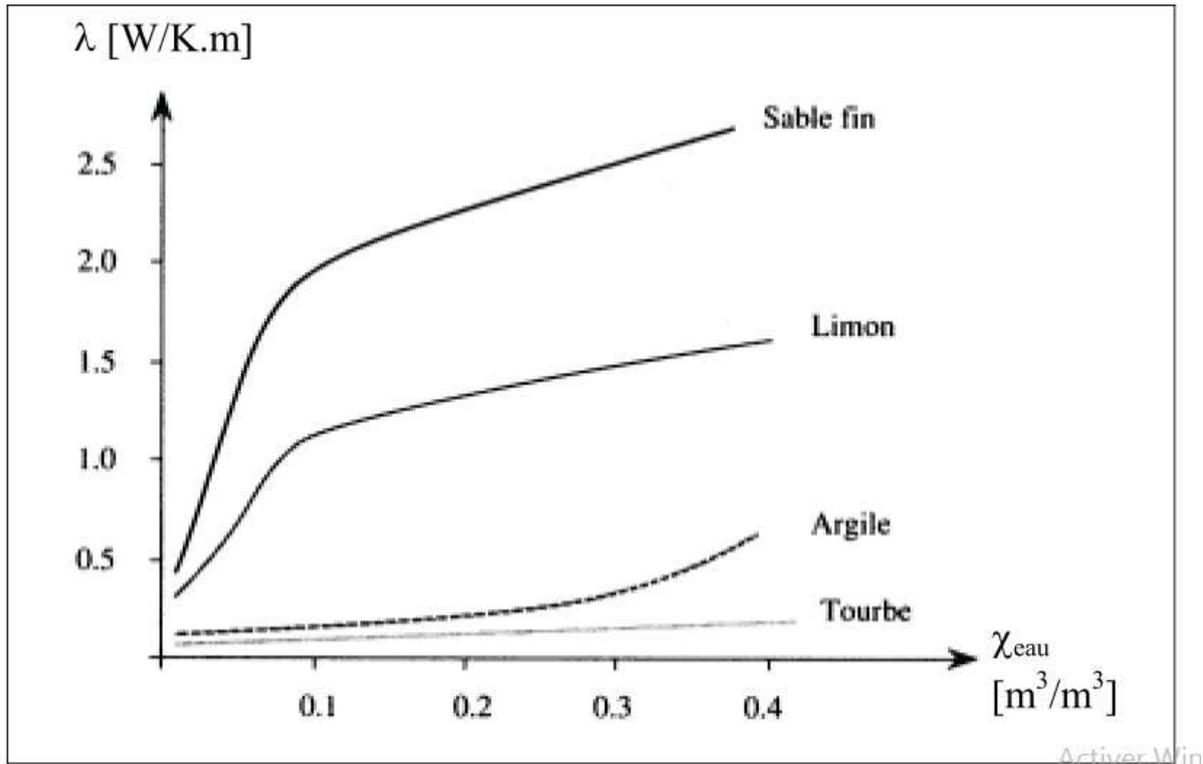


Figure ( I.5 ) : Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau .

matière	masse volumique $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	cap. calorifique $c$ kJ/K.kg	cap. calor. vol. $\rho c$ MJ/K.m <sup>3</sup>	conductivité $\lambda$ W/K.m
minéraux (moyenne)	$2.65 \cdot 10^3$	0.80	2.10	2.90
matière organique	$1.30 \cdot 10^3$	1.90	2.47	0.25
eau	$1.00 \cdot 10^3$	4.20	4.20	0.585
glace	$0.92 \cdot 10^3$	2.10	1.93	2.20
air	$1.25 \cdot 10^3$	1.00	1.25	0.023

Tableau (I.1) : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol. [8]

### I.5 Les puits canadien :

Le puits canadien (appelé aussi puits provençal ou puits climatique) est un système géothermique dit « de surface » qui consiste à alimenter un bâtiment en air en le faisant auparavant circuler dans un conduit enterré.

Le sol, grâce à son inertie thermique (capacité à emmagasiner puis à restituer la chaleur), conserve à partir d'une certaine profondeur une température relativement constante, avec de légères variations en fonction des saisons. Ce principe d'inertie peut être utilisé pour atténuer les différences de température de l'air entrant dans un logement.[9]

### I.5.1 Le fonctionnement d'un puits canadien :

Le puits canadien consiste à faire passer avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf par des tuyaux enterrés, Il peut être réalisé un réseau de tuyaux enterrés dans le sol, de 25 à 30 m de long, à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 mètres. Généralement, à une profondeur située de deux à trois mètres la température du sol est pratiquement constante tout au long de l'année, elle varie entre 10 et 18°C selon les saisons, alors que l'air extérieur peut varier de -5°C à + 45°C dans la plupart des climats, l'exemple de l'Algérie. Un puits canadien semble une solution évidente pour exploiter cette température constante : l'air, au lieu d'être amené directement de l'extérieur, va circuler dans un collecteur enterré qui se trouve en contact avec le sol pour échanger ses calories. L'objectif étant que l'air à la sortie du collecteur soit très proche à la température du sol.

En hiver, le sol à cette profondeur est donc plus chaud que la température extérieure, l'air étant froid se trouve donc préchauffé lors de son passage à travers la tuyauterie de l'échangeur enterré, est aspiré par la pompe à chaleur, n'est pas prélevé directement de l'extérieur d'où une économie de chauffage.

En été, le sol est relativement froid que la température extérieure, ce qui permettra l'exploitation de la fraîcheur relative du sol pour tempérer l'air entrant dans le logement.

Le principe d'un puits canadien consiste donc à faire acheminer l'air neuf du bâtiment dans un réseau de tubes enterrés dans le sol, un échange thermique entre le sol et l'air aura lieu permettant ainsi un pré chauffage de l'air en hiver et un rafraîchissement en été. La température du sol à 2 m de profondeur, très peu sensible aux variations du climat extérieur est généralement située entre 17°C l'été et 4°C l'hiver, l'air ainsi obtenu à l'intérieur des locaux est plus sain, chaud en hiver et frais en été.

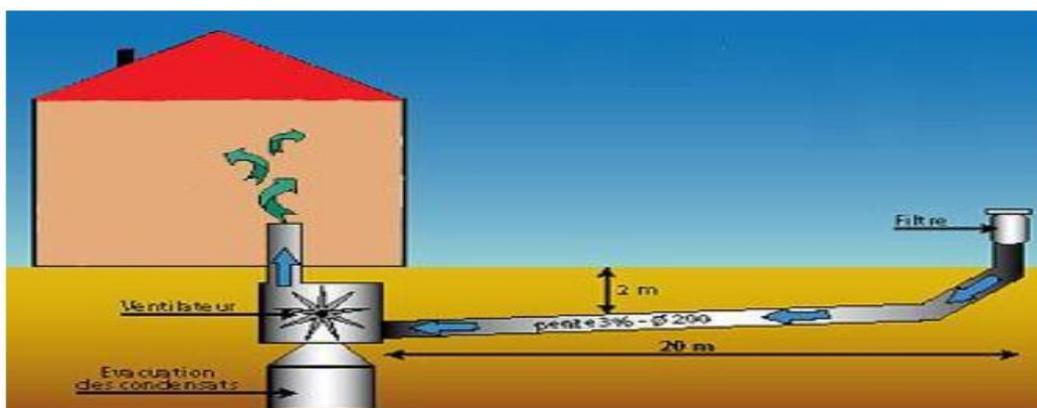


Figure ( I.6 ) : Description d'un puits canadien [10]

### I.5.2 L'entrée d'air :

L'entrée d'air du puits est abritée des intempéries (pluie, neige) et protégée par un grillage des feuilles mortes, des rongeurs et des insectes. La filtration de l'air est faite en aval par le biais d'un filtre, mais il est utile d'en ajouter un en amont afin d'éviter l'encrassement du tuyau. Il est également important de positionner la prise d'air extérieure à un endroit non pollué par les gaz d'échappement, et autres rejets divers.

### I.5.3 La canalisation :

Les matériaux utilisés pour les tuyaux sont nombreux. Ils doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

- Une stabilité suffisante pour supporter l'enfouissement dans la terre,
- Une étanchéité importante (à la fois du tuyau et des raccords) afin d'éviter l'infiltration des eaux souterraines et la propagation de bactéries,
- Une bonne conductivité thermique,
- Une surface lisse à l'intérieur pour favoriser l'écoulement des condensats et diminuer les pertes de charges,
- Une qualité sanitaire irréprochable afin de ne pas polluer l'air du bâtiment.

Matériaux utilisés :

- PVC : c'est le matériau le moins cher, mais il pose des problèmes au niveau sanitaire : il contient beaucoup de chlore et des additifs qui se dégagent en présence de lumière et de chaleur, mais aussi par frottement d'air sur le matériau.
- Polyéthylène (PE) ou Polypropylène (PP) : les solutions les plus utilisées outre-Rhin. Bon échange thermique et rigidité suffisante pour éviter les points bas dans les conduits. De plus, certains tuyaux ont un traitement antistatique qui en fait une solution sécurisée pour ce type d'utilisation.
- Gaine électrique TPC : gaine annelée à l'extérieur mais lisse à l'intérieur. Une solution très bon marché pour les petits diamètres mais pas prévue à l'origine pour être enterrée à forte profondeur, ce qui peut nuire à la tenue dans le temps.
- Grès vitrifié ou Fonte ductile : ce sont des matériaux très robustes permettant un bon échange thermique et très peu de formation de condensats. Ce sont donc des matériaux idéaux pour les puits canadiens mais qui nécessitent une mise en œuvre soignée et parfois onéreuse.
- Béton, terre cuite : bonne conductivité thermique mais conduits relativement perméables, ce qui peut poser des problèmes avec le radon. De plus, l'étanchéité des joints est difficile à assurer.

### I.5.4 Diamètre, longueur et profondeur :

Le diamètre de la canalisation est déterminé par le débit d'air nécessaire pour le logement. Il est généralement compris entre 150 et 250 mm. Un débit d'air trop important diminue l'efficacité du puits, et il est nécessaire de trouver le bon compromis avec le besoin en ventilation du logement. S'il faut augmenter les échanges, il est préférable de coupler plusieurs tuyaux de petits diamètres au lieu d'installer un seul conduit de gros diamètre. En termes de longueur, il faut compter 30 m au minimum pour une bonne efficacité. Au-delà de 50 m, les gains générés sont très faibles. La profondeur idéale est de 1 m si on cherche uniquement à optimiser le fonctionnement en rafraîchissement. En revanche, pour le préchauffage de l'air, il est nécessaire d'enterrer les tuyaux à une profondeur de 1,5 à 2 mètres.

### I.5.5 Les Condensats :

En été, l'air condense la vapeur d'eau en se refroidissant dans les tuyaux. Cette condensation peut poser des problèmes de fonctionnement, et engendrer des problèmes sanitaires (prolifération bactérienne). Des mesures sont donc à prendre pour éviter ces phénomènes :

- Créer une pente de 2 % dans le sens d'écoulement de l'air Elle permet aux condensats de circuler jusqu'au point bas, duquel on pourra facilement les traiter. Lors du terrassement, il convient de faire attention à la constance de cette pente et de prévoir une conduite lisse sur sa paroi intérieure pour éviter la stagnation d'eau.
- Infiltration ou récupération ?

Si la maison possède un sous-sol, la récupération des condensats se fait dans celui-ci, et il est possible de nettoyer et rejeter les condensats dans les eaux pluviales. Dans le cas d'une maison sans sous-sol, le point le plus bas se trouve avant la maison et il convient donc de réaliser une infiltration accompagnée d'un regard de visite pour l'entretien. [11]

### I.5.6 Les périodes intermédiaires :

L'amenée d'air neuf passe soit par le collecteur enterré soit par la prise d'air directe, en fonction de la température extérieure. La commande est automatique par thermostat ou manuelle.

### I.5.7 Ventilation et qualité d'air intérieure :

Économies d'énergie et réduction des gaz à effet de serre nous obligent désormais à trouver des solutions d'amélioration à haute efficacité énergétique. La VMC double flux et le puits canadien font partie de ces solutions. La VMC double flux permet de gérer les débits entrants et sortants en récupérant l'énergie de l'air sortant avant qu'il en sorte du bâti. Par rapport à une VMC simple flux, l'économie réalisée est de l'ordre de 20 % sur le poste ventilation. Dans l'habitat, ce poste représente à

l'heure actuelle entre 20 et 30 % des déperditions énergétiques. Dans le tertiaire et les ErP, ce chiffre peut être plus important et atteindre 50 %.

À l'avenir, plus le bâtiment sera étanche et isolé, plus le poste ventilation augmentera en proportion.

En captant les calories du sol, le puits canadien ou échangeur d'air géothermique permet à moindre frais, surtout dans le neuf, de préchauffer l'air de ventilation en hiver et de le rafraîchir en été. Ce système se présente donc comme une solution intelligente et citoyenne de récupération d'énergie sur le poste ventilation. [12]

### I.5.8 Recommandations à prendre durant la réalisation d'un puits

#### canadien :

1. Evitez coudes et angles lors de la conception d'un système de rafraichissement de l'air par puits canadien.
2. Durant la pose du réseau de conduites, il est conseillé de le faire avec une pente de 2% au minimum dans le sens de l'aspiration pour l'évacuation des condensats.
3. En cas de présence d'une forte concentration de Radon dans le sol, seule une solution étanche sera envisageable.
4. Gardez une distance suffisante entre les différents conduits du réseau constituant l'échangeur enterré.
5. Eviter la mise en place de sable dans la zone d'enrobage et le lit de pose afin d'obtenir un transfert thermique optimal .
6. Choisir le bon matériau de fabrication, généralement en PVC haute pression (polypropylène) ayant une très bonne conductivité thermique ( $\lambda = 0.17\text{W/m K}^\circ$ ) permettant d'optimiser le bon fonctionnement du puits canadien, d'autre part, il devrait tenir aux chocs élevés pendant les travaux de Pose, de manutention sur chantier et d'éventuels mouvement du terrain.
7. Une rigidité élevée garantissant la rectitude des tubes enterrés et ne nécessitant pas de pose sur un lit de sable qui inflige une diminution l'échanges thermiques avec le sol avoisinant.
8. Etat de surface intérieure lisse facilitant l'écoulement des condensats et les opérations d'entretien.
9. Etanchéité vis à vis des agressions externes, humidité, nappes phréatiques et racines des arbres ... etc. [13]

### I.5.9 Les paramètres Qui sont pris en compte pour réalisé un puits canadien :

Le calcul d'un puits canadien est fonction de plusieurs paramètres. Voici les principaux :

1. Le volume de la maison
2. Le débit nécessaire en hiver et en été
3. Le choix de la ventilation de la maison (VMC, double flux, mono flux...)
4. L'architecture (bioclimatique, matériaux, isolation, serre, ...)
5. La nature du sol (sablonneux, argileux, nappe phréatique, ...)
6. La place disponible pour l'enfouissement du tuyau
7. La localisation géographique
8. Le budget [14]

Le coût d'installation d'un puits est très variable : entre 3 000 et 10 000 € pour une maison individuelle. Le prix varie en fonction du coût de la main d'œuvre pour le terrassement, et du matériel retenu pour le puits.

L'économie sur le budget de chauffage est très difficile à estimer, et elle varie en fonction de l'efficacité du puits (type de sol et installation), du climat, et de la qualité de l'enveloppe thermique de l'habitation.[11]

### I .5.10 Exemple du calcul par logiciel GAEA :

Volume de la maison 800 m<sup>3</sup> , 1 tuyau de 50 m en PE (polyéthylène) diamètre de 184mm (Int) à 1,9m de profondeur ,Le logiciel GAEA a été utilisé pour optimiser l'installation, en voici certains résultats

Puissance ventilateur (Watt)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Heures de fonctionnement (heures par an)	T sortie min (hiver) pour T entrée (-12,7)	T sortie max (été) pour T entrée (31,7)
8.42	240	4607	1.7	17.9
13.80	320	4648	0.3	19.2
21.16	400	4683	-0.9	20.3
43.40	560	4754	-2.6	22
100.93	800	4930	-4.4	24

**Tableau (I.2) :** les résultats obtenu par logiciel GAEA

Le logiciel permet également de simuler différentes autres solutions pour le choix des échangeurs ainsi que de simuler les aspects économiques de votre installation. [14]

## I.6 Principaux travaux de recherche réalisés sur le procédé du rafraichissement par géothermie :

On trouve dans la littérature une grande quantité des modèles de simulation les échangeurs de chaleur air/sol expérimental et théorique :

En 2002 Pierre Hollmuller dans une étude théorique et expérimentale a utilisé l'échangeur air/sol pour le chauffage et le rafraichissement de l'HABITAT. Cette étude est basée sur une

compagnie de mesures récoltées et une simulation effectuée par le biais d'un modèle numérique développé, où il s'est intéressé à une analyse théorique du phénomène à travers la simulation des performances thermiques de ces systèmes. Il s'agit de connaître l'évolution de la température de l'air frais depuis l'entrée jusqu'à la sortie de l'échangeur. Pour réaliser son travail, l'auteur a suivi les étapes suivantes :

Une brève présentation des projets pilotes à partir des fondements théoriques nécessaires à la compréhension et la quantification des flux de chaleur échangés entre le sol et les parois des tubes acheminant l'air, ainsi, après un rappel des paramètres physiques du base, la présentation du modèle numérique, le potentiel du stockage diurne, le fonctionnement d'un stockage en sol de type diffusif avec un stockage en cuve de type capacitif, dont l'exemple des résultats obtenu est représenté sur la figure ( I.6 ) ci-dessous.

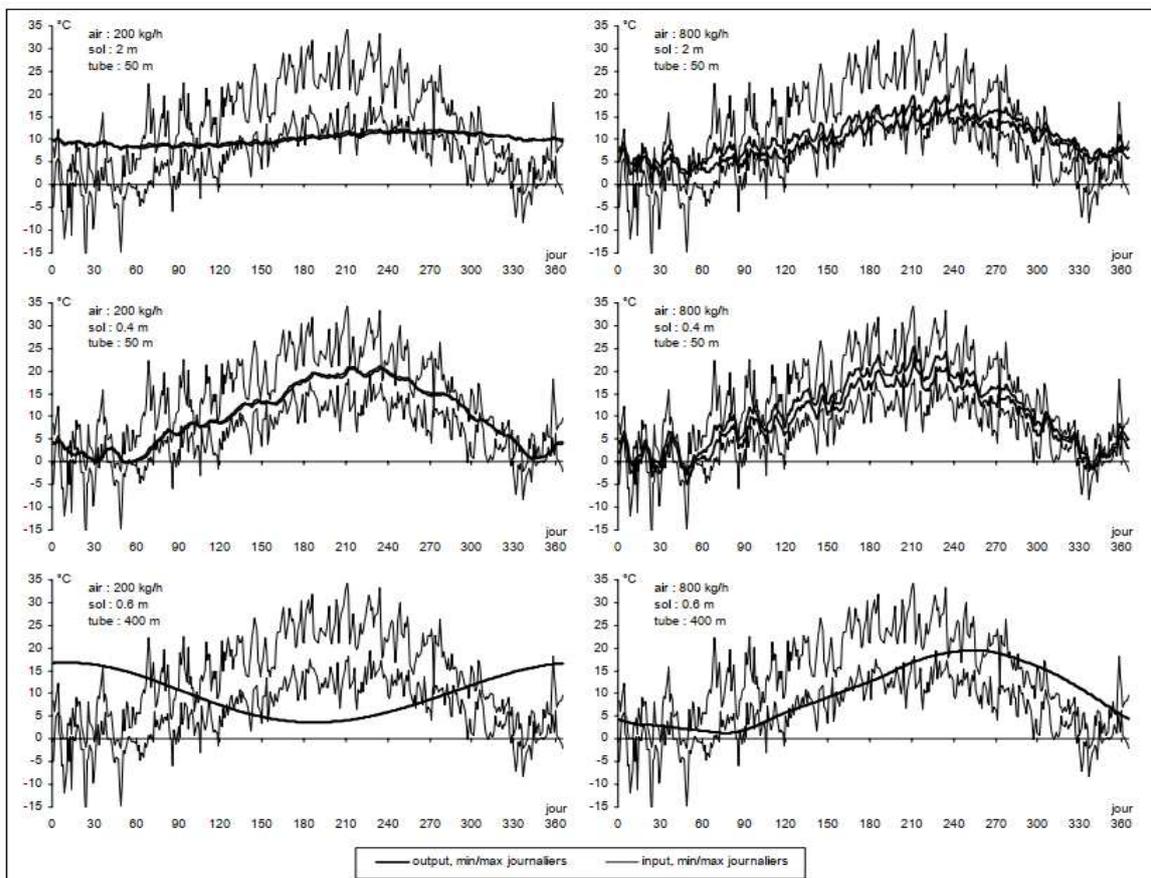


Figure ( I.7 ) : Modélisation analytique par transformée de Fourier d'un échangeur air/sol à condition au bord adiabatique, étude paramétrique. [8]

L'auteur conclut l'importance de couplage diffusif entre l'échangeur et le bâtiment (stockage solaire qui participe fortement à la réduction de la demande de chauffage) température à la sortie de l'échangeur qui se situe au dessous ou en dessous du seuil de confort. Dans le cas de puits canadiens, l'amortissement hivernal de l'oscillation annuelle, à des températures situées en dessous du seuil de

confort inférieur de 20°C, n'induit rien d'autre qu'une économie sur le préchauffage du renouvellement d'air auquel elle est liée par minimisation du débit faible complémentaire du puits canadiens avec le récupérateur sur air vicié. D'autre par l'amortissement estival de l'oscillation diurne est suffisant pour produire une température de ventilation en dessous du seuil de confort supérieur à 26°C, qui peut être accrue par augmentation du débit.

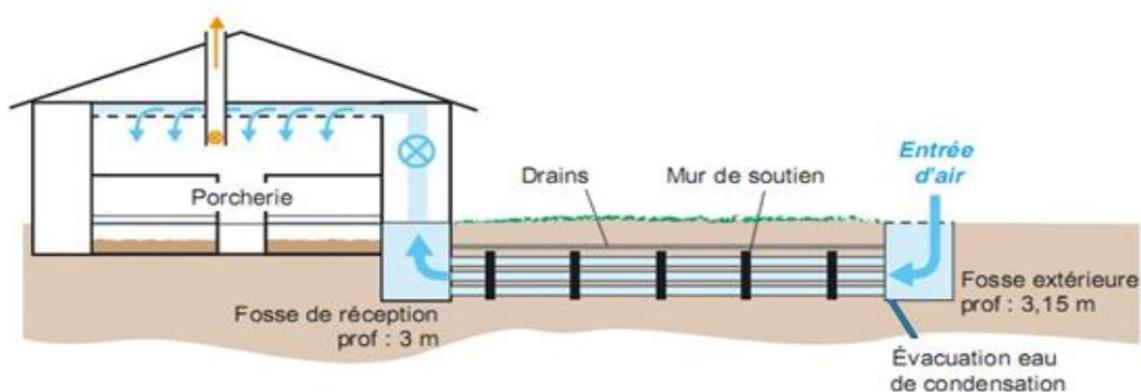
En 2005 David BARTOLOMEU, a entamé une étude expérimentale sur le rafraîchissement de l'air par procédés géothermie dans la région de Romillé en France, il a obtenu des résultats permettant monter l'efficacité cette technique. Dans ce travail il a créé une station de mesure à Romillé, les expérimentations ont débuté depuis l'été 2003, ce qui permet d'obtenir un total de 70 000 relevés au cours de 112 jours d'enregistrement. Le principe de la station expérimentale est basé sur les échanges de températures entre le sol et l'air circulant dans le réseau de tubes enterrés. Un bon dimensionnement de ce système est nécessaire pour optimiser ses performances qui sont analysées tout au long de l'année en distinguant les saisons hivernale et estivale.

L'échangeur thermique de Romillé est constitué d'un réseau de 36 tubes de 16 cm de diamètre, d'une longueur de 25 m, situé à 3 niveau de profondeurs respectivement de 2 m, 2,5 m et 3 m.

Les tubes sont disposés en quinconce et espacés les uns des autres d'une distance entre axe de 50cm. Les tubes sont scellés sur des murets transversaux en béton espacés 2 m les uns des autres. D'autre part un caniveau est prévu en sortie de l'échangeur avec une pente de 2% permettent de recueillir les eaux de condensation et de les évacuer en cas de besoin à l'aide d'une pompe.

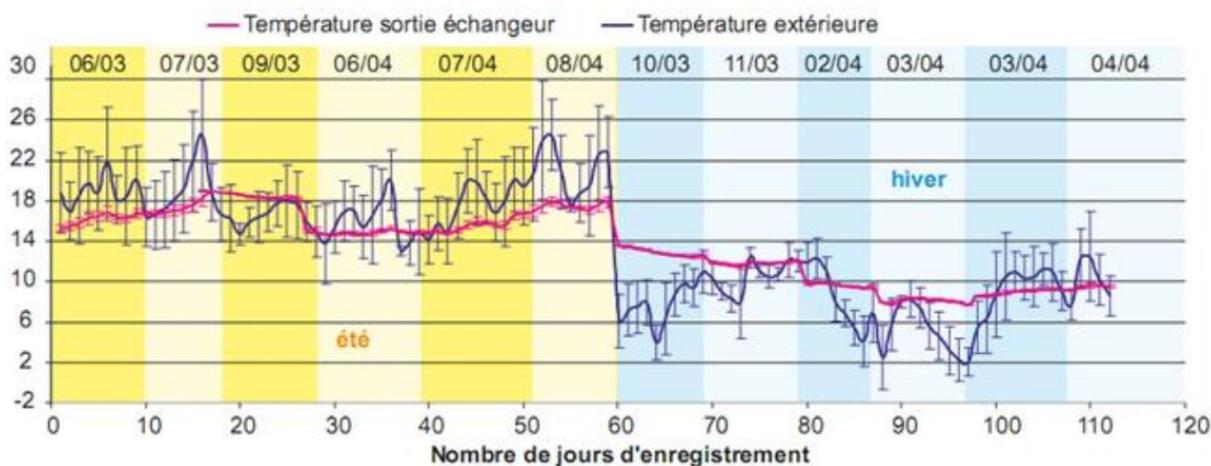
Deux fosses de réception en béton sont construites à l'entrée et en sortie d'échangeur, et un ventilateur est ajouté à l'entrée du bâtiment afin de compenser les pertes de charge générées par le système.

Le sol est constitué d'un sable fin compacté qui entoure l'ensemble des 36 tuyaux. Au dessus le couvert végétal est présent sur environ 50 cm



**Figure ( I.8 )** : schéma de principe de l'échangeur thermique de Romillé [15]

L'installation de cet échangeur permet de conditionner l'air destiné à deux salles d'engraissement de 48 places, plusieurs sondes thermiques ont été placées à l'entrée, au milieu et en sortie des tuyaux, ainsi que dans le sol à 2m, 2,5 et 3 m de profondeur. Les débits d'air soufflé évoluent d'un minimum de 8 m<sup>3</sup>/h à un maximum de 70 m<sup>3</sup>/h. Les résultats obtenus montrent un réchauffement proche de 10°C lorsque la température hivernale est de -2°C et un refroidissement en été maximal de 13,4°C lorsque la température extérieure avoisine les 32°C.



**Figure (I.9)** : Evolution de la température au cours des campagnes d'enregistrement. [15]

En période hivernale, la température du sol est supérieure à celle de l'air extérieur, l'échangeur permet de réchauffer l'air de 10 °C dans les conditions extrêmes, par contre en période d'été, la température du sol est inférieure à celle de l'air extérieur, l'échangeur permet le rafraîchissement l'air dans les conditions extrêmes, dont la variation dépend des conditions climatiques du site environnantes.

	Nombre de jours d'enregistrement	Température extérieure moyenne (en °C ±Ecart Type)	Température sortie échangeur (en °C ±Ecart Type)	Température du sol à -3m (en °C ±Ecart Type)	Débit de ventilation (m <sup>3</sup> /h/porc ±ET)
Saison estivale	59	18,0 ±4,4	16,2 ±1,3	15,1 ±1,3	42,0 ±11,3
	12	22,0 ±4,5	17,2 ±1,0	15,3 ±0,6	53,0 ±9,1
	Le jour le plus chaud	24,0 ±5,9 T.max = 32,0	17,4 ±0,7 T.max = 18,6	15,3 ±0,0 T.max = 15,3	55,6 ±8,8 D.max = 68,6
Saison hivernale	43	8,4 ±3,7	10,2 ±1,8	11,5 ±2,6	24,0 ±5,7
	7	3,2 ±2,5	8,9 ±1,7	10,3 ±2,3	20,0 ±2,8
	Le jour le plus froid	2,5 ±3,1 T.min = -1,8	7,9 ±0,0 T.min = 7,8	9,5 ±0,0 T.min = 9,4	20,3 ±2,8 D.min = 20,3

**Tableau (I.3)** : Gains thermique de l'échangeur testé [15]

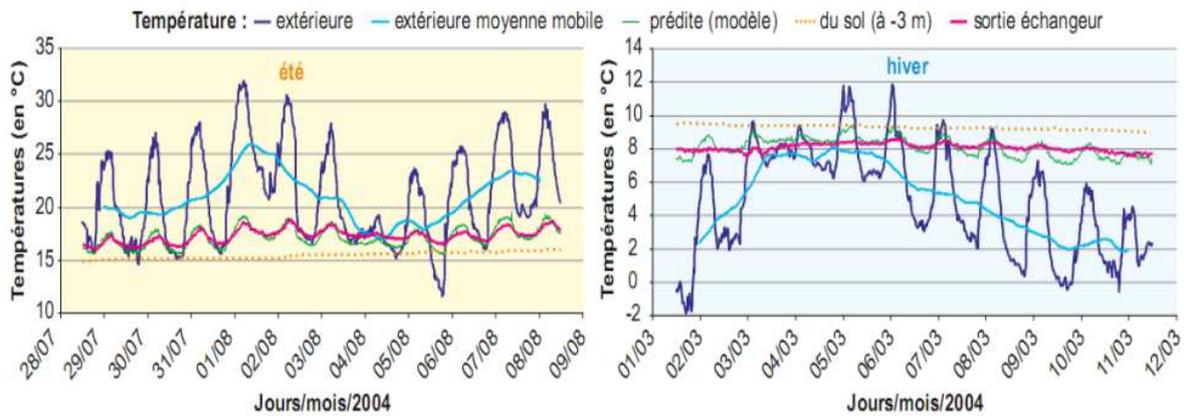


Figure ( I.10 ) : Evolution des températures les plus chaudes d'été et les plus froides d'hiver [15]

Le décalage dans le temps est indispensable pour le bon fonctionnement du dispositif échangeur enterré, il se manifeste d'autant plus que le sol est profond et de nature plus inerte. Le rendement thermique de L'échangeur augmente avec la longueur des tuyaux. Sur l'ensemble de l'année, il est d'environ 55% à 12.5 m et de 80% à la sortie de l'échangeur à 25m.

Saison	ETE	HIVER
Débit (m <sup>3</sup> /h)	42,0 ±11,3	24,0 ±5,7
Nombre d'observation	1557	1146
Rendement $\eta$ (x=25m)	79 %	77 %
Rendement $\eta$ (x=12.5m)	50 %	59 %

Tableau ( I.4 ) : Rendement de l'échangeur à 25 m et à mi-longueur en fonction de la saison [15]

Le rendement  $\eta$  de l'échangeur thermique peut se calculer à différentes longueurs parcourues(x) depuis l'entrée de l'air dans le conduit échangeur enterré, à différentes profondeurs (z) et à différentes débits (m), il caractérise l'efficacité du système est défini, comme étant le pourcentage d'utilisation de la différence de température entre l'air et celle du sol à une profondeur donnée :

$$\eta(x,z, \dot{m}) = \frac{T(x,p) - T_e}{T_{sol(p)} - T_e} * 100 \quad (I.2)$$

L'efficacité d'un échangeur géothermique repose en partie sur la qualité des échanges entre le sol et l'air transitant dans le réseau souterrain, un sol plus inerte est beaucoup plus performant en termes d'échange thermique. La capacité d'accumulation de chaleur et la conductivité thermique étant plus

élevées dans les sols humides. Les tubes doivent être choisis avec un diamètre de 14 à 20 cm. Lorsque le diamètre d'un tuyau est doublé on aura une perte de rendement de l'échange, les tubes doivent être: rigides, longe de 25m et positionnés à une seule profondeur. la vitesse de l'air dans les tuyaux ne devrait pas dépasser 3m/s pour favoriser une durée suffisante d'échange avec le sol.

**M. Benhammou et al** en 2011, dans leur étude ont montrés que la climatisation électrique est très énergivore et l'offre ne peut plus satisfaire à la demande accrue surtout dans les saisons chaudes.

L'utilisation des systèmes de rafraîchissement par géothermie constitue une bonne alternative notamment dans la région du sud de l'Algérie, où la période estivale est très longue et très chaude. Dans leur travail, ils ont présenté une étude qui a été effectuée sur un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments. Les résultats obtenus sont très encourageants et indiquent que cette technique est très économique peut couvrir une bonne partie de nos besoins en matière de climatisations domestiques. Cette étude a permis également d'examiner l'influence des paramètres de l'échangeur sur son efficacité moyenne quotidienne et sur la température de l'air refroidi à la sortie de l'échangeur enterré.

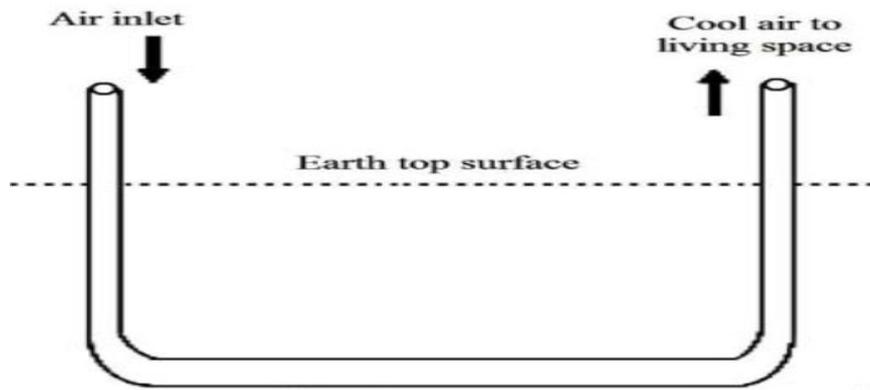


Figure (I.11) :Représentation de l'échangeur géothermique à air [13]

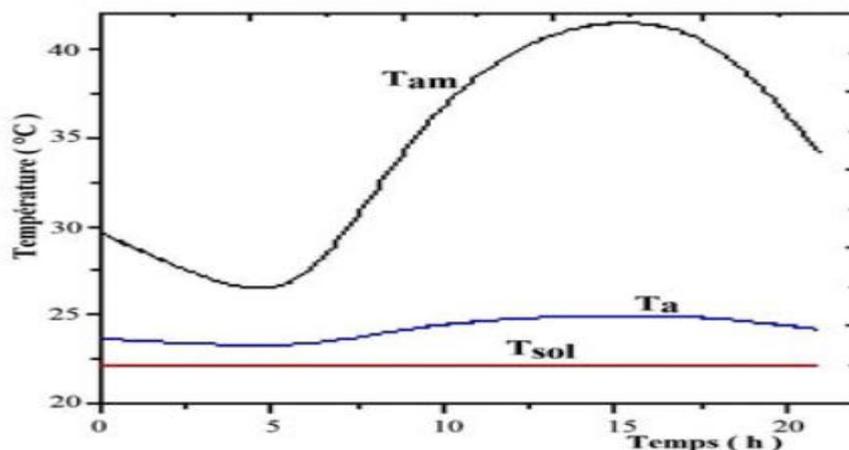


Figure (I.12):Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juin [16]

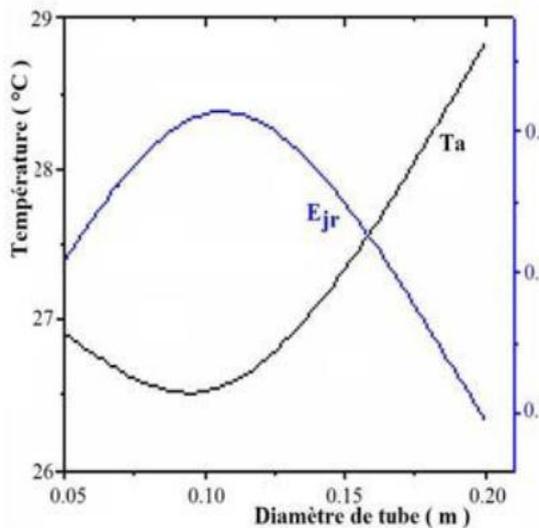


Figure (I.13): Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction du diamètre du tube [16]

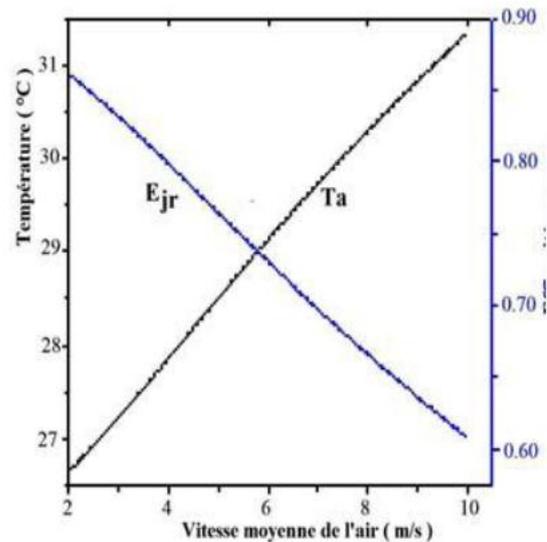


Figure (1.14) : Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction de la vitesse moyenne de l'air dans le tube [16]

Dans ce travail, ils ont présentés une étude sur un échangeur géothermique à air destiné à la production du froid. Cette étude est effectuée dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie. Les résultats obtenus montrent que cette technique est prometteuse et elle peut être substituée à la climatisation conventionnelle.

Dans son étude *Mohamed Saadeddine* en 2012 a réalisé une étude de description et définition détaillée des échangeurs enterrés ainsi que leurs composants, il analysé les paramètres physique qui influent sur les performances thermiques d'un tel dispositif, puis il s'est intéressé à la stabilité saisonnière de la température du sol qui peut être exploiter dans le rafraichissement de l'air en période d'été et le chauffage en hiver par l'utilisation d'échangeur air/sol qui enterré a cette profondeur, ensuite l'auteur a proposé un modèle mathématique pour suivre l'évolution de la température du sol à n'importe quelle profondeur et à n'importe quelle journée de l'année, une étude de modalisation numérique est entamée qui a pour objectif de calculer la température de sortie à chaque jour durant la période estivale dans la région de Biskra. Les courbes montrent l'évolution la température de l'air dans l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie pour trois débit différents.

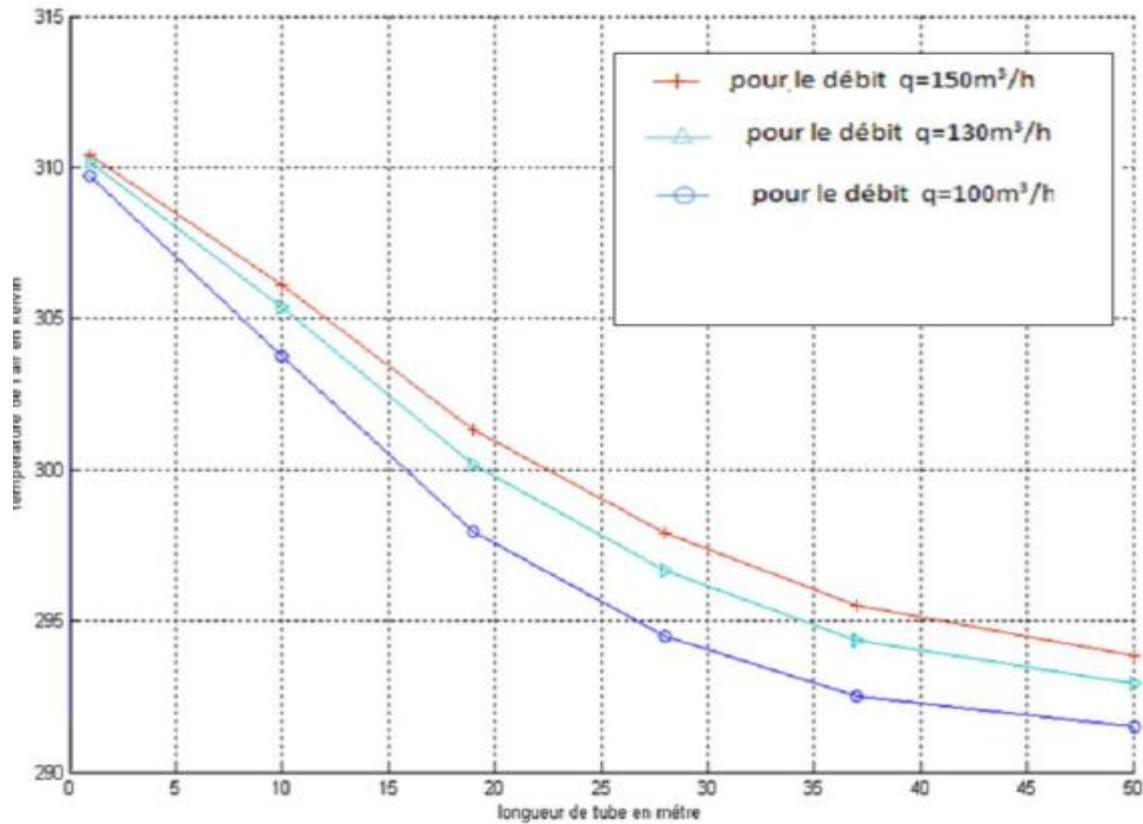


Figure (I.15) : Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour la 200ieme journée de l'année [17]

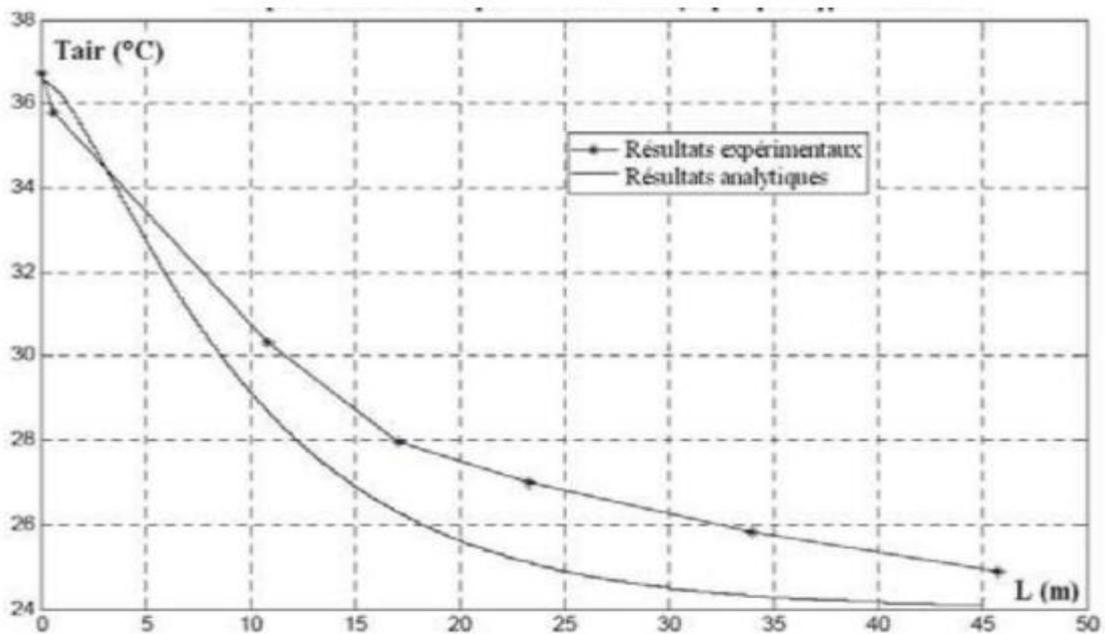


Figure (I.16) : Comparaison résultats expérimentaux et analytique pour  $qv=121.52 \text{ m}^3/\text{h}$  [14]

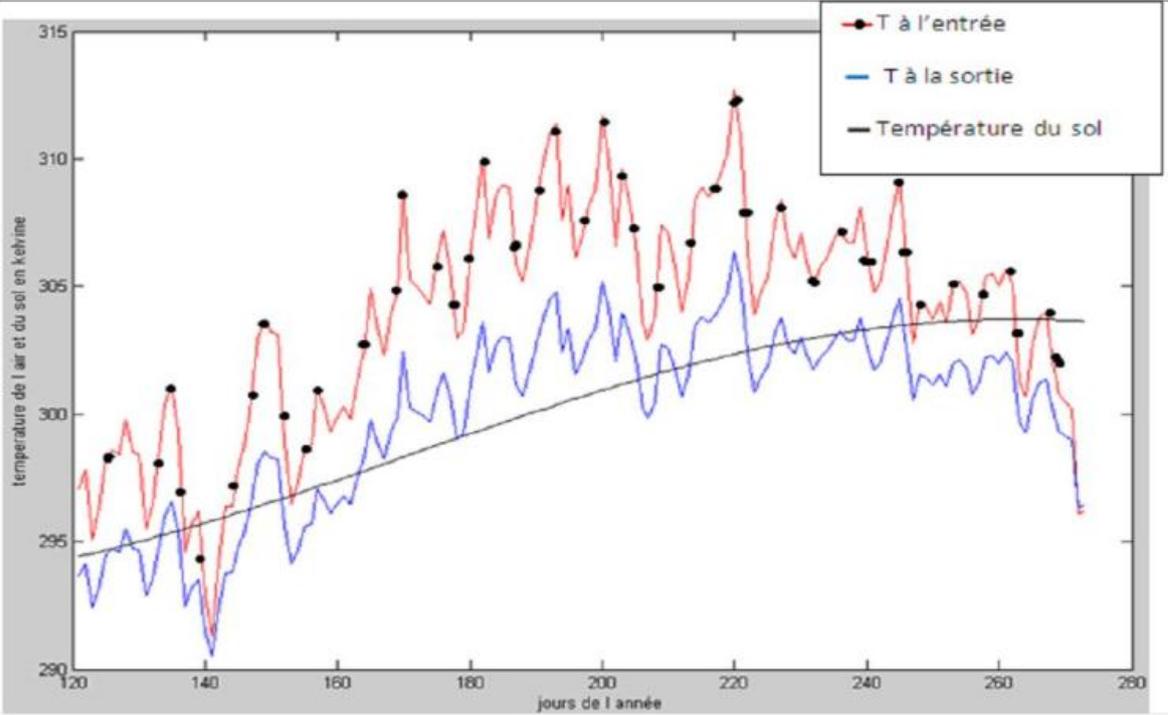


Figure (I.17) : Evolution annuelle de la température à la sortie de l'échangeur [17]

## Chapitre II

### Modélisation de la température du sol et de l'air à la sortie de l'échangeur (air/sol) enterré

---

#### II.1 Introduction :

Ce chapitre a pour but d'établir un modèle mathématique permettant de déterminer la température du sol à différentes profondeurs et la température de l'air à la sortie de l'échangeur en considérant les principaux facteurs intrinsèques et extrinsèques par rapport au système étudié.

Les échangeurs de chaleur sont des appareils permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Dans la plupart des cas, les deux fluides ne sont pas en contact, et le transfert s'effectue à travers une surface d'échange. Dans le cas d'un échangeur air-sol, l'une de ces sources est l'air qui circule dans le conduit enterré, l'autre est le sol placé au contact des tubes. Ce dernier joue le rôle de la source froide pendant la saison chaude, et la source chaude pendant la saison froide. Donc la température de l'air à l'entrée des tubes et la température du sol constituent les conditions aux limites pour l'échangeur.

La température de l'air à l'entrée de l'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 non perturbée ne peut être connue sans l'usage d'un dispositif de mesure difficile à mettre en œuvre (sonde thermique placée à la profondeur d'enfouissement des tubes). Il n'existe aucune base de données qui permet de fournir cette température, c'est pourquoi une modélisation semble nécessaire, afin d'obtenir la température du sol à tout instant et à toute profondeur.

#### II.2 Analyse des paramètres à modéliser :

L'analyse approfondie de la littérature consultée nous amène clairement à identifier les paramètres influant sur le comportement thermique de l'échangeur air/sol enterré et à distinguer les plus prépondérants d'entre eux.

##### II.2.1 Débit d'air :

Le débit d'air dans les canalisations 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 des pièces ou de la zone à ventiler.

## **II .2.2 Longueur du conduit échangeur :**

La longueur optimale de l'échangeur dépend essentiellement du débit dans les canalisations. En effet, d'après la bibliographie, on remarque 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.

## **II .2.3 Diamètre du conduit échangeur :**

L'augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais n'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement de l'air, le coefficient d'échange convectif chute. Ceci est dû au fait que l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite, où va être échangée la chaleur. L'air circulant au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol.

Cet optimum est indépendant de la longueur de la canalisation. On obtiendra donc une relation directe entre débit d'air et diamètre optimal. En général, pour les débits utilisés, cet optimum se situe autour des 20 cm de diamètre.

## **II .2.4 Distance entre les canalisations :**

La fonction de stockage et d'amortisseur thermique de l'échangeur est assurée par la couche de sol se trouvant en contact ou à proximité de chaque canalisation, l'épaisseur de sol concernée dépend de la période des phénomènes mis en jeu (Hollmuller, 2002).

Le rôle de la distance entre les canalisations n'a pas été réellement abordé dans les documents consultés. Cependant, il semble important d'assurer une distance suffisante pour maintenir une interaction mineure entre deux canalisations adjacentes. Une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour les variations journalières. Un stockage thermique saisonnier nécessiterait un espacement de l'ordre de plusieurs mètres qui n'est généralement pas envisageable en pratique.

## **II .2.5 La profondeur d'enfouissement des canalisations :**

Le sol joue le rôle de tampon thermique entre l'extérieur et la canalisation enterrée. C'est lui qui isole cette dernière de l'influence des conditions atmosphériques. La profondeur d'enfouissement est donc un paramètre important qui va jouer sur la qualité de cette isolation, une profondeur plus grande améliore l'isolation de la canalisation et le déphasage.

Hollmuller (2002) [7] montre clairement que les variations de température de l'air extérieur sont amorties et déphasées par le sol, ceci est d'autant plus marqué que la profondeur est grande. Au delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne

varie plus sous l'effet de l'évolution de la température extérieure. Seule la température moyenne évolue en fonction de la profondeur sous l'effet de la puissance géothermique provenant du manteau terrestre.

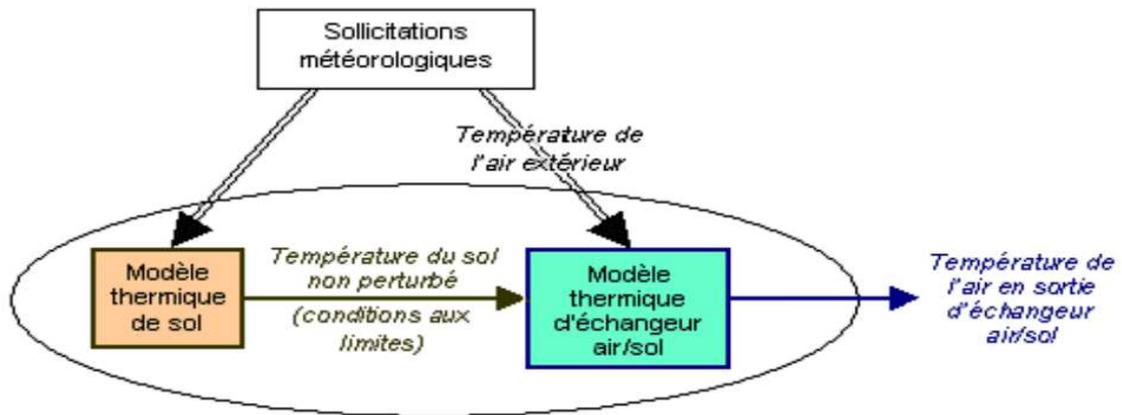


Figure (II.1) : Structure du modèle d'échangeur air/sol enterré [18]

### II.3 La distribution de la température en fonction du temps pour différentes profondeurs :

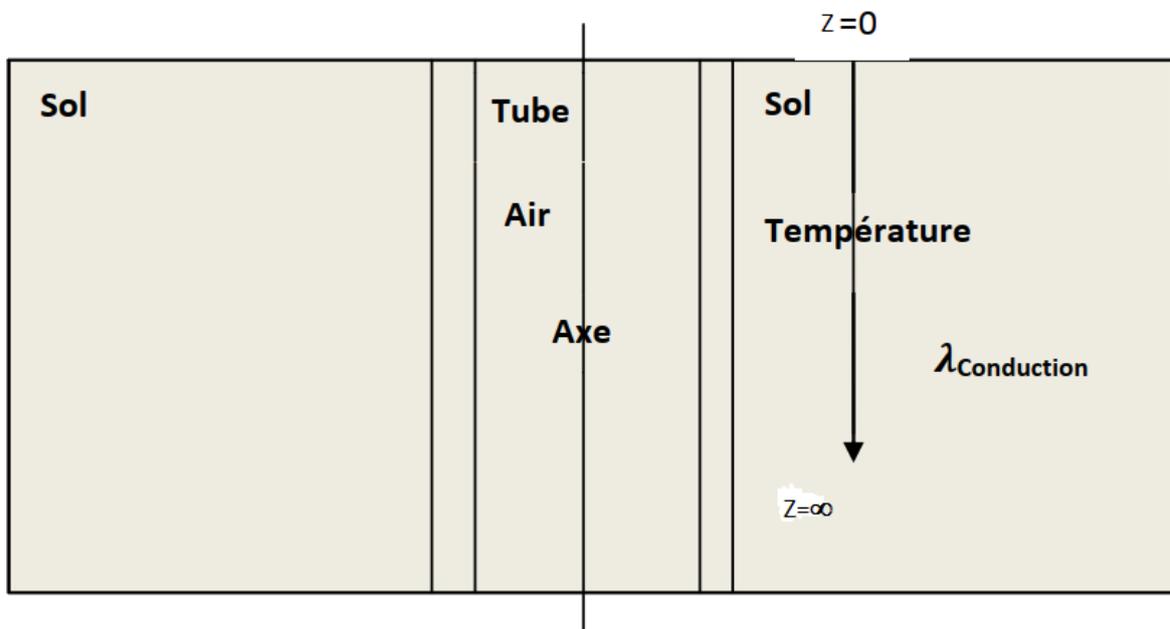


Figure (II.2) : Schématisation du Problème Physique [18]

La distribution verticale de la température du sol peut être modélisée sur la base de la méthode Développé par Kasuda qui a découvert que la température du sol est une fonction du temps L'année et la profondeur sous la surface dépendent des hypothèses suivantes :

- Le sol est supposé être un milieu semi-infini homogène.
- La température du sol à une profondeur infinie ( $z = \infty$ ), est supposée constante ( $T_i$ ).
- La surface ( $z = 0$ ) est soumise à une variation périodique de température

$$T(0,t) = T_i + A \cdot \sin(\omega(t-t_0)).$$

- la conduction unidimensionnelle suivant l'axe de  $z$

L'équation de propagation de température sous la forme :

$$T(t, z) = T_i - A \cdot \exp\left(-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot (t - t_0 - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}})\right) \dots [19] \quad (\text{II.1})$$

$T_i$  = Température moyenne de la surface (température moyenne de l'air). La température du sol à une profondeur infinie sera cette température

$\alpha$  = Diffusivité thermique du sol [ $m^2/s$ ]

$A$  = Amplitude de la température de surface [(température maximale de l'air - minimale température de l'air) / 2]

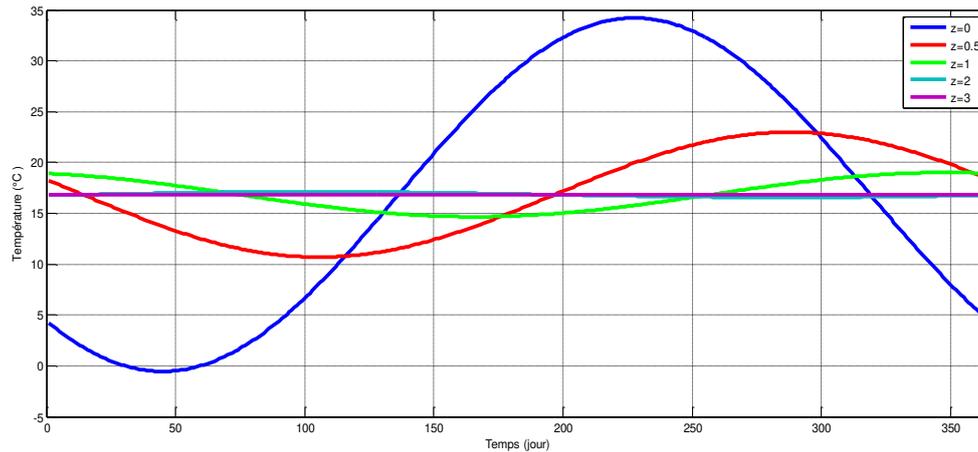
$z$  = Profondeur sous la surface (surface = 0)

$t$  = le temps en jour

$t_0$  = jour de l'année de la température de surface minimale

L'évolution de la température du sol annuel théorique dans le site de blida :

à l'aide des données météorologiques on a : La température du sol à une profondeur infinie  $T_i = 16.84$  °C , jour de l'année de la température de surface minimale  $t_0 = 45$  , Amplitude de la température de surface  $A = 17.83$  °C.



**Figure (II.3) :** Evolution de la température du sol théorique en fonction du temps et de la profondeur  $z$  dans le cas d'un sol argileux

La stabilité de la température commence à partir de 4 m de profondeur qui est la plus fréquemment considérée dans les applications pratiques du rafraîchissement de l'air par échangeur enterré.

## II.4 Calcul de la température de l'air à la sortie de l'échangeur enterré :

### Hypothèses considérées :

Dans ce qui suit on va considérer les hypothèses suivantes :

- La température extérieure du tube est constante, ce qui revient à considérer que. (l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangées).
- La vitesse de l'air est considérée constante tout le long de l'échangeur (air/sol) enterré.
- Les propriétés thermo physiques de l'air sont considérées constantes (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique,...etc.).

L'échange de chaleur à l'intérieur d'un tube enterrée où circule un fluide se fait par convection forcée. Le flux thermique  $\phi$ , à travers la paroi du tube est proportionnel à la différence entre la température du sol ( $T_{sol}$ ), et la température de l'air dans le tube ( $T_{air}$ ), et à l'inverse de la résistance thermique séparant les deux domaines. Le bilan thermique élémentaire à travers un tronçon de longueur  $dl$  du tube échangeur s'écrit :

$$\dot{m}.C_{pair}.\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \frac{T_{sol}-T(x)}{Rt} . \quad (II.2)$$

$$\dot{m} \cdot C_{\text{pair}} \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{T_{\text{sol}} - T(x)}{R_{cd} + R_{cv}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\dot{m}$  : débit d'air [kg/s].

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot S$$

$\rho$  : masse volumique de l'air [kg/m<sup>3</sup>]

V : la vitesse d'entrée de l'air [m/s]

S : la surface de section [m<sup>2</sup>]

C<sub>pair</sub> : chaleur massique de l'air [ $\frac{J}{\text{kg} \cdot K}$ ].

R<sub>cd</sub> : résistance thermique du tube par unité de la longueur [ $\frac{m \cdot K}{W}$ ].

$$R_{cd} = \frac{1}{\lambda_{cd} \cdot 2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right).$$

R<sub>cv</sub> : résistance thermique convective par unité de la longueur entre l'air et le tube [ $\frac{m \cdot K}{W}$ ].

$$R_{cv} = \frac{1}{h_{cv} \cdot 2\pi \cdot r}$$

R<sub>t</sub> : résistance thermique total par unité de la longueur

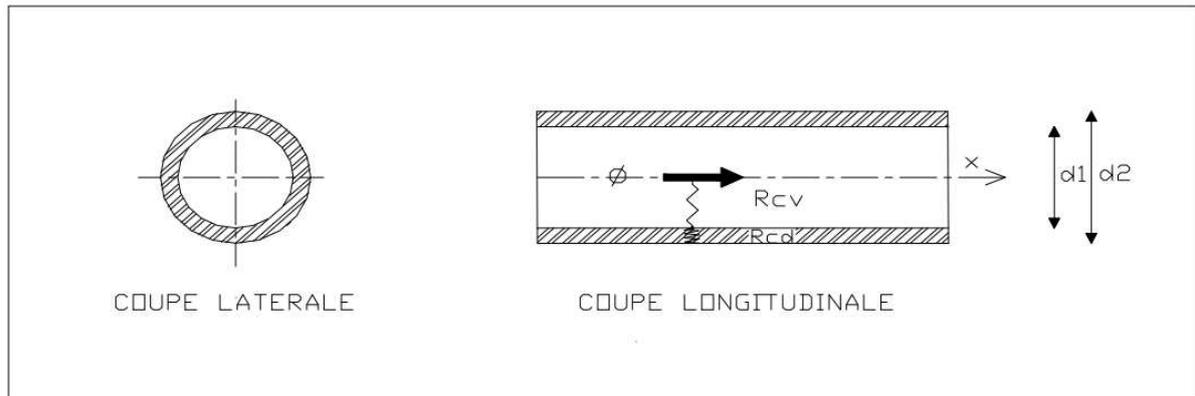
$$R_t = \frac{1}{\lambda_{cd} \cdot 2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) + \frac{1}{h_{cv} \cdot 2\pi \cdot r}$$

T<sub>sol</sub> : température du sol en [K].

T(l) : température de la sortie du tube en [K].

R : rayon extérieur du tube [m].

r : rayon intérieure du tube [m].



**Figure (II.4) :** Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré [18]

Le coefficient d'échange convectif :

La nature de l'écoulement dépend du nombre de Reynolds ,dans notre étude on va prendre la vitesse supérieure à 3m/s à partir des extractions de la recherche biobibliographie .

$$Re = \frac{v.d}{\nu}$$

Dans notre cas l'écoulement est turbulent, le nombre de Nusselt moyen peut être estimé à l'aide de la relation de Colbrun elle est valable si:  $10000 < Re < 120000$

$$\overline{Nu} = 0.023Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection moyen sera égal à :

$$hcv = \frac{\overline{Nu}.k}{d} \quad . [19]$$

on développé l'équation (II.2) :

On considère le cas du transfert stationnaire  $\frac{dT}{dx} = 0$  :

$$\dot{m}.C_{pair} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{T_{sol} - T(x)}{Rt}$$

$$\dot{m}.C_{pair} \cdot \frac{dT}{T(x) - T_{sol}} = \frac{-d(x)}{Rt}$$

$$\frac{dT}{T(x) - T_{sol}} = \frac{-d(x)}{\dot{m}.C_{pair}.Rt} \quad \text{(II.3)}$$

On intègre l'équation (II.3)

$$\int \frac{dT}{T(x)-T_{sol}} = \int \frac{-dx}{\dot{m}.C_{pair}.Rt}$$

$$\ln(T(x) - T_{sol}) = \frac{-x}{\dot{m}.C_{pair}.Rt} + c$$

Aux limite(  $x=0$  ) on à  $T(0)=T_e$   
 $\Rightarrow c = \ln(T_e - T_{sol})$

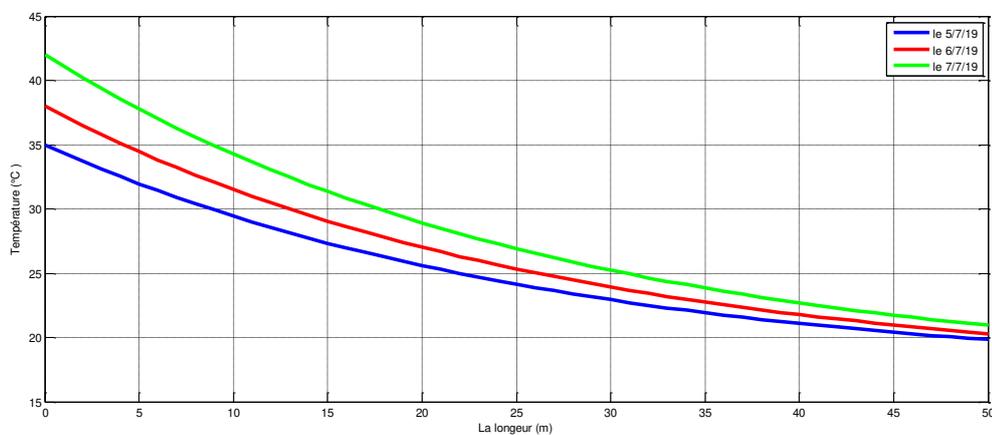
$$\Rightarrow \ln\left(\frac{T(x)-T_{sol}}{T_e-T_{sol}}\right) = -\frac{x}{\dot{m}.C_{pair}.Rt}$$

$$\Rightarrow \frac{T(x)-T_{sol}}{T_e-T_{sol}} = e^{-\frac{x}{\dot{m}.C_{pair}.Rt}}$$

$$T(x) = T_{sol} + (T_e - T_{sol}) \cdot e^{-\frac{x}{\dot{m}.C_{pair}.Rt}} \quad (\text{II.4})$$

Pour une distance  $x=L$  , aurait comme valeur :

$$T(x = l) = T_{sol} + (T_e - T_{sol}) \cdot e^{-\frac{l}{\dot{m}.C_{pair}.Rt}} \quad (\text{II.5})$$



**Figure (II.5) :** Evolution de la température théorique en fonction de la longueur de l'échangeur air/sol pour les 3jours (site de blida) à différent température d'entrée pour une profondeur de 3m

La figure(II.5) représente l'évolution d'après le model mathématique eq(II.4) de la température de l'air théorique en fonction de la longueur pour la vitesse  $v=3m/s$  ,  $T_{sol} =$

17°C ,et différent température extérieur de l'air à l'entrée (42°C ,38°C ,35°C) à l'aide des données météorologique et des données qui on à trouvé à la figure (II.3).

### II.5 L'efficacité de l'échangeur air/sol :

L'efficacité décrit le rendement de l'échangeur enterré d'une longueur bien défini, dépend de la température de l'air à l'entrée de l'échangeur à une certaine distance parcourue depuis son introduction et de la température du sol, son expression est désignée par le rapport suivant :

$$\varepsilon = \frac{T_{air-sortie} - T_e}{T_{sol} - T_e} \quad (II.6)$$

## Chapitre III

---

### Analyse des paramètres intervenant dans le dimensionnement d'un échangeur (air/sol) enterré

---

#### III-1. INTRODUCTION

Partant du principe de fonctionnement d'un échangeur air sol enterré et des éléments constitutants, on a pu mettre en évidence plusieurs paramètres qui interviennent directement ou indirectement dans les performances d'un tel système pour le rafraîchissement de l'air dans le domaine du bâtiment. Les principaux paramètres intervenant dans le dimensionnement d'un échangeur (air/sol enterré) :

- Les paramètres thermo-physiques du sol (conductivité thermique, capacité calorifique et la masse volumique).
- Les paramètres géométriques de l'échangeur (épaisseur, diamètre du tube échangeur et la longueur totale de l'échangeur enterré).
- Les paramètres thermo-physiques des matériaux utilisés dans la construction des échangeurs (air/sol) enterré (conductivité thermique).
- Le régime d'écoulement laminaire ou turbulent ? autrement il s'agit de contrôler le débit massique de l'air injecté dans l'échangeur.

D'après l'étude et la synthèse bibliographique entamée dans le premier et le second chapitre, deux modèles mathématiques qui décrivent le comportement de la température du sol et de l'air injecté dans l'échangeur enterré.

Les deux modèles analytiques en question regroupent les principaux paramètres de performances qui interviennent dans le fonctionnement et le dimensionnement de ces dispositifs thermiques.

- Le premier modèle qui décrit l'évolution de la température du sol à n'importe qu'elle profondeur et à n'importe qu'elle période de l'année éq.( **II.1**).

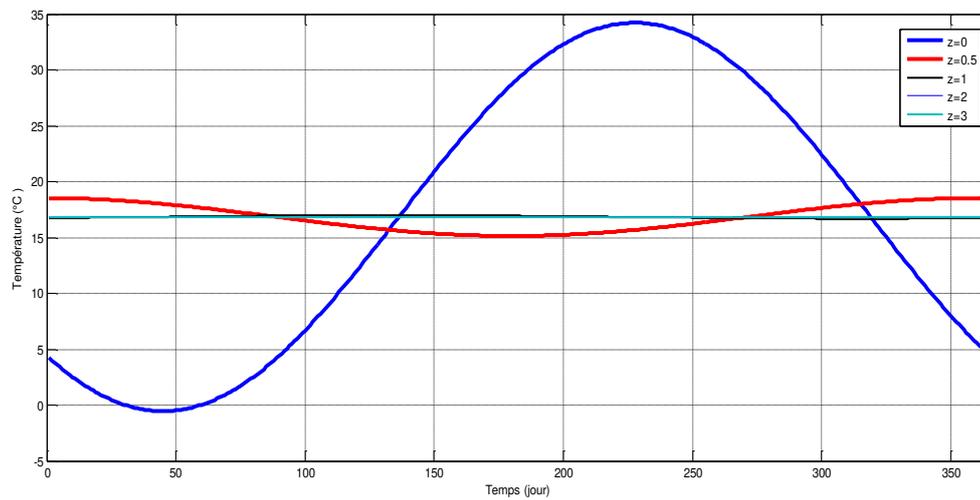
$$T(t, z) = T_i - A \cdot \exp\left(-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot (t - t_0 - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}})\right)$$

- Le deuxième modèle qui caractérise la variation de la température de l'air circulant dans l'échangeur enterré depuis l'entrée jusqu'à la sortie éq.( **II.4**).

$$T(x) = T_{sol} + (T_e - T_{sol}) \cdot e^{-\frac{x}{m \cdot C_{pair} \cdot R_t}}$$

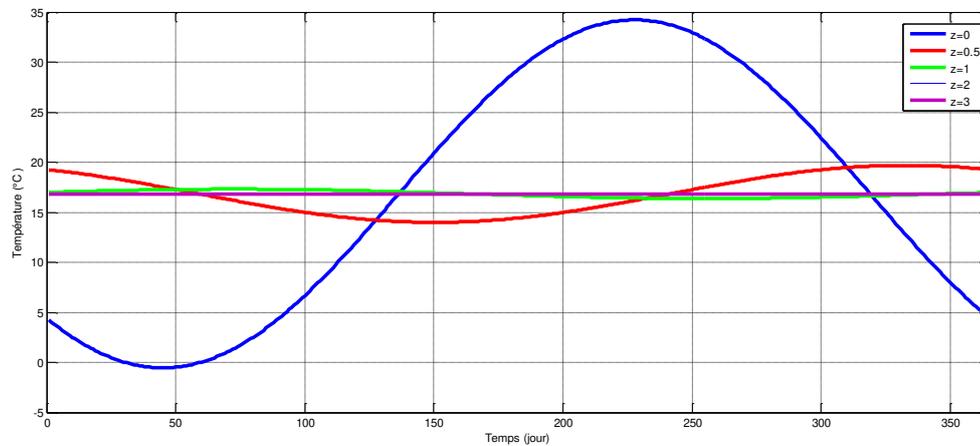
### III-2.Effet de la nature et de type du sol :

Sol sableux sec :

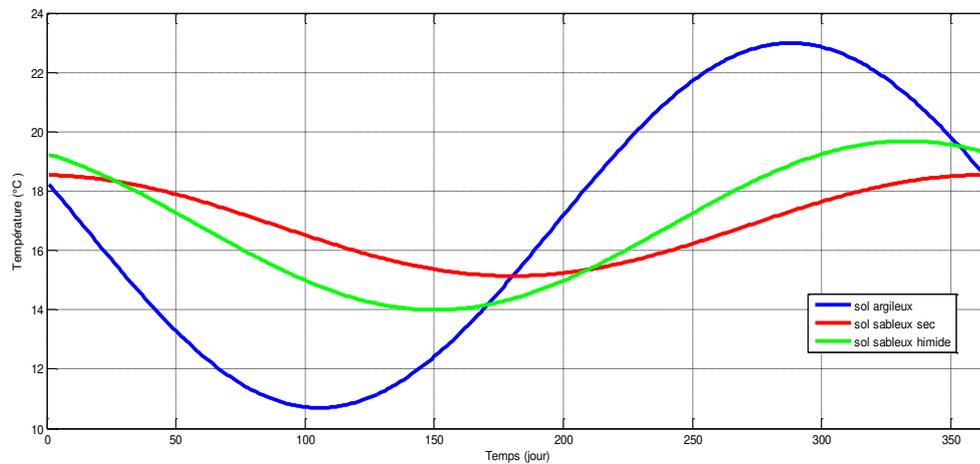


**Figure (III-1) :** Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol sableux sec ( $\rho = 1650 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0.27 \text{ W/m.K}$ ,  $C_p = 805 \text{ J/kg.K}$ )

**Sol sableux humide :**



**Figure (III-2) :** Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur  $z$  dans le cas d'un sol sableux humide ( $\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0.58 \text{ W/m.K}$ ,  $C_p = 1000 \text{ J/kg.K}$ )

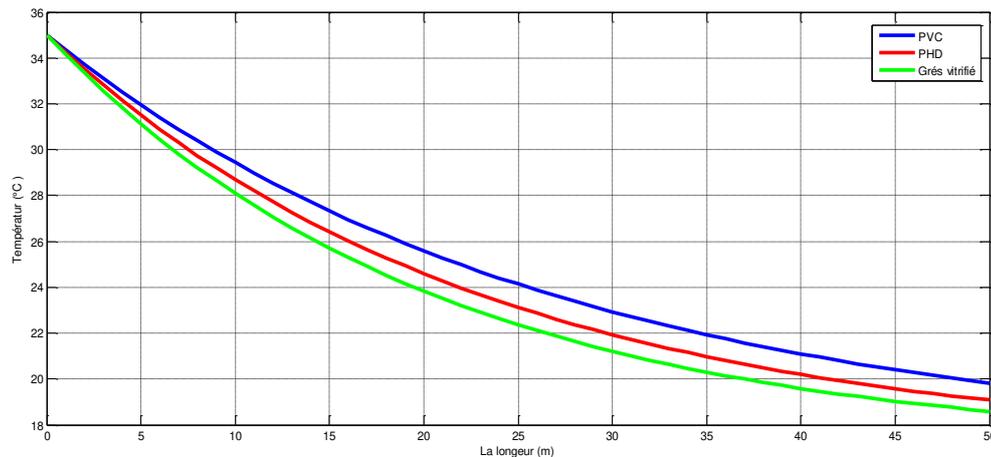


**Figure (III-3) :** Evolution de la température du sol en fonction du temps pour trois types de sol pour une profondeur de 0.5 m

La comparaison entre l'évolution de la température en fonction du temps pour trois différents types de sol Figure (III-3) à une profondeur de 0.5 mètres, l'argile est mieux que le sable humide et sable sec à cause de sa diffusivité thermique (plus élevée)

### III.3- Effet de la matière de construction du tube échangeur enterré :

Pour voir l'effet de la matière de construction les plus fréquemment utilisés dans le rafraîchissement par échangeur enterré géothermique, on a essayé de voir le comportement thermique de trois types de matériaux, le PVC ( $\lambda=0.17\text{w/m.k}$ ) le PHD ( $\lambda=0.35\text{w/m.k}$ ) (polyéthylène haute densité) et La grés vitrifié ( $\lambda=1.16\text{ w/mk}$ )



**Figure (III-4)** : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents matières de construction du tube échangeur, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m,  $V=3\text{ m/s}$

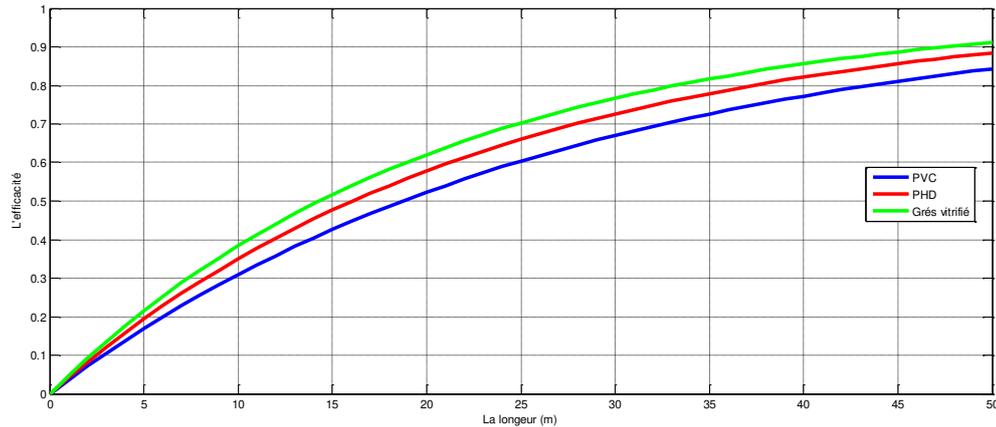
la figure (III-4) montre l'évolution de la température de l'air en fonction de la longueur, dans le cas d'un sol argileux, en présence d'un échangeur d'une longueur de 50 m, enterré à une profondeur de 3m, une vitesse moyenne de 03 m/s et diamètre de 15 cm.

L'analyse des courbes figure (III-4) montre que la conductivité thermique du matériau est le paramètre dominant qui affecte la qualité du transfert thermique entre le sol et la paroi du tube échangeur enterré. Dans notre cas, parmi les trois matières testées, un échangeur en grés vitrifié ( $\lambda=1.16\text{ W/m.K}$ ) représente de bonnes performances thermiques comparativement à un échangeur en PVC ( $\lambda=0.17\text{W/m.K}$ ), PHD ( $\lambda=0.35\text{W/m.K}$ ). Cependant, dans les applications pratiques, les constructeurs préfèrent le PVC en raison de ces nombreux avantages, en particulier son faible coût de réalisation et sa résistance à la corrosion en présence des sols humides. D'autre part, malgré sa faible conductivité thermique, l'écart de température en fonction de la longueur de l'échangeur pour atteindre la température du sol n'est pas très important par rapport aux matériaux métalliques qui sont de bons conducteurs, mais qui présentent un handicap vis-à-vis de la résistance à la corrosion.

Pour voir l'effet de la matière de construction sur les performances thermiques notamment l'efficacité de l'échangeur, on a essayé d'évaluer ce paramètre par l'équation (II-4), et de suivre par la suite l'évolution de son profile en fonction de la longueur pour trois matières de conception .

Longueur de l'échangeur (m)	Efficacité		
	PVC	PHD	Grés vitrifié
1	0.0363	0.0422	0.0473
5	0.1689	0.1941	0.2152
10	0.3093	0.3505	0.3841
15	0.4259	0.4765	0.5166
20	0.5229	0.5781	0.6206
25	0.6035	0.6600	0.7022
30	0.6704	0.7259	0.7623
35	0.7261	0.7791	0.8166
40	0.7723	0.8220	0.8561
45	0.8108	0.8565	0.8870
50	0.8427	0.8844	0.9113

**Tableau III-1 :** Efficacité de l'échangeur pour différentes matières de constructions utilisées dans les échangeurs air/sol géothermiques.

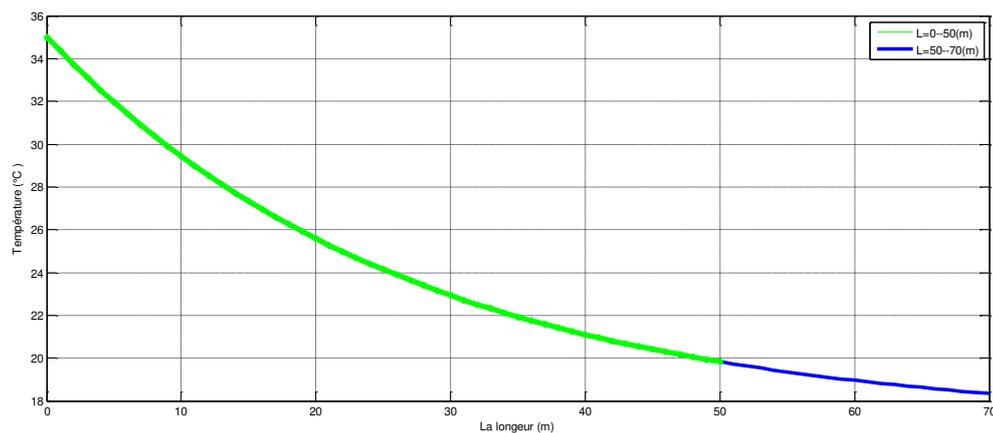


**Figure (III-5):** Evolution de l'efficacité théorique de l'échangeur air/sol géothermique en fonction de la longueur pour différentes matières de constructions utilisées.

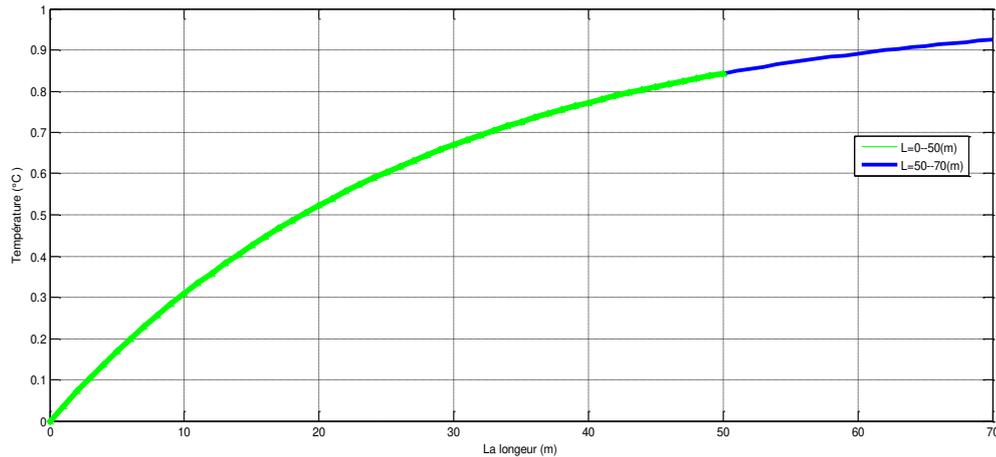
Tableau (III-1) et figure (III-5), où c'est le matériau le plus conducteur thermique qui l'emporte et qui assure un bon échange thermique entre le sol et l'air qui circule à l'intérieur des tubes (grès vitrifié dans notre cas). seulement l'écart par rapport au PVC pour toutes les longueurs d'échanges considérées ne dépasse la valeur de 07 % d'efficacité.

#### III.4- Effet de la longueur d'échange :

Concernant l'effet de la longueur d'échange mise en jeu du réseau de tube enterré, la simulation a été entamée en présence d'un échangeur en PVC, de diamètre intérieur égale à 150 mm et d'une épaisseur de 05 mm dans le cas d'un sol argileux et dont la profondeur d'enfouissement est de 03 mètres, à savoir que la distance entre axe est égale à 0,4 m et  $V=3$  m/s .



**Figure (III-6) :** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur d'échange, tube échangeur en PVC, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, dont le vitesse de  $V=3$  m/s.

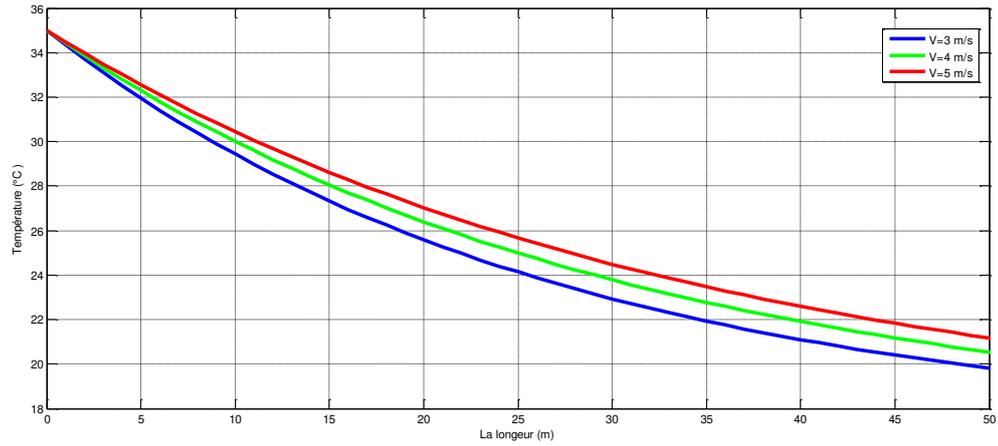


**Figure (III-7) :** Efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur tube échangeur en PVC,  $d = 150$  mm enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, de vitesse  $V = 3$  m/s.

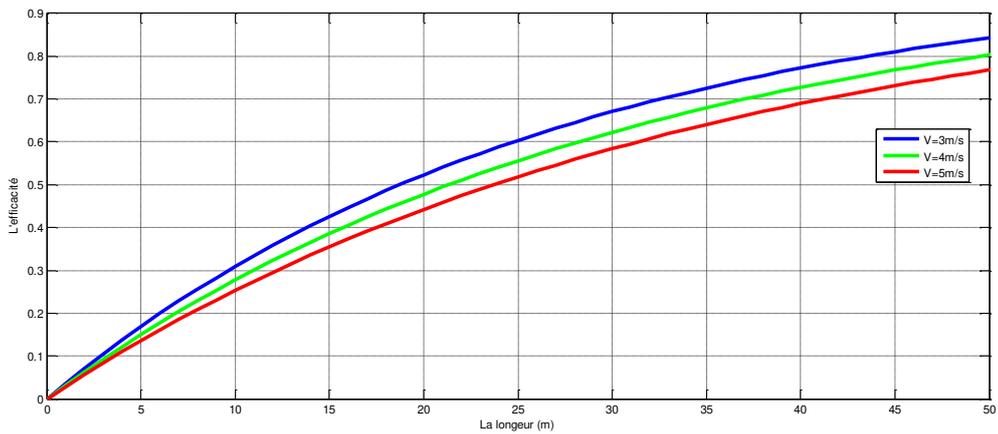
A partir de la figure (III-6) et (III-7), qui montre l'évolution de la température de l'air et de l'efficacité en fonction de la longueur du conduit (air/sol) enterré, on remarque que la l'efficacité augment quand augment la longueur donc l'échangeur consomme l'énergie du sol plus quand la longueur est long .

### III.5- Effet du débit d'air injecté dans l'échangeur :

Le débit d'air soufflé est un paramètre essentiel qui permet de basculer du régime laminaire au régime turbulent. Car il est important dans les applications pratiques d'obtenir un écoulement agité au sein de la veine d'air dynamique du conduit échangeur (air/sol), afin d'optimiser la qualité de transfert thermique entre l'air acheminé et les parois du tube échangeur enterré en contact avec le sol.



**Figure (III-8) :** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différent vitesse d'air injectés dans l'échangeur (PVC , d=150 mm ) enterré à une profondeur de 03 m, sol argileux, température à l'extérieur  $T_e = 35\text{ }^\circ\text{C}$



**Figure (III-9) :** Evolution Efficacité de l'échangeur pour différents débits, Echangeur en PVC , d= 150 mm, profondeur de 03 m, température à l'extérieur  $T_e=35\text{ }^\circ\text{C}$

Longueur de l'échangeur (m)	Efficacité		
	V=3	V=4	V=5
1	0.0363	0.0320	0.0288
5	0.1689	0.1499	0.1359
10	0.3093	0.2774	0.2534
15	0.4259	0.3857	0.3549
20	0.5229	0.4778	0.4426
25	0.6035	0.5561	0.5184
30	0.6704	0.6227	0.5838
35	0.7261	0.6792	0.6404
40	0.7723	0.7273	0.6893
45	0.8108	0.7682	0.7315
50	0.8427	0.8030	0.7680

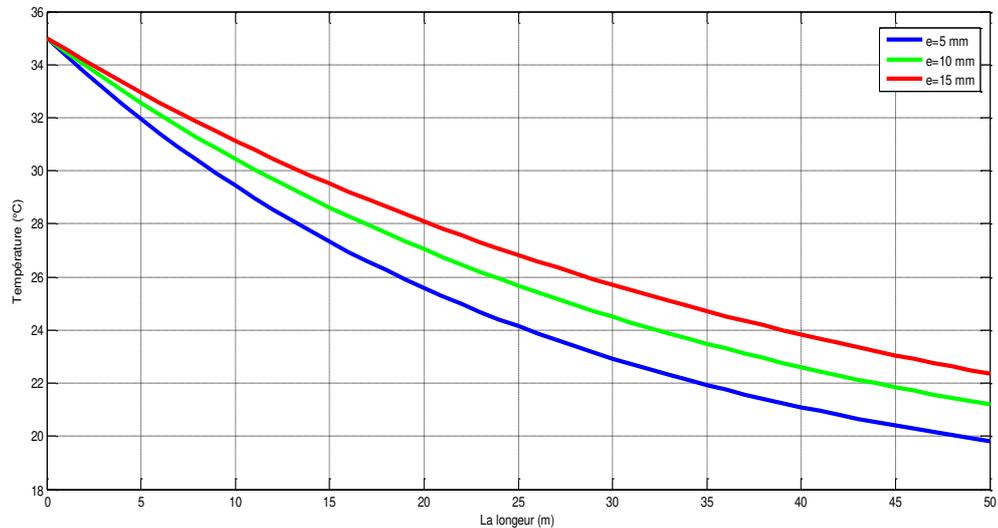
**Tableau (III-2) :** Efficacité de l'échangeur pour différents vitesses (échangeur en PVC , d=150 mm ) profondeur = 03 m, sol argileux, température à l'extérieur  $T_e=35\text{ }^\circ\text{C}$  .

A partir de l'équation (II-4) qui décrit l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur, on a pu voir l'influence du vitesse de l'air sur le comportement thermique de l'échangeur géothermique enterré. En effet pour de bonnes performances, le dimensionnement prévoit des débits d'air moyen tout en assurant une convection forcée. La figure (III-8) montre que c'est pour un vitesse d'air au voisinage de  $V= 03\text{ m/s}$  que la température de l'air se rapproche de celle du sol pour une longueur d'échange comprise entre 45 et 50 m .De même sorte, le calcul de l'efficacité de l'échangeur Tableau (III-2) pour trois valeurs de débits d'air soufflé, montre que c'est au voisinage de vitesse de  $03\text{ m/s}$  que l'efficacité de l'échangeur dépasse la valeur de  $84\%$  pour une longueur de 50 m, par contre elle, n'est que de  $81\%$  pour une vitesse de  $4\text{ m/s}$  et  $77\%$  à  $5\text{ m/s}$  .

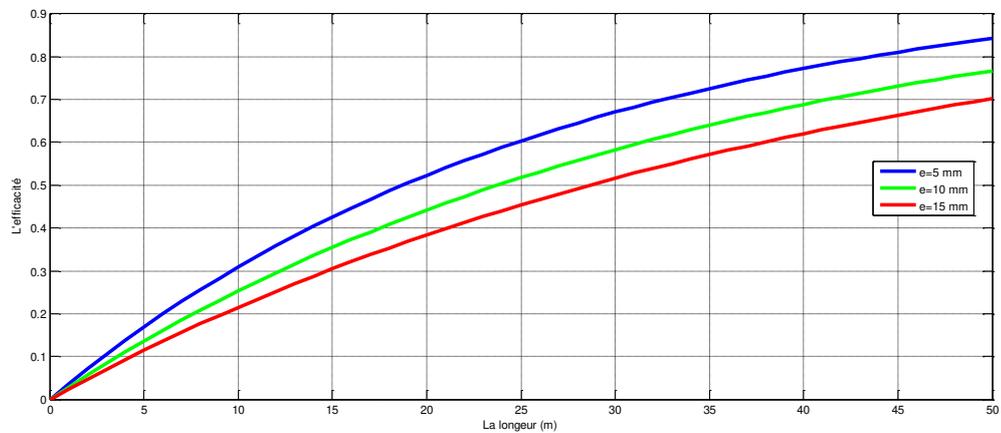
### III.6- Effet de l'épaisseur du tube échangeur enterré :

Pour vérifier l'effet de l'épaisseur du conduit échangeur, la simulation a été réalisée avec 03 épaisseurs différentes de la paroi du tube enterré, 05, 10 et 15 mm, où on imposé les

conditions de fonctionnement suivantes ; sol argileux, profondeur égale à 3m, échangeur en PVC, vitesse d'air injecté 3 m/s , diamètre du tube  $d=150\text{mm}$  , longueur totale de l'échangeur 50 m



**Figure (III-10)** : Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour différentes épaisseurs du tube échangeur en PVC,  $d=150\text{mm}$ , sol argileux, profondeur 03m,  $V = 3\text{m/s}$



**Figure (III-11)** : Efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur pour différent épaisseur de tube échangeur en PVC,  $d=150\text{mm}$ , sol argileux, profondeur 03 m,  $V=3\text{m/s}$

En analysant les résultats affichés par les figure (III-10) et (III-11), (III-3) Il est évident de conclure que pour obtenir de meilleures performances, il est important d'utiliser un échangeur avec une épaisseur la plus minimale possible, en outre qui permet d'assurer une résistance thermique minimale entre le sol et l'air acheminé à travers l'échangeur (air/sol), tout en conservant la rigidité du réseau des tubes à une profondeur de 03 mètre dans le sol.

### III.7- Effet de diamètre :

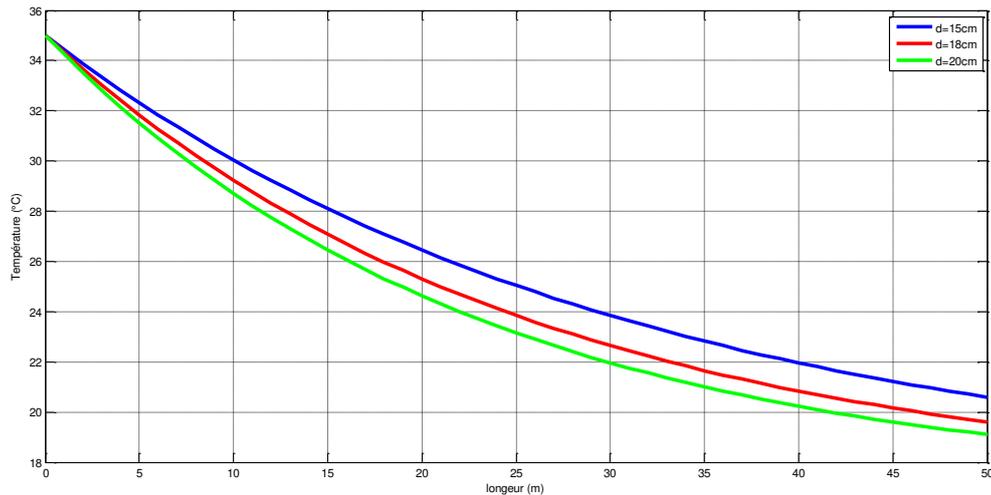


Figure III.12 Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour différentes diamètre du tube échangeur en PVC, sol argileux, profondeur 03m,  $V = 3\text{m/s}$

la figure III.12 montre Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour différentes diamètre du tube échangeur en PVC, sol argileux, profondeur 03m,  $V = 3\text{m/s}$

On remarque quand on augmente le diamètre l'échange de chaleur augmente et la température diminue rapidement à cause de l'augmentation de la surface d'échange.

## Chapitre IV

---

### Etude expérimentale et validation le code de calcul

---

#### IV-1 Introduction :

Les méthodes expérimentales scientifiques consistent à tester la validité des modèles théorique et d'une hypothèse, en reproduisant un phénomène et en faisant varier un paramètre.

Dans cette partie, nous présentons une étude expérimentale d'un échangeur air/sol qui a fait par Mr.lafri à 2018 avec son étudiant au niveau de département génie mécanique à said dahleb blida et après on essayé de validation le modèle mathématique de variation de température et l'efficacité en fonction de la longueur que on à torve dans l'équation (II.4)

#### IV-2 description du dispositif expérimental :

ce travail a été réalisée dans l'atelier de gène mécanique LGM a l'université de Blida l'échangeur air/sol montre dans la figure 1 composé d'un tube en PVC divise en trois fosses a différent profondeur (0.75 ; 1.75; 2.75m) ; le diamètre de la conduite 16cm avec une pente de 1% pour la conduite premier et deuxième (0.75;1.75m) ; la troisième une pente de 2% ; il occupe une superficie de 37.2m<sup>2</sup>.

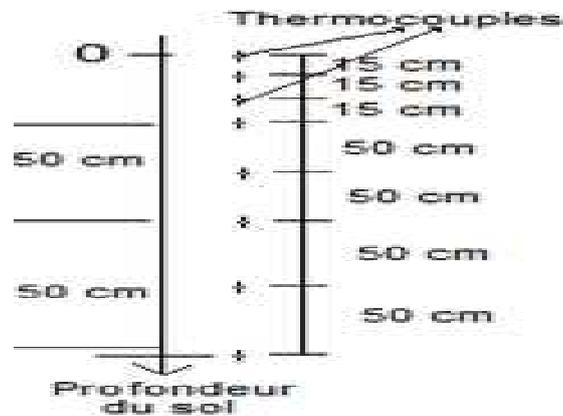
Une centrale d'acquisition illustrée dans la figure 2 reliée par vingt prélèvement de thermocouples de type T. les thermocouples sont reparties suivant les longueur des conduites pour mesurer les températures de l'air le long des conduites a distance de 0m (entrée de l'échangeur); 1m ; 2m ; 3m ; 4m ; 5m ; 6m ; 7m (sortie du l'échangeur).

La vitesse de l'écoulement de l'air est mesurée par un anémomètre a hélice a la sortie du tube et gère anémomètre a hélice de vitesse constante.

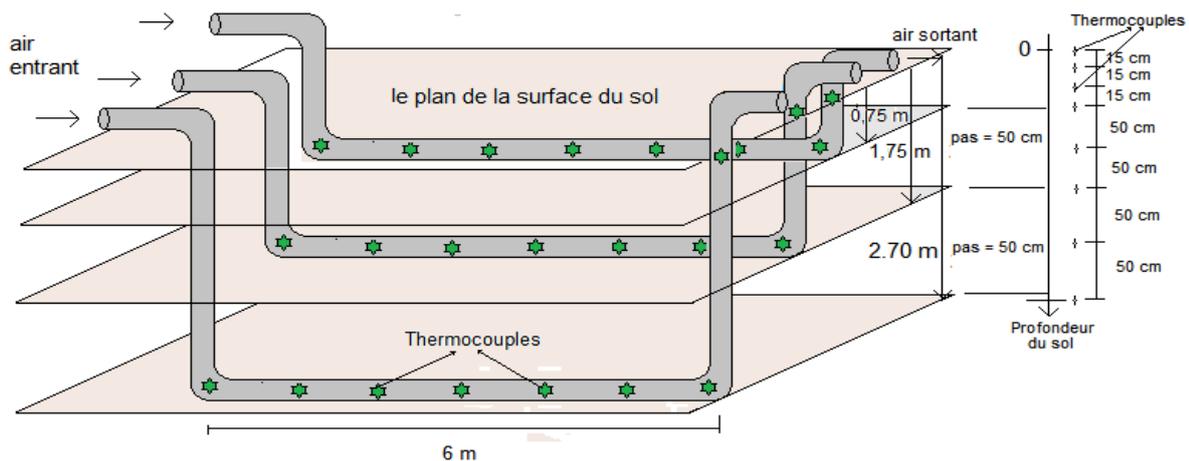
Les températures de l'air a l'intérieur du tube entrée on été prise toute les 15 minute durant la Période de préchauffage.

### IV-3 la température de sol:

cette figure (IV-1) qui présentée le positionnement des thermocouples suivant les profondeur



**Figure IV-1 :** schéma et représentatif les positions des thermocouples suivant la profondeur sol a 2.75m



**Figure. IV.2** schéma explicatif de l'implantation des thermocouples pour différent profondeur de l'échangeur air/sol



Figure IV-3 fosse a 0.75m



Figure IV-4 fosse a 1.75m



Figure IV-5 fosse a 2.70 m



Figure IV-6 montage parallèle pour les trois conduites a même ventilateur pour un vitesse constante 1.5 m/s

## IV-4 Les résultats expérimental et théorique

### IV-4-1 La température du sol :

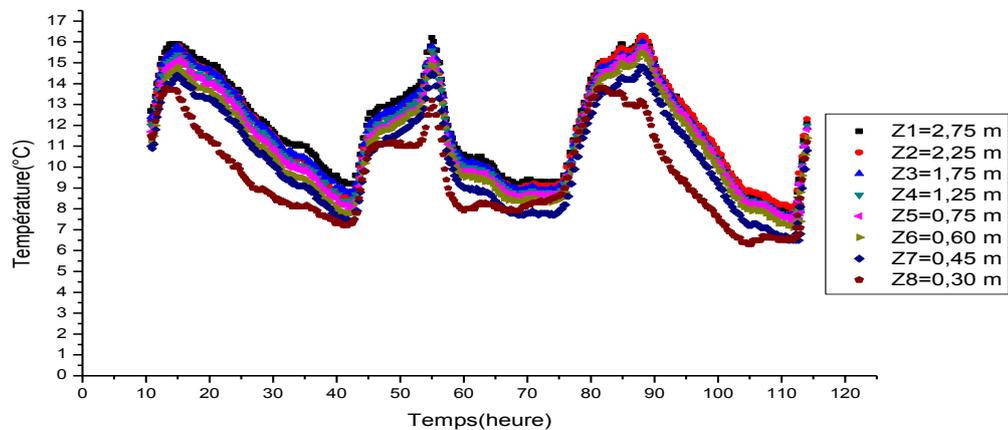


Fig.IV.8 La variation de la température du sol en fonction du temps pour différentes profondeur du sol de la journée 12 2 2018

Figure IV-7 résultats expérimental pour les profile des température en fonction de profondeur et le temps

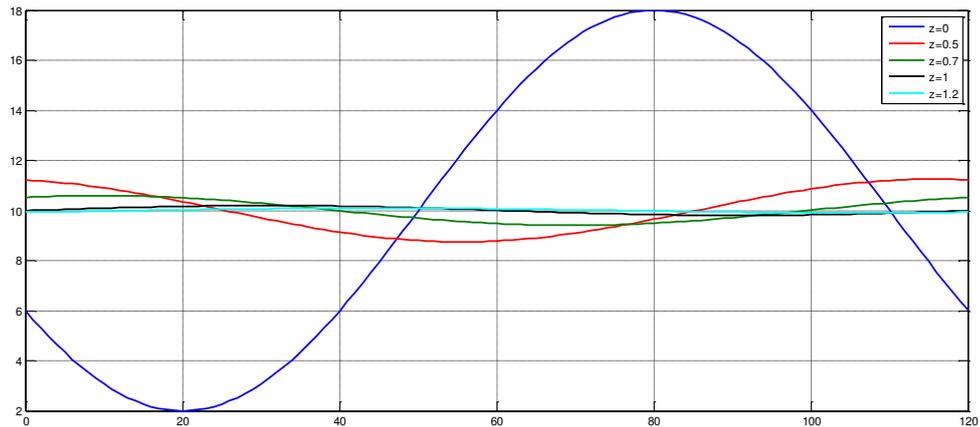


Figure IV-8 Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol argileux

A partir de les résultats expérimentaux Figure IV-7 et les résultats théoriques de model de kasuda (II.1) qui on à trouve en remarque que la température pas stable pour différent profondeur dans les résultats expérimentaux , et dans résultats théorique Figure( IV-8) la stabilité commence à 1.2 m l'écart de température entre les résultats expérimentaux et théoriques justifier par les composants du sol.

#### IV-4-2 La température de sortie de l'échangeur :

Temps	profondeur	T air entré	Tsortie	Tsol
13 :00	0.75m	8	10.4	13.8
21 :30		9.3	11.2	12.6
10 :15		6.6	9.5	9.7

Tableau IV-1 la température expérimentale de l'échangeur air/sol en fonction de temps à 0.75m

temps	profondeur	T air entré	Tsortie	Tsol
13 :00	0.75 m	8	9.6	13.8
21 :30		9.3	10.1	12.6
10 :15		6.6	8.1	9.7

Tableau IV-2 la température théorique de l'échangeur air/sol en fonction de temps à 0.75m

A partir de les résultats expérimentaux tableau (IV-1) et les résultats théoriques de model de l'équation (II.2) qui on à trouve en remarque que l'écart de température est ne dépasse pas 1.5°C cause de les propriétés physiques de l'air entrée qui on suppose constant dans notre étude.

### *Conclusion Générale*

Les échangeurs enterrés air/sol sont de nos jours considérés comme une des solutions très encourageantes, destinés pour le rafraîchissement de l'air en été et le réchauffement en hiver. Les études réalisées montrent que ce système est à basse consommation d'énergie en comparaison avec les autres techniques conventionnelles qui sont par contre très « **gourmands** » d'électricité souvent l'origine est l'énergie fossile.

Dans de nombreuses applications, l'échangeur air/sol thermique n'a cessé de démontrer son efficacité dans le rafraîchissement et l'amélioration des conditions de vie et de confort climatique tout au long de l'année. D'autre part, comparativement aux autres techniques, ce système préserve la santé de l'homme grâce à la température sortie de l'échangeur qui est favorable au corps humain, et qui fonctionne d'une manière propre loin des autres sources de la pollution.

Notre présente étude a pour objective de dimensionner un échangeur de chaleur (air/sol) enterré. Pour cela on a essayé de comprendre les lois physiques régissent le fonctionnement de ce dispositif, ce qui nous a permis d'établir deux modèles mathématiques, le premier donne la température du sol, pour toute profondeur et à n'importe quelle journée de l'année. Ce modèle est basé sur les caractéristiques du sol du site et sur la base de données météorologique. Les résultats théoriques obtenus montrent l'amortissement de l'amplitude des sollicitations du signal de température du sol quelque soit la saison, ce qui explique sa grande inertie thermique.

Le second modèle analytique décrit le comportement de la température de l'air le long de l'échangeur supposé implanter dans un site, qui possède les données météorologiques et les caractéristiques du sol similaires à celles de la région de Blida.

Les résultats graphiques qui sont obtenus à partir de la simulation des paramètres de dimensionnement fixés préalablement, montrent l'évolution des températures de l'air acheminé à travers l'échangeur à une profondeur d'enfouissement de 03 mètres, pour différents débits injectés, l'efficacité augmente avec l'augmentation de la longueur d'échange et diminue avec l'augmentation de débit d'air soufflé et atteint son maximum pour une longueur d'échange équivalente à 50 m. D'autre part on a pu observer l'influence de la matière de conception de cet échangeur, de son diamètre et l'épaisseur optimaux.

Pour la simulation des paramètres déterminants le fonctionnement, on a écrit un programme informatique sous MATLAB, qui comporte deux sous programmes, le premier est basé sur le modèle mathématique d'évaluation de température du sol, afin d'estimer la variation de la température du sol à plusieurs niveaux de profondeur en fonction du temps.

Le deuxième programme est basé sur le calcul de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur tout en variant les paramètres de dimensionnement thermiques

## *Conclusion Générale*

---

A partir de notre étude de dimensionnement et en vue d'obtenir de meilleures performances thermiques d'un échangeur (air/sol) enterré, on propose aux constructeurs de respecter certaines recommandations durant la réalisation pratique d'un tel dispositif et de satisfaire les conditions de conception suivantes :

- 1- Une profondeur d'enfouissement idéal de trois mètres
  
- 2- Une matière de construction en PVC à haute pression en raison de ces nombreuses avantages, moins chère que les matériaux métalliques, rigides et ont une bonne résistance à la corrosion en présence des terrains et sols humides.
  
- 3- Une longueur totale aux environs de 50 m, avec une disposition en forme serpentín pour n'occuper que peu d'espace et dont la distance entre axes des tubes devrait être supérieure à 40 cm.
  
- 4- Pour que la température de l'air injecté dans le conduit échangeur se rapproche de celle du sol, la vitesse d'air recommandé doit être au voisinage de 3 m/s.
  
- 6- Pour assurer un bon transfert de chaleur entre le fluide acheminé à travers l'échangeur enterré et le sol avoisinant, L'épaisseur optimale à respecter ne devrait dépasser 5 mm, tout en restant dans la limite des consignes de fonctionnement.

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] wikipedia
- [2] <https://www.caminteresse.fr/sciences/dou-vient-la-chaleur-de-la-terre-1181965/>
- [3] <http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/02-chaleur-ressource.html>
- [4] maxicours.com -Cours de SVT Terminale S - Gradient et flux géothermiques
- [5][<https://www.caminteresse.fr/sciences/dou-vient-la-chaleur-de-la-terre-1181965/>]
- [6] <http://www.la-geothermie.net/les-types-de-geothermie/les-4-types-de-geothermie.html>
- [7]<https://www.sodielec-berger.fr/fr/content/255/88/vmc/puit-canadien-puits-canadien>
- [8] THÈSE de Pierre HOLLMULLER Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments Faculté des sciences de l'Université de Genève 2002
- [9][https://www.infoenergie38.org/wp-content/uploads/puits\\_canadien.pdf](https://www.infoenergie38.org/wp-content/uploads/puits_canadien.pdf)
- [10] <http://www.dtim-diag.com/les-energies-renouvelables.php>
- [11][https://www.infoenergie38.org/wp-content/uploads/puits\\_canadien.pdf](https://www.infoenergie38.org/wp-content/uploads/puits_canadien.pdf)
- [12][https://conseils.xpair.com/consulter\\_savoir\\_faire/puits-canadien-ventilation-double-flux/ventilation-helios-qualite-air.htm](https://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/puits-canadien-ventilation-double-flux/ventilation-helios-qualite-air.htm)
- [13]<https://www.fiabitat.com/dimensionner-un-puits-canadien/>
- [14] [www.ekopedia.fr/wiki/Puits\\_canadien](http://www.ekopedia.fr/wiki/Puits_canadien)
- [15]\_David Bartolomeu, Performance d'un échangeur thermique de type air-sol. ITP à Romillé 2005.4p
- [16]\_M. Benhammou et B. Draoui, Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie, Revue des Energies renouvelables, Vol. 15 N°2 (2012) pp.275-284
- [17]\_Mohamed Saad-Eddine, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, Mémoire de Magister en génie Mécanique, Université de Biskra (2012)
- [18]\_Stéphane THIERS, Bruno, PEUPORTIER modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments Journée thématique SFT-IBPSA Froid solaire et confort d'été 25 avril 2007, Aix-les-Bains Article présenté au Centre Énergétique et Procédés, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France (2007)

## Références bibliographiques

---

[19] Williams G. and Gold L. Canadian Building Digest N. 180.1976. National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction. <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd180e.html>.

[20] <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/mecanique/chap4/Chapitre-2/index.html>

## Annexes

### Propriétés thermo physiques de quelques métaux

	masse volumique ( $\rho$ ) en $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	chaleur spécifique ( $C_p$ ) en $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	conductivité- thermique ( $\lambda$ ) en $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	diffusivité- thermique ( $a$ ) en $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Aluminium	2,7	0,888	237	98,8
Plomb	11,34	0,129	35	23,9
Bronze	8,8	0,377	62	18,7
Chrome	6,92	0,44	91	29,9
Cr-Ni-Acier (X12CrNi18,8)	7,8	0,5	15	3,8
Fer	7,86	0,452	81	22,8
Or	19,26	0,129	316	127,2
fonte	7,8	0,54	42...50	10...12
Acier (< 0,4 % C)	7,85	0,465	45...55	12...15
Cuivre	8,93	0,382	399	117
Magnésium	1,74	1,02	156	87,9
Manganèse	7,42	0,473	21	6
Molybdène	10,2	0,251	138	53,9
Sodium	0,97	1,22	133	112
Nickel	8,85	0,448	91	23
Platine	21,37	0,133	71	25
Argent	10,5	0,235	427	173
Titane	4,5	0,522	22	9,4
Tungstène	19	0,134	173	67,9
Zinc	7,1	0,387	121	44
Étain, blanc	7,29	0,225	67	40,8
Silicium	2,33	0,700	148	87

## Annexes

### Diffusivité de non-métaux à 20 °C:

	masse volumique ( $\rho$ ) en $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	chaleur spécifique ( $C_p$ ) en $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	conductivité- thermique ( $\lambda$ ) en $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	diffusivité- thermique ( $a$ ) en $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Acrylique (Plexiglas)	1,18	1,44	0,184	0,108
Asphalte	2,12	0,92	0,70	0,36
Béton	2,4	0,88	2,1	0,54
Glace (0 °C)	0,917	2,04	2,25	1,203
Humus (grossier)	2,04	1,84	0,52	0,14
Sol sableux (sec)	1,65	0,80	0,27	0,20
Sol sableux (humide)	1,75	1,00	0,58	0,33
Argile	1,45	0,88	1,28	1,00
Verre à vitre	2,48	0,70	0,87	0,50
verre à miroir	2,70	0,80	0,76	0,35
Verre de quartz	2,21	0,73	1,40	0,87
Laine de verre	0,12	0,66	0,046	0,58
Gypse	2,2 bis 2,4	1,09	0,51	0,203
Granit	2,75	0,89	2,9	1,18
Graphite (Graphite)	2,25	0,709	119...165	74...103
Liège (matériau)	0,19	1,88	0,041	0,115
Marbre	2,6	0,80	2,8	1,35
Mortier	1,9	0,80	0,93	0,61
Papier	0,7	1,20	0,12	0,14
Polyéthylène	0,92	2,30	0,35	0,17
Polytétrafluoroéthylène	2,20	1,04	0,23	0,10
Polychlorure de vinyle	1,38	0,96	0,15	0,11
Porcelaine (95 °C)	2,40	1,08	1,03	0,40
Soufre	1,96	0,71	0,269	0,193
Charbon	1,35	1,26	0,26	0,15
Sapin (radial)	0,415	2,72	0,14	0,12
Crépi	1,69	0,80	0,79	0,58
Brique	1,6...1,8	0,84	0,38...0,52	0,28...0,34
Air	0,0013	1,01	0,026	20