

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

**Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique**



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Energétique

Présenté par :

DOUH Abd elouahab

SERRAOUI Khaled

Thème

**Dimensionnement d'un échangeur air/sol
Enterré destiné au rafraîchissement de l'air**

Le : 31/05/2017

Devant le jury :

DERGHOUT Zoheir	MAA	UKMO	Président
DOKKAR Boubakeur	MAA	UKMO	Examineur
HECINI Adel	MAA	UKMO	Encadreur

Année Universitaire : 2016/2017

Dédicace

Je dédie ce travail

À mes parents

À mes frères et sœurs

À tout ma famille et mes amis

Khaled

Abd elouahab

Remerciements

*Nous tenons à exprimer notre gratitude et remerciement à **ALLAH** qui nous a donné la force et le pouvoir pour effectuer ce modeste travail.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur **Mr. HECINI Adel** Maître Assistant à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour nous avoir proposé ce sujet, et pour sa contribution et son aide qui nous ont été indispensable pour la réalisation de ce travail ainsi que tous ces remarques constructives qui nous ont permis d'approfondir les connaissances scientifiques.*

Nous tenons à remercier des membres de jury qui ont accepté de lire et juger notre travail

Nos remerciements vont en particuliers à tous les enseignants et à ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

NOMENCLATURE

Symboles	Désignation	unité
a	Diffusivité thermique du sol	m^2/s
Cp_{air}	Capacité calorifique massique de l'air	$J/kg.K$
Cp_{sol}	Capacité calorifique massique du sol	$J/kg.K$
g	Pesanteur	m/s^2
h_{conv}	Coefficient d'échange convectif	$W/m^2.K$
L	Longueur du tube	m
\dot{m}	Débit massique d'air dans la conduite	Kg/s
P	Pression de l'air	Pa
R_{int}	Rayon intérieur du tube	m
R_{ext}	Rayon extérieur du tube enterré	m
R_{sol}	Rayon de la couche adiabatique du sol	m
R_{conv}	Résistance thermique entre l'air et le tube	$^{\circ}k/w$
R_{pipe}	Résistance thermique du tube enterré	$m^2.K/w$
R_{SOL}	Résistance thermique entre le tube et le sol	$m^2.K/w$
t_0	Jour de l'année où la température est maximale	Jour
T_0	Amplitude de la variation de température	$^{\circ}C$
T	Température	$^{\circ}C$
T_{sol}	Température du sol	$^{\circ}C$
T_{amb}	Température ambiante journalière	$^{\circ}C$
$T_{air\ entrées}$	Température de l'air à l'entrée	$^{\circ}C$
T_{moy}	Température moyenne journalière	$^{\circ}C$
T_i	Température du sol à une profondeur z_i	$^{\circ}C$
T_{air}	Température de l'air	$^{\circ}C$
U	Résistance thermique totale entre l'air et le sol	$m^2.K/w$
U	La vitesse de l'air suivant (ox)	m/s
V	La vitesse de l'air suivant (oy)	m/s
V_{air}	Vitesse de l'air	m/s
W	La vitesse de l'air suivant (oz)	m/s
Z	Profondeur en dessous de la surface du sol	m
\varnothing	Diamètre intérieur du tube	m

NOMENCLATURE

Lettres grecques

Lettre grecque	Désignation	unité
λ	Conductivité thermique de l'air	w/ (m.°k)
λ_{sol}	Conductivité thermique du sol	w/ (m. °k)
λ_{pipe}	Conductivité thermique du tube enterré	w/ (m.°k)
φ	Déphasage d'oscillation	[rad]
α	Diffusivité thermique	m^2/s
ε	Efficacité du tube enterré	[-]
ω	Fréquence angulaire	Rad/jour
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	Kg/m ³
ρ_{sol}	Masse volumique du sol	Kg/m ³
ν	Viscosité cinématique de l'air	m^2/s

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds	$\frac{\rho.V.D}{\mu}$
Pr	Nombre de Prandtl	$\frac{C_p.\mu}{\lambda}$
Nu	Nombre de Nusselt	$\frac{hD}{\lambda}$

Liste des figures

Figure I.1 : Modes d'exploitation des ressources géothermiques.....	Page 5
Figure I.2 : Chauffage des serres par énergie géothermique (Touggourt).	Page 6
Figure I.3 : Carte des ressources géothermiques mondiales.	Page 7
Figure I.4 : Interprétation des données climatiques de la région d'Ouargla.....	Page 9
Figure I.5 : tranche dans la terre montre l'effet du gradient géothermique.....	Page 11
Figure I.6 : Carte du flux de chaleur du Sud algérien.	Page 12
Figure I.7 : Schéma de principe d'un puits canadien.....	Page 14
Figure I.8 : Description d'un puits canadien en Hiver	Page 15
Figure I.9 : Description d'un puits canadien en été	Page 15
Figure I.10 : Différentes modèles des Prises d'air.	Page 17
Figure I.11 : Système d'évacuation des condensats à siphon.....	Page 18
Figure I.12 : Système d'évacuation à puits d'infiltration.	Page 18
Figure I.13 : Evacuation par infiltration dans le sol.	Page 19
Figure I.14 : Echangeur air-sol avec une VMC simple flux.	Page 20
Figure I.15 : Echangeur air-sol avec une VMC double flux.	Page 21
Figure I.16 : Emplacement du puits.	Page 22
Figure. II.1 : Nature de sol.....	Page 29
Figure III.1 : Structure du modèle d'échangeur air-sol.	Page 38
Figure III.2 : Structure du calcul de la température du sol.	Page 39
Figure III.3 : Schématisation du Problème Physique.....	Page 40
Figure III.4 : Domaine d'étude à l'intérieur du sol.....	Page 41
Figure III.5 : La géométrie du l'échangeur air-sol.	Page 46
Figure III.6 : Echangeur de chaleur entre air et sol.....	Page 48
Figure III.7 : Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré.....	Page 48

Liste des Figures

- Figure IV.1 :** Disposition de l'échangeur air-sol..... Page 55
- Figure IV.2 :** comparaison entre le profil de température théorique et expérimentale pour $Q_{air} = 135.65 \text{ m}^3/h$ ($V = 1.34 \text{ m/s}$). Page 56
- Figure IV.3:** comparaison entre le profil de température théorique et expérimentale pour $Q_{air} = 155.43 \text{ m}^3/h$ ($V = 1.54 \text{ m/s}$) Page 57
- Figure IV.4 :** Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z d'un sol argileux Page 58
- Figure IV.5:** Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z d'un sol gypseux..... Page 58
- Figure IV.6:** Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z d'un sol sableux Page 59
- Figure IV.7:** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents matériaux de construction du tube échangeur, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, Page 60
- Figure IV.8 :** Evolution de l'efficacité théorique de l'échangeur air/sol géothermique en fonction de la longueur pour différents matériaux de constructions utilisées..... Page 61
- Figure IV.9:** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur d'échange, \varnothing tube échangeur en PVC, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m Page 62
- Figure IV.10:** Efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur tube échangeur en PVC, \varnothing tube =110 mm enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m..... Page 62
- Figure IV.11:** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents débits d'air injectés dans l'échangeur (PVC , \varnothing tube =110 mm) enterré à une profondeur de 03 m, Page 63
- Figure IV.12:** Evolution Efficacité de l'échangeur pour différents débits, Echangeur en PVC \varnothing , tube = 110 mm, profondeur de 03 m, température à l'extérieur $T_{en} = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ Page 64
- Figure IV.13:** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents diamètres de tube échangeur en PVC, longueur =50 m, épaisseur = 05 mm, enterré à une profondeur de 03 mètres, Page 65

Liste des Figures

- Figure IV.14:** Evolution de l'efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur
Pour différents diamètres de tube échangeur en PVC, longueur =50 m,
épaisseur= 05 mm, enterré à une profondeur de 03 mètres, Page 65
- Figure IV.15:** Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour
différentes épaisseurs du tube échangeur en PVC, $\varnothing=110$ mm, sol argileux,
profondeur 03m, Page 66
- Figure IV.16:** Efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur pour différents
épaisseurs de tube échangeur en PVC, $\varnothing=110$ mm, sol argileux, profondeur 03
m, Page 67
- Figure IV.17:** Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour
Saison été ,échangeur en PVC, $\varnothing=110$ mm, sol argileux, profondeur 03
m.....Page 68
- Figure IV.18:** Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour
Saison hiver ,échangeur en PVC, $\varnothing=110$ mm, sol argileux, profondeur 03
m.....Page 69

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les utilisations de la géothermie à travers le monde.	Page 8
Tableau II.1 : Les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol.	Page 28
Tableau II.2 : Conductivité thermique et diffusivité de quelques matériaux.	Page 30
Tableau II.3 : Dispositions des tubes, avantages et inconvénients de chaque Disposition.....	Page 32
Organigramme de calculer de température de sortie dans l'échangeur disposition.....	Page 51
Organigramme de calculer de température de sol disposition.....	Page 51

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Nomenclature	
Sommaire	
Introduction général	Page 1

Chapitre I : Généralité sur l'échangeur air-sol

I.1 Introduction.....	Page 4
I.2. Historique	Page 4
I.3. Energie géothermique	Page 5
I.3.1. Notions générales.....	Page 5
I.3.2. Les ressources géothermiques en Algérie	Page 5
I.3.3. Types de l'énergie géothermique	Page 6
a) La géothermie haute énergie	Page 6
b) La géothermie moyenne énergie	Page 6
c) La géométrie basse énergie.....	Page 7
d) La géothermie de très basse énergie.....	Page 7
I.4. Classification des zones climatiques en Algérie	Page 8
I.5. Les caractéristiques climatiques de la région d'Ouargla	Page 9
I.6.Le gradient géothermique.....	Page 10
I.7.Le flux géothermique	Page 12
I.8.1. Avantages de l'énergie géothermique	Page 13
I.8.2. Inconvénients de l'énergie géothermique	Page 13
I.9.Généralité sur l'échangeur air / sol	Page 14
I.9.1.principe de fonctionnement de l'échangeur air / sol	Page 14
I.9.2. Modes de fonctionnement d'un échangeur air-sol	Page 14
a. Fonctionnement en hiver	Page 15
b. Fonctionnement e	Page 15
c. Fonctionnement au printemps / automne	Page 16

Sommaire

I.9.3. Caractéristiques des principaux composants d'un puits canadien	Page 16
I.9.3.1. Prise d'air neuf	Page 16
I.9.3.2. L'échangeur géothermique	Page 17
I.9.3.3. Système d'évacuation des condensats	Page 17
I.9.3.4. Ventilateur	Page 19
I.9.4. Les ventilations mécaniques couplées avec échangeur air-sol	Page 19
I.9.4.1. La ventilation mécanique contrôlée simple flux	Page 20
I.9.4.2. La ventilation mécanique double flux	Page 20
I.9.5. Emplacement du puits canadien	Page 21
I.9.6. Les avantages du puits canadien	Page 22
I.9.7. Les inconvénients du puits canadien.....	Page 22
I.10. Conclusion.....	Page 23

Chapitre II : Les paramètres de dimensionnement d'un échangeur air-sol

II.1. Introduction.....	Page 25
II.2. Rappels sur les modes de transferts de chaleur.....	Page 25
II.2.1. Conduction	Page 25
II.2.2. Transfert de chaleur par convection.....	Page 26
II.2.3. Convection naturelle et forcée.....	Page 26
II.2.4. Calcul du coefficient d'échange par convection h.....	Page 26
II.3. Les propriétés thermiques du sol	Page 27
II.3.1. Capacité calorifique du sol.....	Page 27
II.3.2. Conductivité thermique du sol λ	Page 28
II.4. Les propriétés physiques de matériau des tubes.....	Page 30
II.4.1. Les propriétés thermiques	Page 30
II.4.2. La tenue à l'enfouissement	Page 30
II.4.3. La rugosité intérieure des tubes	Page 30
II.5. La géométrie de l'échangeur	Page 31
II.5.1. Disposition des tubes	Page 31
II.5.2. Débit d'air	Page 32
II.5.3.- La longueur de la canalisation.....	Page 32
II.5.4.- Le diamètre des canalisations.....	Page 33
II.5.5- La distance entre canalisations.....	Page 33

Sommaire

II.5.6- La profondeur d'enfouissement des canalisations.....	Page 34
II.5.7-Le nombre des tubes	Page 34
II.5.8-Pente de la conduite	Page 34
II.5.9- La vitesse de l'air dans les tubes	Page 34
II.6. Conclusion	Page 35

Chapitre III : Modélisation Mathématique de l'échangeur air/sol

III.1. Introduction.....	Page 37
III.2. Modèle thermique de sol	Page 38
III.2.1.Description du modèle thermique de sol	Page 38
III.2.2. Modèle du massif semi-infini	Page 39
III.2.3. Hypothèses du modèle	Page 39
III.2.4. Calcul de la température du sol en fonction du temps et de la profondeur... Page 40	
III.3. Modèle thermique d'échangeur air-sol	Page 45
III.3.1. Description du modèle thermique d'échangeur air-sol	Page 45
III.3.2. Hypothèses du modèle	Page 46
III.3.3. Calcul de la température de l'air à la sortie de l'échangeur enterré	Page 47
III.4. Matlab	Page 50
III.4.1. Fichiers SCRIPT	Page 50
III.4.2. Organigramme de calculer de température de sol	Page 51
III.4.3. Organigramme de calculer de température de sortie dans l'échangeur.....	Page 51
III.5. Efficacité de l'échangeur enterré	Page 52
III.6. Conclusion	Page 52

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction.....	Page 54
IV.2. Présentation du cas étudié expérimentalement	Page 55
IV.3. La validation du modèle échangeur air-sol	Page 55
IV.4. Conception d'un modèle de l'échangeur air/sol	Page 57
IV.4.1. Effet de la nature et de type du sol	Page 57
IV.4.2. Effet de la matière de construction du tube échangeur enterré	Page 59

Sommaire

IV.4.3. Effet de la longueur d'échange	Page 61
IV.4.4. Effet du débit d'air injecté dans l'échangeur	Page 63
IV.4.5. Effet du diamètre intérieur du tube échangeur	Page 64
IV.4.6. Effet de l'épaisseur du tube échangeur enterré.....	Page 66
IV.5. Conformable le résultat dans la région d'Ouargla	Page 67
IV.6. La température d'entrée	Page 67
a- La température ambiante.....	Page 67
b- La température de sol.....	Page 68

Conclusion Générale

Introduction

Introduction

De l'antiquité à l'époque moderne l'humanité ne cessait d'apprendre comment maîtriser l'énergie. Au cours du temps, l'homme a fait le recours plusieurs fois à la recherche d'une nouvelle source d'énergie qui lui permet de faire face à l'évolution en besoins énergétiques et de s'adapter aux demandes de l'industrie de l'époque. La transition des énergies de flux (l'eau et le vent) aux énergies de stocks (fossiles et fissiles) a été régie par la course vers la puissance énergétique. Egalement, le bois a été remplacé par le charbon et celui-ci par le pétrole et le gaz naturel en parallèle avec une chaîne d'invention : machine à vapeur, moteur à explosion, turbo-diesel... etc.

La prospection économique intense des pays développés est établie grâce à la consommation à grande ampleur des énergies fossiles. La politique d'approvisionnement en énergie fossile est accusée, au plus tard, dans la plus part des débats scientifiques et celles des conférences mondiales. Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 suscitent dans les pays industrialisés non seulement le souci de diversifier l'approvisionnement énergétique, mais aussi une réflexion sur la maîtrise des consommations. Cette notion de *maîtrise des consommations* recouvre deux dimensions : [35]

- La réduction des besoins (on parle de sobriété) à travers une évolution des comportements, individuels et collectifs.
- La satisfaction de la demande à moindre coût énergétique (on parle d'efficacité) par des réponses technologiques.

L'utilisation massive des énergies fossiles, et le caractère localisé de ses gisements ont engendré des multiples impacts : écologiques, économiques et politiques.

- La plupart des systèmes de productions y compris l'industrie nucléaire provoquent d'une part la pollution d'atmosphère, du sol et des eaux et d'autre part le réchauffement global par émission excessive de gaz à effet de serre.
- Les effets d'épuisement des ressources sur la croissance économique : augmentation de la facture énergétique des états (par stagnation de l'offre et explosion des besoins) ; fourniture inéquitable d'énergie entre les pays riches et les autres.
- Face à sa dépendance vis-à-vis des pays producteurs de pétrole et de gaz naturel, les pays industriels adaptent souvent ses stratégies politiques qui les permettent de

Introduction générale

s'imposer et de gagner plus de dominance dans les régions riches en ressources pétrolifères. La question du nucléaire est aussi pourrait générer des conflits d'intérêts.

De ce fait, la recherche des *énergies alternatives* devient plus envisager, cela implique un passage d'une vision à court terme : augmentation de l'offre face à la croissance de la demande, à une vision à plus long terme : optimisation de l'efficacité énergétique par développement plus durable et exploitation des énergies renouvelables à grande échelle.

Les énergies renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables à l'échelle humaine (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique et énergie géothermique) ou qui se renouvellent (bois, cultures énergétiques).

L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et les moins chères du monde entier. Elle intervient dans des multiples domaines : la pisciculture, le chauffage des serres, la balnéothérapie et la production de l'électricité, elle offre aussi une véritable rentabilité à la collectivité vis à vis *le confort thermique* (satisfaction exprimée à l'égard de l'ambiance thermique du milieu environnant). [36]

La climatisation par la géothermie, peut offre un apport considérable à la climatisation conventionnelle au terme de réduction de la consommation énergétique sur tout dans les régions à climat chaud ; néanmoins, elle est non exploitée dans notre pays. Parmi les systèmes de climatisation par géothermie, l'échangeur air-sol est une technique basée sur l'inertie thermique du sol, pour chauffer ou refroidir l'air utilisé dans la ventilation des bâtiments.

Acte égard, nous étudions ici, une simulation Analytique pour la conception d'un échangeur air-sol convenable aux conditions climatiques de la région d'Ouargla.

Nous proposons un modèle d'échangeur air-sol, la validation de ce modèle est réalisée à partir de la comparaison de nos résultats de simulation par logiciel Matlab avec les essais expérimentaux. Ensuite, on introduit les conditions d'entrée des données du service météorologique d'Ouargla ;et on procède à une analyse de l'influence des différents paramètres de dimensionnement sur la performance de notre modèle.

Le présent travail est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre introduire quelques notions indispensables pour la compréhension d'un système échangeur air-sol comme : confort thermique, énergie géothermique ; on cite

Introduction générale

quelques types et quelques utilisations de cette énergie. Ce chapitre se termine par une généralité sur l'échangeur air-sol.

Le deuxième chapitre est consacré au dimensionnement de l'échangeur air-sol ; dans lequel, on présente les paramètres de dimensionnement et leurs influences sur la conception du modèle finale.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéressons à la modélisation mathématique de l'échangeur. Cette modélisation réunit un modèle complémentaire dit : modèle thermique de sol avec le modèle de l'échangeur air-sol.

Le quatrième chapitre, commence d'abord par la formulation mathématique et la méthode de résolution Analytique de l'écoulement de l'air dans l'échangeur air-sol, puis un aperçu sur le code Analytique utilisé (Matlab). Les résultats de simulation par ce logiciel comportent deux parties ; la première partie est consacrée la validation du modèle, tandis que la deuxième partie traite l'influence des paramètres de dimensionnement sur l'échangeur air-sol proprement aux conditions climatiques de la région et expose les résultats d'optimisation .Enfin, une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur l'échangeur air-sol

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 rafraichissement 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 rafraichissement 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 rafraichissement 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. Historique :

Les premières traces d'utilisation de la géothermie par l'homme remontent à une période lointaine, tout au long de l'histoire des civilisations, la pratique des bains thermaux s'est multipliée et depuis un siècle, les exploitations industrielles se sont développées pour la production d'électricité et le chauffage urbain.

S'il faut trouver des origines lointaines à l'utilisation de la géothermie, pourquoi ne pas se demander, comme les historiens de la Préhistoire, quel rôle jouèrent les sources chaudes dans la résistance de l'humanité aux dernières glaciations ? Les plus anciens vestiges en rapport avec la chaleur de la Terre, retrouvés sur le site de Niisato au Japon, sont des objets en pierre

volcanique taillés (outils ou armes) datant du troisième âge glaciaire, il y a 15 ou 20000 ans. Les régions volcaniques ont donc constitué, très tôt, des pôles d'attraction, du fait de l'existence de fumerolles et de sources chaudes que l'on pouvait utiliser pour se chauffer, cuire des aliments ou tout simplement se baigner [1].

I.3- Energie géothermique :

I.3.1 : Notions générales :

Les scientifiques sont en train de développer des manières de produire de l'énergie en utilisant la chaleur contenue à l'intérieur de la terre, qu'on appelle l'énergie géothermique.

L'énergie géothermique est une des sources d'énergies renouvelables les plus riches du monde.

Les régions qui ont une température sous le sol élevée, utilisent souvent l'énergie géothermique pour climatiser les maisons et produit de l'électricité.

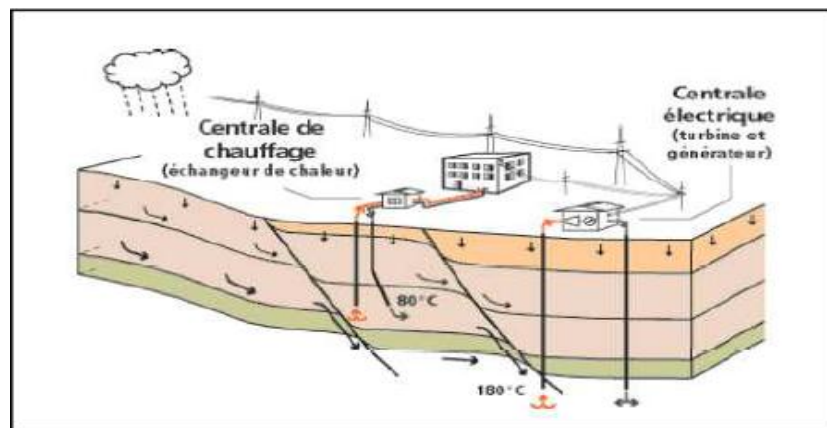


Figure I.1 : Modes d'exploitation des ressources géothermiques. [3]

L'énergie géothermique chauffe, rafraîchit des maisons et produit de l'électricité sans faire du mal à l'environnement. Grâce à l'énergie géothermique, nous pouvons réduire notre consommation de dangereux combustibles fossiles.

Aujourd'hui, la géothermie est la troisième énergie renouvelable effectivement exploitée dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. L'utilisation de l'énergie géothermique est en pleine expansion, elle est développée dans une soixantaine de pays, comme par exemple les Etats-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse. [2]

I.3.2. Les ressources géothermiques en Algérie :

L'Algérie dispose de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C.

Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90°C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C.

Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouelman et 119 °C à Biskra.

On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser. Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région d'El Meni'a à 1500 mètres à Touggourt, présentant une température de 40 à 60°C, ce qui donne de grandes possibilités pour le chauffage des serres [2].



Figure I.2 : Chauffage des serres par énergie géothermique (Touggourt). [3]

I.3.3. Types de l'énergie géothermique :

En géothermie, on exploite la chaleur du fluide soit pour le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude sanitaire par exemple, soit en produisant de l'énergie électrique. On distingue quatre catégories :

a) La géothermie haute énergie : (150 °C _ 320 °C) Elle n'est exploitable que dans

Des régions géologiques particulières présentant par exemple une convection magmatique qui réchauffe les réservoirs d'eau superficiels. Elle est généralement utilisée dans des régions volcaniques comme aux Philippines, en Indonésie, en Amérique du Nord ou encore en Guadeloupe. En 1995, la capacité de production dans le monde était d'environ 5800 MW dont 46 % aux États-Unis et 15 % aux Philippines.

b) La géothermie moyenne énergie : (90 °C _ 150 °C) correspond à l'exploitation de

La chaleur des nappes profondes dans des régions géologiques présentant un gradient de température non particulier. Après forage, on injecte dans le sol un fluide calorifuge, tel que le Fréon ou l'ammoniac, qui est chauffé et ramené à la surface où on l'utilise pour chauffer des bâtiments, produire de l'eau chaude sanitaire. Le principe est identique à celui d'une machine frigorifique fonctionnant à l'envers.

c) La géométrie basse énergie : (50 °C _ 90 °C)

Beaucoup plus répandue que les Précédentes, elles en diffèrent toutefois par la profondeur beaucoup plus faible de la source géothermique (de 0 à 1000 m). Le forage est donc plus rapide et moins coûteux. De plus, il n'est pas toujours nécessaire de réinjecter le fluide caloporteur, l'installation est donc moins complexe.

d) La géothermie de très basse énergie : (12°C _ 50°C) géothermie des faibles

Profondeurs. Principale utilisation :

- la climatisation (échangeur air-sol) ;
- le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique. [4]

La figure I-3 représente les zones des ressources géothermiques dans le monde entier.

- Zones propices au développement de la géothermie haute énergie.
- Zones favorables à la géothermie basse énergie (bassins sédimentaires)
- Zones de socle cristallin réservées pour la très basse énergie.

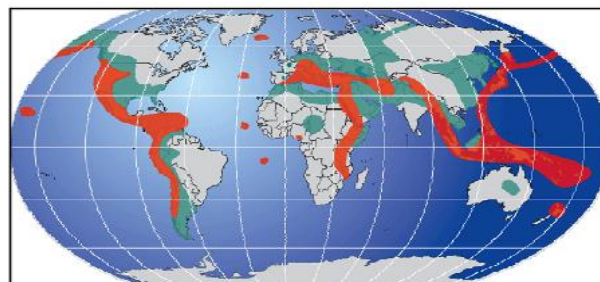
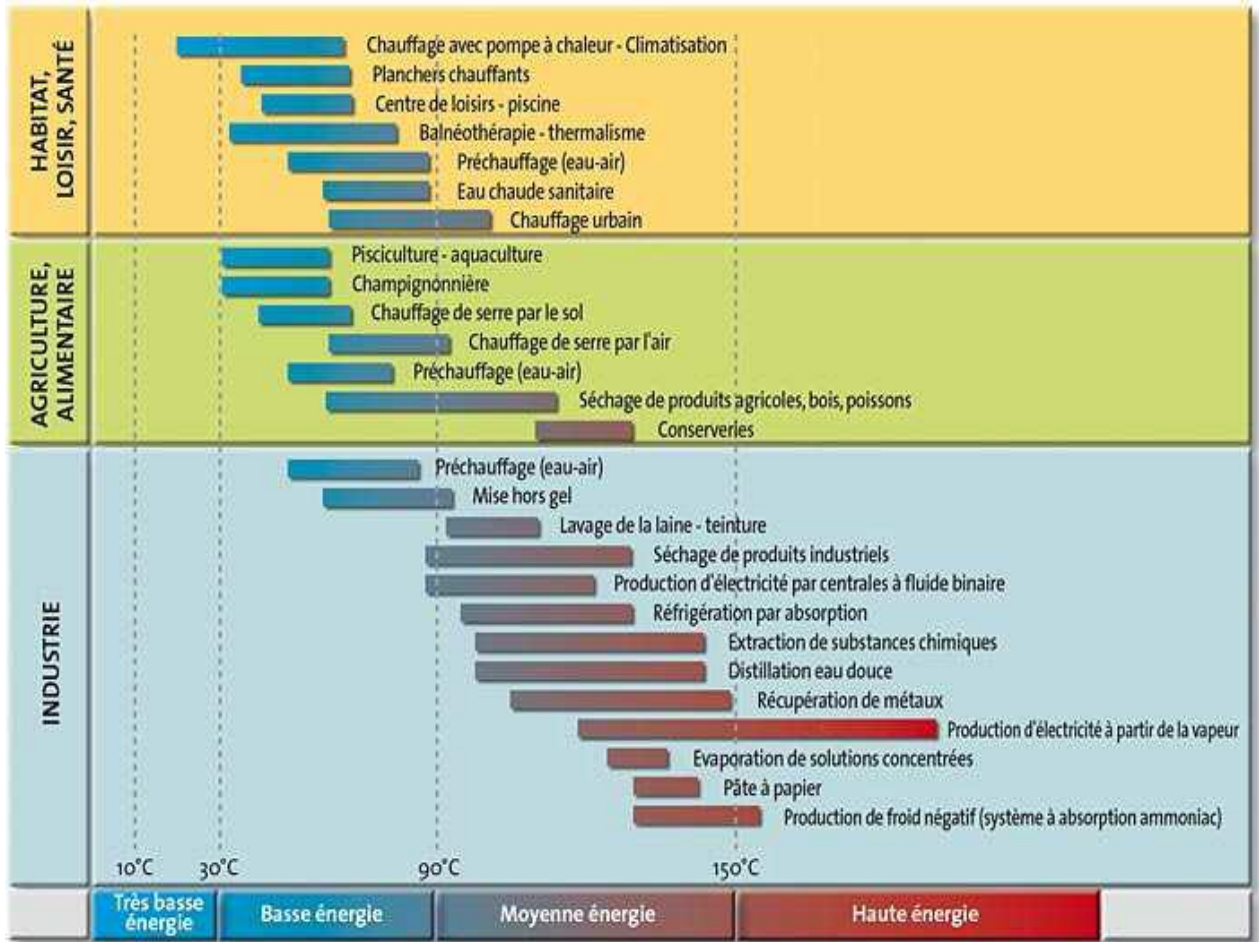


Figure I.3 : Carte des ressources géothermiques mondiales. [14]

La récapitulatif des types & usages des énergies géothermiques peut être présenté sur le tableau I.1

Tableau I.1 : Les utilisations de la géothermie à travers le monde. [15]



I.4. Classification des zones climatiques en Algérie :

L'Algérie est un vaste pays elle est comprise entre 18°et 38° de latitude nord, et entre 9° de longitude ouest et 12° de longitude est, (le méridien international 0°Greenwich passant près de la ville de Mostaganem). [5]

En Algérie la première classification en zones climatiques a été faite par le Centre Scientifique et Technique du bâtiment en 1962 qui sert de base de calcul pour le dimensionnement de chauffage ou de climatisation. Une deuxième classification prenant en compte les données climatiques plus représentative de la période (1974 –1984) permet de définir avec plus de précision les zones climatiques de l'Algérie. Cette vaste étendue territoriale correspond à une diversité de zones climatiques qui peuvent se classer en trois catégories. [5]

- Le tell : climat tempéré humide de type méditerranéen ;
- Les hautes plaines : climat de type continental ;
- Le Sahara : climat aride et sec.

I.5. Les caractéristiques climatiques de la région d'Ouargla :

La wilaya de Ouargla est caractérisée par un climat saharien, avec une pluviométrie très réduit, des températures élevées, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l'écosystème.

Les températures moyennes mensuelles enregistrées au mois le plus chaud (juillet) sont de 35.1°C. Alors que celles du mois le plus froid (janvier) sont de 11.7°C.

Les précipitations sont rares et irrégulières et varient entre 0.3 mm et 14.4 mm par ans exceptionnelle. Les précipitations moyennes annuelles sont de 77 mm/an à Touggourt et de 48.8 mm/an à Ouargla.

Le Sirocco (vent chaud et sec) peut être observé à toute époque de l'année, avec une vitesse pouvant atteindre 4.2 m/s.

L'humidité relative enregistre des taux tournant de 25 à 61 %. Alors que l'évaporation est très importante pouvant aller jusqu'au 484 mm. [6]

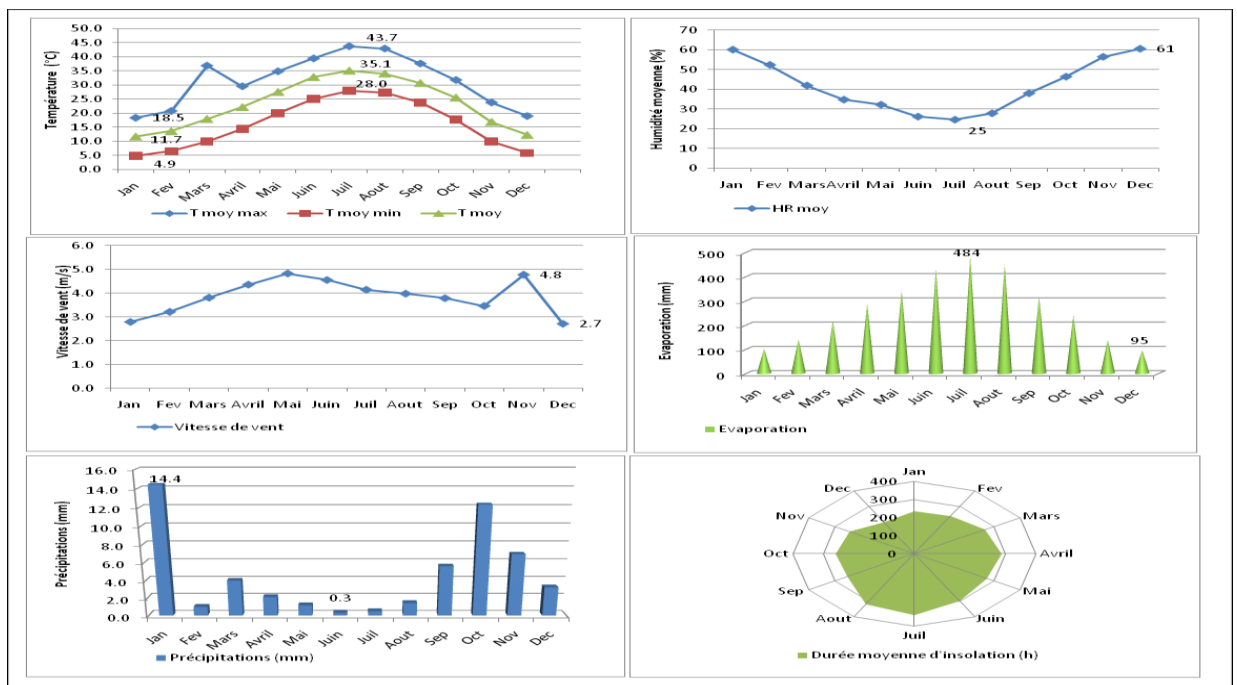


Figure I.4 : Interprétation des données climatiques de la région d'Ouargla (1997-2009) (D'après ONM, et réadapté par l'auteur). [6]

I.6. Le gradient géothermique:

La température des roches augmente en moyenne de 1°C tous les 30 mètres de profondeur c'est le gradient géothermique terrestre moyen. En certains points du globe, et notamment dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, le gradient géothermique est plus élevé (10°C par 100 mètres en Alsace et même exceptionnellement 100 °C par 100 mètres à Larderello, Italie, seulement 1 °C par 100 mètres près de Padoue) et l'eau des précipitations qui traverse les roches s'échauffe de plus en plus en profondeur.

Le gradient géothermique g_G (°C/m) représentant l'augmentation de la température avec la profondeur ($\partial T / \partial z$), sera donc directement fixé par la magnitude du flux géothermique et la conductivité thermique λ (W/m.°C) du matériel terrestre traversé par ce flux, tel que spécifié par la loi de Fourier (conduction thermique).

$$g_G = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{q_G}{\lambda} \quad \text{En } \left[\frac{^\circ\text{C}}{100\text{m}} \right] \quad (\text{I.1})$$

Dans le cas simple où tout le matériel considéré a une seule valeur de conductivité thermique, le profil de température en fonction de la profondeur augmentera linéairement avec la profondeur en fonction du gradient géothermique à partir de la température moyenne à la surface du sol.

$$T(z) = T_s + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot z = T_s + g_G \cdot z = T_s + \frac{q_G}{\lambda} \cdot z \quad (\text{I.2})$$

Lorsque l'évolution de la température à travers toute l'épaisseur de la croûte terrestre est considérée, il faut alors tenir compte de la diminution du flux géothermique profond.

Dans la partie supérieure de la croûte, les gradients géothermiques sont soumis à toutes sortes de perturbations qui donnent en fait des indications importantes sur plusieurs processus géologiques : perturbations par la topographie en région montagneuse ; effet persistant de la dernière glaciation et effet majeur de la présence de pergélisol sur le gradient géothermique ; effets de processus tectoniques, volcaniques, géothermiques et intrusions de sel.

Enfin, l'identification de régions de forts gradients géothermiques est faite lors de l'évaluation du potentiel d'exploitation de l'énergie géothermique. Cette énergie renouvelable pourrait représenter globalement un apport plus important à la consommation énergétique [7]

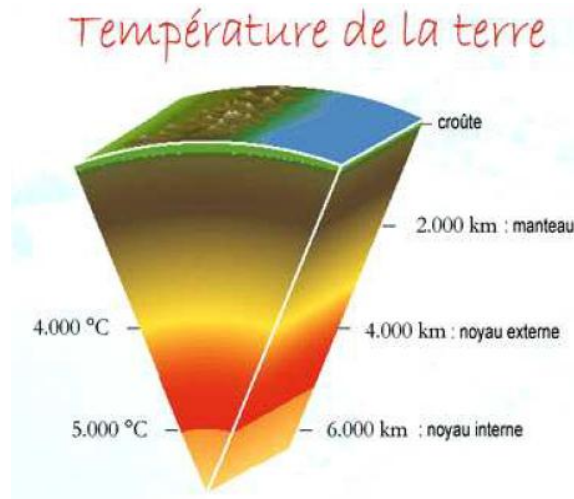


Figure I.5 : tranche dans la terre montre l'effet du gradient Géothermique [7]

I.7. Le flux géothermique :

Il y a un flux de chaleur, appelé flux géothermique $Q_E (\text{W}/\text{m}^2)$, à travers la croûte terrestre (continentale et marine) cause par la chaleur transférée du manteau à la base de la croûte terrestre ainsi que par la désintégration des matériaux radioactifs contenus dans la croûte.

Pour les continents, le flux géothermique moyen varie entre $40 \text{ mW}/\text{m}^2$ dans les cratons stables et $70 \text{ mW}/\text{m}^2$ dans provinces tectonique tertiaires.

Une partie de la chaleur au niveau de la croûte terrestre provient de l'intérieur de la terre.

Une forte quantité de chaleur est stockée dans le noyau et le manteau du globe.

Une infime partie de cette chaleur est dissipée vers la surface surtout dans les régions volcaniques et sismiques.

Par contre la plus grande partie de la chaleur dans la croûte provient de la radioactivité de certaines roches qui la compose. La désintégration des éléments radioactifs représente à elle seule plus de 90% du flux de chaleur terrestre; les 10% du flux de chaleur restant semble être dû à :

- La chaleur dégagée par réaction chimique exothermique à l'intérieur de la croûte.

- La friction au niveau des failles causées par les tensions tectoniques.
- La chaleur dégagée par cristallisation ou solidification des roches en fusion au cours du refroidissement.

La chaleur se déplace du corps le plus chaud au corps le plus froid jusqu'à ce que la température se stabilise. Tous les corps (solide, liquide ou gazeux) subissent ce phénomène d'échange de chaleur.

La chaleur se transmet par conduction, convection et rayonnement. Ces modes d'échange sont bien souvent "cumulés". [8]

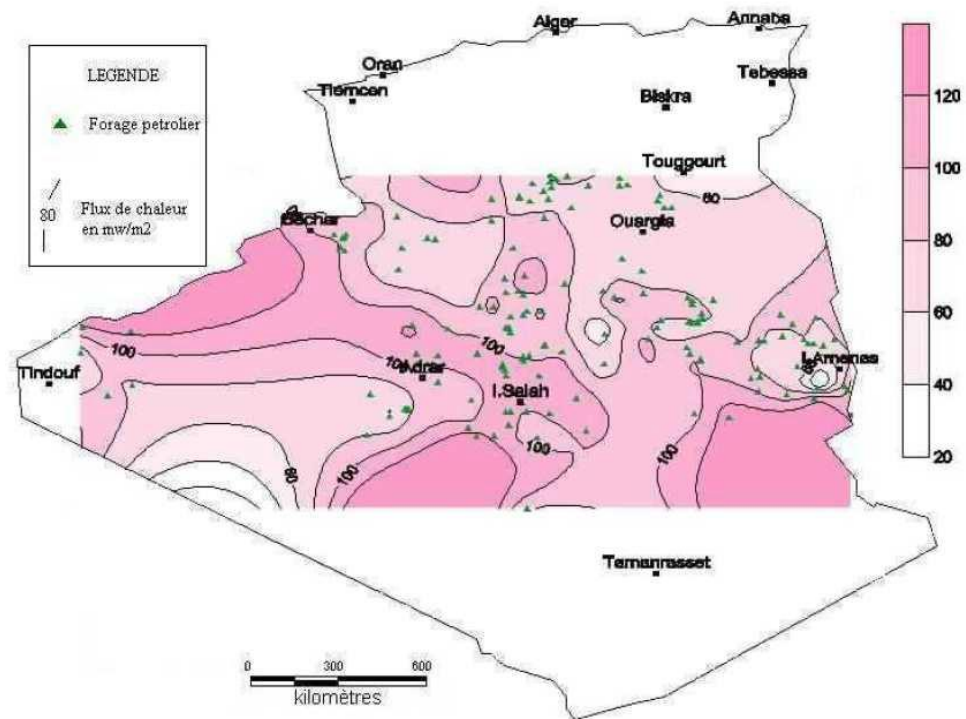


Figure I.6 : Carte du flux de chaleur du Sud algérien. (D'après D.Takherist, 1986) [8]

I.8.1. Avantages de l'énergie géothermique :

1. Source d'énergie renouvelable pour la production de chaleur seulement.
2. La chaleur est utilisée directement dans le chauffage des bâtiments, l'agriculture, l'industrie, l'aquaculture, la culture en serres, les thermopompes et les thermes.
3. Possibilité du couplage avec les centrales électriques, les réseaux de chaleur et de faire de la cogénération. Le séchage de bois, le chauffage des serres ou d'installations touristiques, la

pisciculture, les séchages agricoles, également dans l'industrie tel que le lavage de la laine, distillation et réfrigération.

I.8.2. Inconvénients de l'énergie géothermique :

1. Les sites les plus intéressants sur la planète sont déjà exploités.
2. Coût très élevé en raison du prix de réalisation du forage qui parfois ne peut rentable qu'à une profondeur considérable.
3. Nécessité de pose d'un terrain suffisant pour l'exploitation de l'énergie géothermique.

I.9. Généralité sur l'échangeur air / sol :**I.9.1. principe de fonctionnement de l'échangeur air / sol :**

L'échangeur air-sol qui s'appelle aussi puits canadien/provençal est un système dit : géothermique, qui utilise l'énergie présente dans le sol à proximité de sa surface pour chauffer Ou refroidir l'air neuf de ventilation des bâtiments.

En fonction des conditions atmosphériques, du jour et de la saison, l'air extérieur subit de fortes variations de température. À l'opposé, le sol, à quelques mètres sous sa surface, présente une température peu variable en raison de sa grande inertie thermique. L'échangeur air-sol tire partie de cette grande inertie en mettant en contact thermique l'air extérieur avec le sol grâce à des tubes enterrés à quelques mètres de profondeur sous le sol, à proximité ou directement sous le bâtiment à ventiler. L'air provenant de l'extérieur, mu par un ventilateur, parcourt les tubes avant d'être insufflé dans le bâtiment. [9]

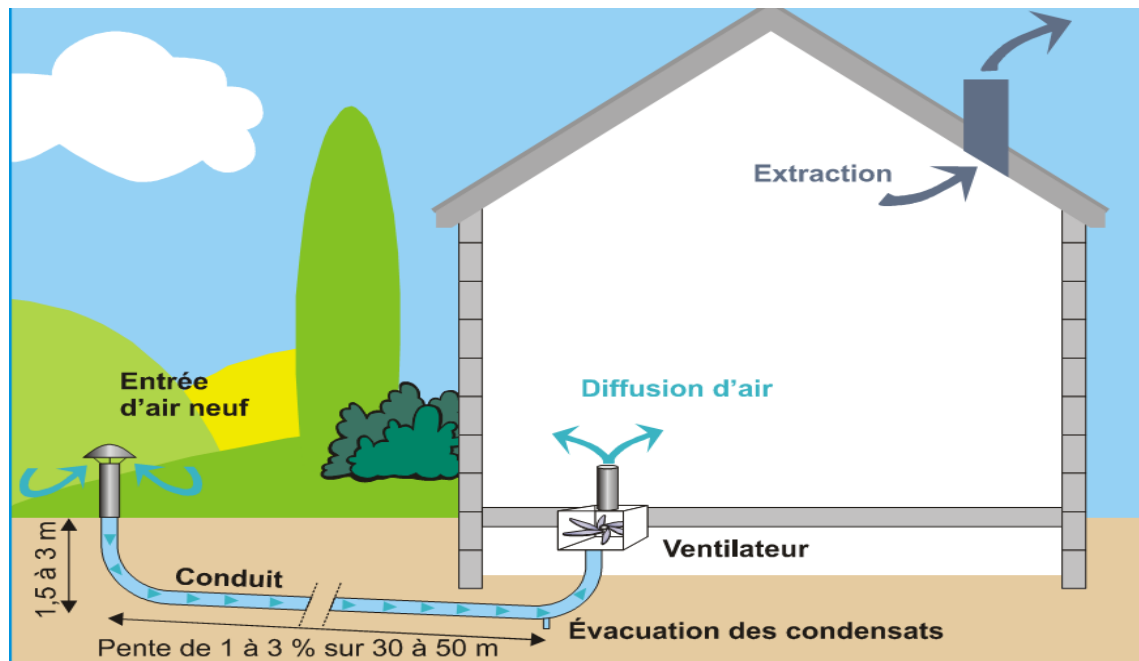


Figure I.7 : Schéma de principe d'un puits canadien. [16]

Un système puits canadien utilise un peu d'électricité, c'est seulement pour alimenter le ventilateur.

I.9.2. Modes de fonctionnement d'un échangeur air-sol :

Trois modes de fonctionnement de l'échangeur air-sol, qui sont appropriés à chaque saison :

a. Fonctionnement en hiver :

En hivers à deux mètres de profondeur, la température du sol est comprise entre 4 et 7°C, dans le cas d'une température extérieure de -10°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +2°C permettant ainsi une économie de chauffage pouvant aller jusqu'à 15% suivant les régions. Le puits canadien permet également de maintenir hors gel un bâtiment. Lorsque ces puits sont couplés à un système de ventilation double flux avec échangeur. D'autre part avec le puits canadien, il n'est plus nécessaire de prévoir un dispositif anti-condensation, permettant ainsi de réaliser des économies de chauffage en cas d'utilisation d'un échangeur thermique [10].

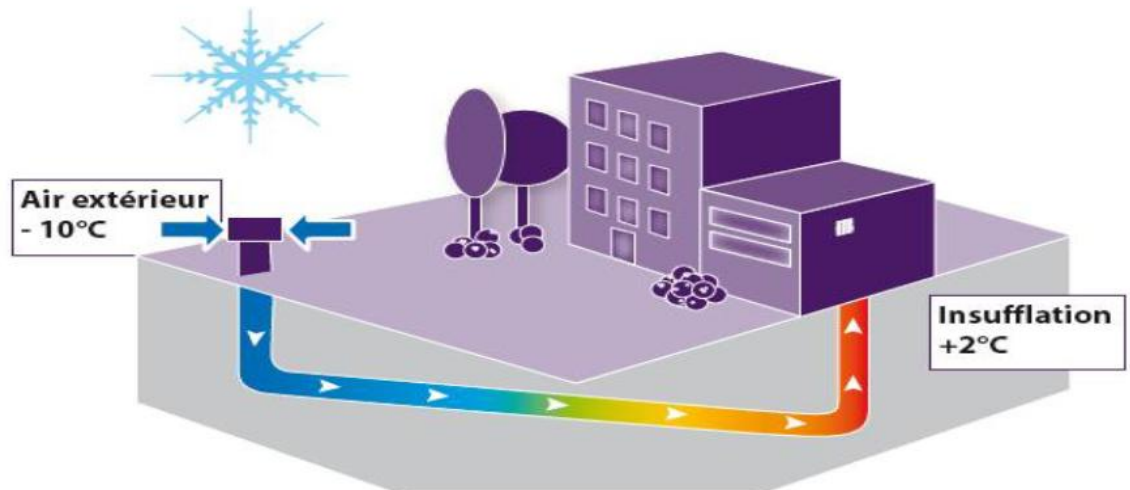


Figure I.8 : Description d'un puits canadien en Hiver [10]

b. Fonctionnement en été :

En été à deux mètres de profondeur, la température du sol est d'environ 15°C, dans le cas d'une température extérieure de +30°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +24°C permettant un rafraîchissement de l'air ambiant sans avoir recours à un système de climatisation et de renoncer à une climatisation classique en raison des avantages obtenus qui permettent d'obtenir des conditions de vie acceptables, un logement sain et agréable [10]

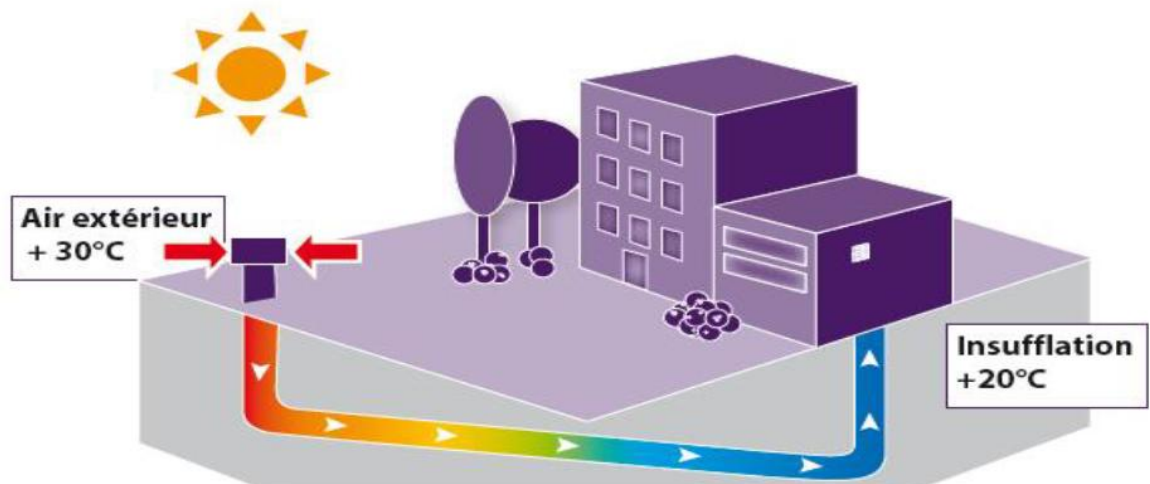


Figure I.9 : Description d'un puits canadien en été [10]

c. Fonctionnement au printemps / automne :

Pendant les intersaisons, la température extérieure subit des variations importantes (journées ensoleillées – nuits froides), mais la température du sous-sol reste stable (fraîche au printemps – encore chaude en automne). Par une chaude journée de printemps, il n'est pas souhaitable d'amener de l'air neuf par l'intermédiaire de l'échangeur géothermique, cet air serait plus frais que l'air extérieur. Par contre, le préchauffage de l'air par l'échangeur géothermique pendant les nuits fraîches du printemps est souhaitable. L'exemple inverse (journées fraîches, nuits chaudes) est valable pour les journées d'automne. [11]

I.9.3. Caractéristiques des principaux composants d'un puits canadien :

L'échangeur air-sol se compose en quatre principaux éléments à savoir :

- L'entrée d'air neuf ;
- L'échangeur géothermique ;
- Le système d'évacuation des condensats ;
- Le ventilateur et le système de régulation du puits.

I.9.3.1- Prise d'air neuf :

Tous les puits canadiens possèdent une prise d'air neuf. Elle peut être en colonne extérieure circulaire ou cubique et placée en façade de bâtiment ou à distance lorsque le terrain le permet. Ses dimensions sont généralement les mêmes que celles des conduits auxquels elle est reliée de manière à ne pas occasionner de variations de vitesse et de pertes de charge.

Elle peut être en colonne omnidirectionnelle ou unidirectionnelle en fonction des éventuelles sources de pollution environnantes. Elle est souvent pourvue d'un chapeau et d'ailettes empêchant l'eau de pluie de pénétrer dans le puits. La prise d'air est généralement placée légèrement en hauteur de manière à ne pas capter trop de poussières. Elle est fixée dans le sol par socle béton.



Figure I.10 : Différentes modèles des Prises d'air. [30]

La matière de la prise d'air peut être : l'acier inoxydable, l'acier galvanisé, le béton, le polyéthylène. [11]

I.9.3.2- L'échangeur géothermique :

Il est constitué d'un ou plusieurs tubes assurant un triple rôle : canaliser le flux d'air, permettre les échanges thermiques entre l'air et le sol et assurer la tenue mécanique de l'ouvrage.

Leurs principales caractéristiques sont leurs dimensions (diamètre, longueur) et leur matériau.

Plusieurs méthodes sont alors utilisées pour assurer les raccords : vissage, emboîtement, collage... avec parfois des joints en caoutchouc.

L'échangeur est généralement enterré entre 4 et 6 m pour le tertiaire et entre 1 et 2 m pour le résidentiel individuel. Il est assez éloigné de la dalle des bâtiments pour éviter toute fuite de chaleur de celle-ci vers le puits. Une pente régulière de 2 à 3% est mise en place afin d'évacuer les éventuels condensats.

I.9.3.3- Système d'évacuation des condensats :

Le fait que de l'air chaud et humide provenant de l'extérieur se refroidisse au contact des parois froides du puits canadien peut engendrer un phénomène de condensation dans les conduits. Dans ce cas, un système doit permettre d'extraire ces condensats. Pour ce faire, il existe trois possibilités :

- Dans le cas où le bâtiment possède un sous-sol, alors le point bas de l'échangeur thermique peut être situé à ce niveau. Les condensats sont alors récupérés grâce à la pente des conduits de 2 à 3% et à un siphon. Le siphon est dans raccordée au réseau d'écoulement des eaux usées ou des eaux pluviales lorsque celui dernier existe. . [11]

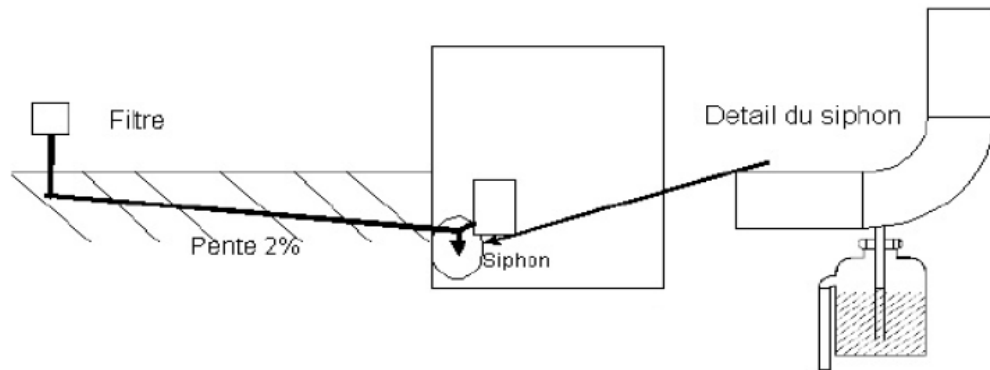


Figure I.11 : Système d'évacuation des condensats à siphon. [17]

- Si le sol est perméable et que la topographie le permet, un puits d'infiltration peut être placé au niveau du point bas de l'installation (vers le bâtiment ou vers la prise d'air). Il faut au préalable s'assurer de l'absence de nappe, source ou écoulements souterrains.

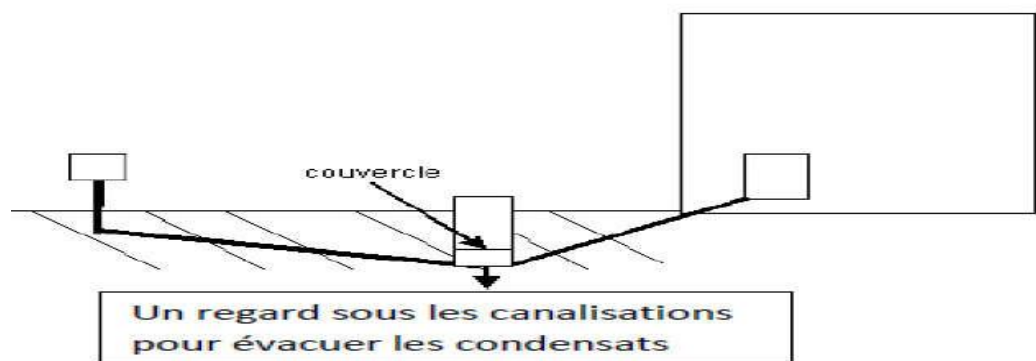


Figure I.12 : Système d'évacuation à puits d'infiltration. [17]

- Si la nature du sol ne permet pas l'infiltration ou si il y a un risque de remontée d'eau (nappe libre superficielle par exemple) dans le puits, alors l'installation d'une fosse en point bas de l'installation équipée d'une pompe peut être envisagée. La pompe est dans ce cas raccordée au réseau d'écoulement des eaux usées ou des eaux pluviales lorsqu'ils existent. Dans le cas contraire, il faut prévoir une zone d'épandage. [11]

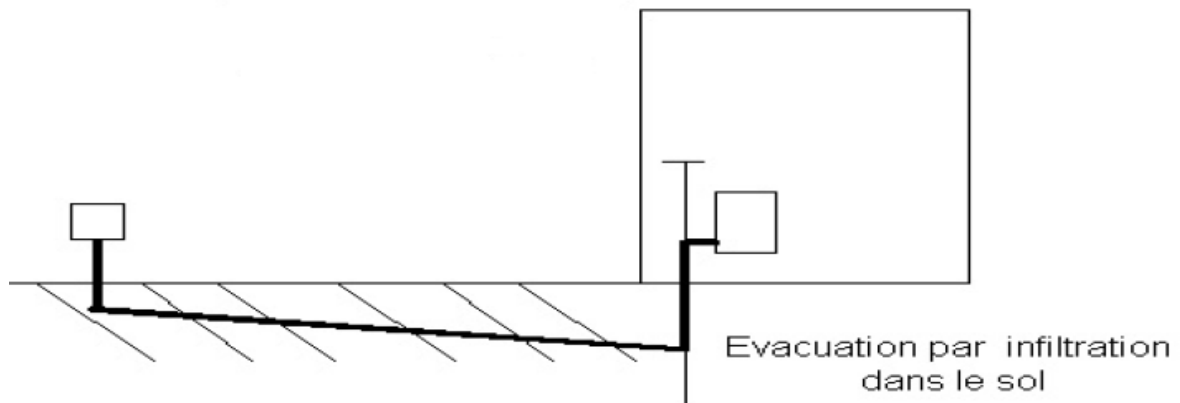


Figure I.13 : Evacuation par infiltration dans le sol. [17]

I.9.3.4. Ventilateur :

Pour garantir l'apport en air neuf du bâtiment, le système de l'échangeur air-sol nécessite un couplage avec une ventilation mécanique capable de vaincre les pertes de charge engendrées par le passage dans l'échangeur. Le ventilateur doit être dimensionné de manière à assurer les débits réglementaires.

Le ventilateur peut être équipé d'un régulateur. Un thermostat placé à l'extérieur va favoriser le passage de l'air par l'échangeur air-sol ou par le by-pass en fonction de la température extérieure (gains en température faible en mi-saison par exemple donc passage par le by-pass).

Deux configurations sont ici aussi envisageables : le ventilateur placé en entrée ou en sortie de puits. Dans le premier cas, le conduit est en surpression et le bruit du ventilateur plus éloigné des occupants. Cette configuration semble plus intéressante d'un point de vue sanitaire (atténuation du bruit et lutte contre l'intrusion de pollution provenant du sol) même si elle est rarement mise en œuvre dans ce but. Elle est peu utilisée car elle nécessite généralement l'emploi de deux ventilateurs.

Dans le second cas, le conduit est en dépression et le ventilateur peut être le même que celui de la VMC (ventilateur mécanique contrôlée) double flux. C'est cette configuration qui est la plus utilisée car elle ne nécessite l'emploi que d'un ventilateur [11].

I.9.4. Les ventilations mécaniques couplées avec échangeur air-sol :

Le dimensionnement d'un puits canadien ne peut se faire sans une approche globale à la ventilation de la maison. Le but de la ventilation au sein d'un bâtiment est d'évacuer l'air

vicié en le renouvelant par de l'air neuf. Contrairement à la ventilation naturelle, la VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) est un dispositif motorisé d'évacuation ou d'insufflation d'air frais. [12]

Il existe deux principaux types de ventilation mécanique couplée avec échangeur air-sol.

I.9.4.1. La ventilation mécanique contrôlée simple flux :

Il s'agit du système le plus simple, en général utilisé dans l'habitat individuel. Les entrées d'air sont placées dans les pièces à vivre (salon, chambres...) tandis que les bouches d'extraction se trouvent au niveau des pièces humides. Seule l'extraction de l'air est motorisée. Il s'agit du système le plus simple, en général utilisé dans l'habitat individuel. Les entrées d'air sont placées dans les pièces à vivre (salon, chambres...) tandis que les bouches d'extraction se trouvent au niveau des pièces humides. Seule l'extraction de l'air est motorisée. [12]

L'air est ainsi aspiré depuis les pièces sèches vers les pièces humides avant d'être extrait. Il faut prendre garde à ce que l'air puisse circuler même à portes fermées.

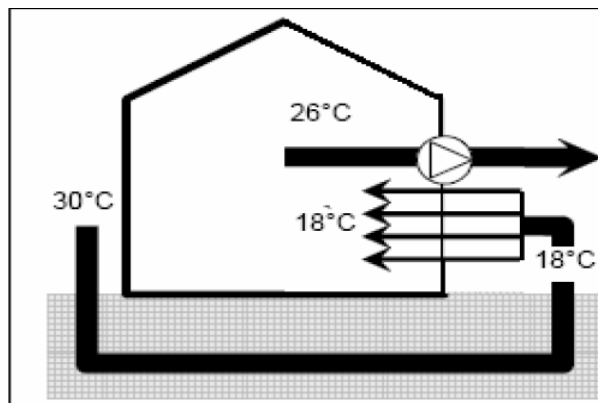


Figure I.14 : Echangeur air-sol avec une VMC simple flux. [18]

I.9.4.2. La ventilation mécanique contrôlée double flux :

La ventilation mécanique contrôlée double flux combine les systèmes d'insufflation et d'extraction mécaniques. Elle est composée de deux ventilateurs indépendants avec deux réseaux de conduits séparés, l'un pour insuffler de l'air neuf dans les pièces principales et l'autre pour extraire l'air vicié dans les pièces de service.

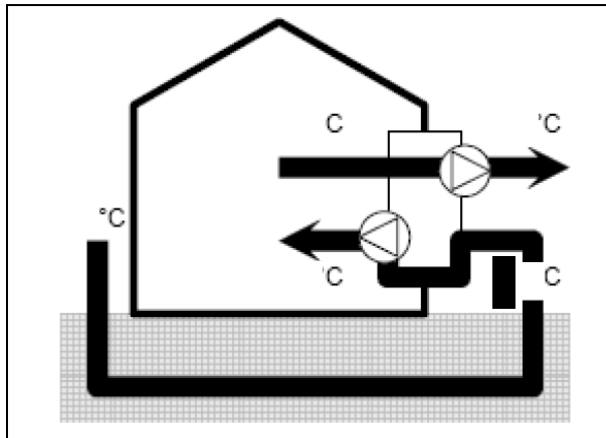


Figure I.15: Echangeur air-sol avec une VMC double flux. [18]

Schéma de principe du puits canadien combiné avec une ventilation mécanique contrôlée à récupération de chaleur double flux.

Ce dispositif permet une meilleure maîtrise des débits d'air neuf insufflés dans les pièces principales, ainsi que des risques de courants d'air froid par la possibilité de préchauffage de l'air neuf. La VMC double flux peut en effet intégrer un récupérateur de chaleur sur l'air extrait en vue du préchauffage de l'air neuf insufflé. Son utilisation est par conséquent répandue dans les pays froids. Il présente également l'avantage de permettre le filtrage de l'air neuf avant sa distribution dans les pièces. [12]

I.9.5. Emplacement du puits canadien :

Trois manières d'installation de l'échangeur air-sol sont possibles :

- 1- Sous le bâtiment
- 2- Dans les fouilles du bâtiment
- 3- Dans le terrain

Techniquement, ces variantes sont équivalentes, la différence se situe au niveau des coûts de terrassement, la deuxième variante étant la plus intéressante financièrement, aucun terrassement supplémentaire n'étant à réaliser. Lors de la mise en place des tuyaux, il faut

éviter au maximum les coudes et angles créant des pertes de charge. De plus un écart entre les tuyaux parallèles d'au moins 0,8m doit être conservé. [13]

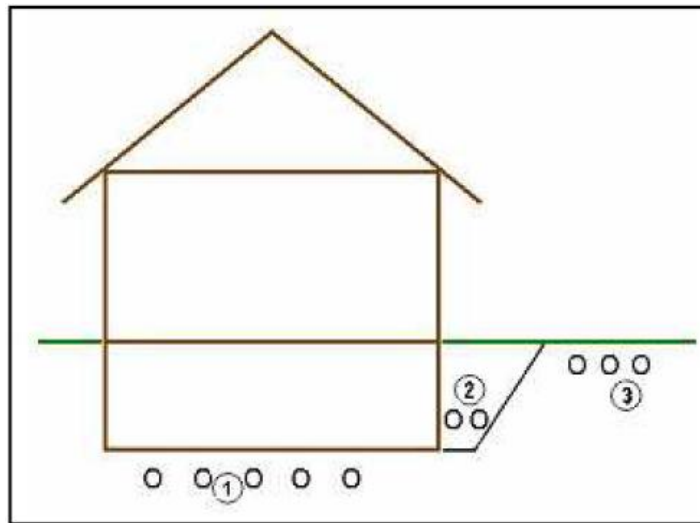


Figure I.16 : Emplacement du puits

I.9.6. Les avantages du puits canadien :

1. Apporte de l'air frais en été
2. Apporte de l'air tempéré en hiver
3. Consomme peu d'énergie
4. Coût du matériel très faible
5. Apporte de l'air pur
6. Évite la climatisation

I.9.7. Les inconvénients du puits canadien :

1. Peut apporter des micro-organismes ou du radon dans la maison
2. Technique de pose relativement délicate
3. Coût de terrassement important
4. Entretien délicat

I.10. Conclusion :

L'ambiance thermique dans les bâtiments est un facteur important pour le confort des occupants. L'exploitation de l'énergie géothermique à travers l'installation d'un système échangeur air-sol peut être un moyen efficace capable de assurer ce confort, et capable de réduire la consommation énergétique sans impact environnemental.

Chapitre II

**Les paramètres de
dimensionnement d'un échangeur
air-sol**

II.1. Introduction :

L'échangeur air-sol est conçue de maintenir un climat confortable à l'intérieur d'un habitat. Cet objectif est réalisé à travers l'identification des paramètres influant sur le comportement thermique de l'échangeur et à distinguer les plus prépondérants d'entre eux.

La réalisation d'un système échangeur air-sol est conditionnée principalement par cinq paramètres à savoir : le débit d'air, les propriétés thermiques de sol, les propriétés physiques de matériau des tubes, la profondeur d'enfouissement des tubes et la géométrie de l'échangeur.

II.2- Rappels sur les modes de transferts de chaleur:

Le thermique (ou thermocinétique) est la science qui permet de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

La chaleur retransmet sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [19]

II.2.1- Conduction :

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts: une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier: la densité de flux est proportionnelle au gradient de température: En absence d'hypothèses simplificatrices, la propagation de la chaleur est un phénomène tridimensionnel qui répond a la loi de Fourier sous la forme générale: [19]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q^m \quad (\text{II.1})$$

ρ : est la masse volumique (kg/m^3)

λ : est la conductivité thermique du matériau (W/Km)

C_p : est la capacité thermique massique ($J/Kg.k$)

q^m : Est la densité volumique du flux développé dans l'échantillon (W/m³)

En faisant les hypothèses:

λ : Constant,

Pas de puissance dissipée $q^m = 0$

Régime permanent $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$

Flux monodimensionnel $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$

La forme simplifiée de telle loi qui dit que la valeur instantanée du débit calorifique est égal à:

$$\varphi = -\lambda S \text{ grad}(T) = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial X} \quad (\text{II.2})$$

Avec:

φ : Le flux de chaleur transmis par conduction (W)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²).

II.2.2-Transfert de chaleur par convection:

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides dans lesquels il est généralement prépondérant. [19]

II-2-3- Convection naturelle et forcée:

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue:

- La convection libre ou naturelle: le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).
- La convection forcée: le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi. [19]

II.2.4-Calcul du coefficient d'échange par convection h:

On exprime le flux thermique échangé par convection par:

$$\varphi = h S(\theta_m - \theta) \quad (\text{II.3})$$

h : est appelée coefficient d'échange par convection. (W/m².C°)

$\theta_m - \theta$: Différence de la température de la paroi et du fluide.

En convection forcée En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange h par convection est indépendant de la différence de la température de la paroi et du fluide mais il dépend des 6 grandeurs suivantes:

U_m : vitesse moyenne du fluide

ρ : Masses volumiques du fluide

C_p : Chaleur spécifique du fluide

μ : viscosité dynamique du fluide

λ : Conductivité thermique du fluide

D : Dimension caractéristique de la surface d'échange.

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants:

$$N_U = \frac{hD}{\lambda} \quad \text{Nombre de Nuselt} \quad (\text{II.4})$$

$$R_e = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds} \quad (\text{II.5})$$

$$P_r = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad \text{Nombre de Prandtl} \quad (\text{II.6})$$

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélations mathématiques $Nu = f(Re, Pr)$ qui permettent de calculer h par:

$$h = \frac{N_U \lambda}{D} \quad (\text{II.7})$$

P_r : Le nombre de Prandtl caractérise les propriétés thermiques du fluide

N_U : Le nombre de Nuselt caractérise l'échange thermique entre le fluide [19]

II.3. Les propriétés thermiques du sol :

II.3.1-Capacité calorifique du sol:

La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau. Elle s'exprime par la formule suivante : [21]

$$C_s = \sum_i \chi_i \rho_i C_i \quad (II.8)$$

Où : C_s est la capacité calorifique.

χ_i, ρ_i, C_i représentent respectivement la teneur du matériau (m^3 de matériau/ m^3 de sol), la masse volumique et la capacité calorifique d'un des constituants.

Comme l'eau possède une capacité supérieure à celle des autres constituants du sol (Tableau II-1), un sol humide stockera mieux la chaleur qu'un sol sec. Cet effet est mis à profit pour augmenter temporairement la performance des échangeurs thermiques air-sol en humidifiant le sol par arrosage.

Le tableau suivant montre les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol :

Tableau II.1 : Les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol. [24]

	Masse volumique	Capacité calorifique	Conductivité thermique
Matière	ρ [Kg/m³]	C [KJ/Kg k]	λ [W/m k]
Minéraux (moyenne)	2650	0.80	2.90
Sable et Gravier	1700 à 2200	0.91 à 1.18	2.00
Argile et limon	1200 à 1800	1.67 à 2.50	1.50
Matière organique	1300	1.90	1.25
Eau	1000	4.20	0.585
Glace	920	2.10	2.20
Air	1.250	1.00	0.023

II.3.2-Conductivité thermique du sol λ :

La conductivité thermique du sol λ dépend de sa nature et de son teneur en eau.

La courbe suivante présente la variation de la conductivité thermique (λ) des différents gros de sol en fonction de la teneur en eau (χ_{eau}). [21]

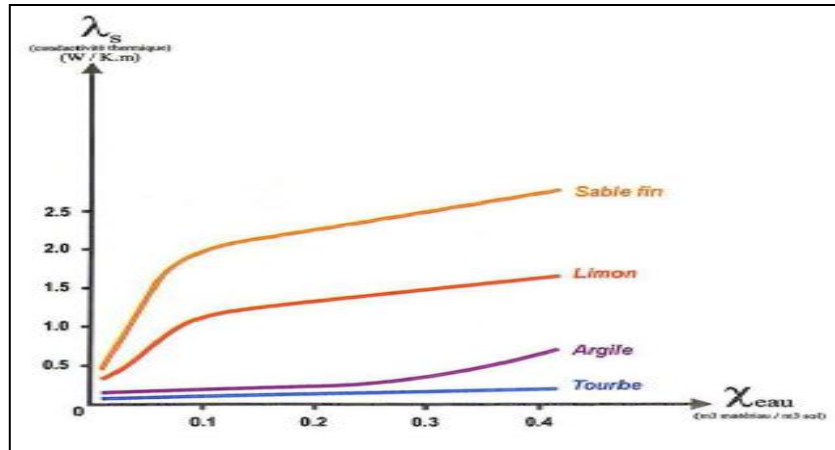


Figure. II.1 : Nature de sol [23]

II.4. Les propriétés physiques de matériau des tubes :

Le matériau des tubes est plus important car il impacte directement sur les échanges thermiques sol/puits. Le choix du matériau varie en fonction des contraintes mécaniques, des dimensions et des performances thermiques recherchées.

II.4.1. Les propriétés thermiques :

L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits.

La faible épaisseur des canalisations rendant ses propriétés thermiques peu influentes sur le comportement général du puits. Pourtant ces propriétés peuvent avoir un impact sur le Comportement dynamique de l'échangeur, et il est nécessaire les prendre en compte.

Tableau II.2 : Conductivité thermique et diffusivité de quelques matériaux. [22]

	Diffusivité 10^{-4} [m ² /s]	Conductivité [W/m K]
Cuivre	1.1	380
Aluminium	0.94	230
Fer	0.16	72
Acier inoxydable	0.04	15
Béton	0.005	1.75

II.4.2. La rugosité intérieure des tubes :

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

Des pertes de charge élevées sont indésirables car elles entraînent un surdimensionnement des systèmes de ventilation et des pertes énergétiques supplémentaires. De plus, les irrégularités de l'intérieur des tubes favorisent la stagnation d'eau condensée, ce qui peut dégrader à terme la qualité de l'air ventilé (développement de micro-organismes).

L'intérieur des tubes doit donc être le plus lisse possible. Ainsi, une légère pente de l'ensemble des tubes permet l'évacuation de l'eau condensée sans intervention extérieure.

Les tubes des puits canadiens actuellement en fonctionnement sont généralement en PVC, en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide.

➤ **PVC :** Le moins cher, pas très écologique. Il peut "éventuellement" dégager des vapeurs nocives dues au mode de fabrication. Pas d'étude connue à ce jour dans le cadre du puits canadien.

➤ **Polyéthylène (PE) :** le plus écologique, mais assez cher.

Le choix peut être encore entre :

➤ **Tuyau annelé de protection de câbles électriques (TPC) :** Très bon marché pour des petits diamètres. Annelé à l'extérieur, mais lisse à l'intérieur. Ils peuvent être posés en parallèles. Attention toutefois : ce type de tuyau n'est pas prévu à l'origine pour être enterré à forte profondeur, ce qui peut nuire à leur tenue dans le temps.

➤ **Tuyaux de béton :** Utilisé pour des diamètres supérieurs à 300 mm L'échange thermique est plus important (la conductivité du béton est plus élevée que celle des tuyaux en plastique, relativement isolants). Mais les raccords sont difficiles à étanchéifier et la mise en œuvre est relativement complexe. En outre le radon d sol s'il y en a peut donc s'infiltrer dans le tuyau, et aller contaminer ensuite la maison. [21]

II.5. La géométrie de l'échangeur :

Visant à atteindre les performances recherchées d'un échangeur air-sol, le choix d'une géométrie adéquate reste une étape indispensable dans son dimensionnement. Ce choix est un compromis entre les possibilités offertes par le terrain et les pertes de charge.

L'étude de la géométrie implique le passage par les six grandeurs principales :

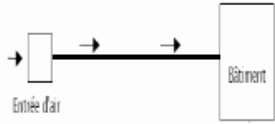
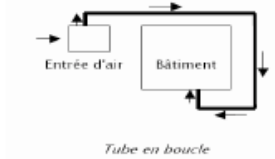
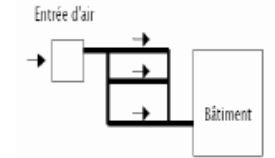
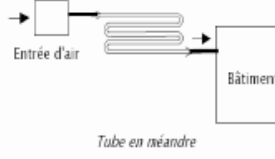
II.5.1. Disposition des tubes :

Afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter son entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes : moins il y aura de coudes, moins grandes seront les pertes de charge ; et de ce fait la puissance du ventilateur sera également réduite. La pose du tuyau s'effectuera en fonction de la configuration du terrain.

Quatre dispositions sont les plus utilisées : droite, en boucle, en boucle de Tichelmann ou en méandres. [21]

Le tableau ci-dessous est un récapitulatif des quatre dispositions :

Tableau II.3 : Dispositions des tubes, avantages et inconvénients de chaque disposition. [21]

Types	Avantages	Inconvénients	Configuration
Tubes en droite (monotube)	Perte de charge réduite. Montage et maintenance facile.	Dépense un terrain spacieux	
Tubes en boucle (circulaire)	Considération la possibilité quand la place manque autour de la maison	Influence thermique de bâtiment sur l'efficacité de système.	
Tubes en boucle de Tichelmann	Surface d'échange importante	Perte de charge considérable	
Tubes en méandres	La plus importante surface d'échange	Perte de charge considérable	

II.5.2. 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.

Il impose le type d'écoulement (laminaire, turbulent) et influe donc non seulement sur la valeur du coefficient d'échange convectif entre l'air et les tubes, mais aussi sur les pertes de charges mécaniques qui doivent être compensées par le ventilateur. [21]

II.5.3.- La longueur des canalisations:

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur liée à la longueur caractéristique d'échange thermique.

En effet, la bibliographie montre que pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échangeur ne tempère plus l'air : il a atteint sa limite d'efficacité. Par contre, plus le débit augmente et plus cette longueur limite augmente. La longueur totale du conduit est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique (température extérieure tout au long de l'année) et du type d'installation choisie. [18]

Elle est habituellement de l'ordre de 30 à 50 m afin de limiter les pertes de charge.

II.5.4.- Le diamètre des canalisations:

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. [22]

II.5.5- La distance entre canalisations:

Les fonctions de stockage et d'amortisseur thermique du sol sont assurées par le volume de sol situé tout autour de chaque canalisation. L'épaisseur de sol concernée est proportionnelle à la profondeur de pénétration du signal thermique, qui dépend de la période de variation des phénomènes mis en jeu. Ainsi, si la distance entre deux tubes est du même ordre de grandeur ou inférieure à la profondeur de pénétration, la température de la portion de sol située entre ces tubes est influencée simultanément par ces deux tubes, ce qui réduit localement la capacité de stockage du sol.

L'influence de la distance entre les tubes sur les performances de l'échangeur est peu abordée dans la littérature. Pourtant, il semble important d'assurer une distance minimale afin de limiter l'interaction entre deux tubes adjacents et d'optimiser ainsi l'exploitation de l'inertie du sol. Donc, une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour des variations journalières. Par contre, un stockage thermique saisonnier nécessiterait un espacement de l'ordre de 3 m, qui n'est généralement pas envisageable en pratique. [22]

II.5.6- 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. [18]

II.5.7-Le nombre des tubes :

Le nombre et le diamètre des tubes définissent la section totale de tubes par laquelle va circuler l'air. Ils influent à la fois sur la vitesse d'écoulement de l'air et sur la surface de contact entre l'air et le sol. Ces paramètres sont ajustés en fonction du débit nominal de ventilation. Le nombre de tubes est conditionné par l'espace disponible pour l'installation de l'échangeur.[22]

II.5.8-Pente de la conduite :

Elle doit être comprise entre 1 et 3% pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud est en contact avec les parois plus froides du puits. [21]

II.5.9- La vitesse de l'air dans les tubes :

La vitesse de l'air ne constitue pas un paramètre indépendant, puisqu'elle découle directement du choix des trois paramètres précédents. Néanmoins, elle impose le type d'écoulement (laminaire, turbulent) et influe donc non seulement sur la valeur du coefficient d'échange convectif entre l'air et les tubes, mais aussi sur les pertes de charges mécaniques qui doivent être compensées par le ventilateur. Afin de limiter les pertes de charge, cette vitesse est le plus souvent maintenue entre de 3 à $4m \cdot s^{-1}$. [23]

II.6. Conclusion :

La conception d'un puits canadien est capitale pour obtenir le niveau de performance souhaité.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents paramètres de conception intervenants dans la performance des puits.

L'étude de ce chapitre nous a permis de tirer les conseils suivants :

- Le choix de régime de ventilation varie selon le mode de fonctionnement et le volume de pièce à ventilé.
- Un sol argilo-sableux humide est le plus adéquate pour optimiser le rendement.
- Le tuyau sera de préférence lisse à l'intérieur pour diminuer les pertes de charge. Pour l'extérieur, privilégier les tuyaux annelés pour augmenter l'échange thermique entre le sol et le tuyau. Le choix peut être en PVC
- Le choix de la configuration et les dimensions de l'échangeur est un compromis entre l'échange thermique et la consommation électrique.

Chapitre III

**Modélisation mathématique de
l'échangeur air-sol**

III.1. Introduction:

Comme tout échangeur thermique, l'échangeur air-sol met en contact thermique deux sources de températures différentes. Dans le cas de l'échangeur air-sol, l'une de ces sources est l'air qui circule dans les tubes et l'autre est le sol placé au contact des tubes. Durant la saison chaude, la source chaude est l'air et la source froide le sol. Ceci s'inverse durant la saison froide.

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.

Dans les échangeurs thermiques courants, deux fluides de températures différentes sont en mouvement depuis l'entrée jusqu'à la sortie. 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 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.

D'abord, la modélisation de l'échangeur air-sol passe par la réalisation de deux modèles distincts :

1- Un modèle thermique de sol :

Permettant de calculer la température du sol pour chaque heure ou jour de l'année, à la profondeur souhaitée.

2- Un modèle thermique d'échangeur air-sol :

Calculant la température de l'air à la sortie de l'échangeur en fonction de la température de l'air à l'entrée d'échangeur et de la température du sol modélisé par le modèle thermique de sol. [21]

La structure du modèle d'échangeur air-sol est représentée par la figure (III-1)

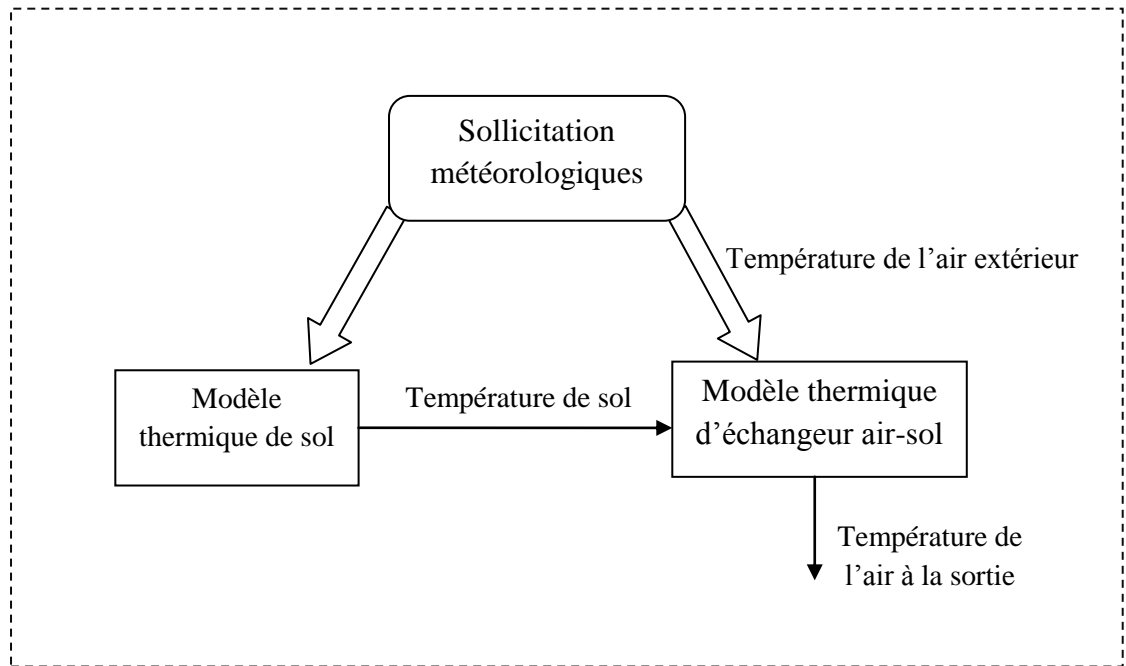


Figure III.1 : Structure du modèle d'échangeur air-sol.

III.2. Modèle thermique de sol :

La température du sol n'est pas fournie par la base des données météorologiques. Il a donc été nécessaire d'élaborer, avant toute chose, un modèle thermique permettant de calculer la température du sol pour chaque heure ou jour de l'année, à la profondeur souhaitée.

III.2.1. Description du modèle thermique de sol :

Le modèle thermique de sol consiste très simplement à considérer le sol comme un massif semi-infini, excité en surface par un signal de température sinusoïdal. En effet, ce modèle présente des solutions sinusoïdales de même période que l'excitation mais dont les amplitudes, valeurs moyennes et déphasages varient en fonction de la profondeur considérée. Globalement, plus la profondeur est grande et plus le signal sinusoïdal est amorti et retardé. La solution analytique de ce modèle est parfaitement établie. [21]

III.2.2. Modèle du massif semi-infini :

Le modèle de propagation de la chaleur par conduction dans un massif semi-infini propose une solution analytique lorsque la température en surface du massif est sinusoïdale. En conséquence, toutes les sollicitations du problème doivent être ramenées à des constantes ou à des fonctions sinusoïdales du temps.

Il s'agit d'extraire, à partir de températures mesurées, un signal de forme sinusoïdale. C'est-à-dire que la température de l'air extérieur, T_e sera idéalement exprimée sous la forme. [21]

III.2.3. Hypothèses du modèle :

Pour simplifier notre modèle il est préférable de d'adopter les hypothèses suivantes

- Le sol est considéré comme un milieu homogène
- les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique λ_{sol} , la masse volumique ρ_{sol} la capacité calorifique massique Cp_{sol}) du sol sont invariables.
- Le modèle de température considéré tient compte un seul phénomène, c'est la conduction dans le sol du signal de température provenant de la surface du sol (effet des conditions atmosphériques)
- Les changements de la diffusivité thermique (α) du sol principalement en fonction la nature du terrain, due par exemple à la teneur en eau, ne sont non plus pris en compte d'éventuels mouvements d'eau entraînant des échanges convectifs à l'intérieur du terrain.

Pour ce phénomène, la seule condition aux limites est un signal de température imposé en surface du sol. Ce signal, obtenu par un bilan thermique à la surface du sol.

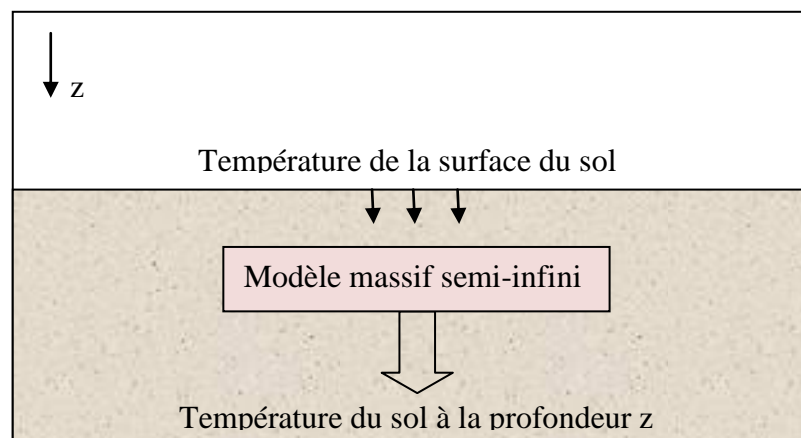


Figure III.2 : Structure du calcul de la température du sol.

La température de sol T_{sol} , est prépondérante. En effet, selon la saison, la partie superficielle du sol peut subir des variations de température importantes, fonction de la zone climatique du lieu considéré et de la nature et de l'exposition de la surface du sol.

III.2.4. Calcul de la température du sol en fonction du temps et de la profondeur :

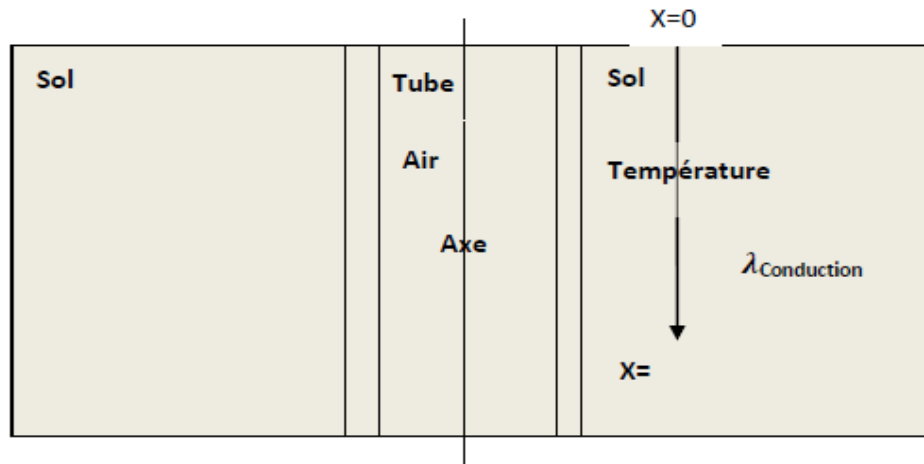


Figure III.3 : Schématisation du Problème Physique [34]

L'équation générale de la conduction s'écrit comme suit : [34]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q'}{\rho c} \tag{III.1}$$

Pour un transfert unidimensionnel suivant l'axe des x, on aura :

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0$$

D'autre part, si le transfert est sans source interne $Q' = 0$ l'équation se simplifie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{III.2}$$

Sachant que la diffusivité thermique est aussi donnée par :

$$\alpha = \frac{K}{\rho c}$$

Avec,

K : Conductivité thermique du sol [w/m. °C]

c : Capacité calorifique massique du sol [J/kg. °C]

ρ : Masse volumique du sol [kg /m³]

T : Température du sol, fonction de t et de z [°C]

t : Temps [s]

α : Diffusivité thermique [m²/s]

On se trouve donc confrontés à une équation différentielle aux dérivées partielles de la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{III.3})$$

Autrement on a : $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$

L'équation différentielle aux dérivées Partielles prendra la forme :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

En considérant les conductions aux Limites suivantes :

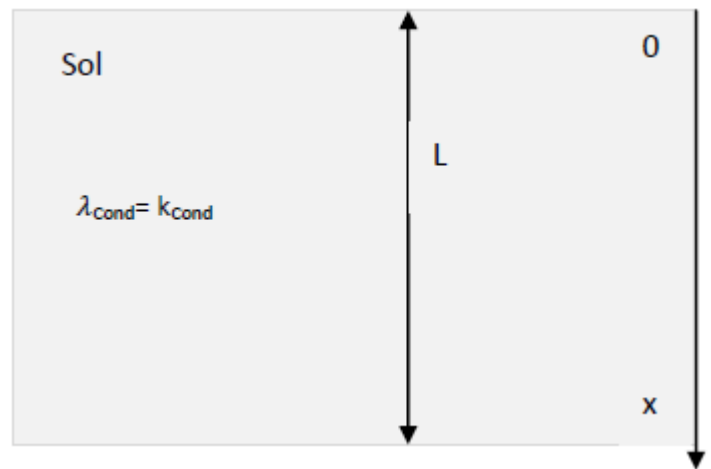


Figure III.4 : Domaine d'étude à l'intérieur du sol [34]

$$T(0, t) = T_i + T_0 \sin(\omega t - \varphi),$$

$$T(\infty, t) = T_i$$

Avec ;

T_i : Amplitude de la variation de température.

T_{moy} : Température moyenne du jour (°C)

Introduisons la variable θ suivante telle que :

$$\theta = T - T_i$$

$$\text{Avec, } \theta(0, t) = T_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

Quand la profondeur $x \rightarrow \infty$ la température du sol tend vers une valeur finie

La solution serait alors de la forme $\theta = X(x) \cdot Y(t)$

En remplaçant l'expression θ de dans l'équation de la chaleur on aura :

$$X''(x).Y(t) = \frac{1}{\alpha} Y'(t).X(x)$$

En remplaçant l'expression θ de dans l'équation de la chaleur on aura :

$$X''(x).Y(t) = \frac{1}{\alpha} Y'(t).X(x)$$

$$\frac{X''(x)}{x(x)} = \frac{1}{\alpha} \frac{Y'(t)}{Y(t)} \Rightarrow \begin{cases} \frac{X''(x)}{x(x)} = \delta \\ \frac{Y'(t)}{\alpha Y(t)} = \delta \end{cases}$$

Où :

$$\begin{cases} \frac{X''(x)}{x(x)} = \beta \\ \frac{Y'(t)}{Y(t)} = \beta \end{cases}$$

Le choix des constantes δ et β se fait à partir des considérations physiques :

1. Pour les processus thermiques tendant vers une distribution de température constante à l'équilibre, on choisit δ , qui doit être nécessairement négative.

En effet l'intégration relative par rapport au temps fournit :

$$Y(t) = R. \exp(\alpha. \delta t), \text{ où } R = \text{cst. Si } \delta \text{ Était positive,}$$

Pour les temps croissants, la température tendrait vers une valeur infinie, ce qui est Physiquement absurde.

Pour une valeur de δ négative, tel que $\delta = -K^2$ on aura :

$$Y(t) = R. \exp(-\alpha. K^2. t)$$

2. Si le phénomène est de nature périodique en fonction du temps, on prend alors β , un nombre imaginaire :

En posant $\beta = i(\omega t + \varphi)$, on obtient la solution de la forme :

$$Y(t) = R. \exp(i(\omega t + \varphi)) = R(\cos(\omega t + \varphi) + i \sin(\omega t + \varphi)) \quad (\text{III.4})$$

On peut résoudre alors le problème dans le plan complexe et on ne retiendra que la partie réelle de la solution obtenue.

L'excitation étant de nature périodique, on doit chercher une solution de même fréquence

que l'excitation en posant : $c = i(\omega t + \varphi) = \beta$

On obtient : $Y' - CY = 0 \Rightarrow \frac{dy}{dt} - CY = 0$

Dont la solution est :

$$\frac{dY}{Y} = C dt \Rightarrow \ln Y = Ct + \alpha$$

Donc :

$$Y = e^\alpha \cdot e^{-ct} = A \cdot e^{-i(\omega t + \varphi)}$$

Avec : $A = \exp \alpha$, où $\alpha = \text{const}$

Cherchons la solution de X(x) :

$$\alpha X'' - CX = 0 \Rightarrow X'' - \frac{c}{\alpha} X = 0 \Rightarrow X(x) = A' \exp \sqrt{\frac{c}{\alpha}} x + B \cdot \exp - \sqrt{\frac{c}{\alpha}} x \quad (\text{III.5})$$

Comme X(x) doit tendre vers une limite finie quand $(x \rightarrow \infty \Rightarrow A' \rightarrow 0)$

On aura par conséquent :

$$X(x) = B \cdot \exp - \left(\sqrt{\frac{c}{\alpha}} \right) x \quad (\text{III.6})$$

Comme $\sqrt{c} = \sqrt{(\omega t + \varphi)}$

On aura alors :

$$\text{Réelle} [X(x) \cdot Y(t)] \text{ Réelle} \left[A \cdot B \cdot e^{-i(\omega t + \varphi)} \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} (i+1)x} \right] \quad (\text{III.7})$$

Or la condition à la limite relative à l'excitation est de la forme :

$\theta(0, t) = T_0 \cos(\omega t)$ qui doit satisfaire l'équation T(x, t) au point d'origine des abscisses $x=0$,

Par conséquent :

$$\theta(0, t) = T_0 \sin(\omega t - \varphi) = \text{Réelle}[A. B. e^{-(\omega t - \varphi)}. 1]$$

$$= \text{Réelle}[A. B. (\cos(\omega t - \varphi) + i \sin(\omega t - \varphi))]$$

$$\Rightarrow AB = T_0$$

Développons l'expression $T_0 e^{i(\omega t - \varphi)}. e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}(i+1)x}$

$$\Rightarrow T_0 e^{i(\omega t - \varphi)}. e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}(ix+x)}$$

$$\Rightarrow T_0 e^{i(\omega t - \varphi)}. e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}ix}. e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x}$$

On aura :

$$T_0. e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[e^{i(\omega t - \varphi)}. e^{-i\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \right]$$

$$\Rightarrow \theta(x, t) = T_0. e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[e^{i(\omega t - \varphi)}. e^{-i\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \right] \quad \text{(III.8)}$$

$$e^{-i(\omega t + \varphi)} = \cos(\omega t + \varphi) + i \sin(\omega t + \varphi)$$

$$e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}xi} = \cos\left(-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) + i \sin\left(-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right)$$

$$\theta(x, t) = T_0. e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[(\cos + i \sin(\omega t - \varphi)). \left(\cos\left(-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) + i \sin\left(-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right) \right]$$

Comme la fonction cosinus est paire et la fonction sinus est impaire, on obtient alors :

$$\theta(x, t) = T_0. e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[\left(\cos(\omega t - \varphi). \cos\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) - i \cos(\omega t - \varphi) \sin\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right) \right. \\ \left. + i \sin(\omega t - \varphi) \cos\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) - i^2 \sin(\omega t - \varphi). \sin\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right]$$

Cependant :

$$\theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x} \left[\left(\cos(\omega t - \varphi) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x\right) - \sin(\omega t - \varphi) \sin\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x\right) \right) \right. \\ \left. + i \sin(\omega t - \varphi) \cos\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x\right) - \cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x\right) \right]$$

Finalement l'expression sera de la forme :

Telle que $\sin(a - b) = \sin a \cos b - \cos a \sin b$

$$\theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x} \left[\sin\left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x\right) \right] \quad \text{(III.9)}$$

$$\theta = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x} \left[\sin\left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x\right) \right]$$

Si l'excitation est donnée par la relation de la forme :

$$T - T_i = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x} \left[\sin\left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x\right) \right]$$

Finalement on aura l'équation suivante :

$$T = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x} \left[\sin\left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}} x\right) \right] + T_i \quad \text{(III.10)}$$

III.3. Modèle thermique d'échangeur air-sol :

Dans l'échangeur air-sol l'écoulement de l'air en contact avec la paroi conduit à un transfert thermique dû à la différence de température entre la paroi (température de sol imposée) et l'air. Pour connaître l'évolution de la température de l'air écoulant, il est nécessaire d'utiliser un modèle calculant la température de l'air à la sortie de l'échangeur en

fonction de la température de l'air à l'entrée d'échangeur et de la température du sol modélisée. [21]

III.3.1. Description du modèle thermique d'échangeur air-sol :

Le domaine d'étude est représenté par la figure III.5 qui est un échangeur air-sol de type : tubes en méandres. Notre modèle garde en premier lieu les mêmes dimensions de celle utilisé dans l'étude expérimentale du site de Biskra; ensuite on va procéder au changement de la longueur totale (L), le diamètre (D), Matière de tube (λ), Epaisseur (E), Débit injecter (Q), et la distance (H), afin d'évaluer l'influence de ces dimensions sur la performance de l'échangeur. [21]

L'air entre dans la conduite avec une vitesse V_0 et à une température uniforme en moyenne, T_e .

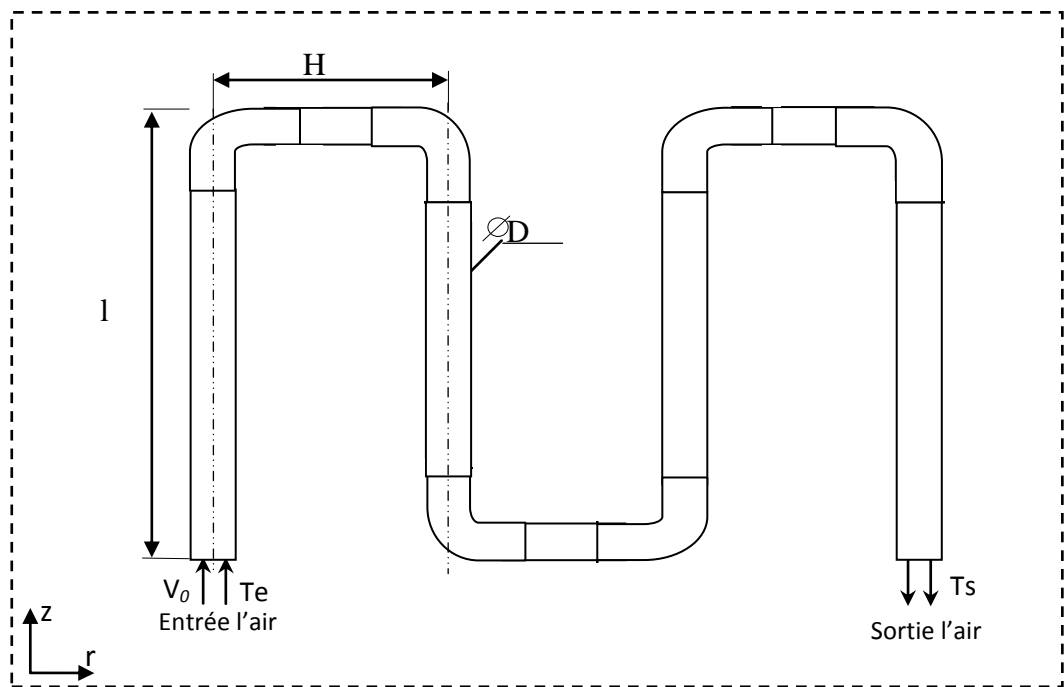


Figure III.5: La géométrie du l'échangeur air-sol.

III.3.2. Hypothèses du modèle :

- Le sol est considéré homogène ;
- La température de l'air en entrée d'échangeur correspond à la température de l'air extérieur.

- On néglige dans cette étude les échanges thermiques latents (évaporation ou condensation d'eau).
- La vitesse de l'air est considérée constante tout le long de l'échangeur (air/sol) enterré.
- Dans une section du conduit perpendiculaire à l'écoulement, l'air considère homogène, l'échange convectif est régi par un coefficient convectif moyen.
- Les forces de pesanteur sont négligées ;
- L'écoulement incompressible ($M < 0.3$) [31] ;
- L'écoulement en régime stationnaire, ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) ;
- Les propriétés thermo-physiques (ρ, ν, k, c_p, \dots) de l'air et du sol sont supposées constantes.

III.3.3. Calcul de la température de l'air à la sortie de l'échangeur enterré :

Le bilan thermique élémentaire à travers un tronçon de longueur dx du tube échangeur Figure (II-7) s'écrit : [34]

$$\dot{m} \cdot c_{\text{pair}} \cdot (T_x + dT_x - T_x) = \frac{dx}{R_{\text{sol}} + R_{\text{gainé}} + R_{\text{conv}}} \cdot (T_{\text{sol}} - T_a(x)) \quad (\text{III.11})$$

Avec,

\dot{m} : Débit d'air [Kg]

c_{pair} : Chaleur massique de l'air $\left[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}\right]$

R_{sol} : Résistance thermique entre le tube et le sol $\left[\frac{m \cdot ^\circ K}{w}\right]$

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

R_{tube} : Résistance thermique du tube enterré $\left[\frac{m \cdot ^\circ K}{w}\right]$

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

R_{conv} : Résistance thermique convective entre l'air et le tube $\left[\frac{m \cdot ^\circ K}{w}\right]$

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

T_{sol} : Température du sol [°K]

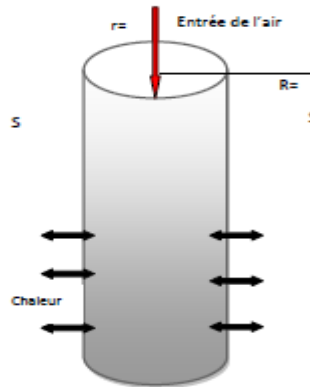


Figure III.6 : Echangeur de chaleur entre air et sol [33]

Où :

r : Rayon intérieur du tube enterré [m]

R : Rayon extérieur du tube enterré [m]

R_{sol} : Rayon de la couche adiabatique du sol [m]

λ_{gaine} : Conductivité thermique du tube enterré $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}\right]$

λ_{sol} : Conductivité thermique du sol $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}\right]$

h_{conv} : Coefficient de convection de l'air $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$

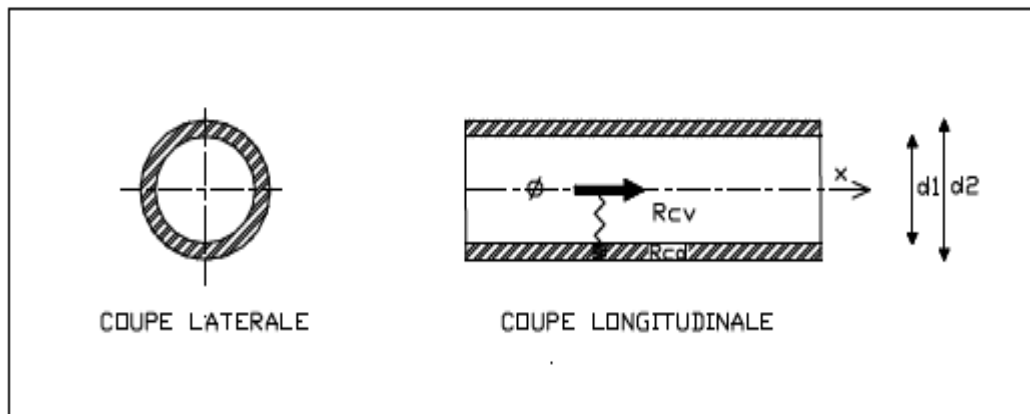


Figure III.7 : Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré [32]

Soit U la résistance thermique global entre l'air et le sol non perturbé définit par :

$$U = \frac{1}{R_{sol} + R_{tubes} + R_{conv}}$$

L'équation (II-11) devient :

$$\frac{dT_x}{T_{sol} - T_{a(x)}} = \frac{U}{\dot{m} \cdot c_{pair}} \cdot dx \quad (III.12)$$

L'intégration de l'équation (II-12) donne

Tell que $\int \frac{ab}{(a-b)} = \ln(a-b)$

$$\ln(T_{sol} - T_{a(x)}) = \frac{U}{\dot{m} \cdot c_{pair}} \cdot x + c \quad (III.13)$$

Pour trouver la valeur de la constante c , il suffit de revenir à condition au limite suivante :

Pour $x=0, T_0 = T_{air-entrées}$

$$\Rightarrow C = \ln(T_{sol} - T_{air-entrées})$$

En remplaçant C par sa valeur dans (II.13) on obtient :

$$\ln\left(\frac{(T_{sol} - T_{a(x)})}{\ln(T_{sol} - T_{air-entrées})}\right) = \frac{U}{\dot{m} \cdot c_{pair}} \cdot x + c$$

Avec : $\ln(a) - \ln(b) = \ln\left(\frac{a}{b}\right)$

Par conséquent la température de l'air théorique à une certaine distance parcourue est décrite par le modèle mathématique suivant :

$$T_{a(x)} = T_{sol} + (T_{sol} - T_{air-entrées}) \cdot e^{\frac{-U}{\dot{m} \cdot c_{pair}} \cdot x} \quad (III.14)$$

Qui pour une distance $x=l$, aurait comme valeur :

$$T_{air(x=L)} = T_{sol} + (T_{air-entrées} - T_{sol}) \cdot e^{\frac{-U}{\dot{m} \cdot c_{pair}} \cdot l} \quad (III.15)$$

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.

III.4. Matlab :

Matlab est un logiciel de calcul numérique commercialisé par la société MathWorks1.

Il a été initialement développé à la fin des années 70 par **Cleve Moler**, professeur de mathématique à l'université du Nouveau-Mexique puis à Stanford, pour permettre aux étudiants de travailler à partir d'un outil de programmation de haut niveau et sans apprendre le Fortran ou le C. Matlab signifie Matrix laboratoire.

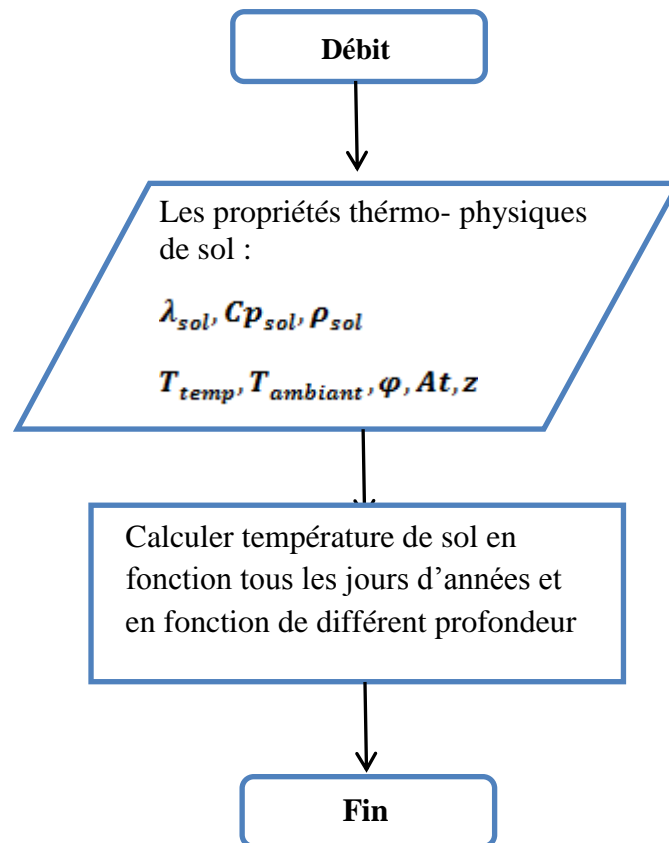
Il est un langage pour le calcul scientifique, l'analyse de données, leur visualisation, le développement d'algorithmes. Son interface propose, d'une part, une fenêtre interactive type console pour l'exécution de commandes, et d'autre part, un environnement de développement intégré (IDE) pour la programmation d'applications. Matlab trouve ses applications dans de nombreuses disciplines.

Il constitue un outil numérique puissant pour la modélisation de systèmes physiques, la simulation de modèles mathématiques, la conception et la validation (tests en simulation et expérimentation) d'applications. [28]

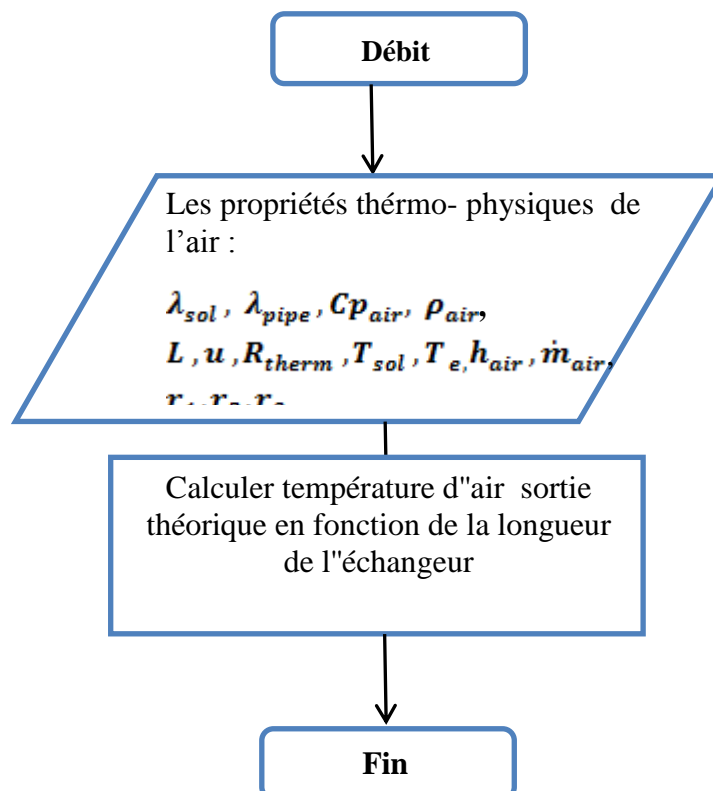
III.4.1Fichiers SCRIPT :

Un fichier script permet regrouper des séries de commandes Matlab. Cela évite d'avoir à saisir plusieurs fois de longues suites d'instructions. A son lancement, les instructions qu'il contient s'exécutent séquentiellement comme si elles étaient lancées depuis l'invite de commande. Un script stocke ses variables dans le workspace, lequel est partagé par tous les scripts. Ainsi, toutes les variables créées dans les scripts sont visibles depuis la command window et vice versa. Lorsque Matlab détecte une erreur, le programme s'arrête et un message d'erreur s'affiche à l'écran (avec le numéro de la ligne où l'erreur est détectée). [28]

III.4.2. Organigramme pour calculer la température de sol :



III.4.3. Organigramme pour calculer la température de sortie dans l'échangeur :



III.5. Efficacité de l'échangeur enterré :

L'efficacité décrit le rendement de l'échangeur enterré d'une longueur bien définie, 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 : [34]

$$\varepsilon = \frac{T_{air-sortie} - T_{air-entrée}}{T_{sol} - T_{air-entrée}} \quad (\text{III. 16})$$

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation d'un échangeur air-sol constituée de deux modèles :

Le premier relatif au comportement de sol, il détermine la température de sol en fonction de la profondeur et le temps.

Le deuxième est un modèle d'échangeur air-sol détermine l'évolution de la température de l'air écoulé dans les tubes.

Les conditions aux limites de ce modèle sont : la température de l'air ambiant qui entrée de l'échangeur et la température de sol a été déterminer par le modèle précédent. En fin ce chapitre est terminé par organigramme pour les deux équations et programme pour calcule l'efficacité d'échangeur.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

à partir de les deux modèles mathématiques qui sont obtenus dans le troisième chapitre, nous allons étudier l'effet de chacun dès la nature de type du sol , la matière de construction du tube échangeur enterré (λ), et la longueur d'échange (L), et débit d'air injecté dans l'échangeur (Q), et diamètre intérieur du tube échangeur (\emptyset), et l'épaisseur du tube échangeur enterré (E), puis nous choisissons le meilleur parmi eux, et après nous allons faire la validation avec l'étude expérimental de la deuxième modèle qui étudier la variation de la température à l'intérieur de l'échangeur de chaleur.

Nous avons les caractéristiques de l'échangeur air/sol qui nous avons obtenus déjà avec les données climatiques de la région de Ouargla, nous allons les simuler afin d'étudier l'efficacité d'échangeur de chaleur air/sol à la période de l'hiver et l'été.

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. (III-10).

$$T = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega+\varphi)}{2\alpha}}x} \left[\sin \left((\omega t - \varphi) - \sqrt{\frac{(\omega+\varphi)}{2\alpha}}x \right) \right] + T_i$$

- 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. (III.15).

$$T_{air(x=L)} = T_{sol} + (T_{air-entrée} - T_{sol}) \cdot e^{\frac{-U}{m \cdot c_{pair}} \cdot l}$$

IV.2. Présentation du cas étudié expérimentalement :

Pour vérifier la fiabilité du code de calcul réalisé afin d'entamer l'étude de dimensionnement réalisée, on a voulu comparer nos résultats par rapport à d'autres rencontrés dans la littérature, principalement avec les résultats expérimentaux effectués par le laboratoire Génie Mécanique de l'Université de Biskra.

Les essais expérimentaux correspondent à un réseau de quatre traçons d'une longueur totale d'environ 60 m. Le diamètre interne du tube est de 110 mm. L'ensemble est placé à une profondeur de 3 m sous une pente de 2 %.

Pour le site de Biskra, cette profondeur (3 m) a été déterminée préalablement grâce à une étude effectuée en fonction des données locales du site). Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 2 m.

Une fosse de réception en béton est construite à la sortie de l'échangeur. Un extracteur d'air de débit variable est placé à l'entrée de l'échangeur. Une série de sondes thermiques a été placées le long de l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie. Les sondes sont reliées à une centrale d'acquisition. Les tests sont effectués le 28 juin 2009. [29]

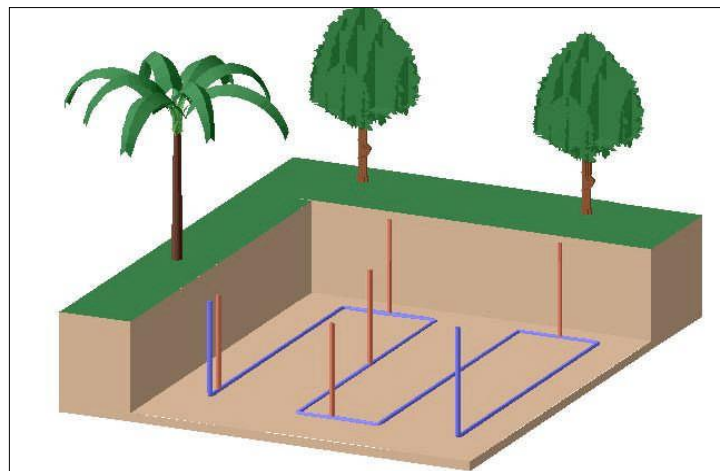


Figure IV.1 : Disposition de l'échangeur air-sol. [29]

IV.3. La validation du modèle échangeur air-sol :

Dans la première étape, on va tester la validation du modèle échangeur air-sol, nous procédons à une comparaison, en termes de l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur, entre nos résultats et les résultats expérimentaux pour des débits volumiques :

$$Q_v = 135.65 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow V_e = 1.34 \text{ m/s}$$

$$Q_v = 155.43 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow V_e = 1.54 \text{ m/s}$$

Les températures mesurées au cours des essais expérimentaux sont introduites comme des données d'entrées de calcul :

- Une température à l'entrée de l'échangeur $T_e=36,572^\circ\text{C}$
- Une température de sol $T_{\text{sol}}= 24^\circ\text{C}$

Les figures (IV-2, IV-3) représentent une comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux en termes de l'évolution de la température de l'air au cours de la longueur de l'échangeur pour le deux débits volumiques.

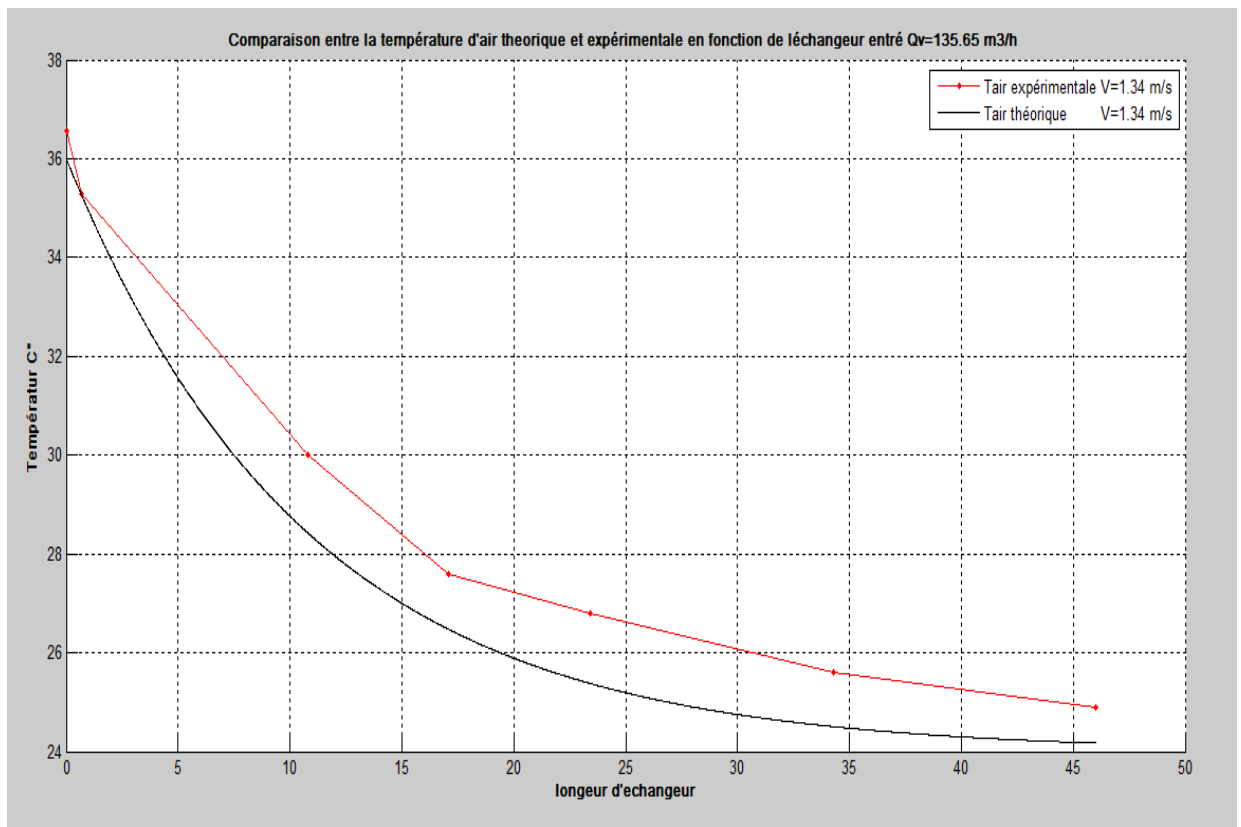


Figure IV.2: comparaison entre le profil de température théorique (dimensionnement) et expérimentale (expérience effectuée le 28/06/2009 à BISKRA[29], sous les conditions de fonctionnement suivantes : ($T_{\text{sol}}=24 \text{ C}^\circ$ $T_{\text{en}} 36.57 \text{ }^\circ\text{C}$, $L_{\text{tu-ec}}= 46 \text{ m}$, en PVC, $\varnothing_{\text{tube}} = 110 \text{ mm}$, épaisseur = 05 mm, profondeur = 3 m, sol argileux, $Q_{\text{air}}= 135.65 \text{ m}^3/\text{h}$ ($V = 1.34 \text{ m/s}$).

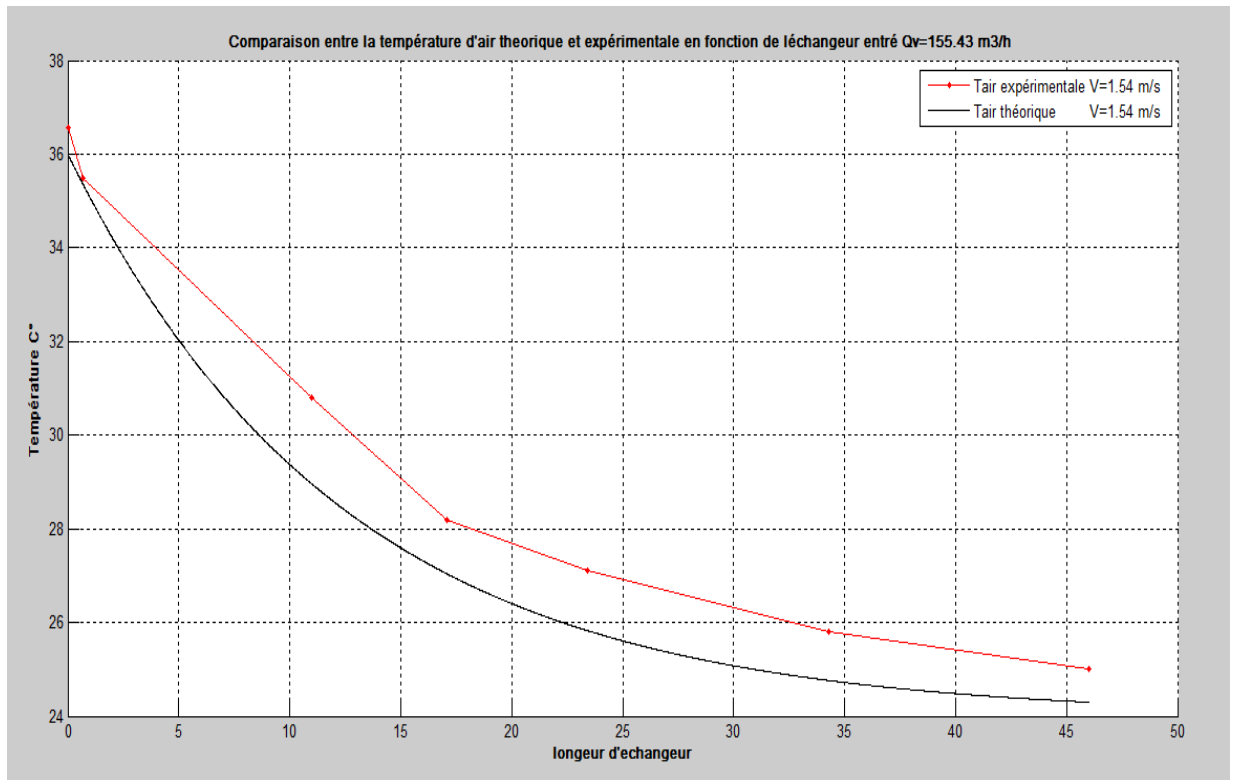


Figure IV.3: comparaison entre le profil de température théorique (dimensionnement) et expérimentale (expérience effectuée le 28/06/2009 à BISKRA[29], sous les conditions de fonctionnement suivantes : ($T_{\text{sol}} 24 \text{ C}^\circ$ $T_{\text{en}} 36.57 \text{ C}^\circ$, $L_{\text{tu-ec}} = 46 \text{ m}$, en PVC, $\varnothing_{\text{tube}} = 110 \text{ mm}$, épaisseur = 05 mm, profondeur = 3 m, sol argileux, $Q_{\text{air}} = 155.43 \text{ m}^3/\text{h}$ ($V = 1.54 \text{ m/s}$).

Les résultats obtenus par simulation montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux, l'écart relatif maximal dans tous les points n'atteint pas 3.5 % ce qui correspond à 1 °C. Donc, le modèle de l'échangeur air-sol proposé et les hypothèses considérées ont fourni des résultats validés par rapport à celles mesurés.

IV.4. Conception d'un modèle de l'échangeur air/sol :

IV.4.1. Effet de la nature et de type du sol :

Un sol est caractérisé par trois principaux paramètres qui influent directement sur le comportement thermique de l'échangeur air/sol enterré principalement l'évolution de la température de l'air injecté, qui sont la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique.

Dans cette étude de simulation et de dimensionnement on a considéré trois types de sol qui les plus répandus en Algérie, ce qui a permis de suivre la variation de la température du sol en fonction du temps (365 jours) Figure (IV-4) (IV-5) et (IV-6) respectivement pour 07 valeurs de profondeurs 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 mètres.

1. **Sol Argileux** ($\rho=1800 \text{ Kg/m}^3$, $\lambda=1.5 \text{ W/m.K}$, $C_p=1340 \text{ J/kg.K}$) :

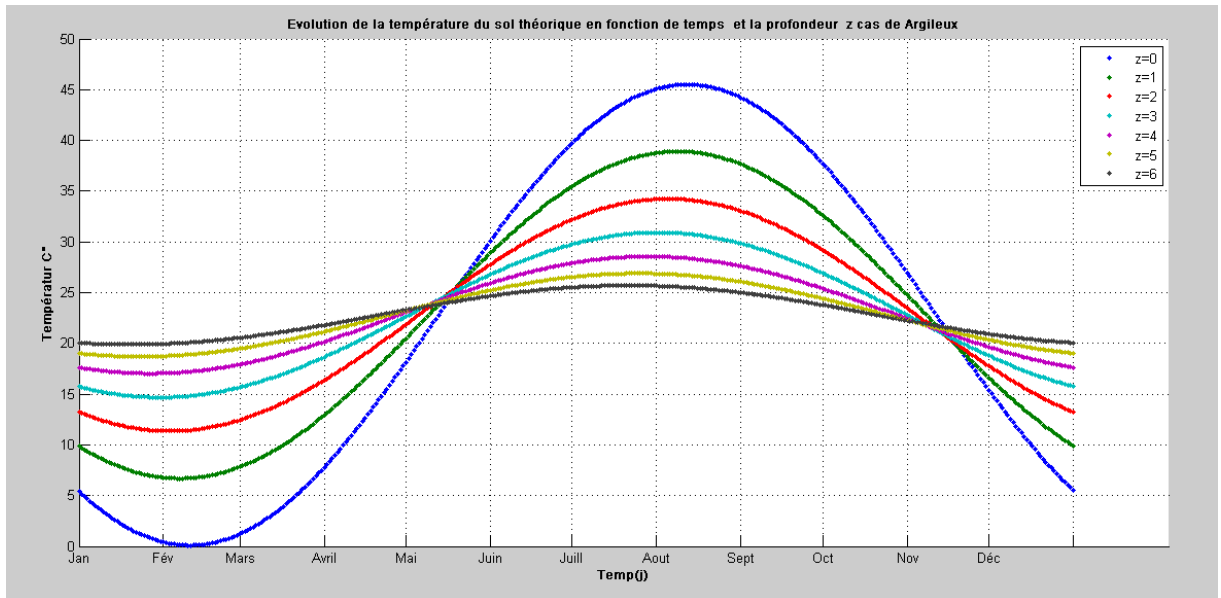


Figure IV.4: Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol argileux ($\rho=1800 \text{ Kg/m}^3$, $\lambda=1.5 \text{ W/m.K}$, $C_p=1340 \text{ J/kg.K}$).

2. **Sol gypseux** ($\rho=2400 \text{ Kg/m}^3$, $\lambda=0.51 \text{ W/m.K}$, $C_p=1090 \text{ J/kg.K}$) :

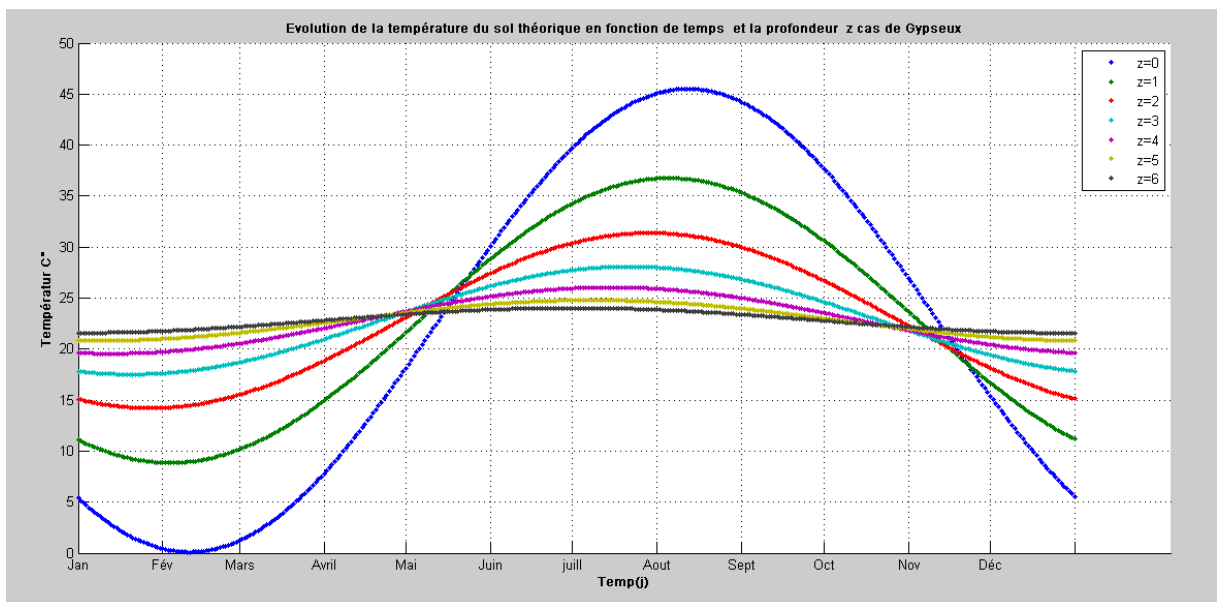


Figure IV.5 : Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol gypseux ($\rho=2400 \text{ Kg/m}^3$, $\lambda=0.51 \text{ W/m.K}$, $C_p=1090 \text{ J/kg.K}$).

3. Sol Sableux sec ($\rho=1650 \text{ Kg/m}^3$, kg/m^3 , $\lambda=0.27 \text{ W/m.K}$, $C_p=805 \text{ J/kg.K}$) :

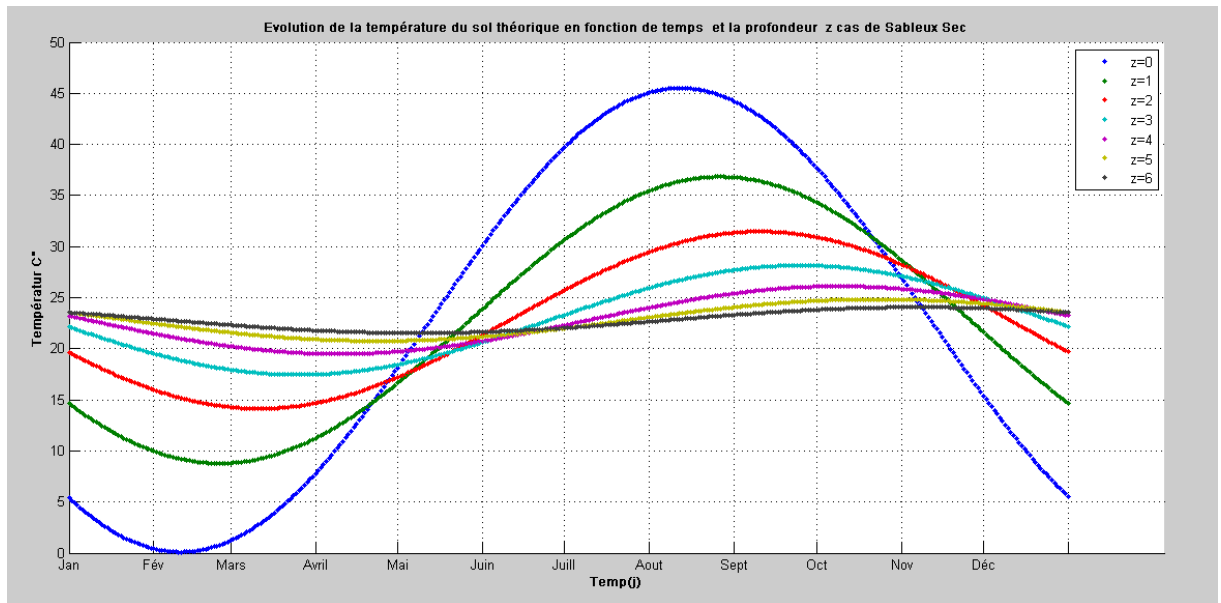


Figure IV.6: Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol sableux ($\rho=1650 \text{ Kg/m}^3$, $\lambda=0.27 \text{ W/m.K}$, $C_p=805 \text{ J/kg.K}$).

La comparaison entre l'évolution de la température en fonction du temps pour trois différents type de sol à une profondeur de 03 mètres, respectivement l'argile de diffusivité thermique $\alpha=6.33.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, le Gypse $\alpha = 0.203.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ et le sable $\alpha= 0.2.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, on constate que le sable para rapport à la surface du sol montre un déphasage de température maximal en période d'hiver, par contre ce déphasage devient minimal en période d'été qui peut justifier par sa diffusivité thermique basse.

IV.4.2. 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 rafraichissement par échangeur enterré géothermique, on a essayé de voir le comportement thermique de trois types de matériaux, le PVC haute pression, le PHD (polyéthylène haute densité) et le cuivre . La figure (IV- 7) 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 03 m, avec une distance entre axes des tubes égale à 0,4 m, dont le débit d'air injecté à l'entrée de l'échangeur est égale à 407 kg/h qui correspond à une vitesse moyenne de 03 m/s.

L'analyse des courbes figure (IV- 7) 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 Cuivre ($\lambda= 399 \text{ W/m.K}$) représente de bonnes performances thermiques comparativement à un échangeur en PVC ($\lambda=0,17 \text{ W/m.K}$).

Cependant, dans les applications pratiques, les constructeurs préfèrent le PVC haute pression 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 importante par rapport aux matériaux métalliques qui sont de bons conducteurs, mais qui présentent un handicap vis-à-vis de la résistance à la corrosion.

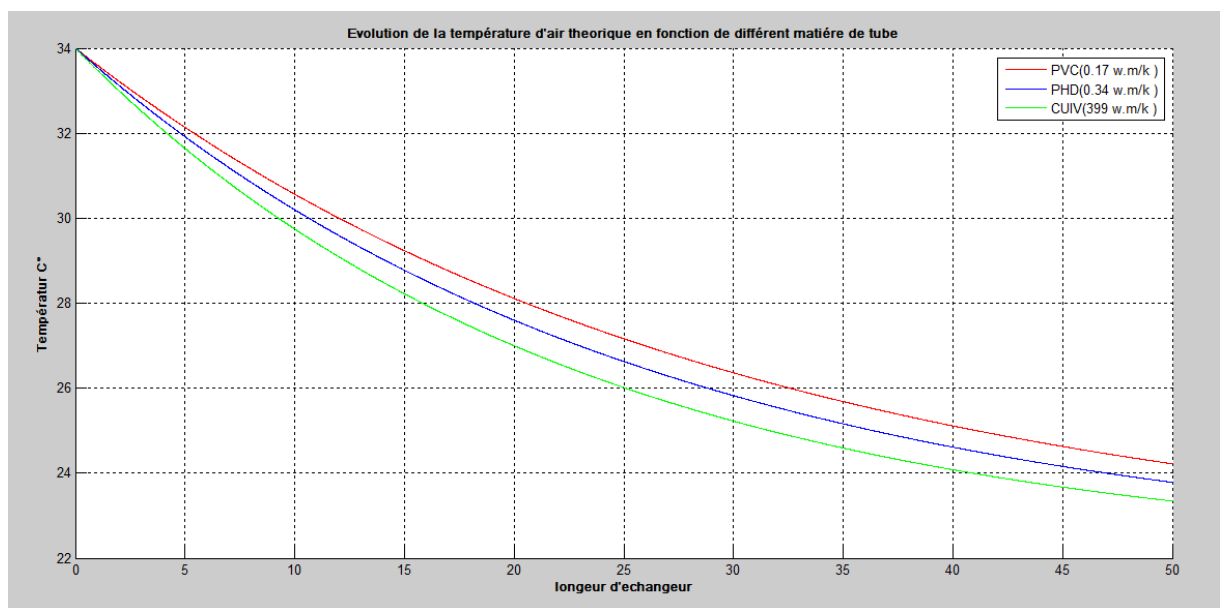


Figure IV.7 : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents matières de construction du tube échangeur, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, dont le débit d'air injecté = 407 Kg/h ($V=3 \text{ m/s}$).

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 (III15), et de suivre par la suite l'évolution de son profil en fonction de la longueur pour trois matières de conception figure (IV - 8), 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 (Cuivre dans notre cas), seulement l'écart par rapport au PVC pour toutes les longueurs d'échanges considérées ne dépasse la valeur de 80 % d'efficacité.

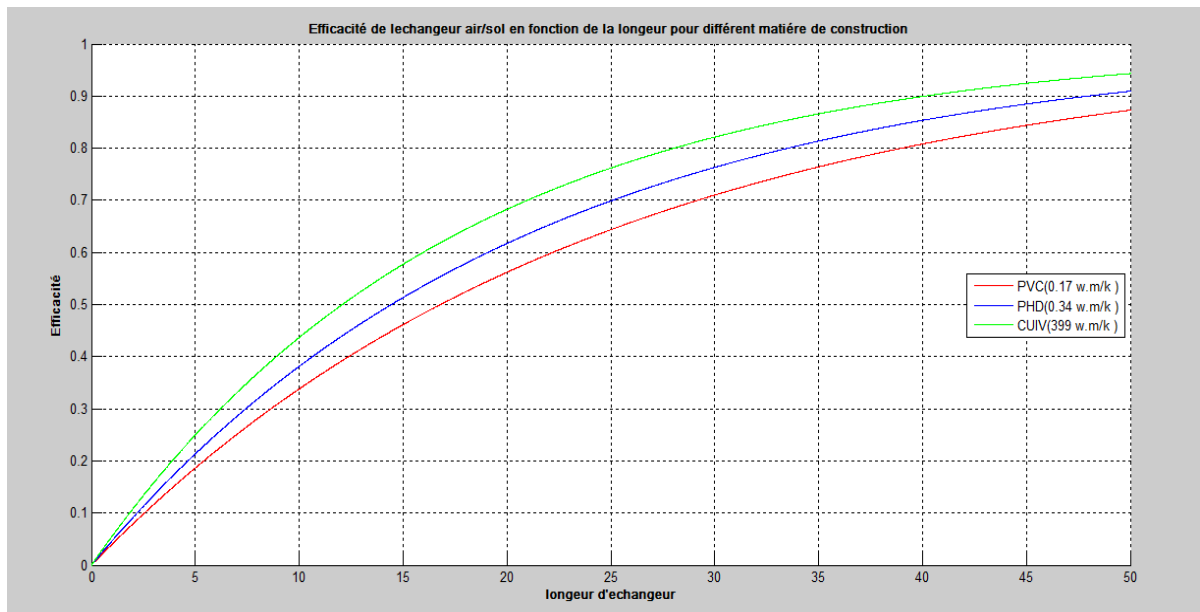


Figure IV.8 : Evolution de l'efficacité théorique de l'échangeur air/sol géothermique en fonction de la longueur pour différentes matières de constructions utilisées.

IV.4.3. 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 110 mm et d'une épaisseur de 05 mm Figure (IV -9), 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 0,4m et dont le débit d'air injecté est égale à 407 Kg/h ($V=3$ m/s).

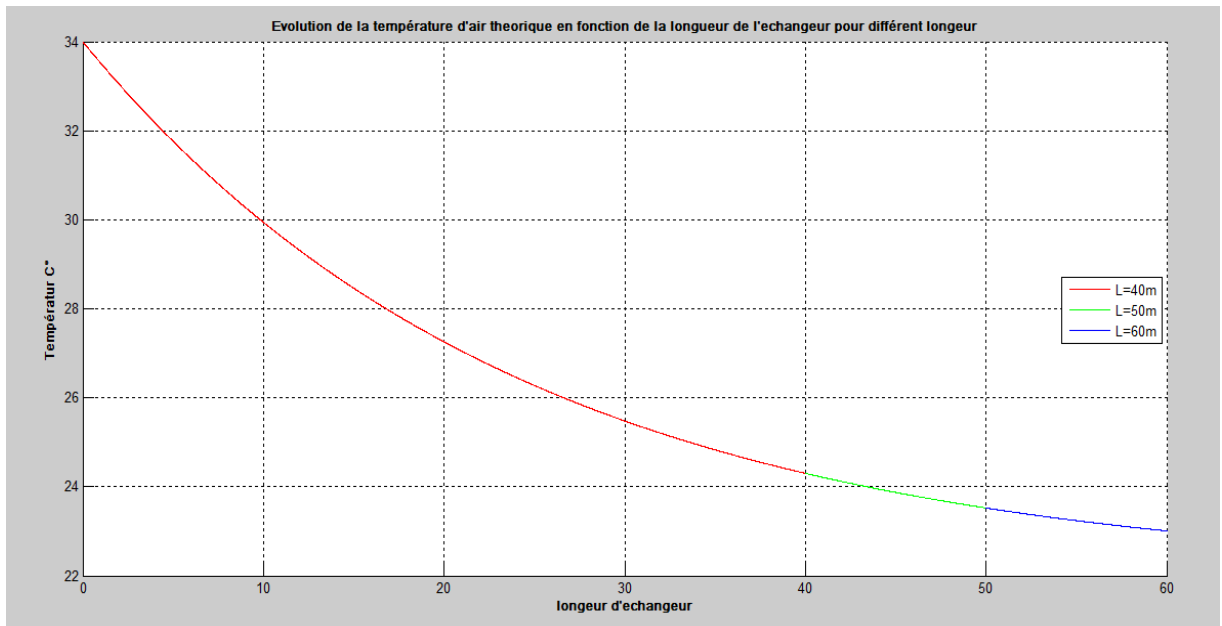


Figure IV.9: Evolution de la température d’air théorique en fonction de la longueur d’échange, tube échangeur en PVC, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, dont le débit d’air injecté = 407 Kg/h ($V=3$ m/s).

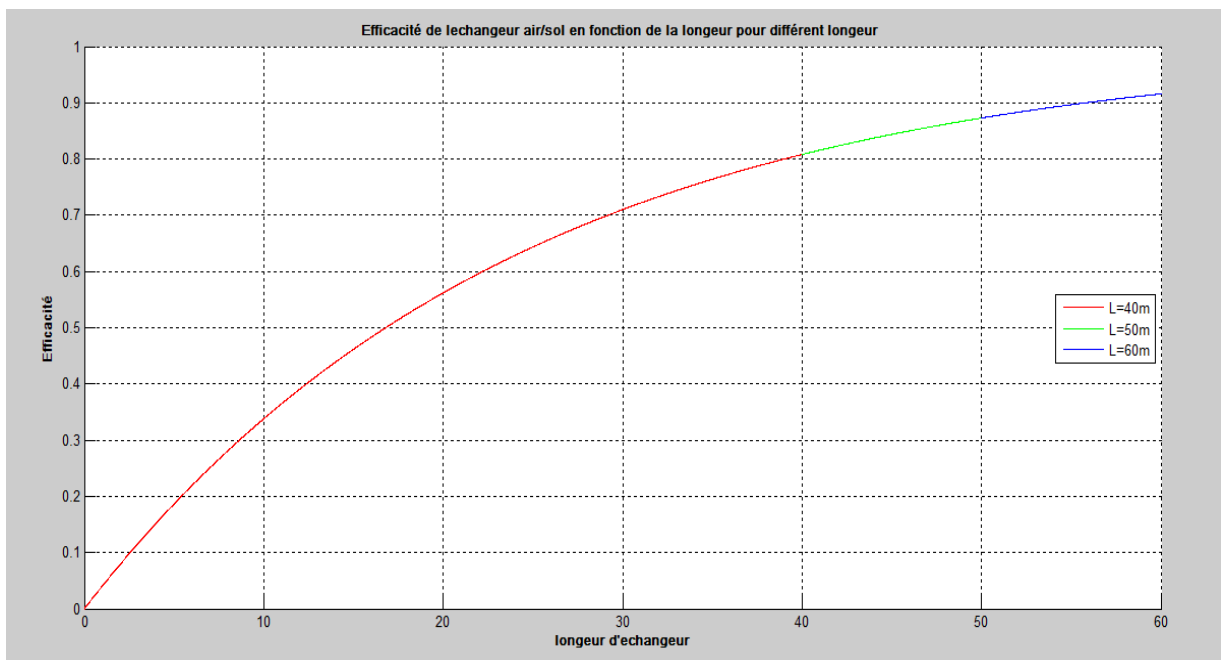


Figure IV.10: Evolution de l’efficacité théorique de l’échangeur en fonction de la longueur tube échangeur en PVC, $\varnothing_{\text{tube}}=110$ mm enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, dont le débit d’air injecté = 407 Kg/h ($V=3$ m/s).

A partir de la figure (IV -9) et (IV -10), qui montre l’évolution de la température de l’air et de l’efficacité en fonction de la longueur du conduit (air/sol) enterré, il est évident de remarquer que l’allure des courbes commence à se stabiliser entre 40 et 50 m de longueur totale d’échange, qui correspond à la longueur optimale de l’échangeur enterré. Cependant,

on constate qu'au-delà de 50 m, l'écart de température devient insignifiant pour atteindre la température du sol, d'autre part toute augmentation de la longueur en vue d'atteindre de meilleures performances est pénalisé par une perte de charge supplémentaire et un coût de réalisation élevé par rapport à l'écart de température réalisé entre l'air acheminé et le sol.

IV.4.4. 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.

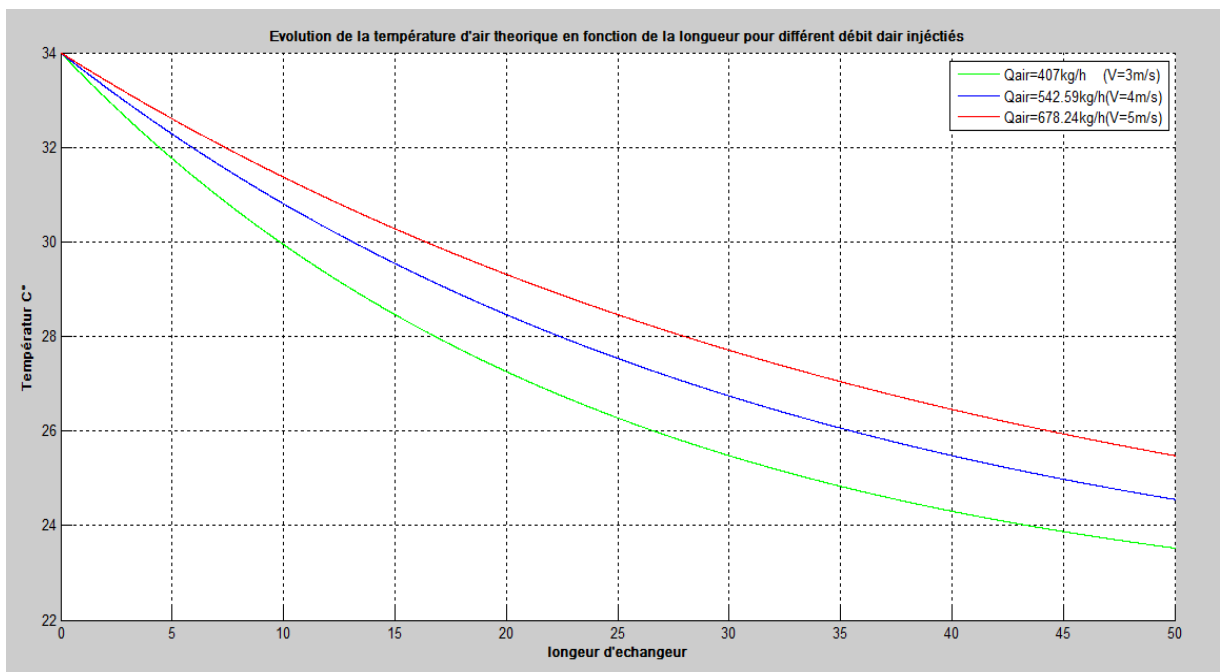


Figure IV.11: Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents débits d'air injectés dans l'échangeur (PVC, $\varnothing_{\text{tube}} = 110$ mm) enterré à une profondeur de 03 m, sol argileux, température à l'extérieur $T_{\text{entrée}} = 34$ °C.

A partir de l'équation (II-15) qui décrit l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur, on a pu voir l'influence du débit 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 (IV -11) montre que c'est pour un débit d'air au voisinage de 407 Kg/h ($V_{\text{air}} = 03$ 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 figure (IV -12) pour trois valeurs de débits d'air soufflé, montre que c'est au voisinage de 407 Kg/h qui correspond à une vitesse de 03 m/s que l'efficacité de l'échangeur dépasse la valeur de 87 % pour une longueur de 50 m, par contre elle, n'est que de 77 % pour une vitesse de 4 m/s et 71 % à 5 m/s.

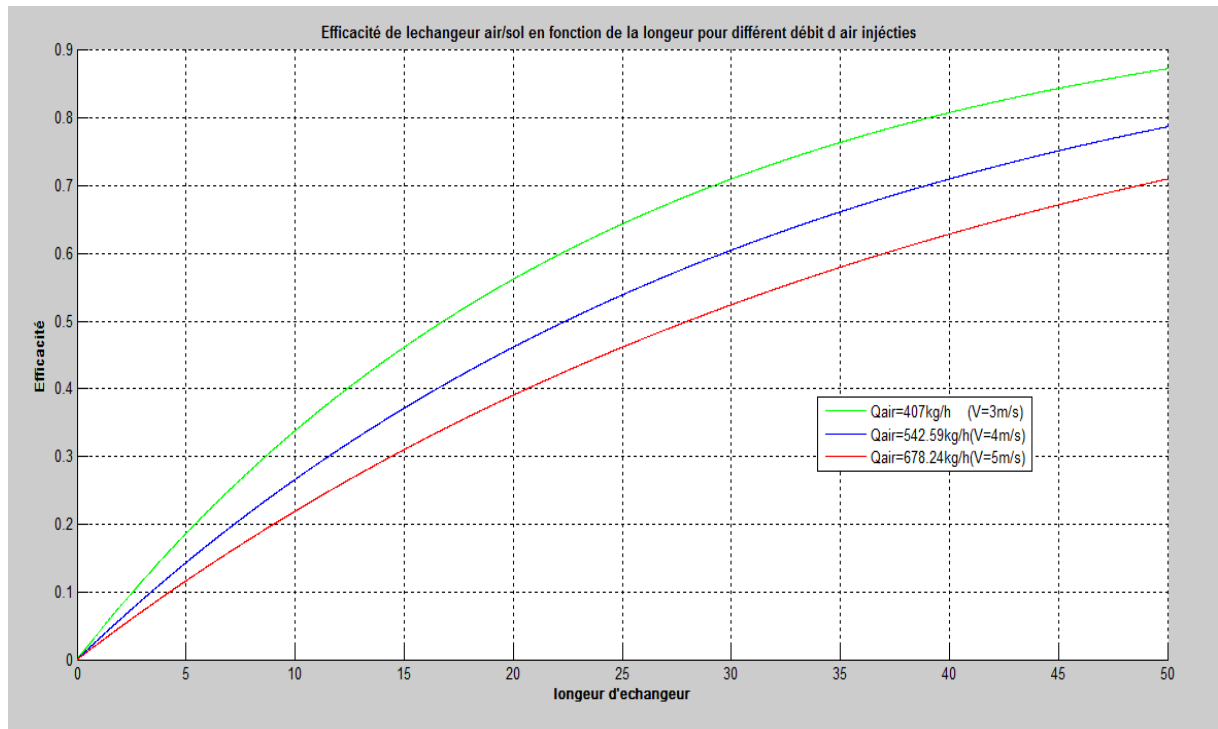


Figure IV.12: Evolution Efficacités de l'échangeur pour différents débits, Echangeur en PVC, $\varnothing_{\text{tube}} = 110$ mm, profondeur de 03 m, température à l'extérieur $T_{\text{en}} = 34$ °C.

IV.4.5. Effet du diamètre intérieur du tube échangeur :

Pour le dimensionnement du diamètre hydraulique du conduit échangeur, on a réalisé une simulation sous les conditions d'un sol argileux, ou l'échangeur en PVC avec une paroi d'épaisseur de 05 mm se trouve enterré à une profondeur de 03 mètres, dont la distance entre axes des tubes est de 0,4 m et le débit d'air $Q_{\text{air}} = 407$ Kg/h.

D'après les figures (IV -13) et (IV -14) qui montrent l'évolution de la température d'air et l'efficacité en fonction de la longueur du conduit enterré, respectivement pour trois valeurs de diamètres égale à 110, 160 et 200 mm On constate que c'est le plus grand diamètre du tube (200mm) qui assure de bonnes performances, en effet il permet d'augmenter la surface d'échange totale et par conséquent un meilleur transfert de chaleur entre la paroi externe du tube et le sol avoisinant.

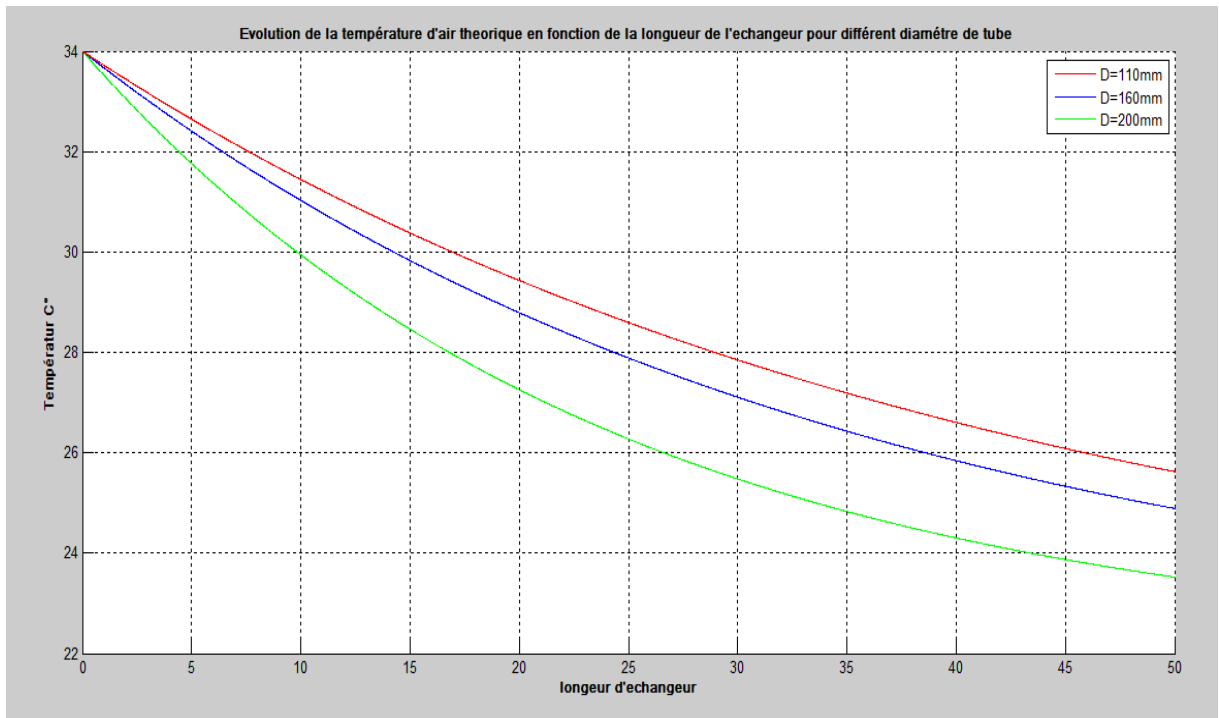


Figure IV.13: Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents diamètres de tube échangeur en PVC, longueur =50 m, épaisseur = 05 mm, enterré à une profondeur de 03 mètres, distance entre axes = 0,4 m , $Q_{air}= 407 \text{ Kg/h}$.

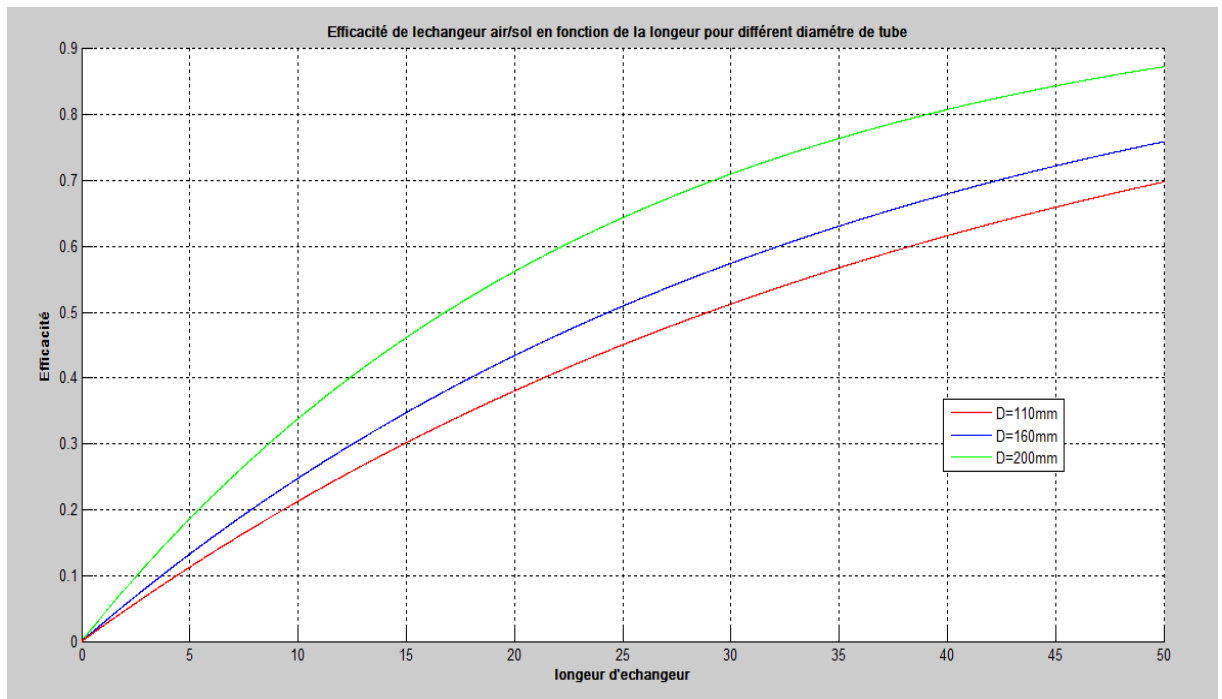


Figure IV.14: Evolution de l'efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur pour différents diamètres de tube échangeur en PVC, longueur =50 m, épaisseur = 05 mm, enterré à une profondeur de 03 mètres, distance entre axes = 0,4 m , $Q_{air}= 407 \text{ Kg/h}$.

IV.4.6. 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, débit d'air injecté $Q_{air} = 407 \text{ Kg/h}$, diamètre du tube $\varnothing = 110 \text{ mm}$, longueur totale de l'échangeur égale 50 m, distance entre axes des tubes = 0.4 m.

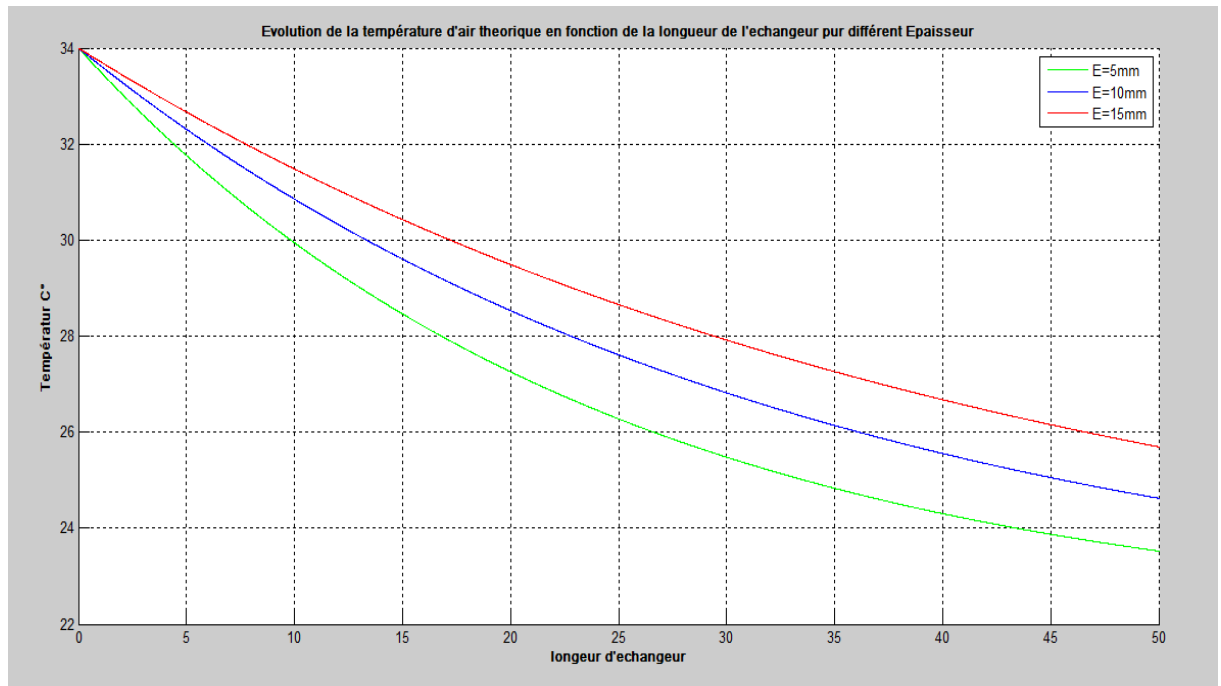


Figure IV.15: Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour différentes épaisseurs du tube échangeur en PVC, $\varnothing=110 \text{ mm}$, sol argileux, profondeur 03m, $Q_{air} = 407 \text{ kg/h}$.

En analysant les résultats affichés par les figure (IV -15) et (IV -16), 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.

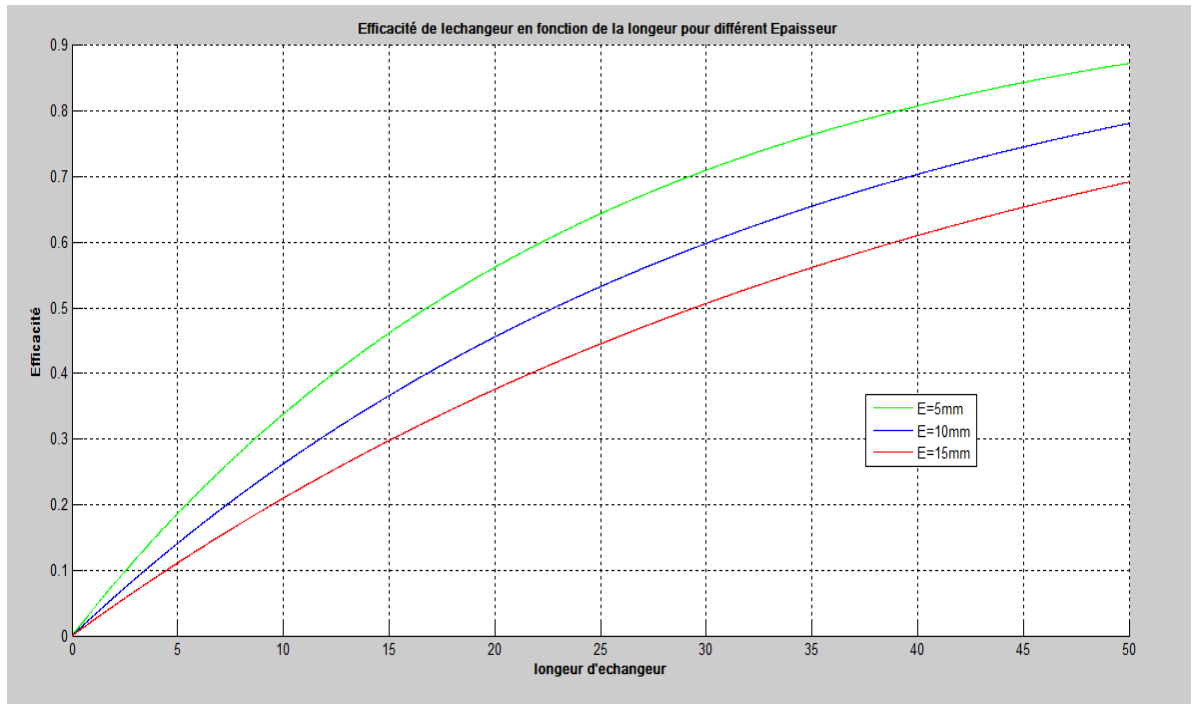


Figure IV.16: Evolution de l’efficacité théorique de l’échangeur en fonction de la longueur pour différent épaisseur de tube échangeur en PVC, Ø=110 mm, sol argileux, profondeur 03m, $Q_{air}= 407$ kg/h.

IV.5. Conformable le résultat dans la région d’Ouargla :

Sous ce titre nous allons étudier le fonctionnement de l’échangeur de chaleur air/sol avec le climat de la région d’Ouargla pendant les deux saisons (l’été et l’hiver).

Là où nous avons pris des données du service météorologique qui sont:

IV.6. La température d’entrée :

c- La température ambiante:

Pour la température externe nous avons pris la valeur maximale à l’été et le minimale à l’hiver

➤ **à l’été :**

Juin –Juillet –Aout :

$$T_{amb-moy-été} = 46.83 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

➤ **à l’hiver:**

Décembre –Janvier –Février

$$T_{amb-moy-hiver} = 1.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

b -La température de sol:

Et aussi on a fait le même travail pour la température de la terre T_{sol} on a pris la température à la profondeur de 1m à l'été et à l'hiver

➤ **à l'été :**
 $T_{sol-moy-été} = 34.34^{\circ}\text{C}$ 21 mai 2015 \Rightarrow 21 Aout 2015

➤ **à l'hiver:**
 $T_{sol-moy-hiver} = 19.39^{\circ}\text{C}$ 21 Décembre 2015 \Rightarrow 21 Mars 2016

Les figure (IV.17) et (IV.18) représentée Evolution de la température d'air en fonction de la longueur en hiver et en été pour les donnée de la région de Ouargla.

En été :

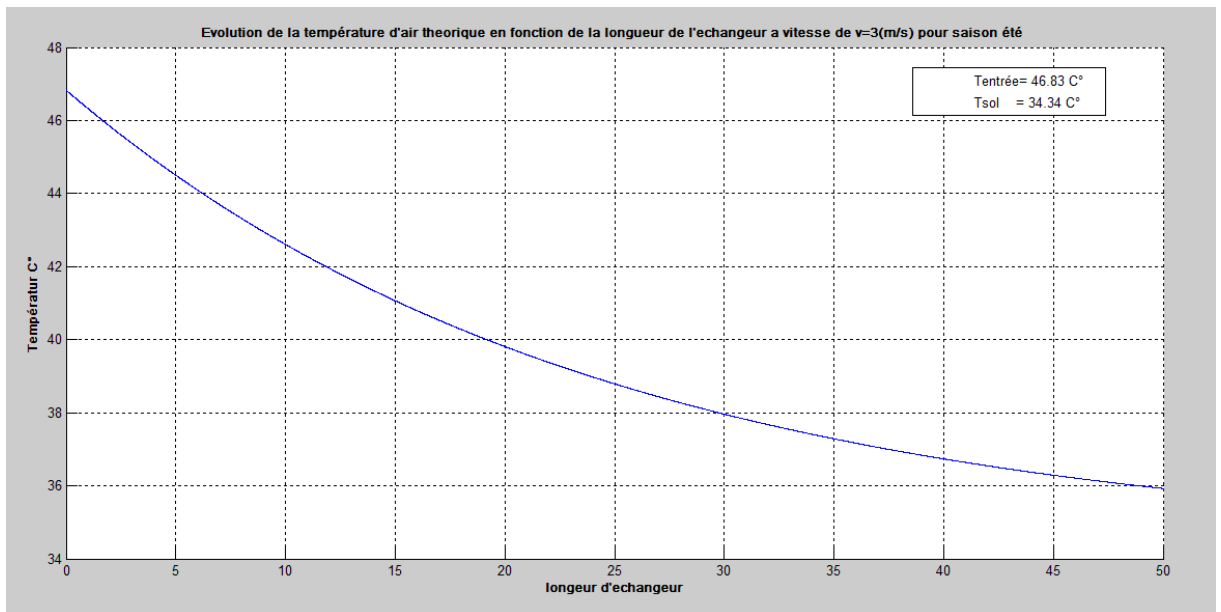


Figure IV.17 : Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour Saison été, échangeur en PVC, $\varnothing=110$ mm, sol argileux, profondeur 03m, $Q_{air}= 407$ kg/h, $V= (3\text{m/s})$

D'après la courbe on remarque une diminution de la température de 10 °C, ça constat que l'échangeur de chaleur est bien fonctionné à ce saison.

En hiver :

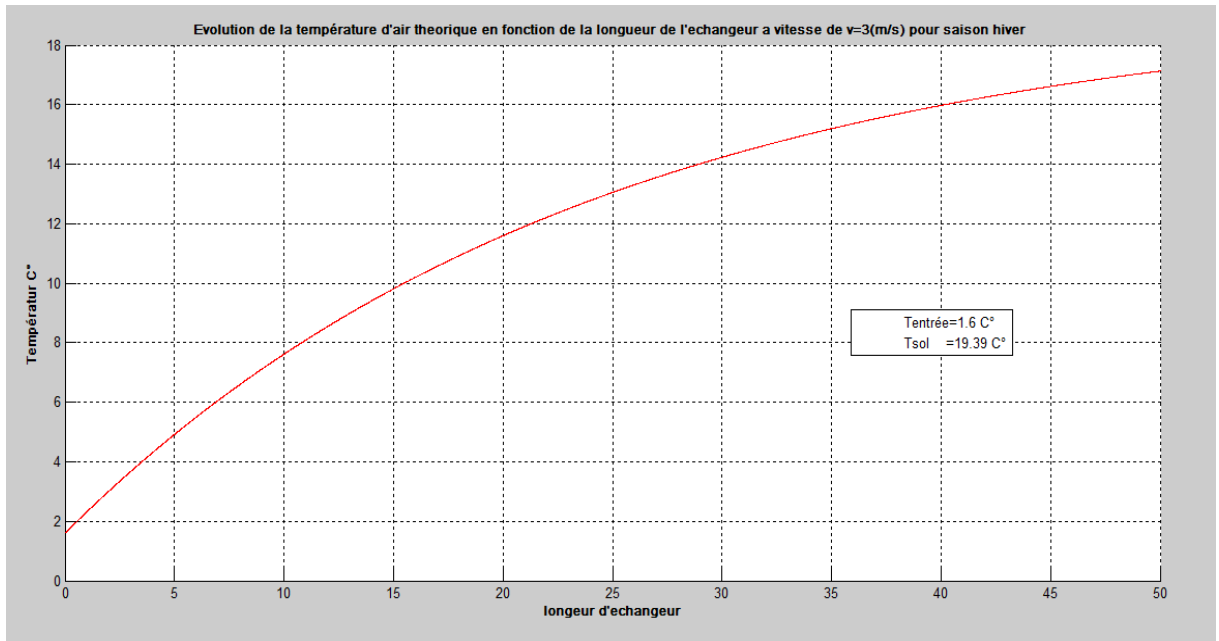


Figure IV.18 : Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour Saison hiver, échangeur en PVC, $\varnothing=110\ mm$, sol argileux, profondeur 03m, $Q_{air}= 407\ kg/h$, $V= (3m/s)$

Les résultats obtenus d'après la courbe montre que il y a une augmentation à la température de $15^{\circ}C$ par rapport à l'été qui sont confirmé que l'échangeur de chaleur bien fonctionné à l'hiver .

À partir de Ces résultats nous concluons que l'échangeur de chaleur fonctionne dans les deux saisons à la région d'Ouargla et ils convient avec le climat du désert.

Conclusion

Conclusion

L'énergie géothermique est d'un intérêt primordial pour un grand nombre de pays, L'utilisation de cette énergie se justifie non seulement au point de vue environnemental, mais également au point de vue économique. L'Algérie, disposant d'une très forte géothermie, pour laquelle elle peut jouer un rôle majeur dans le futur proche. De plus, si les efforts du *Centre de Développement des Energies Renouvelables se multiplient*, la part de cette source d'énergie pourrait se révéler encore supérieure à long terme.

Depuis un certain nombre d'années, plusieurs prototypes ont vu le jour dans les laboratoires ; Ces prototypes s'orientent vers le but de maîtriser la consommation énergétique, d'où vient la nécessité de les intégrer dans la conception des bâtiments, en diminuant considérablement les besoins de chauffage et de climatisation. Dans cet axe, notre travail vient pour apporter une contribution aux études de simulation et de modélisation des échangeurs air-sol.

L'objectif principal de notre étude est de faire une simulation Analytique pour la conception d'un modèle échangeur air-sol convenable aux conditions climatiques de la région d'Ouargla, dans laquelle le travail est orienté vers l'analyse et la prévision de l'influence des différents paramètres de dimensionnement sur la performance de notre système.

La simulation a été réalisée par le logiciel (Matlab), on a écrit un programme informatique pour déterminer l'effet des paramètres de l'échangeur.

La validation du modèle se fait par une comparaison entre les résultats de simulation et ceux obtenus expérimentalement sur le site de Biskra. Un bon accord a été observé entre les deux. L'étude paramétrique donne une plage de définition d'un modèle échangeur air-sol propre aux conditions climatiques estivales d'Ouargla.

Conclusion générale

Pour atteindre cette efficacité, les recommandations peuvent être résumées comme suit :

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 serpentin 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, le débit d'air recommandé doit être au voisinage de 407 kg/h qui correspond à une vitesse de 3 m/s.

5- 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, la valeur de 110 mm correspond au diamètre optimal.

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.

Enfin, nous souhaitons que cette étude ait contribué aux efforts visant à exploiter de plus nos réserves géométriques.

Références bibliographiques

- [1] - Site de Web ADEME-BRGM : consulté le 19/02/2016
<http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/02-chaleur-ressource.html>
- [2] - S. Brahimi, **Situation des énergies renouvelables en Algérie**, Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marché, (2001).
- [3] - Louai Nabila. , **Evaluation Energétique des déchets solides en Algérie, une solution climatique et un nouveau vecteur énergétique**, Mémoire de magister, Université El-Hadj Lakhdar, Batna, (2009).
- [4] - L'énergie géothermique : consultée le 19/02/2016
- [5] - Benlatreche Toufik, **Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics**, Mémoire de magister, université Mentouri, Constantine, (2006).
- [6] - Alain M.Viaro, Arelette Ziegler, **Habitat traditionnel dans le monde : Eléments pour une approche**, UNESCO (Aout 1983)
- [7] - M. Djeridi et N. Niboua. **Conversion de l'énergie géothermique en énergie électrique par un cycle binaire dans le sud Algérien.**
- [8] - Lucie S.OUALI .**Étude géothermique du sud de l'Algérie**, Mémoire de magister, Université M'hamed Bouguerra Boumerdes, (2006).
- [9] -Stéphane Thiers, **Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive**,Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris, (2008).
- [10] - Le puits canadien: solution environnementale, Site Web : consulté le 23/02/2016
[http://conseils.xpair.com/consulter parole expert/puits canadien solution environnementale.htm](http://conseils.xpair.com/consulter_parole_expert/puits_canadien_solution_environmentale.htm)
- [11] - Lucie Tome. , **Puits canadiens/provençaux et qualité de l'air intérieur : analyse des dégradations potentielles**, Mémoire de l'Ecole des Hautes Etude en Santé Publique, (2009).
- [12] - Juslin Koffi, **Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles**, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France, (2009).
- [13] - B. Mohammed et T. Abderrahmane, **Dimensionnement et analyse de fonctionnement d'un échangeur air-sol**, Mémoire d'Ingénieur, Université Kasdi Merbah, Ouargla, (2010).
- [14]- <http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/index.html>. : consulté le 23/02/2016

Références bibliographiques

- [15]- <http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/04-applications-01.html> : consulté le 25/02/2016
- [16]- <http://algerie.meteosun.com/meteo/previsions-ville/AG/ouargla-AGXX0029> : consulté le 27/02/2016
- [17]- P. Hollmuller, **Utilisation des échangeurs air-sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique**, Thèse de doctorat, université de Genève, (2002).
- [18]- Younes Kartachi , **Intégration de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables dans la conception des bâtiments**, Projet de fin d'étude, Université de la Rochelle, (2006).
- [19]- Okba Boukhalfa''**Etude théorique et expérimentale d'un chauffe-eau solaire''**, Mémoire de Master en génie Mécanique, Université de Biskra 2012
- [20]- M. Saadeddine, '**Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeurs air/sol enterre'**, Mémoire de Magister en génie Mécanique, Université de Biskra 2012
- [21]- T. SALOMON, R. MIKOLASEK, B. PEUPORTIER, S. THIERS, Y. JAUTARD et A.TROMBE, **Dimensionnement du puits climatique, Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits canadiens ou provençaux**, Rapport ADEME, Région Languedoc Roussillon, (2003).
- [22]- **Les puits canadiens/provençaux**, Guide d'information, Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques «CETIAT», France, (2008).
- [23]- Stéphane Thiers, **Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive**, Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris, (2008)
- [24]- Joanna Powell ,**Puits canadien au provençal**, Ecole architecteur de Lyon, (2005).
- [25]- Stéphane THIERS, Bruno, **PEUPORTIER modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraichissement 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)
- [26]- SALHI Toufik et ROUAHNA Salah, **Etude d'un échangeur air/sol cylindrique à input périodique**, Mémoire d'ingénieur d'état, Université du Biskra (2010).
- [27]- BENFATEH HOCINE, **Etude du Rafrâichissement par la Géothermie, Application à l'Habitat**, Mémoire de Magister en génie Mécanique, Université de Biskra (2009)

Références bibliographiques

- [28]-Yassine Arbia-Jérôme **Manuel Matlab** Département GEI et mécanique. Consulté le (12/05/2017).
- [29]- H. Benfatah, N. Moummi, N. Hatraf, A. Moummi et S.Youcef Ali, **Etude théorique et expérimentale du rafraichissement par la géothermie, application à l'habitat**, Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Énergétique, SIGCLE, Constantine, (2010).
- [30]- Site de Web: consulté le 10/02/2017
[https://www.google.dz/prise d'aire de puit canadienih search?q=prise+d%27aire+de+puit+canadien](https://www.google.dz/prise+d%27aire+de+puit+canadienihsearch?q=prise+d%27aire+de+puit+canadien)
- [31]- Belkhir Negrou , **Conception et analyse de fonctionnement d'une turbine installéedans une cheminée solaire**, Mémoire de magistère, Université Kasdi Merbah, Ouargla, (2007).
- [32]-BENFATEH HOCINE, **Etude du Rafrâchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat**, Mémoire de Magister en génie Mécanique, Université de Biskra (2009)
- [33]- SALHI Toufik et ROUAHNA Salah, **Etude d'un échangeur air/sol cylindrique à input périodique**, Mémoire d'ingénieur d'état, Université du Biskra (2010).
- [34]- Stéphane THIERS, Bruno, PEUPORTIER **modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraichissement 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)
- [35]-**Guide pédagogique, L'énergie**, Observatoire régional de l'environnement de Bourgogne, (2005).
- [36]-**Confort thermique à l'intérieur d'un établissement**, Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec, (2004).

Annexe A :

Propriétés thermo physiques de quelques métaux

	masse volumique (ρ) en $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	chaleur spécifique (C_p) en $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	conductivité- thermique (λ) 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

Annexe B :

Diffusivité de non-métaux à 20 °C

	masse volumique (ρ) en $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	chaleur spécifique (C_p) en $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	conductivité- thermique (λ) 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

Annexes

Annexes C :

Température ambiante 2014-2015 dans la région d'Ouargla :

ANNEE	Mois	Moyenn e de T MIN EN °C	Moyenn e de T MAX EN °C
2014	Décembre	5,9	19,0
2015	Janvier	-2,3	28,2
2015	Fevrier	1,2	23,5
2015	Mars	3,8	32,8
2015	Avril	7,6	41,5
2015	Mai	17,0	45,5
2015	Juin	19,7	46,0
2015	Juillet	22,5	46,9
2015	Aout	26,4	47,6
2015	Septembre	17,6	44,6
2015	Octobre	10,5	39,7
2015	Novembre	5,0	30,8
2015	Décembre	2,4	24,3

[Source] : service météorologique d'Ouargla

Annexe D :

Température de sol 2015-2016 dans la région d'Ouargla de profondeur **1m** :

HEURES TEMPERATUR MOYENNE

Date	T0.3 M	T 0.6 MT	1.00 M
21/12/2015	16,40	17,83	20,03
22/12/2015	16,27	17,67	20,00
23/12/2015	16,10	17,40	19,97
24/12/2015	16,23	17,17	19,87
25/12/2015	16,20	17,37	19,97
26/12/2015	16,10	17,23	19,97
27/12/2015	16,00	17,10	19,83
28/12/2015	15,80	17,10	19,80
29/12/2015	15,43	17,20	19,57
30/12/2015	15,50	17,17	19,57

Annexes

31/12/2015	15,23	17,23	19,37
01/01/2016	15,23	17,17	19,37
02/01/2016	15,17	17,07	19,27
03/01/2016	15,20	17,10	19,27
04/01/2016	15,37	17,27	19,43
05/01/2016	15,40	17,33	19,43
06/01/2016	15,57	17,47	19,50
07/01/2016	15,33	17,13	19,50
08/01/2016	15,30	17,10	19,43
09/01/2016	15,40	17,23	19,57
10/01/2016	16,73	17,87	19,63
11/01/2016	16,63	17,93	19,77
13/01/2016	17,47	18,47	19,80
14/01/2016	17,40	18,40	19,80
15/01/2016	17,43	18,47	19,80
16/01/2016	17,63	18,53	19,90
17/01/2016	17,40	18,30	19,67
18/01/2016	17,03	17,97	19,63
19/01/2016	16,93	17,90	19,57
20/01/2016	11,27	11,93	13,10
21/01/2016	16,90	17,80	19,60
22/01/2016	16,83	17,80	19,57
23/01/2016	16,77	17,87	19,47
24/01/2016	11,27	11,93	12,97
25/01/2016	16,80	17,87	19,37
26/01/2016	16,80	17,83	19,30
27/01/2016	16,17	17,47	19,07

Annexes

28/01/2016	15,93	17,23	19,00
29/01/2016	15,97	17,27	18,93
30/01/2016	16,23	17,20	19,10
31/01/2016	16,10	17,17	19,03
01/02/2016	16,13	17,30	19,03
02/02/2016	17,10	17,43	19,00
03/02/2016	17,13	17,37	19,07
04/02/2016	17,13	17,33	19,03
05/02/2016	17,23	17,40	19,13
06/02/2016	17,20	17,13	19,03
07/02/2016	17,00	16,70	18,97
08/02/2016	16,93	16,77	18,93
09/02/2016	16,97	16,90	18,97
10/02/2016	16,97	17,10	19,00
11/02/2016	16,90	17,33	19,40
12/02/2016	17,10	17,33	19,33
13/02/2016	17,00	17,30	19,43
14/02/2016	17,07	17,40	19,33
15/02/2016	16,93	17,10	19,30
16/02/2016	18,10	19,13	20,03
17/02/2016	17,97	19,03	20,00
18/02/2016	18,40	19,10	20,50
19/02/2016	18,03	18,30	20,50
20/02/2016	17,53	18,57	20,27
21/02/2016	11,83	12,43	13,50
22/02/2016	17,67	18,57	20,27
24/02/2016	18,63	19,13	20,33

Annexes

25/02/2016	18,90	19,60	20,60
26/02/2016	19,03	20,37	20,87
27/02/2016	18,90	20,10	20,67
28/02/2016	19,30	20,30	20,87
29/02/2016	19,07	20,03	20,63
01/03/2016	13,07	13,70	13,97
02/03/2016	19,37	20,50	20,90
03/03/2016	19,33	20,07	20,83
04/03/2016	19,37	20,03	20,63
05/03/2016	19,63	20,07	20,77
06/03/2016	19,57	20,00	20,63
07/03/2016	13,43	13,97	13,93
08/03/2016	19,13	20,17	21,00
09/03/2016	18,17	19,83	21,00
10/03/2016	18,63	19,90	21,10
11/03/2016	18,40	19,57	20,60
12/03/2016	18,50	19,70	20,67
13/03/2016	18,80	19,57	20,50
14/03/2016	19,10	19,77	20,70
15/03/2016	19,17	19,83	20,67
16/03/2016	19,53	20,10	20,87
17/03/2016	20,90	20,97	21,03
18/03/2016	20,93	21,07	21,20
19/03/2016	21,30	21,13	21,30
20/03/2016	21,30	21,57	21,50
21/03/2016	23,40	22,73	22,20

[Source] : service météorologique d'Ouargla

ملخص

مهما كانت درجة حرارة الهواء في سطح الأرض فإن عطالة التربة تسمح لها بالمحافظة على درجة حرارة ثابتة في أعماق معينة , هذه الخاصية نستطيع استغلالها في التكييف و التدفئة باستعمال مبادل حراري (هوائي- ارضي) مدفون في أعماق مخصصة , و بتمرير تيار هوائي داخل المبادل الحراري يتم استغلاله من بعد في مجال التكييف

في دراستنا هذه بدأنا بتعريفات مفصلة لكل العناصر الحرارية للمبادل الحراري و من أجل حساب درجة الحرارة في أي عمق و أي يوم من السنة طرحنا نموذج رياضي للظاهرة

بعد هذا, طرحنا نموذج تحليلي لمحاكاة درجة الحرارة على طول المبادل الحراري, من أجل معرفة درجة حرارة الخروج من المبادل الحراري , ثم قمنا بتحليل التأثيرات لبعض العناصر مثل العمق , القطر , السمك, تدفق الهواء الداخل, و المادة المستعملة في الصنع و طول أنبوب على درجة حرارة الهواء داخل المبادل وفي الأخير قمنا بتطبيق احسن الخصائص للمبادل الحراري على مدينة ورقلة.

الكلمات المفتاحية : مبادل حراري الهواء / الأرض، التبريد، تحديد الأبعاد، المحاكاة

Résumé

Quelque que soit la température de l'air à la surface, L'inertie thermique du sol assure une température stable à certaines profondeurs. Cette propriété peut être utilisée dans la climatisation ou le chauffage en utilisant un échangeur de chaleur (air-sol) enfouis à des profondeurs appropriées, où un courant d'air passe à travers pour une utilisation ultérieure.

Dans cette étude nous avons commencé par une définition détaillée de comportement thermique de ces échangeurs, et pour calculer la température du sol à n'importe quelle profondeur et pour n'importe quel jour de l'année, nous avons réalisé un modèle mathématique.

Ensuite nous avons fait une modélisation analytique pour simuler la température de l'air à la sortie de l'échangeur. Puis nous avons analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir: la profondeur, le diamètre, l'épaisseur, le débit d'air injecté, la matière de conception et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur enterré. En fin nous appliquent la bonne caractéristique de l'échangeur de chaleur donne la région de Ouargla

Mots clés : échangeur enterré air/sol, rafraîchissement, dimensionnement, simulation

Abstract

At any temperature of the air at the surface, the thermal inertia of the earth ensures a stable temperature at depth. This property can be used in the air conditioning or heating using a heat exchanger (air-earth) buried at appropriate depths, where a stream of air passes through it for later use

In this Work we started with a detailed definition of the thermal behavior of these exchangers, and to calculate the temperature for the earth to any depth and any day of the year, we made a mathematical model.

Then we made an analytical model to simulate the air temperature at the outlet of the heat exchanger for all the length, then we analyzed the influence of some parameters, namely depth, diameter, thickness, the flow of air injected, the design and the length of the in tube at the temperature of air into exchanger temperature In the last we did apply best characteristics for the exchanger thermal on city of Ouargla

Keywords : earth heat exchanger air / ground, cooling, dimensioning, simulation.