



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

MECIDI Oujedane

Le : dimanche 26 juin 2022

Analyse des principaux paramètres influençant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré

Jury :

Mr	Mohamed Said CHEBAH	Pr	Université de Biskra	Président
Mr	Foued CHABANE	MCA	Université de Biskra	Examineur
Mr	Abdelhafid MOUMMI	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2021-2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Dédicace

Je tiens à dédier cet humble travail à :

Mes très chers parents qui veillent sans cesse sur moi avec leurs prières et leurs

Recommandations. Que dieu les protège

Mes chers frères et sœurs

*(abdenour, abdelkader, sabrina, Ikram, mona, ihsene, RaouneK) pour leur appui et leurs
encouragements permanents, et leur soutien moral*

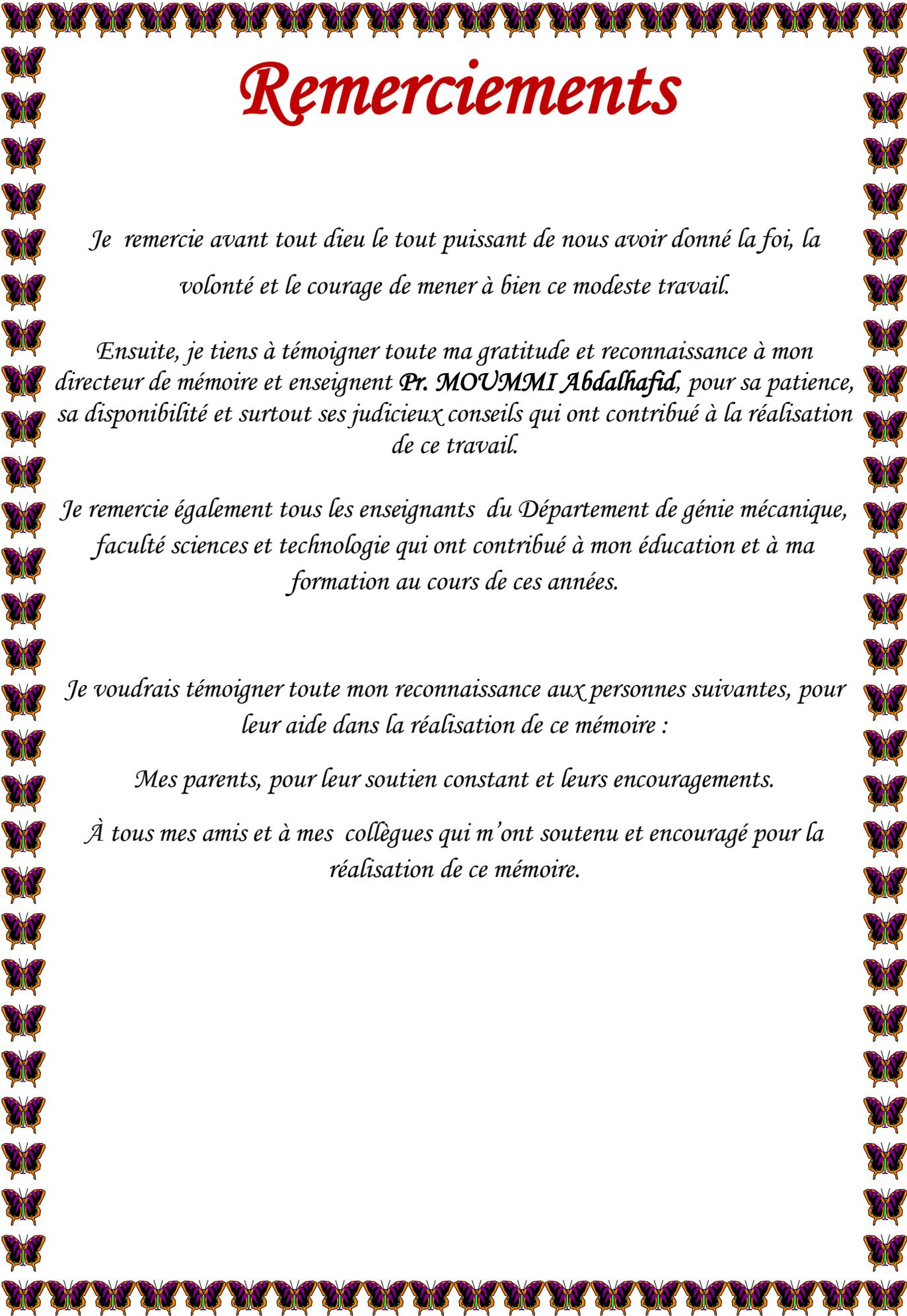
Toute ma famille Mecidi et Seksaf

*Mes collègues et mes meilleurs amis avec lesquels j'ai partagé des moments de joies tout au
long de mon cursus*

(Nour, Rajaa, Wafaa, Imen, Salwa, Ali, Imed, Tofa, Walid)

Toute la promotion 2022.

Et à tous ceux qui sont proches à mon cœur.



Remerciements

Je remercie avant tout dieu le tout puissant de nous avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Ensuite, je tiens à témoigner toute ma gratitude et reconnaissance à mon directeur de mémoire et enseignant **Pr. MOUMMI Abdalhafid**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à la réalisation de ce travail.*

Je remercie également tous les enseignants du Département de génie mécanique, faculté sciences et technologie qui ont contribué à mon éducation et à ma formation au cours de ces années.

Je voudrais témoigner toute mon reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

À tous mes amis et à mes collègues qui m'ont soutenu et encouragé pour la réalisation de ce mémoire.

Nomenclature

Symboles	Désignation	unité
m	Débit massique	Kg/s
T	Température	°C
R	Résistance thermique de la paroi	(m.k°)/W
R	Résistance thermique convective entre l'air et le tube	(m.k°)/W
R	Résistance thermique totale par unité de longueur	k°/W
U	Conductance thermique globale entre l'air et le sol	W/k
Cp	Chaleur massique de l'air	J/(kg.k°)
Z	Profondeur en dessous de la surface du sol	m
C	Capacité calorifique massique du sol	J/(kg.°k)
T	Température minimale	C°
T	Température d'air ambiant	C°
T	Température de l'air à l'entrée	C°
T	Température maximale	C°
T	Température de l'air à la sortie	C°
r	Rayon intérieur du tube enterré	m
r	Rayon extérieur du tube enterré	m
r	Rayon de la couche adiabatique du sol	m
h	Coefficient d'échange par convection de l'air	W/m².K
Nu	Nombre de Nusselt	[]
Pr	Nombre de Prandlet	[]
Re	Nombre de Reynolds	[]
V	Vitesse d'air moyen à l'intérieur de l'échangeur air/sol enterré	m/s
D	Diamètre intérieur du conduit échangeur enterré	m

Nomenclature

S	Surface d'échange	m ²
L	Longueur de l'échangeur	m
Cs	Capacité calorifique du sol	J/(Kg.k°)
Ci	Capacité thermique	J/(k.m ³)
Xi	Teneur de sol en constituant <i>i</i>	m ³ /m ³
X	Teneur en eau	m ³ /m ³
R	Rayon du tube PVC	m
t ₀	Jour qui a la température maximale durant l'année	jours
t	jour de l'année qui varie de 1 jusqu'à 365	jours

Lettre grecque	Désignation	unité
Φ	flux thermique	W
λ	Conductivité thermique	W/m.°K
μ	Viscosité dynamique de l'air	Kg/m.s
α	Diffusivité thermique	m ² /s
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
δ	Profondeur de pénétration de chaleur	m

Nomenclature

Indice	Désignation
sol	Sol
tube	tube
air	air
cv	convection
gaine	gaine
itot	totale
min	minimale
air- amb	air ambiant
air-e	Air entré
max	maximale
air-s	air sortie
1	extérieur
eau	eau
Tube_sol	Tube, sol
Tube-air	Tube, air

Liste des Figures

N° de la figure	Désignation	Chapitre	N° de la page
Figure 1	Schéma de principe d'un échangeur air/sol enterré	I	5
Figure 2	Variation de la température du sol durant toute l'année	I	6
Figure 3	Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes profondeurs	I	7
Figure 4	Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour différents diamètres (Z = 05 m)	I	7
Figure 5	Flux thermique d'un échangeur air/sol en fonction de la longueur de la gaine, du débit volumique et du diamètre de la gaine	I	8
Figure 6	Evolution annuelle de la température en surface et en profondeur, pour un cycle de moyenne de 11°C et d'amplitude crête de 25°C	I	9
Figure 7	Solution exacte de la variation de température dans le sol	I	11
Figure 8	variation de la température à l'intérieur du sol dont la température est constante à la surface	I	12
Figure 9	Variation de la température de l'air le long du tube pour la 200 ^{ieme} journée de l'année	I	12
Figure10	Variation en fonction de la longueur de l'échangeur de la température de l'air simulée, calculée et mesurée	I	13
Figure11	Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol	I	14
Figure12	Echangeur air/sol enterré installé à l'université de Biskra	I	14
Figure13	Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur	I	14
Figure1	Conductivité thermique de quelques types sols en fonction de la teneur en eau	II	26
Figure2	Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes diffusivité thermique	II	27
Figure1	Structure du modèle de l'échangeur air/sol	III	31
Figure2	Evolution de la température ambiante maximale et minimale annuelle dans la région de Biskra	III	32
Figure3	Organigramme calculant la température amb	III	33

Liste des Figures

Figure4	Variation de la température de l'air en fonction du temps pour la région de Biskra	III	34
Figure 5	Organigramme pour calculer la température de sol	III	35
Figure6	Organigramme pour calculer la température de sortie de l'air dans l'échangeur	III	37
Figure1	Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps, pour différents types de sol dans le cas où la profondeur $z = 03$ mètres	IV	41
Figure 2	Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol limon argileux-sableux ($\rho=1800$ kg/.m ³ , $\lambda= 1.5$ W/m.K , $C_p=1340$ J/kg.K)	IV	42
Figure 3	Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol argileux ($\rho=1450$ kg/m ³ , $\lambda= 1.25$ W/m.K , $C_p=1450$ J/kg.K)	IV	42
Figure 4	Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol sableux humide ($\rho=1750$ kg/.m ³ ; $\lambda= 0.58$ W/m.K , $C_p=1000$ J/kg.K)	IV	43
Figure 5	Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol sableux sec ($\rho=1650$ kg/m ³ , $\lambda= 0.27$ W/m.K, $C_p=805$ J/kg.K)	IV	43
Figure 6	Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol gypseux ($\rho=2400$ kg/m ³ , $\lambda= 0.51$ W/m.K , $C_p=1090$ J/kg.K)	IV	44
Figure 7	Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différentes matières de construction du tube échangeur enterré, cas d'un sol limon argileux-sableux à une profondeur de 03 m, dont le débit d'air injecté = 180Kg/h ($V=4.5$ m/s), $T_{\text{entrée}}= 40$ °C pour le 15 ^{ème} jour du mois de juillet	IV	45
Figure 8	Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différents débits d'air injectés, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110$ mm) enterré à une profondeur de 03	IV	46

Liste des Figures

	m, $T_{\text{entrée}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le 15 ^{ième} jour du mois de juillet		
Figure 9	Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différents diamètres, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC enterré à une profondeur de 03 m, débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5\text{m/s}$), $T_{\text{entrée}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le 15 ^{ième} jour de mois de juillet	IV	47
Figure10	Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différentes température d'entrée d'air, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110\text{ mm}$) à une profondeur de 03 m, avec un débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5\text{m/s}$)	IV	48
Figure11	Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur, pour différentes profondeurs, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110\text{ mm}$), débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5\text{m/s}$), $T_{\text{entrée}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le 15 ^{ième} jour du mois de Juillet	IV	49
Figure12	Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différentes valeur du rayon du sol, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110\text{ mm}$), à une profondeur de 03 mètres, débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5\text{m/s}$), $T_{\text{entrée}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le 15 ^{ième} du mois de Juillet	IV	50
Figure13	Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur, cas d'un sol limon argileux-sableau, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110\text{m}$), à une profondeur de 03m, débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5\text{m/s}$), $T_{\text{entrée}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le 15 ^{ième} jour du mois de juillet	IV	51
Figure14	Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur, pour différentes diffusivités thermiques du sol, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110\text{m}$), à une	IV	52

Liste des Figures

	profondeur de 03 mètres, débit d'air injecté =180 Kg/h,(V=4.5m/s), $T_{\text{entrée}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le 15 ^{ième} jour du mois de juillet		
Figure15	Comparaison entre le profile de la température de sortie de l'air numérique et expérimentale (expérience effectuée le 21/05/2013 à Biskra Hamdi [2] , sous les conditions de fonctionnement suivantes : (Ltu-ec= 55 m, en PVC, $\varnothing_{\text{tube}} = 110\text{ mm}$, profondeur = 03 m, sol Limon argilo-sableux, $Q_{\text{air}} = 184.74\text{ kg/h}$ (V = 4 .5m/s)	IV	53
Figure16	Comparaison entre le profile de la température de sortie de l'air numérique et expérimentale (expérience effectuée le 27/05/2013 à Biskra Belloufi [25] , sous les conditions de fonctionnement suivantes : (Ltu-ec= 53 m, en PVC, $\varnothing_{\text{tube}} = 110\text{ mm}$, profondeur = 03 m, sol Limon argile, $Q_{\text{air}} = 184.74\text{ kg/h}$ (V = 4 .5m/s)	IV	54
Figure17	Comparaison entre le profile de la température de sortie de l'air numérique et expérimentale (expérience effectuée le 21/04/2013 à Biskra Benabdi [26] , sous les conditions de fonctionnement suivantes : (Ltu-ec= 47 m, en PVC, $\varnothing_{\text{tube}} = 110\text{ mm}$, profondeur = 03 m, sol Limon argile, $Q_{\text{air}} = 164.21\text{ kg/h}$ (V = 4 m/s)	IV	54

Liste des Tableaux

N° du tableau	Désignation	Chapitre	N° de la page
Tableau 1	Données météorologiques de la ville d'Adrar	I	10
Tableau 2	Nature et propriétés physiques de quelques types de sols	I	10
Tableau 3	Caractéristiques des tubes	I	12
Tableau 4	Caractéristiques du sol	I	12
Tableau 1	Température maximale et minimale du 15 ^{ième} jour de chaque mois durant une année	III	32
Tableau 2	Propriétés thermo-physiques pour différentes natures du sol	III	34
Tableau 3	Propriétés thermo-physiques du tube échangeur enterré	III	36
Tableau 4	Propriétés thermo-physiques de l'air	III	36

❖ Sommaire

❖ Remercie

❖ Dédicace

❖ Liste des figures

❖ Liste des tableaux

❖ Nomenclature

Introduction générale 1

Chapitre I : Étude Bibliographique

I.1 Introduction4

I.2. L'échangeur air sol 4

I.2.1. Définition 4

I.2.2 Principe de fonctionnement 4

I.3 Principaux travaux de recherche6

I.4 Conclusion16

Chapitre II : Étude Théorique

II.1 Introduction18

II.2 Modèle de température extérieure d'air ambiant 18

II.3 Température de l'air dans le tube 19

II.4 Modèle de la température de sortie d'air 22

II.5 Modèle de la température du sol 22

II.6 Paramètres du dimensionnement..... 22

II.6.1 Propriétés de l'air véhiculé dans l'échangeur enterré 22

Sommaire

II.6.1.1 Le débit d'air dans les canalisations	23
II.6.1.2 Vitesse de l'air dans le conduit échangeur air/sol.....	23
II.6.2 Conduit échangeur enterré	23
II.6.2.1 Longueur des conduits	23
II.6.2.2 Nombre et diamètre des tubes	23
II.6.2.3 Distance entre les tubes	24
II.6.3 La profondeur d'enterrement	24
II.6.4 Nature du sol et son taux d'humidité	24
II.6.4.1 Capacité calorifique du sol C_s	25
II.6.4.2 Conductivité thermique du sol λ_{sol}	25
II.6.4.3 Diffusivité thermique du sol	26
II.7 Autres paramètres de dimensionnement	26
II.7.1 Rugosité intérieure des tubes	26
II.7.2 Nature des tubes	27
II.7.3 La géométrie de l'échangeur	27
II.7.4 Le rayonnement solaire et la surface du sol.....	27
II.8 Conclusion	27

Chapitre III : Simulation Numérique

III.1 Introduction	30
III.2 Modélisation numérique.....	30
III.2.1 Modélisation de la température extérieure d'air ambiant	31
III.2.2 Modélisation numérique la température du sol	33
III.2.2.1 Hypothèses du modèle	34

Sommaire

III.2.3 Modélisation numérique la température de sortie d'air 35

III.2.3.1 Hypothèses du modèle 37

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1 Introduction..... 39

IV.2 Température du sol..... 39

IV.2.1. Effet de la nature et type du sol 39

IV.2.2 Effet de la profondeur d'enfouissement..... 40

IV.3 Température de sortie d'air 43

IV.3.1 Effet de la nature du tube échangeur enterré..... 43

IV.3.2 Effet du débit d'air injecté dans l'échangeur 45

IV.3.3 Effet du diamètre du tube échangeur 46

IV.3.4 Effet de la température ambiante de l'air à l'entrée 47

IV.3.5 Effet de la profondeur 48

IV.3.6 Effet du rayon du sol 49

IV.3.7 Effet de la longueur de l'échangeur..... 50

IV.3.8 Effet de diffusivité-thermique du sol 51

IV.4 Comparaison quelques résultats expérimentaux 52

IV.5 Conclusion 54

Conclusion Générale 56

Références Bibliographique 59

❖ Résumé

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Selon des études statistiques récentes, les pays en développement connaissent une croissance démographique très rapide, cette croissance exige des besoins énergétiques très importants. A titre d'exemple selon des sources confirmées, un américain consomme 8 fois plus d'énergie qu'un européen et 16 fois plus qu'un africain [1]. Aujourd'hui, l'épuisement annoncé des ressources d'énergie d'origine fossile représentent actuellement 90 % de la consommation mondiale d'énergie, qu'est le principal précurseur du réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets indésirable sur les équilibres physiques, économiques sociaux et politiques de notre planète.

Le recours aux énergies propres pour les besoins énergétiques et le développement économique et social devient incontournable. Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique et énergie géothermique qui présentent une quantité d'énergie assez suffisante. L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et les moins chères du monde entier. Les utilisations de cette énergie sont multiples. Elles vont des utilisations telles que le chauffage des serres, la balnéothérapie, la production de l'électricité et le rafraîchissement de l'air.

Spécialement, le rafraîchissement par la géothermie, est une technique utilisée traditionnellement dans notre région de SAHARA, les gens construisent leurs maisons sous sol (les caves) pour rafraîchir les habitas en été. C'est dans ce contexte, qu'on veut développer cette technique traditionnelle avec une étude scientifique approfondie et par des méthodes nouvelles qui nous permettent de l'utiliser convenablement et dans les meilleures conditions dans une société moderne.

Cette technique est l'échangeur air/sol, un système appelé communément « puits canadien » et parfois « puits provençal ». Il consiste à utiliser comme entrée pour la ventilation de la maison, de l'air qui a préalablement circulé dans un tube enterré à une certaine profondeur. La température du sous-sol étant moins variable que celle de l'air extérieur, cela permet d'avoir une entrée d'air plus tempérée. En hiver, l'air est réchauffé avant de pénétrer dans la maison, en été il est rafraîchit. Il s'agit ainsi d'un système de géothermie le plus simple qui soit, avec une consommation électrique réduite à celle du ventilateur utilisée pour la circulation de l'air.

Introduction Générale

Dans ce travail, on va entamer une étude de dimensionnement des principaux paramètres physiques, thermophysiques et géométriques qui contrôle et affecte le fonctionnement de l'échangeur air/sol enterré. A près identification des paramètres intervenant directement dans le comportement dynamique et thermique de l'échangeur, on a employé un modèle mathématique qui permet de prédire et de calculer la température du sol à n'importe quelle profondeur et pour n'importe quelle journée de l'année. Ensuite un modèle analytique a été adopté pour estimer l'évolution de la température de sortie d'air, en fonction de la longueur, pour différentes paramètres qui contrôle et affecte son fonctionnement.

Le présent travail est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre comporte une étude bibliographique concernant les fondements de bases de la technique de rafraichissement par échangeur air /sol enterré et expose une synthèse bibliographique sur quelques travaux disponibles dans la littérature.
- Le second chapitre comporte à l'étude théorique de l'échangeur air/sol, ce chapitre est dédié aux modèles et approches théoriques qui donnent la température de l'air ambiant, la température de sortie de l'air véhiculé à travers l'échangeur et la température du sol en fonction de la profondeur, avec analyse de quelques paramètres physiques de base, influant sur leurs comportements thermiques.
- Le troisième chapitre est consacré au développement d'un code de calcul pour la simulation des principaux paramètres influençant le comportement thermique de l'échangeur enterré par Matlab.9.0.
- Dans le quatrième chapitre un traitement des résultats numériques, avec interprétions et discussions des résultats de la simulation obtenus par Matlab.9.0.

Enfin, une conclusion qui récapitule l'objectif de cette étude, avec les principaux résultats et perspectives sur ce travail.

CHAPITRE I :
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Étude Bibliographique

I.1 Introduction :

La recherche sur les échangeurs air/sol a démarré après le pic pétrolier de 1979 et arrêtée temporairement après le contre-choc de 1985. L'étude des paramètres qui influent sur les performances et le comportement thermiques de ce système a fait l'objet de plusieurs recherches. Cette étude de recherche bibliographique présente une revue synthétisée des études théoriques, analytiques et numériques, ainsi qu'expérimentales qui traitent le côté thermique, où on essaiera de présenter pour chaque travail réalisé, les objectifs de quelques résultats à travers des courbes et des tableaux.

I.2. L'échangeur air sol :

I.2.1. Définition :

L'échangeur air/sol est une nouvelle technologie passive efficace pour économiser de l'énergie qui utilise l'inertie thermique du sol pour assurer le confort thermique à l'intérieur d'un espace occupé [2]. C'est un système souterrain de refroidissement qui consiste à un réseau de tuyaux enterrés à une profondeur raisonnable sous la surface du sol. L'alimentation en air de ventilation passe à travers les tuyaux et la différence de température entre la surface du tuyau et l'air pilote le chauffage / refroidissement de l'air de ventilation. L'échange entre l'air et le tuyau dépend de plusieurs facteurs tels que, la température du sol, la température de l'air, les dimensions des tuyaux, le débit d'air, la profondeur d'enfouissement des tuyaux et les propriétés thermiques du sol et des tuyaux [3].

I.2.2 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un échangeur air/sol enterré EAHE, appelé aussi « puits canadien » consiste à faire passer une partie de l'air neuf par des tuyaux enterrés avant qu'il ne soit acheminé vers le bâtiment, qui peut être réalisé de plusieurs façons :

- En utilisant le vide sanitaire du bâtiment, que l'on aurait rempli de galets de grosses tailles et permettant la circulation de l'air.
- En réalisant un réseau de tuyaux enterrés dans le sol, de 25 à 30 m de long, à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 mètres.[4]

Généralement, à une profondeur située de deux à trois mètres la température du sol est pratiquement constante tout au long de l'année, elle varie entre 10 et 18 °C selon les saisons, alors que l'air extérieur peut varier de -5°C à + 45°C dans la plupart des climats, l'exemple de l'Algérie. Un puits canadien semble une solution évidente pour exploiter cette température

Chapitre I : Étude Bibliographique

constante : l'air, au lieu d'être amené directement de l'extérieur, va circuler dans un collecteur enterré qui se trouve en contact avec le sol pour échanger ses calories. L'objectif étant que l'air à la sortie du collecteur soit très proche à la température du sol, représente sur la **Figure I.1** . [4]

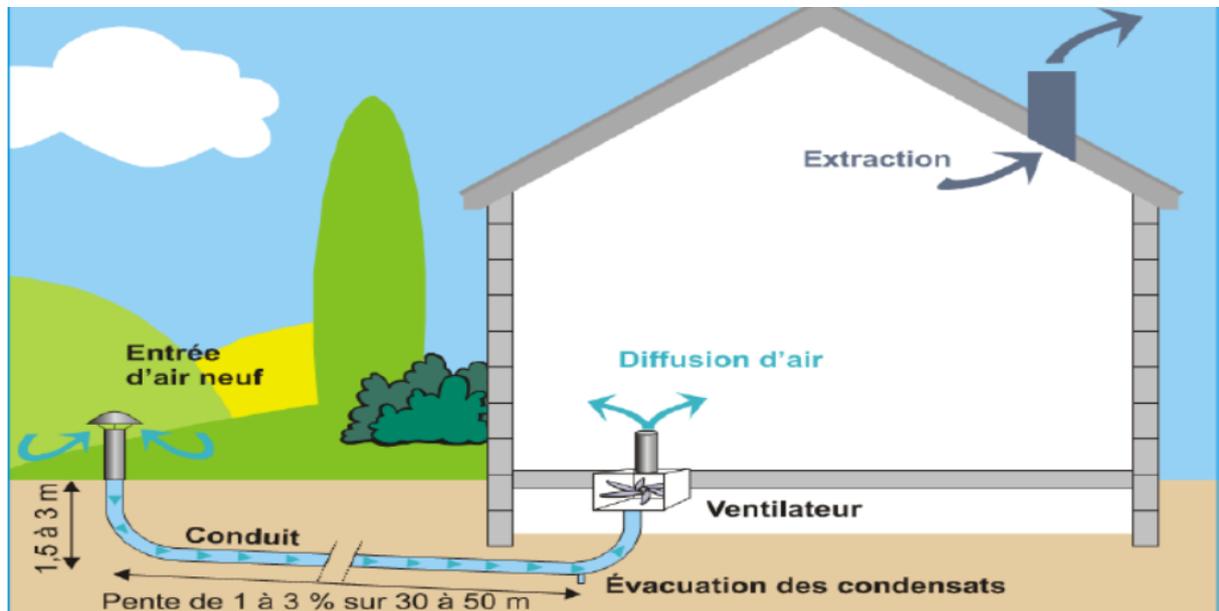


Figure I.1 : Schéma de principe d'un échangeur air/sol enterré [3]

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 extérieur 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. [4]

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 classique en raison des avantages obtenus qui permettent d'obtenir des conditions de vie acceptables, un logement sain et agréable. [4]

En périodes intermédiaires, l'amenée d'air neuf passe soit par le collecteur enterré soit par la prise d'air directe en fonction de la température extérieure, dont la régulation de débit est assurée par une commande automatique, par thermostat ou manuelle, ou la vitesse de l'air dans le conduit ne dépassera pas 3 m/s et le dimensionnement du conduit tiendra compte de la nature du

Chapitre I : Étude Bibliographique

sol, incliné avec une pente d'environ 2% pour évacuer les condensats produits en été, cette pente permet à l'eau éventuelle de couler vers le point d'évacuation. [4]

I.3 Principaux travaux de recherche :

B. Mebarki et al [1], en 2011, ont réalisé une étude sur un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar. Dans le contexte énergétique actuel, les systèmes géothermiques sont fortement développés dans le secteur du bâtiment. Parmi ces systèmes intéressants sur le plan énergétique, on trouve notamment les échangeurs air/sol appelé communément 'puits canadien', une technologie adaptée déjà et employé par nos ancêtres.

Dans le présent travail, une étude des performances d'un échangeur air/sol a été entreprise par voie de modélisation analytique. Ils ont préliminairement validé le modèle de la température du sol **Figure (I.2)** et la température de l'air dans l'échangeur, puis ils ont analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir : la profondeur **Figure (I.3)**, le diamètre et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur **Figure (I.4)**.

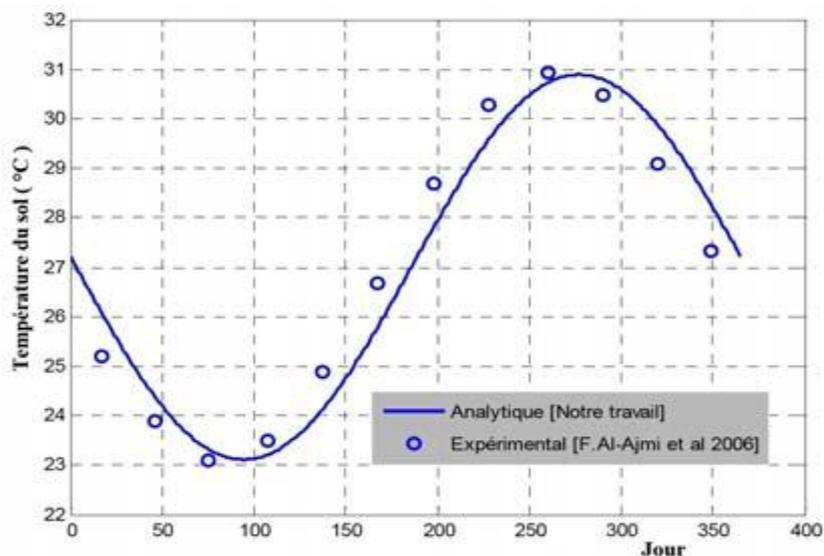


Figure I.2 : Variation de la température du sol durant toute l'année [1]

Chapitre I : Étude Bibliographique

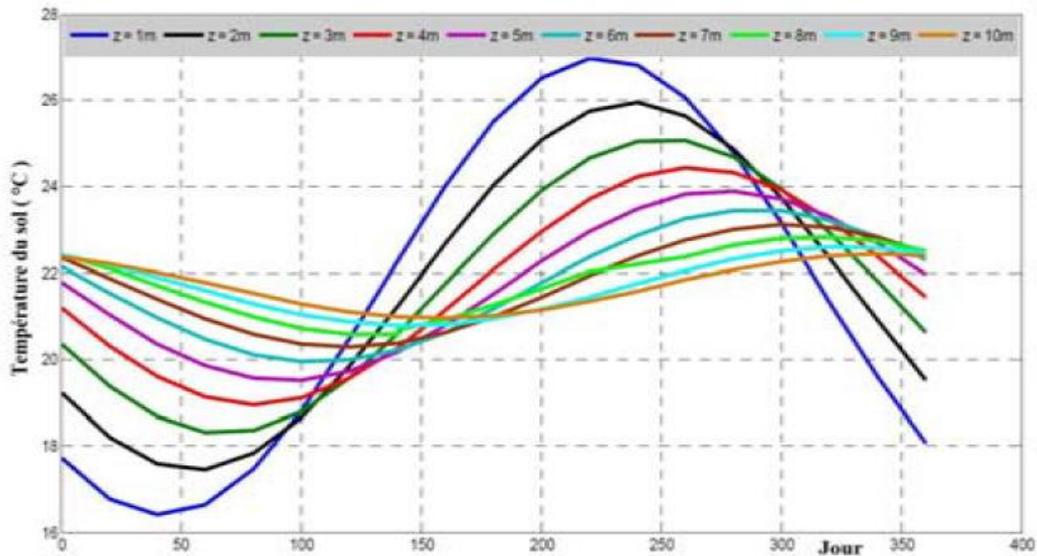


Figure I.3 : Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes profondeurs [1]

L'intérêt de l'échangeur thermique air/sol est majeur, puisqu'il améliore tout au long de l'année, les conditions thermiques recherchées. Qu'il soit utilisé en mode réchauffement en hiver ou refroidissement en été, il intervient de manière efficace sur l'amortissement des amplitudes thermiques.

Ce système favorise un confort d'ambiance pour les individus en limitant les contraintes thermiques. La rentabilité de l'échangeur peut être atteinte, s'il permet d'avoir une ambiance plus homogène en termes de température permettant effectivement de gagner en croissance et en indice de consommation.

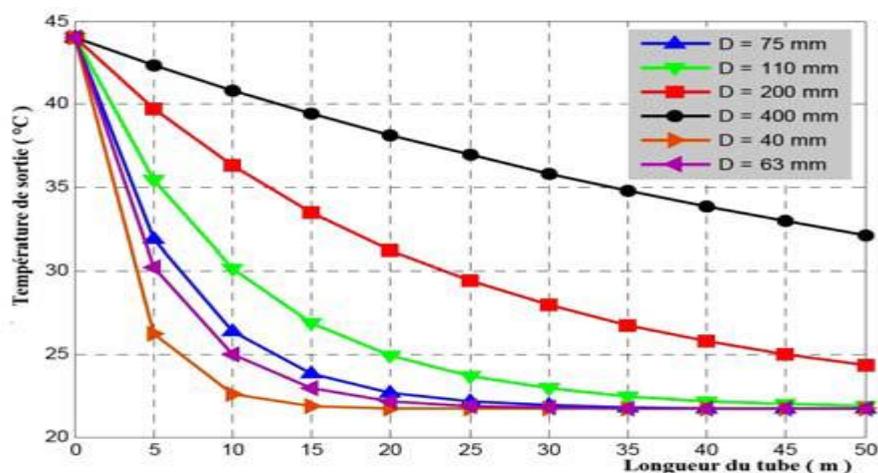


Figure I.4: Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour différents diamètres (Z = 05 m) [1]

Chapitre I : Étude Bibliographique

Un travail de recherche réalisé par **David Amitrano [5]**, en 2006, basé sur des simulations numériques de l'échange thermique par convection forcée dans un tube enterré. Ceci a permis de mettre en évidence l'effet du diamètre, de la longueur, du débit volumétrique et de la différence de température entre le sol et l'air entrant sur le flux thermique fourni par le puits canadien **Figure I.5**.

L'échange de chaleur à l'intérieur d'un tube où circule le fluide caloporteur se fait par convection forcée. Le flux thermique ϕ par unité de surface à travers la paroi du tube est proportionnel à la différence de température entre la surface interne, T_{sol} et externe du tube, T_{air} , et inversement proportionnel à la résistance thermique de la paroi, R . $\Phi = \frac{(T_{sol}-T_{air})}{R}$; avec $(R = R_{cond} + R_{conv})$.

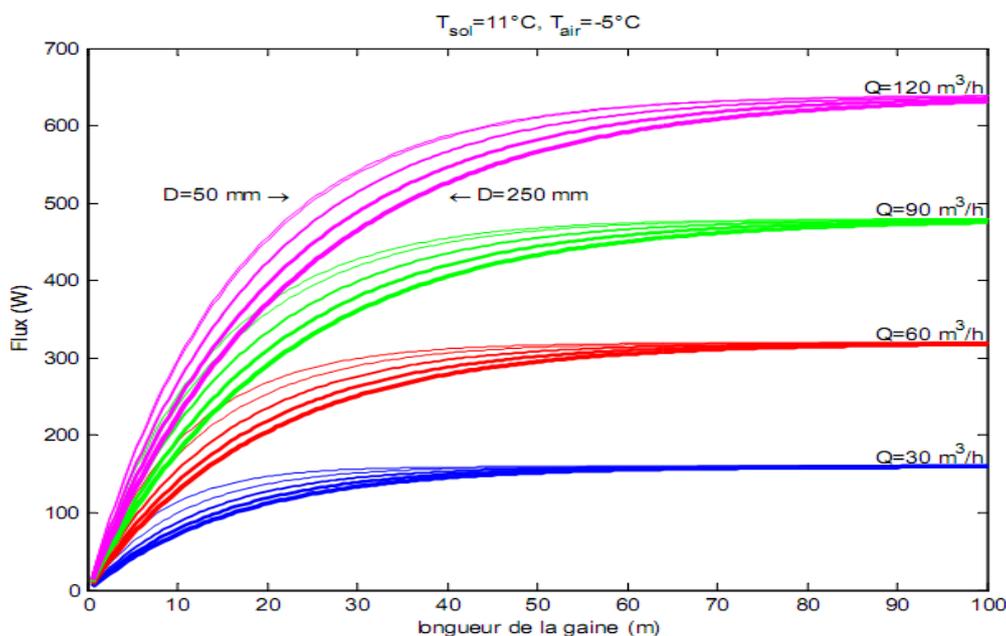


Figure I.5 : Flux thermique d'un échangeur air/sol en fonction de la longueur de la gaine, du débit volumétrique et du diamètre de la gaine [5].

Dans un second temps, il présente des simulations de flux annuel en fonction de la profondeur d'enfouissement de la gaine **Figure I.6**. Ceci permet de mettre en évidence les périodes d'apport de chaleur et/ou de fraîcheur au cours de l'année et la nécessité de coupure aux intersaisons.

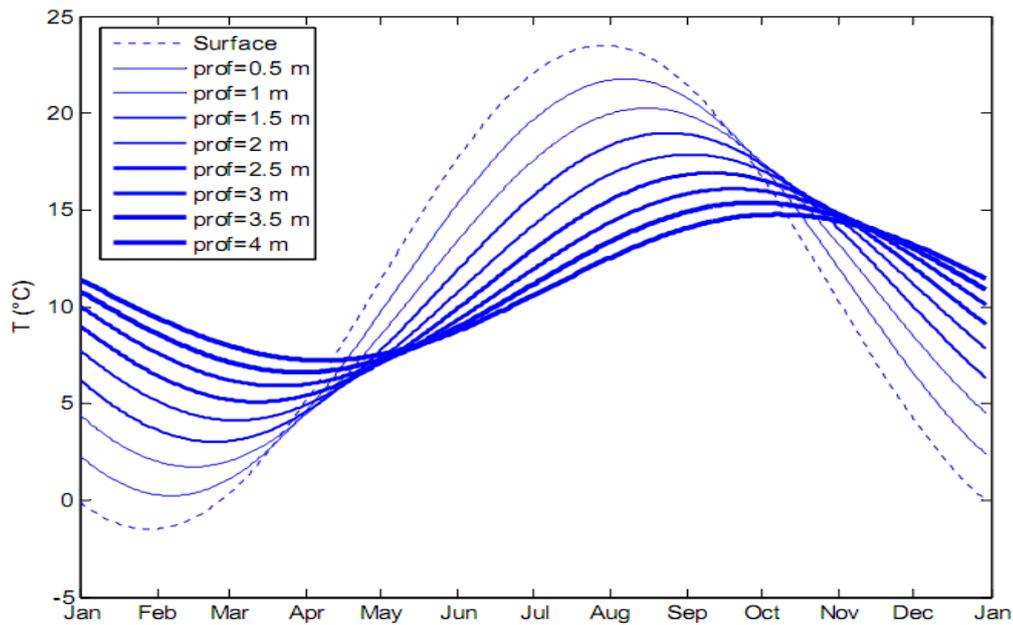


Figure I.6 : Evolution annuelle de la température en surface et en profondeur, pour un cycle de moyenne de 11°C et d'amplitude crête de 25°C [5].

En conclusion, le flux thermique est fonction du débit volumique de l'air dans la gaine et de la différence de température, ce qui est commun à tous les échangeurs. La longueur de gaine nécessaire pour atteindre le flux thermique maximal augmente avec le débit d'air et diminue avec le diamètre de la gaine. L'optimisation sur le seul critère thermique pourra conduire à une augmentation des pertes de charge pour un système de ventilation usuel. Le choix du diamètre et de la longueur et du nombre de gaine devra se faire en prenant en compte des pertes de charges admissibles.

M. Benhammou et al [6], en 2011 ont étudié l'influence de la nature du sol sur la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar. Adrar est située au Sud-Ouest de l'Algérie, est caractérisée par une altitude de 264 m au dessus de la mer, une longitude de 0.17° W, une latitude de 27.53°N et d'un albédo de 35 %. La durée du jour maximum correspondant au solstice d'été est 13 H 46 mn, tandis que la durée du jour minimum correspondant au solstice d'hiver est de 10 H 14 mn. Vu l'indisponibilité des données horaires d'une année entière pour la ville d'Adrar, ils ont utilisé les moyennes mensuelles illustrés dans le **tableau I.1**. Les données de température ambiante ont été obtenues de la station météorologique d'Adrar. Ces données sont les résultats de dix années d'expérience (1974-1984) ce qui leur donne une grande fiabilité. En ce qui concerne les données estimatives du rayonnement solaire, elles ont été obtenues de l'Atlas Solaire d'Algérie.

Chapitre I : Étude Bibliographique

Mois	Température ambiante moyenne (°C)	Rayonnement Solaire moyen (Wh/m ²)
Janvier	12,1	361,67
Février	15,4	445,50
Mars	19,6	561,67
Avril	24,3	639,67
Mai	28,4	661,17
Juin	34,4	683,5
Juillet	36,5	675,08
Août	36,0	626,00
Septembre	31,8	548,83
Octobre	24,5	454,17
Novembre	17,2	369,17
Décembre	13,2	327,67

Tableau I.1 : Données météorologiques de la ville d'Adrar [6]

Afin d'étudier l'influence de la nature du sol et de la période du signal de température et de rayonnement sur la profondeur de pénétration, ils ont pris comme période de signal: un jour, une semaine, un mois et une année. Ils ont choisi trois natures de sol, comme il est indiqué sur le **tableau I.2.**

Nature du sol	Masse volumique (kg/m ³)	Diffusivité thermique (m ² /s)	Capacité calorifique (J.kg/°C)
Argile	1500	9.69×10^{-7}	880
Limon argilo – sableux	1800	6.22×10^{-7}	1340
Sable	1780	3.76×10^{-7}	1390

Tableau I.2 : Nature et propriétés physiques de quelques types de sols [6]

En conclusion, Les résultats ont montré que ce paramètre qui est souvent pris par défaut influe beaucoup sur la profondeur de pénétration annuelle et sur le déphasage thermique.

- Pour l'argile, ils ont trouvé que la profondeur de pénétration annuelle dépasse les trois mètres (3 m), tandis qu'elle est égale à peine deux mètres (2 m) pour le sable.
- De plus, pour une profondeur de 3 m, le déphasage est de trois mois pour le sable, alors qu'il est moins de deux mois pour l'argile. Ils ont constaté également qu'une température du sol comprise entre 17 °C et 24 °C est obtenue pour une profondeur $z = (3/2) \times \delta$
- Une telle profondeur correspond à une distance de 4,60 m dans le sol sableux et à 2,90 m dans le sol argileux, soit une différence de 1,7 m.

Yousef Belloufi [7], en 2012 s'est intéressé à une étude de modélisation d'un échangeur air/sol destiné pour le rafraîchissement des locaux, il a montré que le sol est considéré comme un milieu homogène et invariant, caractérisé par une conductivité thermique λ_{sol} , une masse

Chapitre I : Étude Bibliographique

volumique ρ_{sol} et une capacité calorifique massique C_{sol} . La variation temporelle du taux d'humidité du sol due à l'infiltration d'eau est négligée et aucune nappe phréatique n'est prise en compte sous la zone d'implantation de l'échangeur. Le sol s'apparente donc à un massif semi-infini. Pour attirer le froid maximal contenu dans les premiers mètres du sous-sol à un coût financier faible, il faut étudier la profondeur de pénétration dans le sol pour l'emplacement de l'échangeur air-sol, cela signifie que là où la température reste invariante en fonction du temps et de la profondeur **Figures (I.7) et (I.8)**.

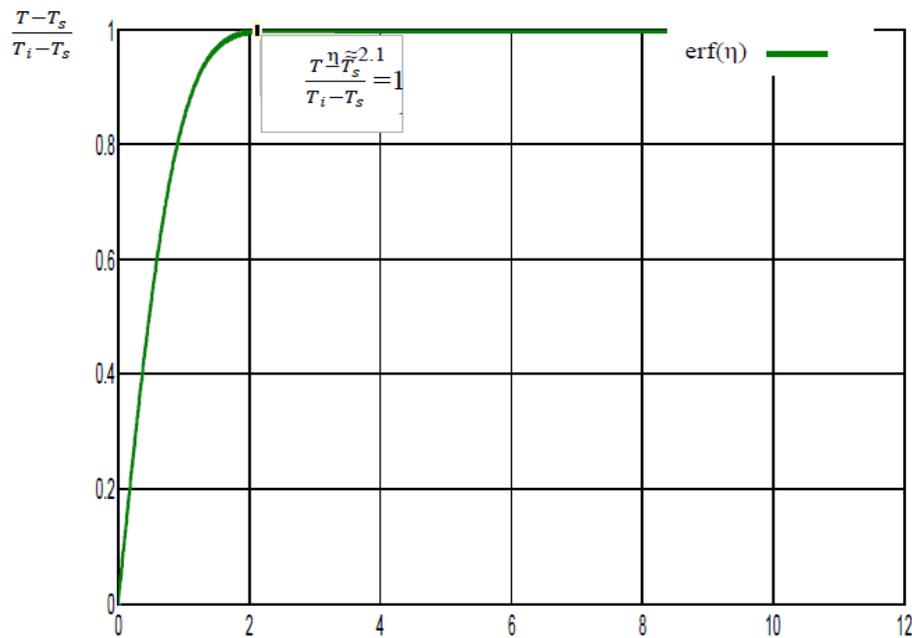


Figure I.7 : Solution exacte de la variation de température dans le sol [7]

$$\theta = \frac{T-T_i}{T_s-T_i} , \quad \eta = \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} , \quad \frac{T-T_i}{T_s-T_i} = [\text{erf}(\eta)]$$

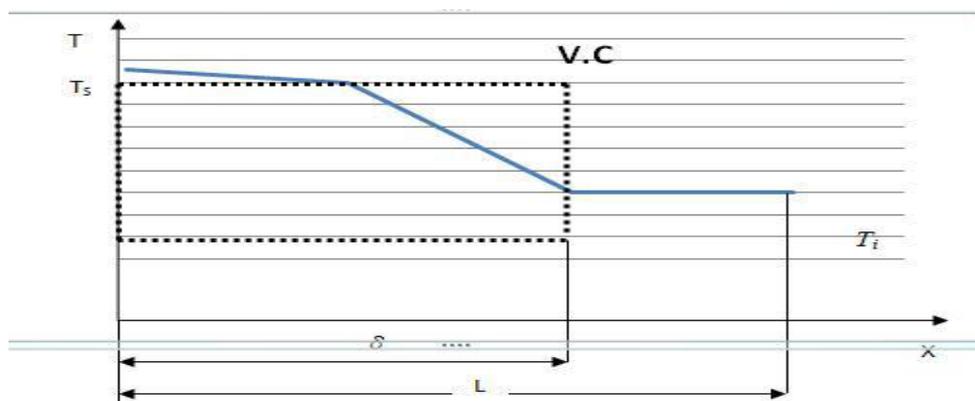


Figure I.8 : variation de la température à l'intérieur du sol dont la température est constante à la surface [7]

Chapitre I : Étude Bibliographique

Mohamed Saadeddine [8], en 2012 a réalisé une étude de description précise des puits provençaux (les échangeurs enterrés) ainsi que leurs composants et leurs façons d'installation. Il a analysé les paramètres physiques qui influent sur les performances thermiques d'un tel dispositif, puis il a proposé un modèle mathématique pour suivre l'évolution de la température du sol à n'importe quelle profondeur et à n'importe quelle journée de l'année, une étude de modalisation numérique est entamée qui a pour objectif de calculer la température de sortie à chaque jour durant la période estivale dans la région de Biskra. Dont les caractéristiques des tubes et du sol sont données d'après les **tableaux (I.3) et (I.4)**.

Conductivité $W.m^{-1}.K^{-1}$	Masse volumique $kg.m^{-3}$	Capacité thermique $J.kg^{-1}.K^{-1}$	Epaisseur m	Longueur m	Diamètre extérieur m	Nombre de tubes	Profondeur moyenne m
0,16	1380	1040	0,005	50	0,205	4	2,5

Tableau I.3 : Caractéristiques des tubes [8]

Conductivité $W.m^{-1}.K^{-1}$	Masse volumique $kg.m^{-3}$	Capacité thermique $J.kg^{-1}.K^{-1}$	Humidité	Exposition au vent
1,5	1800	1200	sec	normal

Tableau I.4 : Caractéristiques du sol [8]

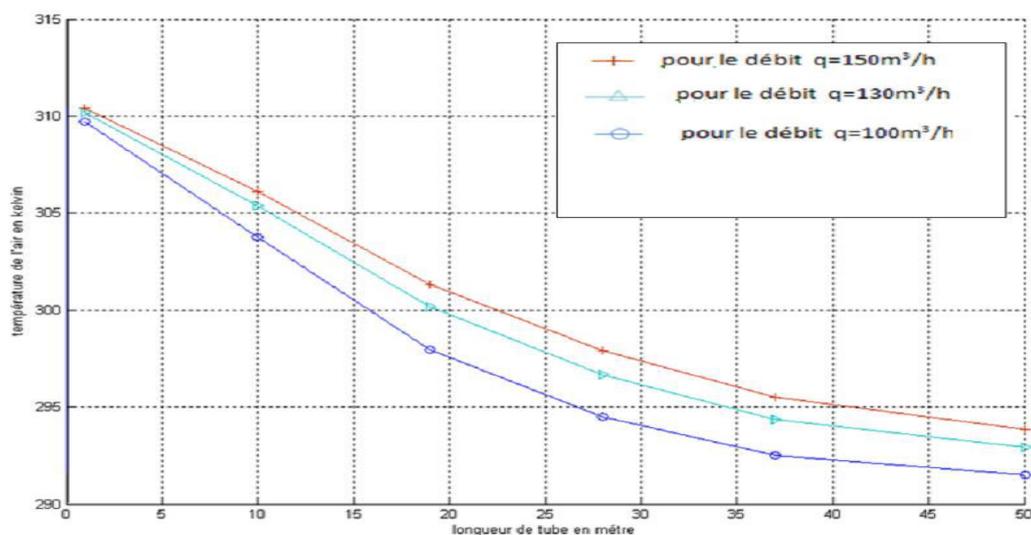


Figure I.9 : Variation de la température de l'air le long du tube pour la 200^{ème} journée de l'année [8]

Chapitre I : Étude Bibliographique

Les courbes montrent l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie pour trois débits différents **Figure (I.9)**, ou il remarque que la température de l'air décroît de l'entrée de l'échangeur jusqu'à la sortie. Les résultats simulés sont comparés à ceux analytiques et expérimentaux réalisés le 28 juin 2009 au Laboratoire de Génie Mécanique LGM de l'Université Mohamed Khider, Biskra **Figure (I.10)**.

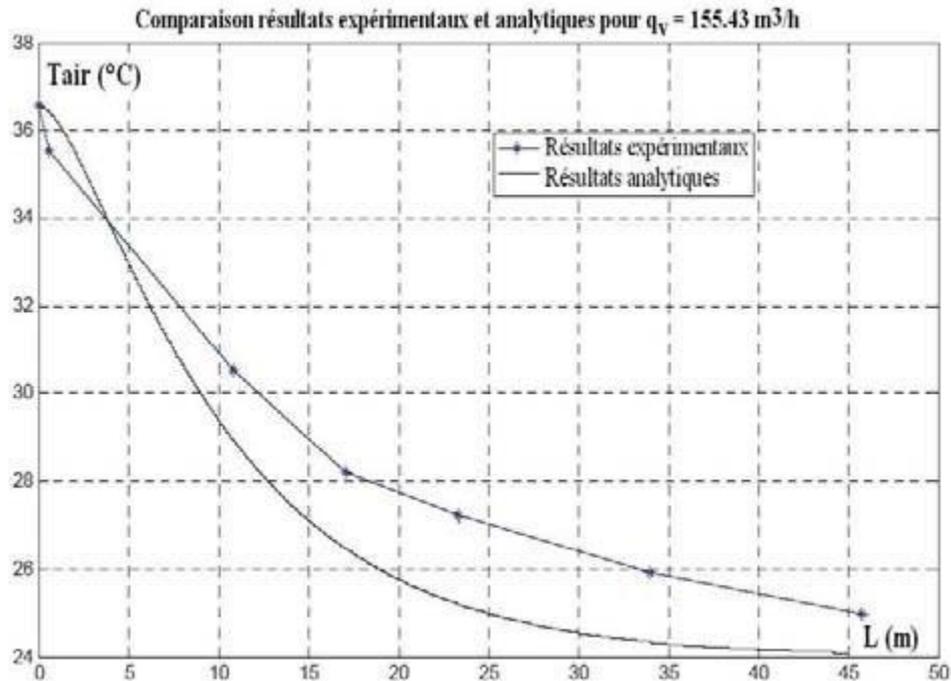


Figure I.10 : Variation en fonction de la longueur de l'échangeur de la température de l'air simulée, calculée et mesurée [8]

N. Moumni et al [9], en 2010 ont menés une étude théorique et expérimentale sur le procédé du rafraîchissement de l'air par la géothermie dans le site de Biskra. L'étude entreprise, concernant le rafraîchissement par la géothermie, constitue un projet pilote de démonstration d'une technique qui est jusqu'à présent non exploitée dans notre pays **Figure I.11**. Cette technique a pour support technique un échangeur air/sol enterré dit 'puits canadien' installé au niveau de l'université de Biskra pour déterminer les principaux paramètres qui influent sur les performances de l'échangeur air/sol et sur la température de l'air à la sortie.

Chapitre I : Étude Bibliographique



Figure I.11 : Echangeur air/sol enterré installé à l'université de Biskra [9]

Dans ce travail, ils ont mené en premier lieu, une étude théorique pour l'établissement d'un modèle qui traduit le mieux l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction des différents paramètres structurels conceptuels et d'utilisation. En deuxième étape, les résultats théoriques sont comparés avec ceux obtenus expérimentalement **Figure (I.12)**

Le dispositif utilisé pour le rafraîchissement, consiste à utiliser de l'air ambiant qui a préalablement cédé sa chaleur au sol à travers un échangeur tubulaire enterré à une certaine profondeur.

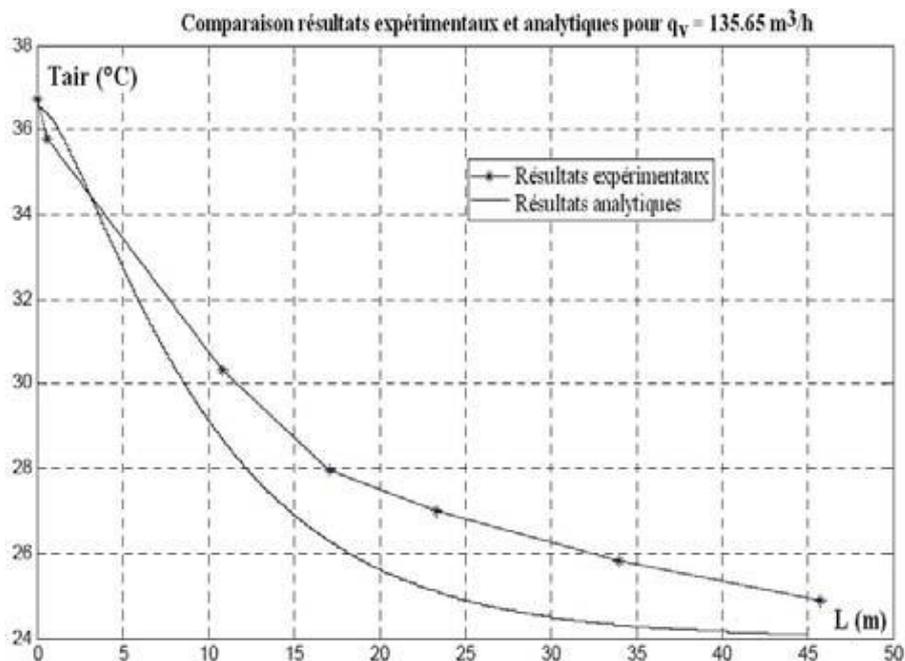


Figure I.12 : Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur [9]

Chapitre I : Étude Bibliographique

En conclusion, les résultats expérimentaux par comparaison à ceux analytiques ont permis de conclure que le modèle présenté pourra être amélioré. En effet expérimentalement la température du fluide continue à chuter avec la longueur de l'échangeur et le régime thermique est loin d'être établi.

Mihalakakou et al [10], en 1995 en Irlande ont étudié le potentiel de chauffage d'un échangeur air sol à un seul tube ainsi qu'avec de multiple tubes parallèles. Un modèle numérique précis a été utilisé pour étudier la performance thermique dynamique du système pendant la période hivernale à Dublin. Le modèle a été bien validé avec un ensemble de mesures expérimentales. Ils ont montré, au cours de cette étude, que l'efficacité thermique de l'échangeur air/sol enterré augmente avec sa longueur et son diamètre. Ils ont aussi montré que les performances du système de récupération dépendent aussi de la profondeur d'enterrement de l'échangeur. Toutefois il existe une profondeur optimale au-delà de laquelle le système de récupération de l'énergie thermique du sol atteint une valeur maximale qui dépend de la nature même du sol.

Misra et al [11], ont réalisé une étude numérique sur les échangeurs de chaleur air/sol, basée sur un modèle qui a été développé par CFD avec le solveur FLUENT 6.3, pour étudier l'influence de la nature du sol enveloppant le tube enterré sur les performances thermiques de l'échangeur géothermique. Pour cela, ils ont utilisé trois types de sol de différentes conductivités thermiques 0,52 W/m.K, 2 W/m.K et 4 W/m.K respectivement. L'échangeur air/sol utilisé est composé d'un tube en PVC de 10 cm de diamètre et 60 m de longueur, enterré dans le sol à une profondeur de 3,7 m. La température du sol à la profondeur de l'enfouissement de l'échangeur est 300,2 K et la vitesse de l'air à l'intérieur du tube est de 5 m/s. Les résultats obtenus montrent que, l'augmentation de la vitesse de l'air détériore la performance thermique de l'échangeur air sol. Ils ont obtenu pour le régime stationnaire une différence de température de l'ordre de 18,8 °C, par contre, pour le régime transitoire et après 24 H de fonctionnement continu, cette différence diminue jusqu'à 16,6 °C pour une valeur de conductivité thermique du sol de l'ordre de 0,52 (W/m.K). Les performances thermiques de ce système avec un plus grand diamètre de tube diminuent davantage que celles d'un système avec un plus petit diamètre de tube, car il y a moins de turbulence dans le flux d'air à travers le tube, ce qui entraîne moins de transfert de chaleur. D'autre part, ils ont remarqué que l'effet du diamètre du conduit dû à une utilisation prolongée du système sur ses performances thermiques est moindre dans le cas d'un sol avec une valeur de conductivité thermique plus élevée.

Barakat et al. [12], ont étudié l'application d'un échangeur air /sol à l'entrée d'une turbine à gaz en 2015, un modèle 1D transitoire a été développé à l'aide de MATLAB. Un modèle

Chapitre I : Étude Bibliographique

mathématique a été validé par rapport à une étude expérimentale menée à la centrale électrique de Damietta, en Caroline du Nord, aux États- Unis. La consommation de carburant a été évaluée et a révélé une baisse de 4,4% lors de l'utilisation de l'échangeur air/sol comme entrée de la turbine à gaz. Ainsi, un tube plus long, un diamètre plus petit, placé en profondeur et une faible vitesse de l'air d'admission donnent une température de sortie plus basse en utilisant l'échangeur air/sol, ce qui augmente la puissance de sortie.

I.4 Conclusion :

A travers cette étude bibliographique consacrée aux différents travaux réalisés par de nombreux chercheurs sur les paramètres qui influent sur les performances et le comportement thermiques de l'échangeur air/sol, il en résulte que leurs performances dépendent essentiellement des paramètres thermo physiques, et géométriques suivants : la conductivité thermique du sol, la nature de même sol , la profondeur d'enfouissement, la vitesse d'écoulement de l'air, la durée de fonctionnement de l'échangeur, le mode de fonctionnement (continu et intermittent) et la géométrie du tube enterré (diamètre et longueur de tube).

Vu l'intérêt scientifique, on a jugé utile d'entamer une étude dans ce sens, qui aura pour objectif de réaliser un algorithme qui permet de prendre en considération ces paramètres intervenant dans les équations gouvernantes le fonctionnement de ce système.

CHAPITRE II :

ÉTUDE THÉORIQUE

Chapitre II : Étude Théorique

II.1 Introduction :

Dans l'échangeur air/sol enterré l'air qui circule dans le conduit se trouve en contact avec les parois intérieures du tube, cette dernière joue le rôle de la source froide pendant la saison chaude estivale et la source froide pendant la saison hivernale. Donc la température de l'air à l'entrée et la sortie du conduit et la température du sol à une profondeur quelconque constituent les conditions aux limites pour l'échangeur.

Dans ce chapitre, on présentera les modèles mathématiques existants qui ont été utilisés dans de nombreuses études de simulation numérique pour suivre l'évolution des profils des températures de l'air ambiant, et la température de l'air dans le tube, du sol et de l'air à la sortie qui décrivent le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré. Aussi identifier les principaux paramètres à considérer pour le dimensionnement d'un échangeur air/sol, qui influent sur le comportement thermique de ce dispositif géothermique.

II.2 Modèle de température extérieure d'air ambiant :

Pour suivre l'évolution de la température de sortie de l'air dans un échangeur air / sol enterré pendant une journée entière, il est important de connaître la variation quotidienne de la température ambiante, qui représente dans notre cas, l'entrée d'air dans l'échangeur géothermique, le comportement thermique dépend sensiblement de ce paramètre en fluctuation continue.

La température ambiante extérieure, également connue sous le nom de température sèche extérieure, est affectée par plusieurs facteurs, tels que le rayonnement solaire incident sur le site, la durée de la journée, la latitude et l'altitude du lieu considéré, les conditions météorologiques environnantes, vent, proximité du site de la mer et des lacs ainsi que des montagnes et de la végétation. [3]

Le modèle de prévision de la température ambiante extérieure au cours d'une année a été élaboré par Chabane Fouad et al. (2016). Elle repose essentiellement sur les données de température minimale T_{\min} et de température maximale T_{\max} , où ces paramètres sont généralement basés sur des relevés expérimentaux réalisés sur plusieurs années par des stations météorologiques dans certains sites géographiques.[13]

L'équation de la température d'air ambiant est donnée par [13] :

Chapitre II : Étude Théorique

$$T_{\text{air-amb}}(t) = T_2 + T_1 \cos \left[\frac{(14-t)}{12} \pi \right] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

T_1 : L'amplitude de la variation de la température de surface du sol calculée comme suit :

$$T_1 = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{2} \quad (\text{II.2})$$

T_2 : la température moyenne annuelle donnée par :

$$T_2 = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \quad (\text{II.3})$$

t : étant la variation de temps en heure.

II.3 Température de l'air dans le tube :

La quantité d'énergie véhiculé par l'air durant sont parcours le long du conduit est décrite par le bilan d'énergie entre deux sections de tube distante de Δx s'écrit [7] :

$$m \cdot c_{\text{pair}} \cdot \frac{DT}{Dt} = \frac{T_{\text{sol}} - T_{\text{air}}(x)}{R_{\text{totale}}} \quad (\text{II.4})$$

$$m \cdot c_{\text{pair}} \cdot \left(\frac{\delta T}{\delta t} + u \frac{\delta T}{\delta x} \right) = \frac{(T_{\text{sol}} - T_{\text{air}}(x))}{R_{\text{sol}} + R_{\text{gain}} + R_{\text{cv}}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

m : Masse d'air $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]$

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

T_{sol} : Température du sol $[^\circ\text{K}]$

$T_{\text{air}}(x)$: Température de l'air à une distance x $[^\circ\text{K}]$

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

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

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

Avec !

$$R_{\text{sol}} = \frac{1}{\lambda_{\text{sol}} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \left(\frac{r_{\text{sol}}}{r_1} \right) \quad (\text{II.6})$$

Chapitre II : Étude Théorique

$$R_{cv} = \frac{1}{\lambda_{tube}.2\pi.\Delta x} \ln\left(\frac{r_1}{r}\right) \quad (\text{II.7})$$

$$R_{gain} = \frac{1}{h_{cv}.2\pi.\Delta x.r} \quad (\text{II.8})$$

Soit : R_{itot} la résistance thermique totale par unité de longueur.

Avec :

$$R_{itot} = \frac{1}{\lambda_{sol}.2\pi} \ln\left(\frac{r_{sol}}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_{tube}.2\pi} \ln\left(\frac{r_1}{r}\right) + \frac{1}{h_{cv}.2\pi.r} \quad (\text{II.9})$$

Où :

r : Rayon intérieur du tube enterré [m]

r_1 : Rayon extérieur du tube enterré [m]

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

λ_{tube} : Conductivité thermique du tube enterré [$\frac{W}{m.^{\circ}K}$]

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

h_{cv} : Coefficient d'échange par convection de l'air [$\frac{W}{m^2.^{\circ}K}$]

* h_{cv} est calculé à partir du nombre de Nusselt, pour un écoulement turbulent dans une section de conduit circulaire, exprimé par [13]:

$$h_{cv} = \frac{Nu.\lambda_{air}}{2.r} \quad (\text{II.10})$$

Où le nombre de Nusselt est donné par la relation suivante :

$$Nu = 0.026Re^{0.8} . Pr^{0.33} \quad (\text{II.11})$$

Avec, Re : est le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_{air}.V_{air}.D}{\mu_{air}} \quad (\text{II.12})$$

Pr : est le nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu_{air}.C_{p_{air}}}{\lambda_{air}} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

V_{air} : Vitesse d'air moyen à l'intérieur de l'échangeur air/sol enterré [$\frac{m}{s}$].

D : Diamètre intérieur du conduit échangeur enterré [m].

Chapitre II : Étude Théorique

μ_{air} : Viscosité dynamique de l'air [$\frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$].

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air [$\frac{\text{W}}{\text{m.}^\circ\text{K}}$].

On considérant le cas d'un transfert thermique stationnaire : $\frac{\delta T}{\delta t} = 0$, par conséquent on aura

d'après l'équation (II.4) [6]:

$$\rho \cdot s \cdot \Delta x \cdot c_{\text{pair}} \cdot u \cdot \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta x \cdot (T_{\text{sol}} - T_{\text{air}}(x))}{R_{\text{tot}}} \quad (\text{II.14})$$

Où : R_{tot} étant la résistance thermique totale par unité de longueur.

$$\frac{1}{(T_{\text{air}}(x) - T_{\text{sol}})} dT = \frac{-1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_{\text{pair}} \cdot u \cdot R_{\text{tot}}} dx$$

$$\text{Ln}(T_{\text{air}}(x) - T_{\text{sol}}) = \frac{-1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_{\text{pair}} \cdot u \cdot R_{\text{tot}}} x + C \quad (\text{II.15})$$

A l'entrée de l'échangeur qui correspond à $x = 0$; $T_{\text{air}}(x) = T_{\text{air-e}}$, $C = \text{Ln}(T_{\text{air-e}} - T_{\text{sol}})$

Avec $T_{\text{air-e}}$ étant la température de l'air à l'entrée de l'échangeur géothermique.

Donc :

$$\text{Ln} \left(\frac{T_{\text{air}}(x) - T_{\text{sol}}}{T_{\text{air-e}} - T_{\text{sol}}} \right) = \frac{-1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_{\text{pair}} \cdot u \cdot R_{\text{tot}}} x$$

$$\frac{(T_{\text{air}}(x) - T_{\text{sol}})}{(T_{\text{air-e}} - T_{\text{sol}})} = \exp \left(\frac{-1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_{\text{pair}} \cdot u \cdot R_{\text{tot}}} x \right) \quad (\text{II.16})$$

La relation (II.12) étant l'expression donnant la température d'un point quelconque de l'air véhiculé dans le tube échangeur enterré:

$$T_{\text{air}}(x) = T_{\text{sol}} + (T_{\text{ae}} - T_{\text{sol}}) * \exp \left(- \frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_{\text{pair}} \cdot u \cdot R_{\text{tot}}} x \right) \quad (\text{II.17})$$

Désignons par $\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_{\text{pair}} \cdot u \cdot R_{\text{tot}}} = \frac{U}{m \cdot c_{\text{pair}}}$

Avec $U = \frac{1}{R_{\text{tot}}}$ étant la conductance thermique globale entre l'air et le sol

Chapitre II : Étude Théorique

II.4 Modèle de la température de sortie d'air :

L'évolution de la température à la sortie de l'air transporté à l'intérieur de l'échangeur air/sol enterré est obtenue à partir du bilan thermique élémentaire à travers une section de longueur dx du conduit échangeur géothermique.

L'intégration de l'entrée à la sortie donne l'expression de la température théorique de l'air à une certaine distance parcourue par le fluide (II.17) [13], qui pour une distance $x=L$, aurait comme valeur :

$$T_{\text{air-s}}(L) = T_{\text{sol}} + (T_{\text{air-e}} - T_{\text{sol}}) \cdot \exp\left(-\frac{U}{m \cdot c_{\text{pair}}} L\right) \quad (\text{II.18})$$

II.5 Modèle de la température du sol :

L'évaluation du potentiel de l'utilisation de l'énergie géothermique de surface à l'aide de la technologie des échangeurs air-sol enterrés exige la détermination des changements au cours de l'année, de la température du sol à différentes profondeurs. Ces variations sont obtenues par des modèles théoriques simples, qui tiennent compte des propriétés du sol et des températures ambiantes. L'évolution de la température extérieure ambiante est également fonction du temps (jour), décrit par une relation semi-empirique comme le montre le paragraphe précédent.

Le modèle de température du sol adopté dans ce travail, considère que le transfert de chaleur au sol est unidimensionnel, se produisant uniquement par conduction dominante, tout en considérant qu'il s'agit d'un milieu homogène. La relation gouvernante la variation de la température dans le sol est donnée par l'expression suivante [13]:

$$T_{\text{sol}}(z,t) = T_2 + T_1 \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (t - t_0) - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right) \right] \quad (\text{II.19})$$

Avec : t_0 : étant le jour qui a la température maximale durant l'année [jours].

t : le jour j de l'année qui varie de 1 jusqu'à 365.

z : la profondeur d'enfouissement de l'échangeur de chaleur air/sol [m].

α : la diffusivité thermique [$\frac{m^2}{\text{jours}}$].

II.6 Paramètres du dimensionnement :

II.6.1 Propriétés de l'air véhiculé dans l'échangeur enterré :

Chapitre II : Étude Théorique

II.6.1.1 Le débit d'air dans les canalisations :

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 charge mécaniques qui doivent être compensées par le ventilateur [14].

II.6.1.2 Vitesse de l'air dans le conduit échangeur air/sol :

La vitesse de l'air ne constitue pas un paramètre indépendant, puisqu'elle découle directement du choix des trois paramètres le nombre et diamètre des tubes, le débit d'air total. Néanmoins, elle impose le régime d'écoulement et influe sur les pertes de charge mécaniques qui doivent être compensées par le ventilateur, afin de limiter les pertes de charge, cette vitesse est le plus souvent maintenue au-dessous de 3 à 4 m/s [15].

II.6.2 Conduit échangeur enterré :

II.6.2.1 Longueur des conduits :

La longueur des conduits détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. En première approximation, le profil de température de l'air dans les tubes est asymptotique. La longueur optimale dépendra du débit dans les canalisations, en effet, la bibliographie montre que pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échangeur ne tempère plus l'air : il atteint sa limite d'efficacité. Par contre, plus le débit augmente et plus cette longueur limite augmente.

Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur, liée à la longueur caractéristique de l'échange thermique, qui peut être obtenue en confrontant le surcoût économique de l'échangeur à l'économie d'énergie apportée par l'allongement des tubes. Par conséquent, il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un ou deux tubes beaucoup plus longs [8].

II.6.2.2 Nombre et diamètre des tubes :

Le nombre et le diamètre des tubes définissent la section totale de tubes par laquelle 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.

Chapitre II : Étude Théorique

En pratique, pour les installations domestiques, le diamètre utilisé se situe entre 16 cm et 20 cm, mais il peut être bien supérieur sur des installations de grande taille. Le nombre de tubes est conditionné par l'espace disponible pour l'installation de l'échangeur. [16].

II.6.2.3 Distance entre les tubes :

Le stockage et l'amortissement thermique du sol sont assurés par le volume du sol situé tout autour de chaque canalisation. L'épaisseur du sol concernée est proportionnelle à la profondeur de pénétration du signal thermique. 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 du 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 thermique du sol. 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 [17]

II.6.3 La profondeur d'enterrement :

La profondeur d'enfouissement influe sur l'échange thermique, par conséquent sur la performance de l'échangeur. Selon les études expérimentales trouvées dans la littérature, la profondeur idéale est variée selon les conditions géographiques et climatiques. Mais d'une manière générale la profondeur varie entre 1 et 4 m.

Profondeur selon la condition de surface :

- Sous bâtiment (isolé) : dès 30 cm.
- Sous terrain ombragé ou végétalisé / humide : dès 80 cm.
- Sous terrain ensoleillé / sec : > 1.5 m [18]

II.6.4 Nature du sol et son taux d'humidité :

La capacité calorifique et la conductivité thermique du sol ont une influence importante sur l'efficacité du système. Elles dépendent de la composition du sol mais aussi de son taux d'humidité et des migrations d'eau à l'intérieur du sol. La capacité thermique du sol

Chapitre II : Étude Théorique

correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau.

L'eau possède une capacité et une conductivité thermiques supérieures à celles des autres constituants du sol. Ainsi, un sol humide emmagasine mieux la chaleur qu'un sol sec et la transmet plus facilement à l'air dans les canalisations de l'échangeur. Cet effet est mis à profit pour augmenter temporairement la performance des échangeurs thermiques air/sol en humidifiant le sol par arrosage [19]

II.6.4.1 Capacité calorifique du sol C_s :

La capacité thermique du sol est la moyenne pondérée de capacités respectives de ses constituants [7] :

$$C_s = \sum X_i \rho_i c_i \quad (\text{II.20})$$

Avec : X_i : La teneur de sol en constituant i ($\frac{m^3}{m^3}$)

ρ_i : Sa masse volumique ($\frac{Kg}{m^3}$)

c_i : Sa capacité thermique ($\frac{J}{K.m^3}$)

II.6.4.2 Conductivité thermique du sol λ_{sol} :

La conductivité thermique du sol λ_{sol} dépend de sa nature et de sa teneur en eau. La courbe suivante présente la variation de la conductivité thermique (λ_{sol}) des différents types de sol en fonction de la teneur en eau (X_{eau}) , **Figure II.1** .[8]

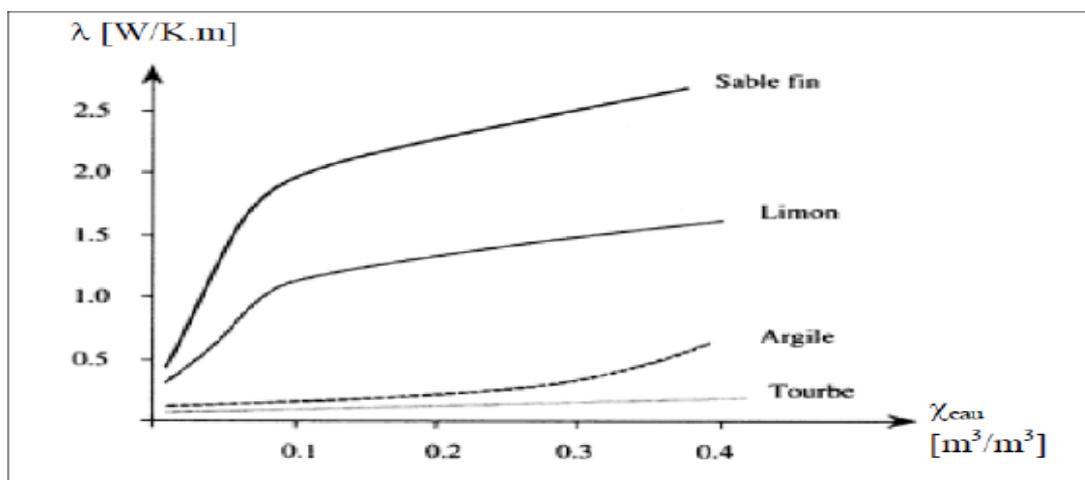


Figure II.1 : Conductivité thermique de quelques types sols en fonction de la teneur en eau [7]

Chapitre II : Étude Théorique

II.6.4.3 Diffusivité thermique du sol :

Parmi toutes les propriétés thermo-physiques, la performance des échangeurs air/sol enterrés est profondément influencée par la conductivité thermique du sol, la chaleur spécifique et la masse volumique. Ces trois propriétés du sol peuvent être exprimées en termes de diffusivité thermique défini par le rapport suivant [20] :

$$\text{Diffusivité thermique } (\alpha) = \frac{\text{Conductivité thermique}(\lambda)}{(\text{Chaleur spécifique}(C_p) * \text{Masse volumique}(\rho))} \quad (\text{II.21})$$

Pour mieux choisir le type de sol, la (**figure II.2**) illustre la variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes diffusivités thermiques. On constate une variation sinusoïdale pour toutes les diffusivités testées, on remarque aussi qu'au fur et à mesure que la diffusivité augmente, la température du sol augmente. Néanmoins et pour ne pas reprendre l'influence du type de sol sur la température de sortie de l'échangeur, nous avons choisi le sable pour notre cas d'étude, puisqu'il assure les performances thermiques qui permettent d'atteindre la température du sol [1].

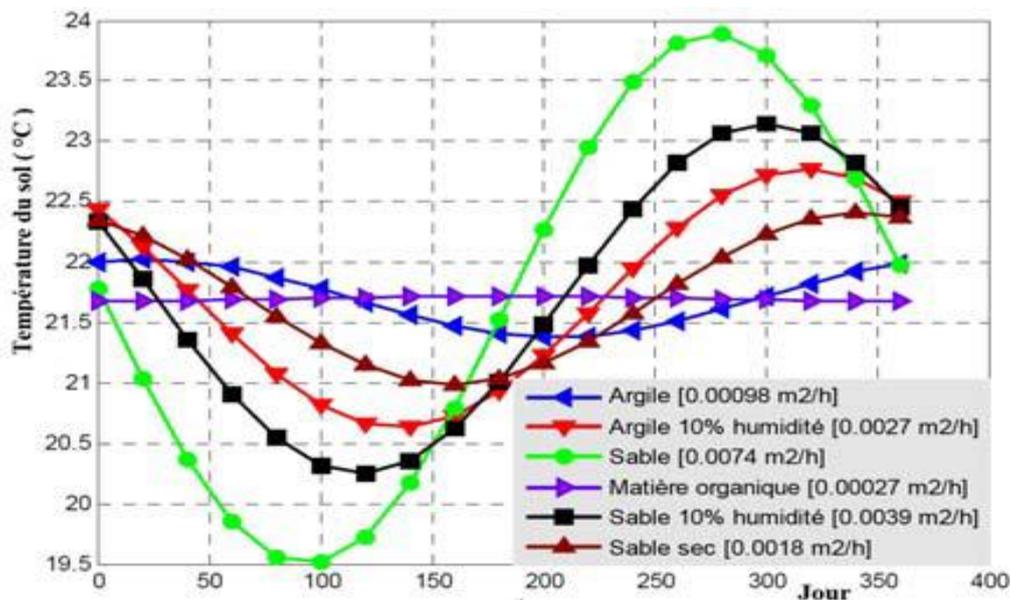


Figure II.2 : Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes diffusivité thermique [1]

II.7 Autres paramètres de dimensionnement :

II.7.1 Rugosité intérieure des tubes :

Chapitre II : Étude Théorique

La rugosité intérieure des tubes favorise le transfert thermique par convection en créant de la turbulence, cependant elle favorise aussi les pertes de charge 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 [21]

II.7.2 Nature des tubes :

La chaleur massique et la conductivité thermique du matériau constitutif des tubes sont généralement négligées dans les modèles consultés. En effet, la faible épaisseur des canalisations réduit fortement la capacité et la résistance thermique globale des tubes, qui influent alors très peu sur le comportement thermique de l'échangeur [2]

II.7.3 La géométrie de l'échangeur :

L'échangeur est généralement constitué d'une nappe de tubes placés parallèlement et regroupés en entrée et en sortie par des collecteurs. Les coudes, les bifurcations induisent des pertes de charge supplémentaires, à éviter dans la mesure du possible [22]

II.7.4 Le rayonnement solaire et la surface du sol :

La surface du sol absorbe le rayonnement solaire selon son coefficient d'albédo : il s'agit d'un apport énergétique majeur dont l'effet sur la température du sol est important, bien que souvent négligé dans les rapports consultés [22]

II.8 Conclusion :

L'étude de modélisation des principaux facteurs influant sur le comportement thermique de l'échangeur air/sol enterré ont été présenté avec un certain détail dans cette partie.

On a exposé de nombreux modèles théoriques qui ont été développés dans la littérature, le premier donne la température de l'air ambiant.

Chapitre II : Étude Théorique

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

Le troisième modèle donne la température du sol, pour toute profondeur et à n'importe quelle journée de l'année. Ce modèle est basé sur les caractéristiques du sol du site et sur la base des données météorologiques.

CHAPITRE III :

SIMULATION NUMÉRIQUE

Chapitre III : Simulation Numérique

III.1 Introduction :

D'après l'étude bibliographique et théorique présentée dans deux premiers chapitres (I et II), il existe trois modèles mathématiques qui décrivent le comportement de la température du sol, de l'air ambiant et de l'air injecté dans l'échangeur enterré.

Ce chapitre est consacré à une étude de simulation numérique réalisée sous l'environnement Matlab 9, où on a pu exploité des modèles qui ont permis d'observer l'évolution en fonction du temps la température ambiante et la températures du sol, ainsi que la température de sortie de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur géothermique, d'autre on s'est intéressé aux principaux paramétrés du dimensionnement durant une journée type de la période estivale, le 15^{ième} jour du mois de Juillet dans la région de Biskra.

III.2 Modélisation numérique:

L'échange thermique entre le sol et l'air circulant dans le conduit dépend de la structure de l'échangeur géothermique enterré, de la température d'entrée de l'air et de la température du sol à proximité des tubes. Si la première température constitue une sollicitation qui peut être fournie par un fichier de données météorologiques, la seconde doit nécessairement être calculée, faute de mesures. C'est pourquoi le modèle réalisé est structuré en deux parties. Une première partie, au calcul de la température en tout point du sol, hors influence de l'échangeur (température du sol non perturbée), qui est utilisée comme condition aux limites du système étudié. Une deuxième partie, constituant le modèle d'échangeur proprement dit, qui consiste au calcul de la température de l'air à la sortie d'échangeur **Figure (III.1) [23]**.

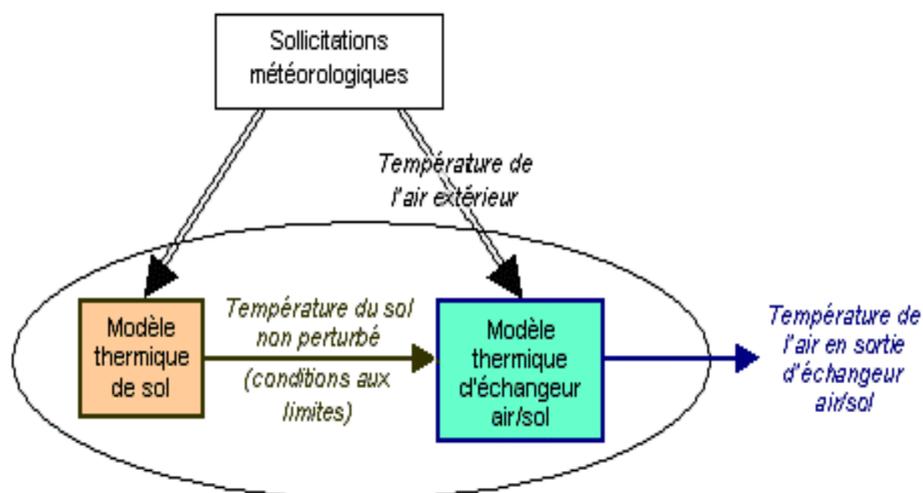


Figure III.1 : Structure du modèle de l'échangeur air/sol

Chapitre III : Simulation Numérique

III.2.1 Modélisation de la température extérieure d'air ambiant :

Dans notre étude de simulation, Matlab a été utilisé pour montrer l'évolution et la variation de la température ambiante, pendant un an en utilisant l'équation (III.1) respectivement pour la région de Biskra.

$$T_{\text{air-amb}}(t) = T_2 + T_1 \cos \left[\frac{(14-t)}{12} \pi \right] \quad \text{(III.1)}$$

T_{max} et T_{min} représentent respectivement la température maximale et minimale du 15^{ième} jour de chaque mois pendant un an. **Figure III.2** et **Tableau III.1**

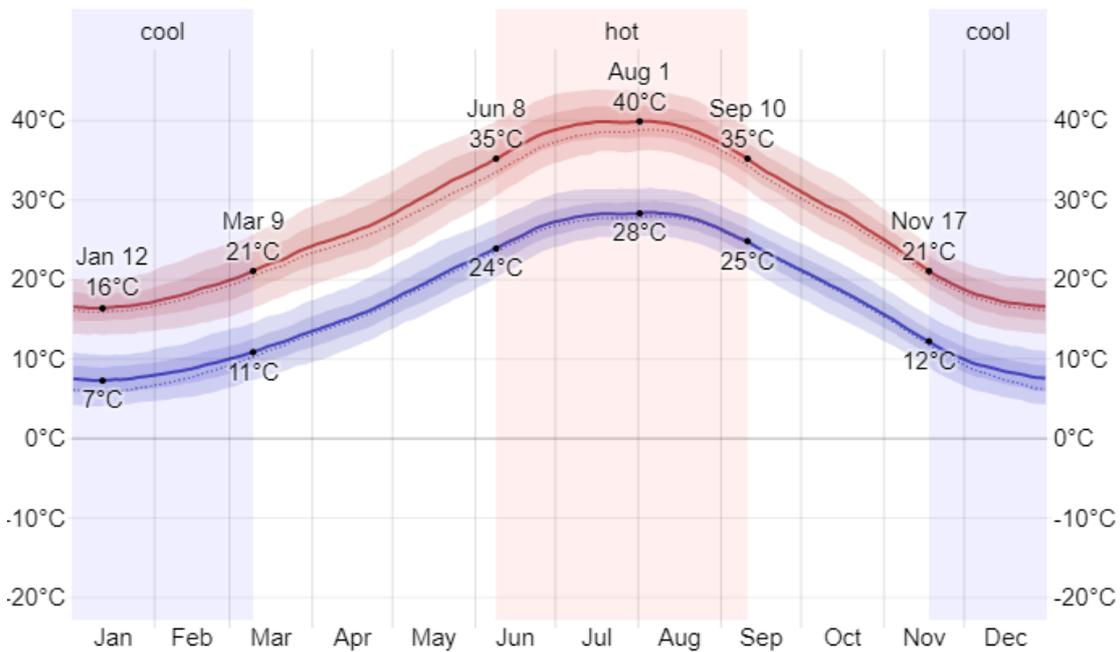


Figure III.2 : Evolution de la température ambiante maximale et minimale annuelle dans la région de Biskra [24]

Average	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
High	17°C	19°C	22°C	26°C	31°C	37°C	40°C	39°C	34°C	28°C	21°C	17°C
Temp.	12°C	13°C	17°C	21°C	26°C	31°C	34°C	34°C	29°C	23°C	17°C	12°C
Low	8°C	9°C	12°C	15°C	20°C	25°C	28°C	28°C	24°C	18°C	12°C	8°C

Tableau III.1 : Température maximale et minimale du 15^{ième} jour de chaque mois durant une année [24]

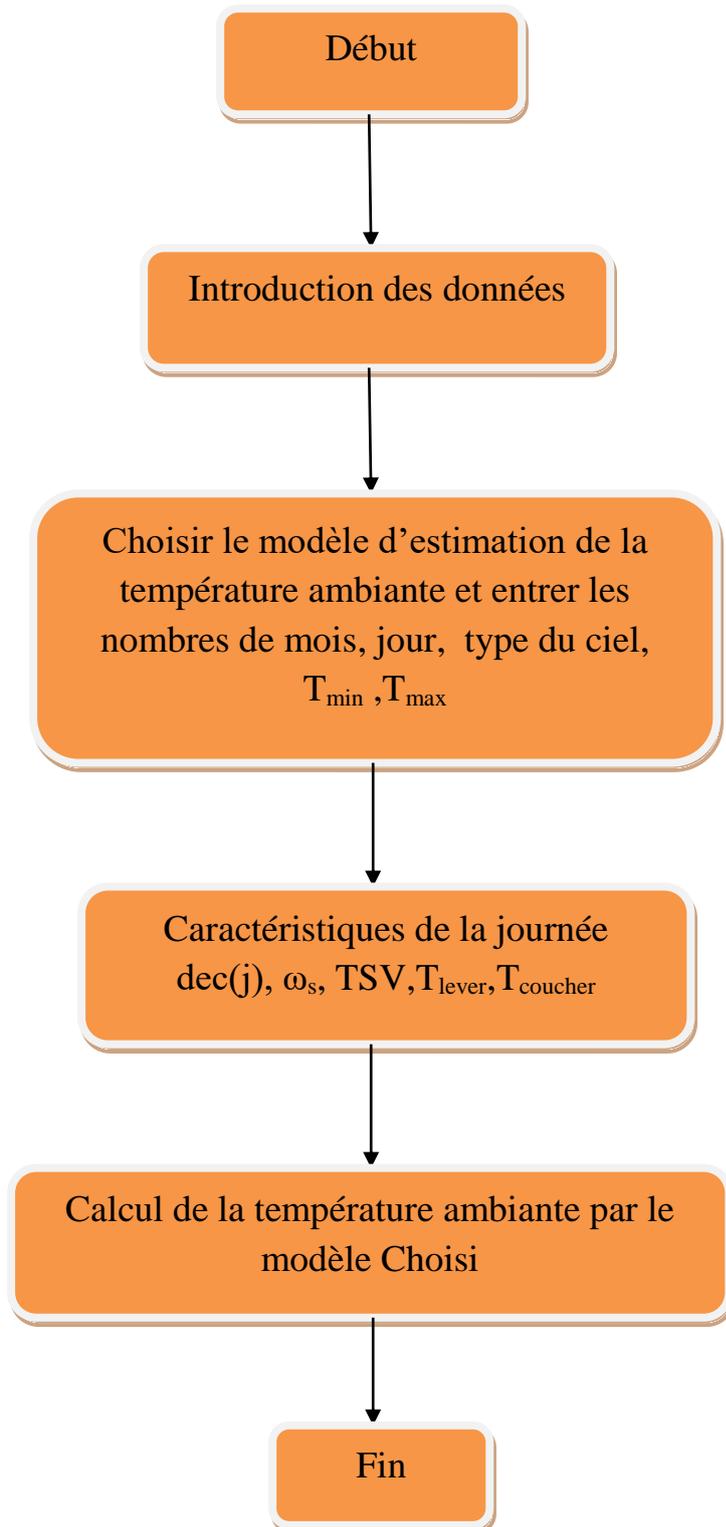


Figure III.3 : Organigramme calculant la température ambiante

Chapitre III : Simulation Numérique

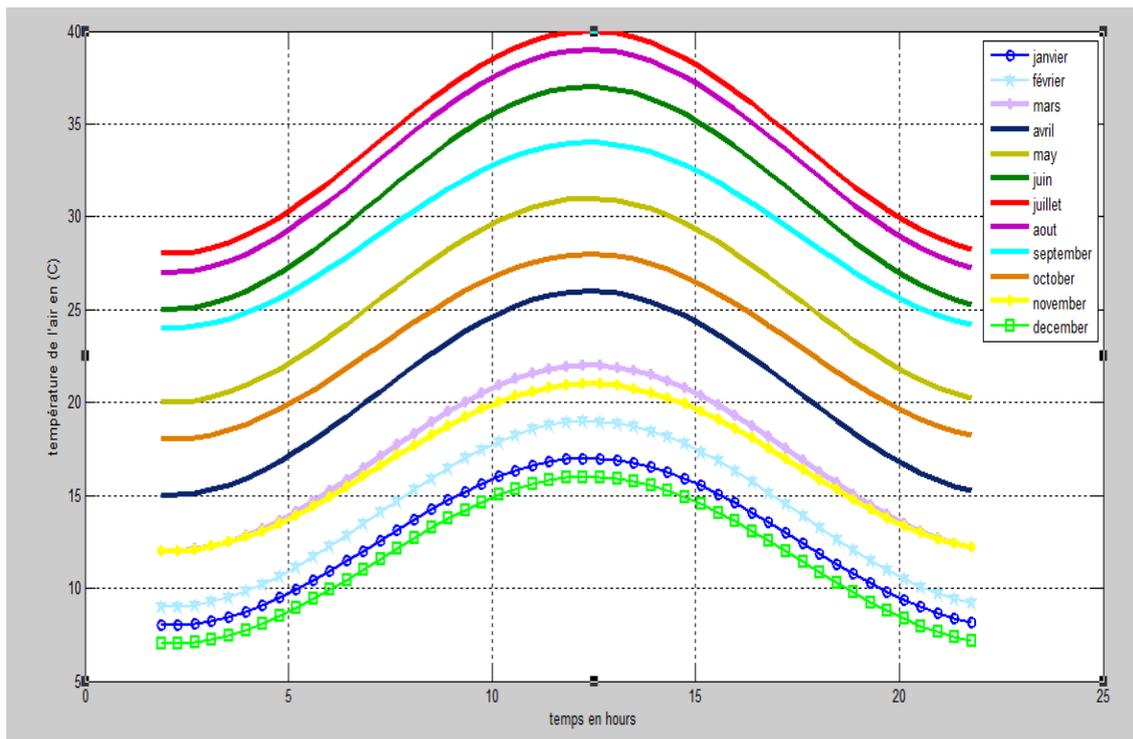


Figure III.4: Variation de la température de l'air en fonction du temps pour la région de Biskra.

III.2.2 Modélisation numérique la température du sol :

De la même façon, pour montrer l'évolution de la température de sol en fonction de la profondeur et du temps (pendant un an), tout en considérant les propriétés thermo physiques du sol **Tableau III.2** et les températures ambiantes du site géographique, on a utilisé l'équation (III.2) :

$$T_{\text{sol}}(z,t) = T_2 + T_1 \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \left[\cos \left(\frac{2\pi}{365} \cdot (t - t_0) - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (\text{III.2})$$

Nature de sol	Conductivité thermique λ_{sol} (W/m.K)	Chaleur spécifique C_p (J/kg.K)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
Limon argilo-sableux	1,5	1340	1800
Sol Sableux sec	0,27	805	1650
Sable humide	0,58	1000	1750
Argile	1,25	880	1450
Gypseux	0,51	1090	2400

Tableau III.2: Propriétés thermo-physiques pour différentes natures du sol [4,7]

Chapitre III : Simulation Numérique

III.2.2.1 Hypothèses du modèle :

En considérant les hypothèses suivantes :

- Le sol est considéré comme un milieu homogène
- Les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique du sol λ_{sol} , la masse volumique ρ et la capacité calorifique massique Cp) du sol sont invariables.
- Le modèle de température du sol considéré est basé sur le phénomène de transfert par conduction thermique dans le sol provenant du signal de température de la surface du sol sous l'effet des conditions météorologiques extérieures.
- Le transfert de chaleur dans le sol est unidirectionnel dans le sens vertical.
- Les changements de la diffusivité thermique (α) du sol est principalement en fonction la nature du terrain, on néglige par conséquent l'effet de la teneur en eau, qui engendre d'éventuels mouvements d'eau entraînant des échanges convectifs à l'intérieur du terrain.

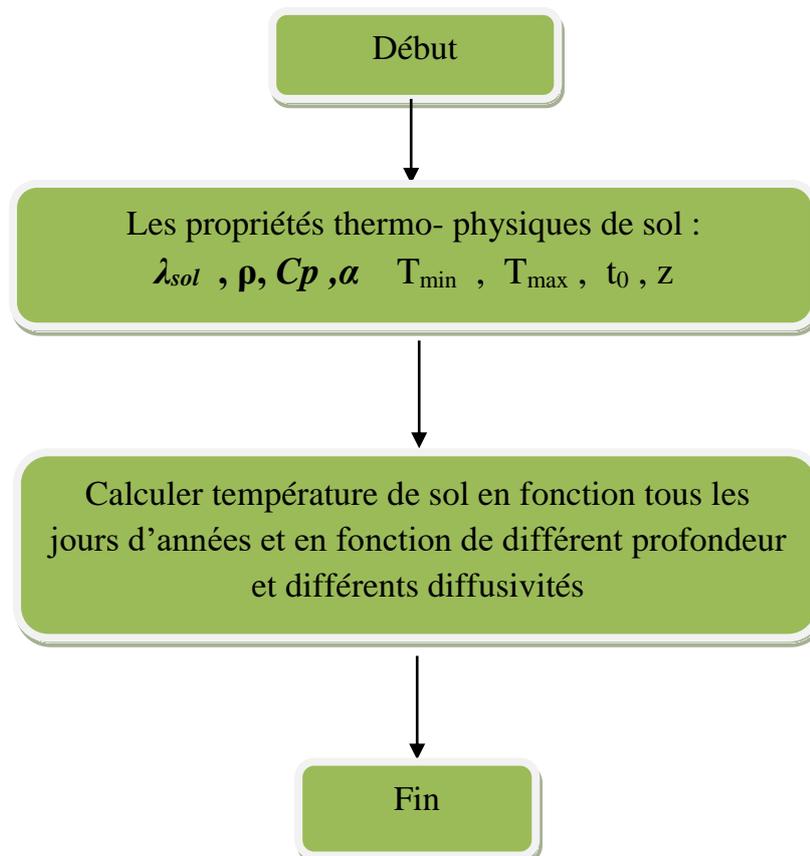


Figure III.5 : Organigramme pour calculer la température de sol

Chapitre III : Simulation Numérique

III.2.3 Modélisation numérique la température de sortie d'air :

Pour suivre l'évolution de la température de sortie de l'air dans l'échangeur air/sol, un modèle théorique est prédit par l'équation (III.3) est adopté dans notre cas :

$$T_{\text{air}(x)} = T_{\text{sol}} + (T_{\text{ae}} - T_{\text{sol}}) * \exp\left(-\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot c_{\text{pair}} \cdot u \cdot \text{Ritot}} x\right) \quad (\text{III.3})$$

Dont l'évolution en fonction de la longueur dépend de la profondeur d'enfouissement et de la nature des matériaux du tube enterré, du diamètre et la longueur, du débit massique débit d'air véhiculé, ou on considéré plusieurs types du sol (diffusivité thermique)...

Les propriétés géométriques et thermo-physiques du tube de l'échangeur géothermique enterré et de l'air comme fluide de travail caloporteur sont données d'après les tableaux (III.3 et III.4) suivants :

λ_{tube} [w/m.k]	λ_{sol} [w/m.k]	r [m]	r_1 [m]	r_{sol} [m]
0,17	1,5	0,11	0,113	0,125

Tableau III.3 : Propriétés thermo-physiques du tube échangeur enterré

λ_{air} [w/m.k]	μ_{air} [kg/m.s]	C_{pair} [J/kg.k]	ρ_{air} [kg/m ³]	V_{air} [m/s]
0,0262	$1,85 \times 10^{-5}$	1006	1,177	4,5

Tableau III.4 : Propriétés thermo-physiques de l'air [13]

III.2.3.1 Hypothèses du modèle :

En considérant que la température de l'air à l'entrée de l'échangeur correspond à la température de l'air extérieur. D'autre part on négligera dans cette étude les échanges thermiques latents tel que l'évaporation ou la condensation d'eau ayant lieu au cours de la circulation de l'air à l'intérieur du tube échangeur.

- La vitesse de l'air est considérée constante tout le long de l'échangeur (air/sol) enterré.
- Les forces de pesanteur sont négligées ;
- L'écoulement est incompressible ($M < 0.3$)
- L'écoulement est en régime stationnaire, $\left(\frac{\delta}{\delta t} = 0\right)$;

Chapitre III : Simulation Numérique

- Les propriétés thermophysiques (ρ , μ , λ , C_p , ...) de l'air et du sol sont supposées constantes.
- La température extérieure du tube est constante, ce qui revient à considérer que (l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangées)
- Le sol est considéré comme étant homogène, par conséquent, les propriétés thermophysiques du sol sont considérées constantes (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique,...etc.).
- Au niveau d'une section, la lame d'air en écoulement est considérée homogène, le coefficient d'échange convectif est supposé constant tout le long du conduit, c'est-à-dire ne dépendant pas de l'évolution longitudinale de la température de l'air mais tout au plus dépendant de la vitesse du flux.
- Les propriétés thermo-physiques de l'air sont considérées constantes (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique,...etc.).

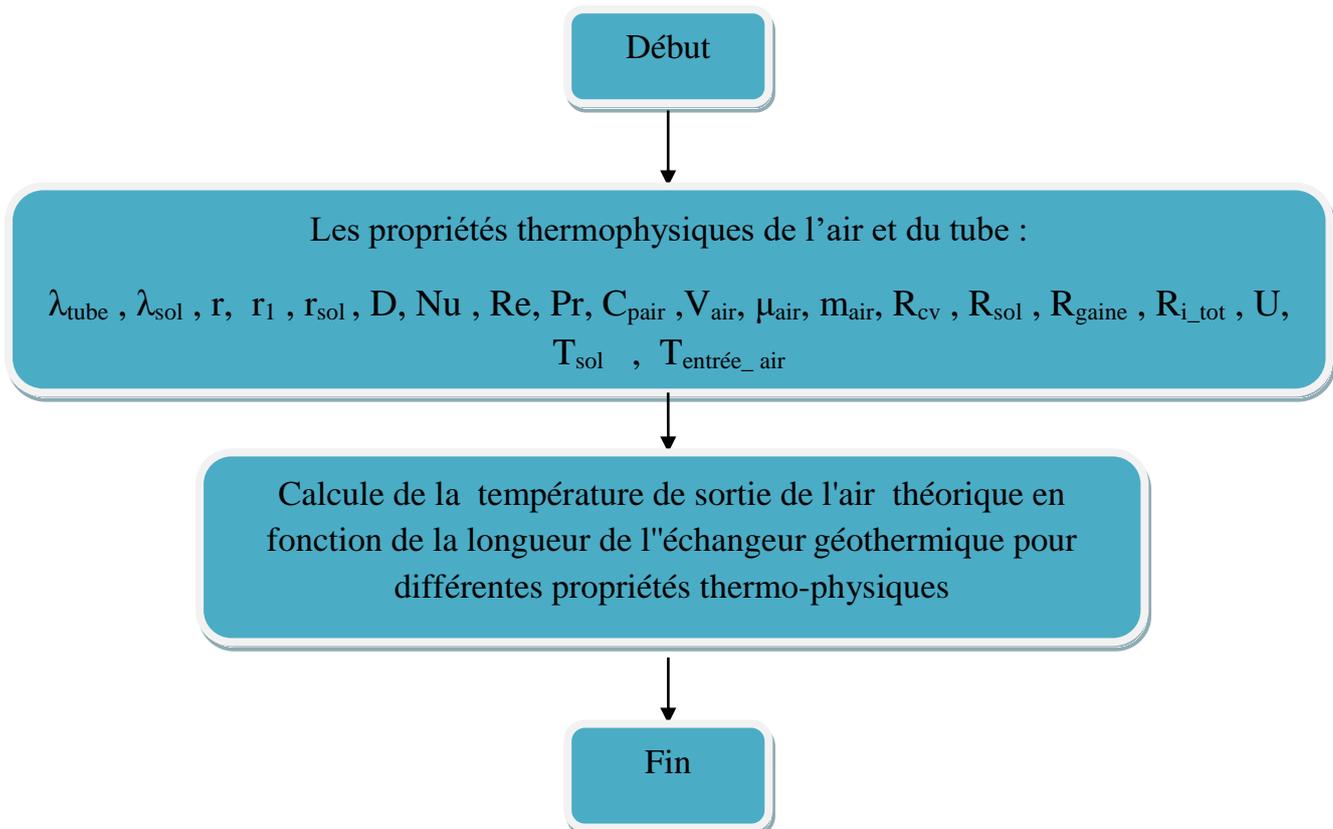


Figure III.6 : Organigramme pour calculer la température de sortie de l'air dans l'échangeur

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation numérique 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 du temps.

Le deuxième est un modèle d'échangeur air/sol qui détermine l'évolution de la température de l'air véhiculé dans le conduit en fonction des paramètres du dimensionnement.

Les conditions aux limites de ce modèle sont : la température de l'air ambiant à l'entrée de l'échangeur et la température de sol qui a été déterminé par le modèle précédent.

CHAPITRE IV :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction :

Comme mentionné dans le chapitre précédent, un code de calcul numérique a été développé et un programme en langage Matlab est élaboré pour dimensionner un échangeur de chaleur air/sol en appliquant des conditions climatiques extrêmes de la région de Biskra.

Ce chapitre présente les différents résultats des modèles mathématiques mentionnés au second chapitre consacré à l'étude théorique sous forme de courbes. En commençant tout d'abord par les profils de températures pour trois textures et natures du sol sont illustrés pour déterminer la profondeur optimale de l'enfouissement du tube échangeur et la nature du sol convenable pour le bon fonctionnement de ce système de rafraîchissement en été et réchauffement en hiver.

Ensuite, on présentera l'influence des différents paramètres thermophysiques et géométriques sur le comportement thermique de l'échangeur air/sol géothermique.

IV.2 Température 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, sont la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique.

Dans cette étude de simulation, nous avons considéré plusieurs diffusivités thermiques du sol, ce qui a permis de suivre la variation de la température du sol pour plusieurs types de sol qui sont les plus répondus en Algérie (**Tableau III.2**) en fonction du temps durant toute l'année. En outre, nous montrons l'influence de la profondeur du sol pour différentes valeurs 01, 02, 03, 04, 05, 06 et 07 mètres respectivement.

IV.2.1. Effet de la nature et type du sol :

La comparaison entre les courbes qui montrent l'évolution de la température en fonction du temps pour trois types de sol (**Figure IV.1**), montre que pour une profondeur de 03 mètres une allure de forme sinusoïdale est constatée pour toutes les diffusivités testées.

On remarque également, que l'allure de la température du sol à faible diffusivité thermique se stabilisent rapidement par rapport aux autres types de sol, comme le gypseux où la diffusivité ($\alpha = 0.19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Ce qui montre que la nature du sol joue un rôle très important dans l'enfouissement et le fonctionnement de l'échangeur air/sol géothermique.

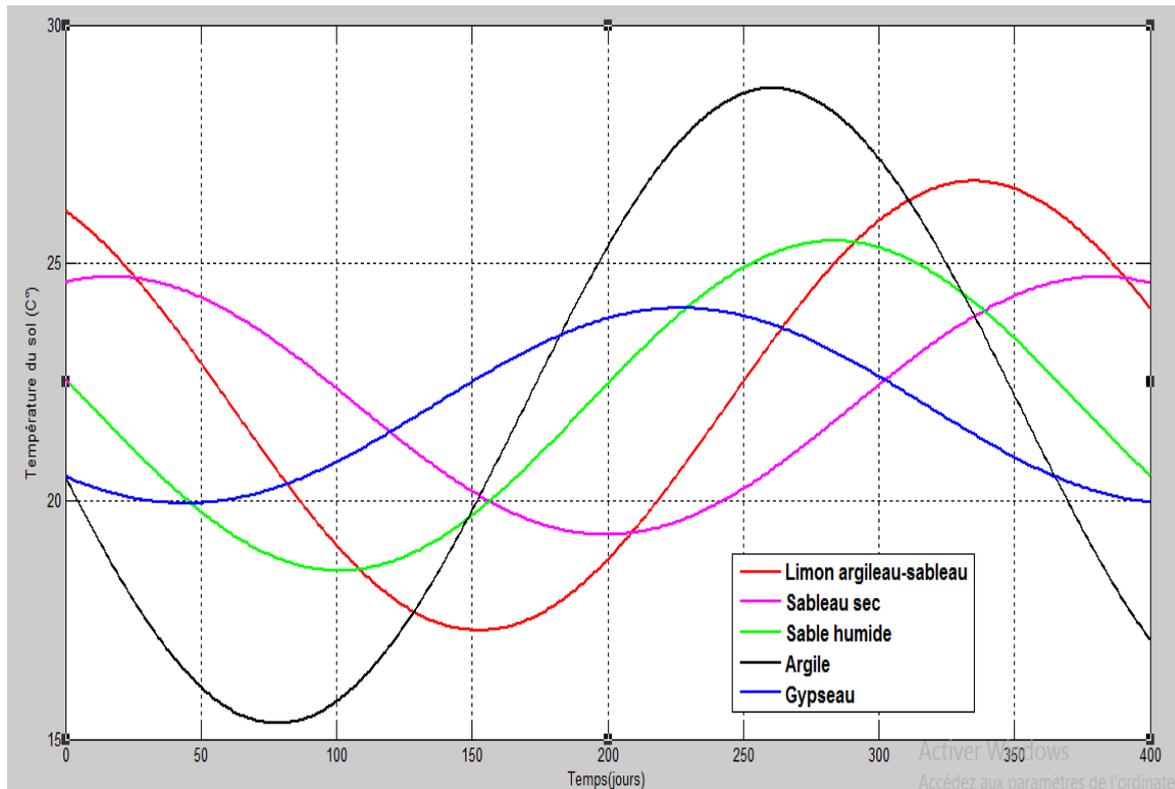


Figure IV.1: Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps, pour différents types de sol dans le cas où la profondeur $z = 03$ mètres.

IV.2.2 Effet de la profondeur d'enfouissement :

Les figures (IV.2) (IV.3) (IV.4) (IV.5) (IV.6) illustrent la variation moyenne annuelle de la température du sol pour trois différents types de sol en fonction de la profondeur d'enfouissement de l'échangeur géothermique, où on a considéré sept (07) valeurs de profondeur 01, 02, 03, 04, 05, 06 et 07 mètres respectivement, dont la simulation numérique du modèle théorique, a permis de suivre l'évolution de la température du sol en fonction du temps, durant une année, pour les différentes profondeurs considérées, montre que les variations suivent une allure sinusoïdale.

Chapitre IV : Résultats et discussion

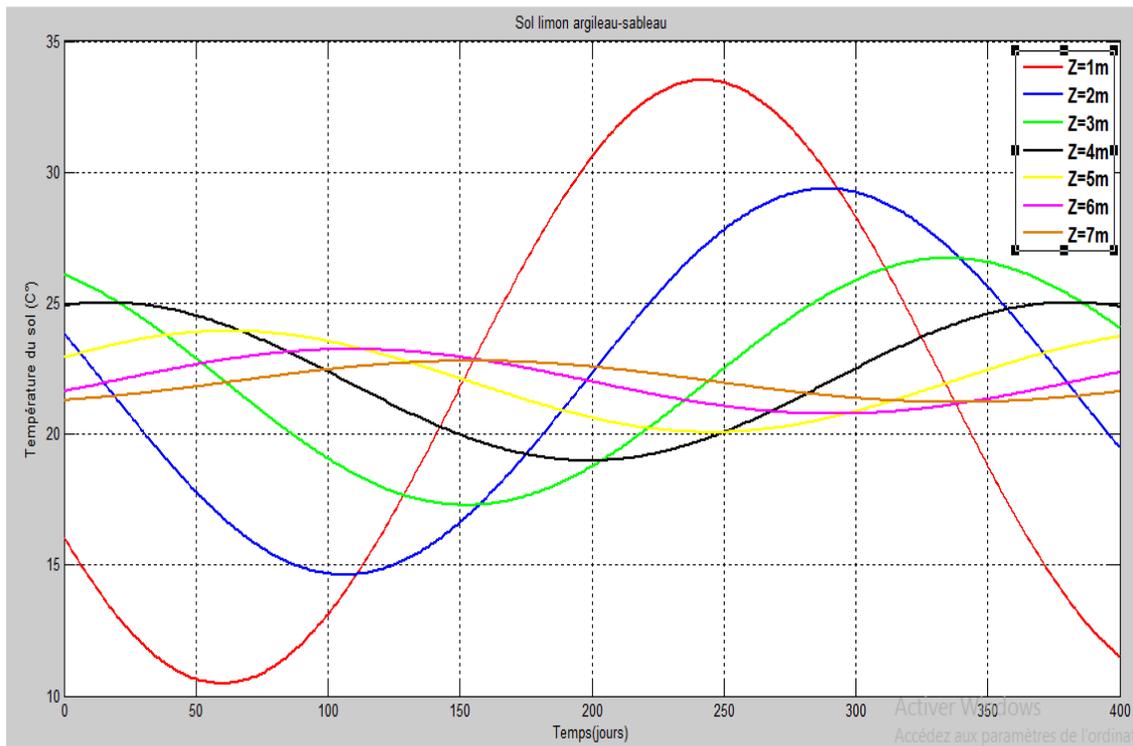


Figure IV.2 : Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol limon argileux-sableux ($\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1.5 \text{ W/m.K}$, $C_p = 1340 \text{ J/kg.K}$)

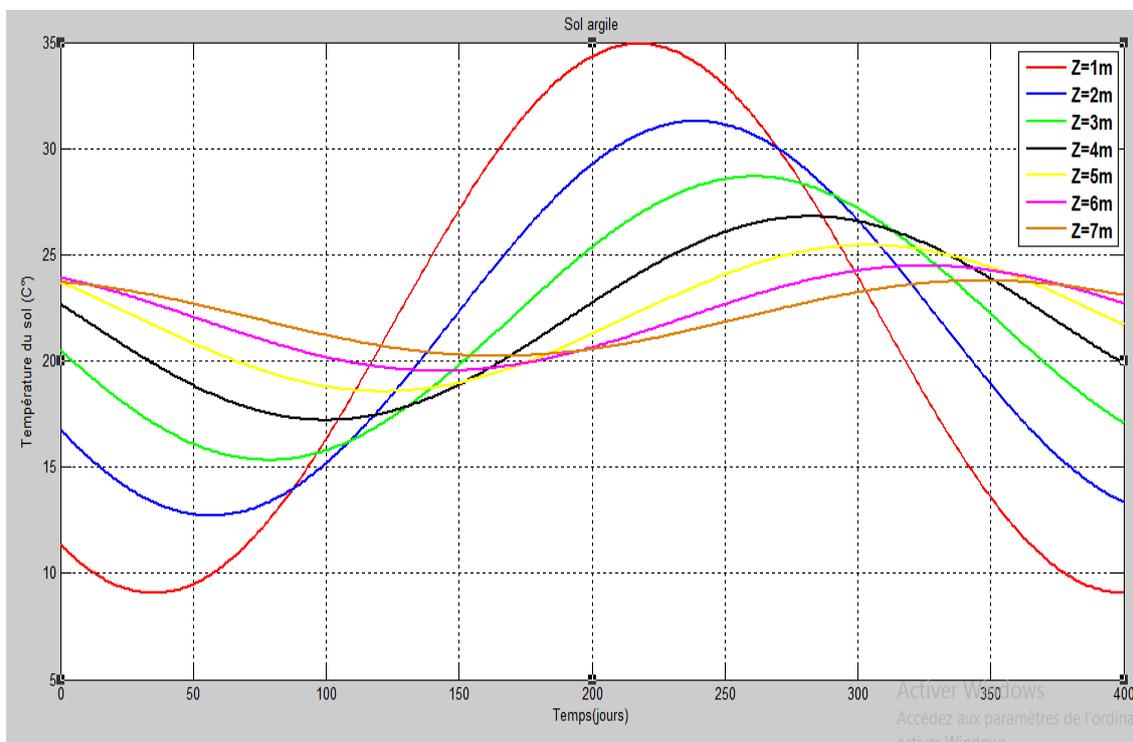


Figure IV.3: Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol argileux ($\rho = 1450 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1.25 \text{ W/m.K}$, $C_p = 1450 \text{ J/kg.K}$)

Chapitre IV : Résultats et discussion

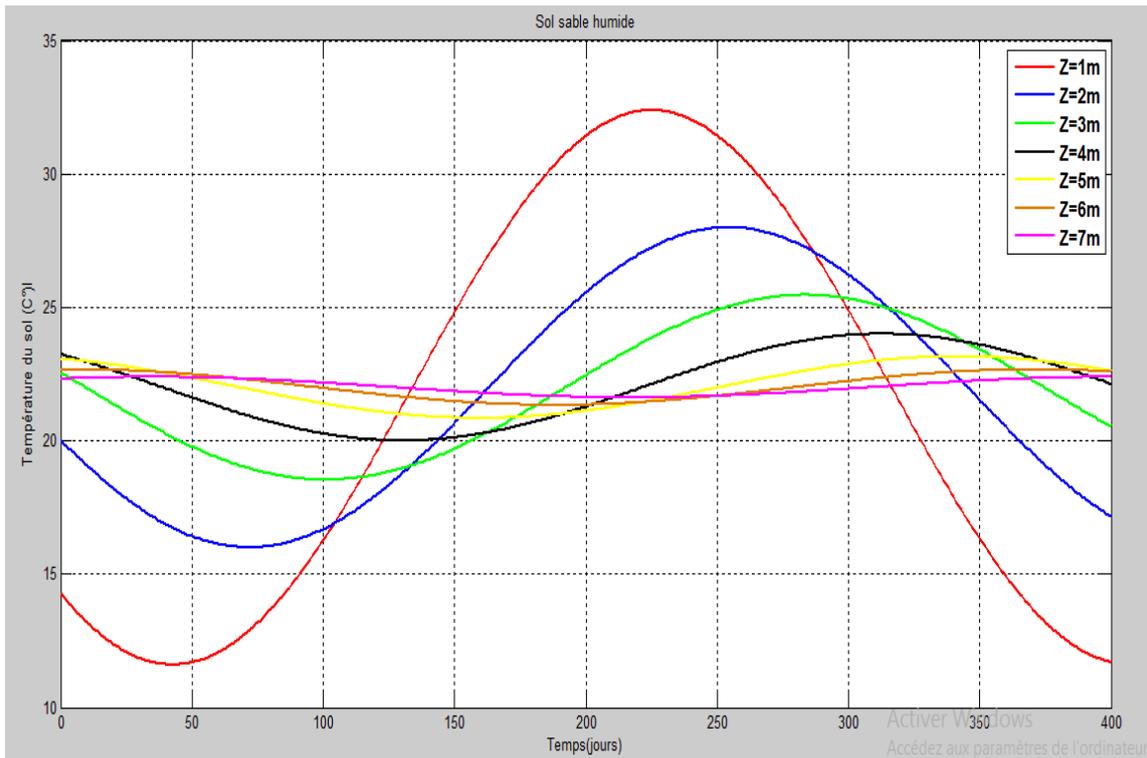


Figure IV.4: Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol sableux humide ($\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0.58 \text{ W/m.K}$, $C_p = 1000 \text{ J/kg.K}$)

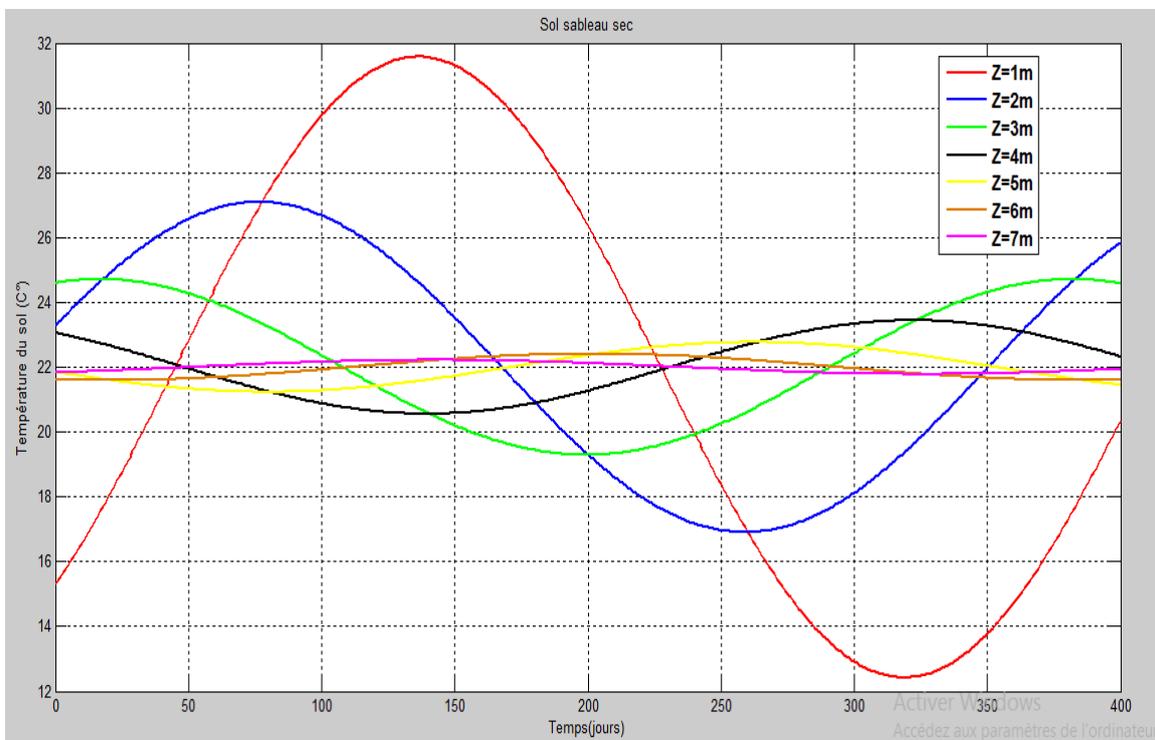


Figure IV.5: Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z , cas d'un sol sableux sec ($\rho = 1650 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.27 \text{ W/m.K}$, $C_p = 805 \text{ J/kg.K}$)

Chapitre IV : Résultats et discussion

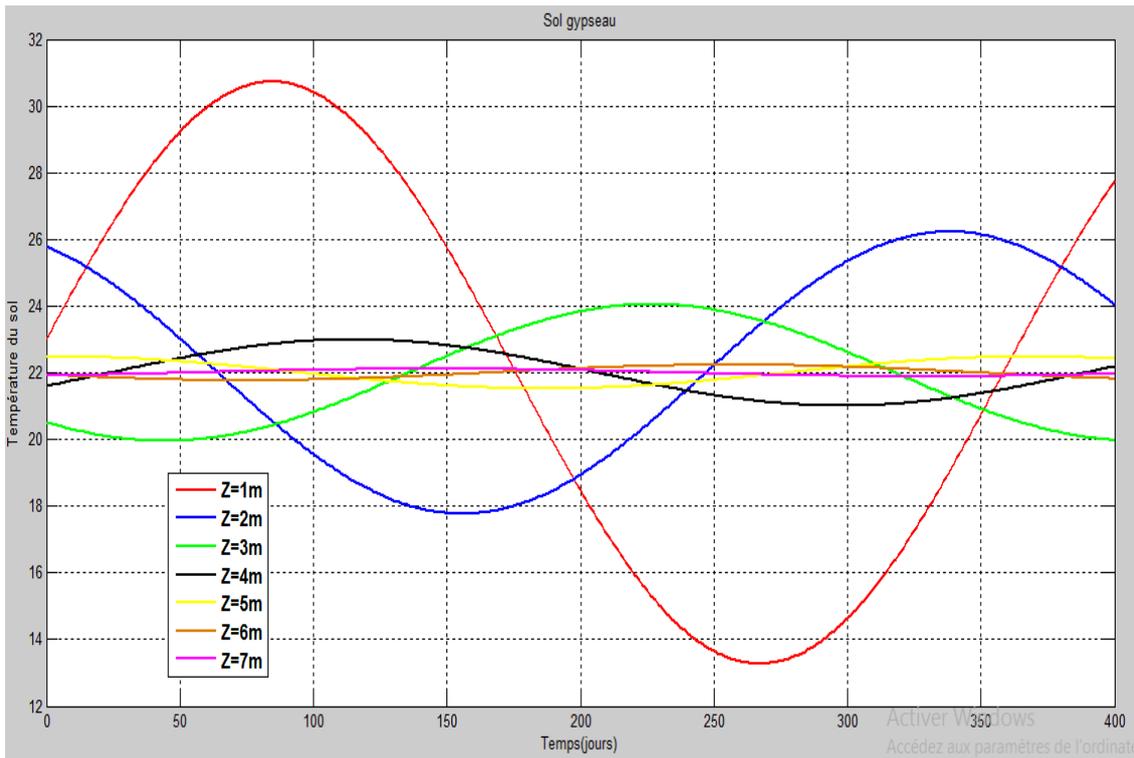


Figure IV.6: Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z, cas d'un sol gypseux ($\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.51 \text{ W/m.K}$, $C_p = 1090 \text{ J/kg.K}$)

L'analyse des courbes, montre que la température de la couche supérieure du sol à une profondeur d'environ 1 et 2 m est affectée de manière significative par la température de surface, puis cet impact diminue lorsque la profondeur du sol augmente où la température du sol n'a plus la forme d'une sinusoïde et commence à se stabiliser autour d'une valeur de 22°C , ce qui est inférieur à la température de surface pendant les mois d'été, par conséquent, il convient au rafraîchissement des locaux en période estivale.

IV.3 Température de sortie d'air :

IV.3.1 Effet de la nature du tube échangeur enterré :

Pour voir l'effet de la matière de construction les plus fréquemment utilisés dans le rafraîchissement par échangeur enterré géothermique, on a essayé de voir le comportement thermique de trois types de matériaux, le **PVC** haute pression, le **PHD** (polyéthylène haute densité) et l'**aluminium**. La **Figure IV.7** montre l'évolution de la température de l'air en fonction de la longueur, dans le cas d'un sol limon argilo-sableux, en présence d'un échangeur d'une longueur de 50 m, enterré à une profondeur de 03 m, dont le débit d'air injecté à l'entrée de l'échangeur est égale à 180 kg/h qui correspond à une vitesse moyenne de 4.5 m/s , avec une température $T_{\text{entrée}} = 40^\circ\text{C}$.

Chapitre IV : Résultats et discussion

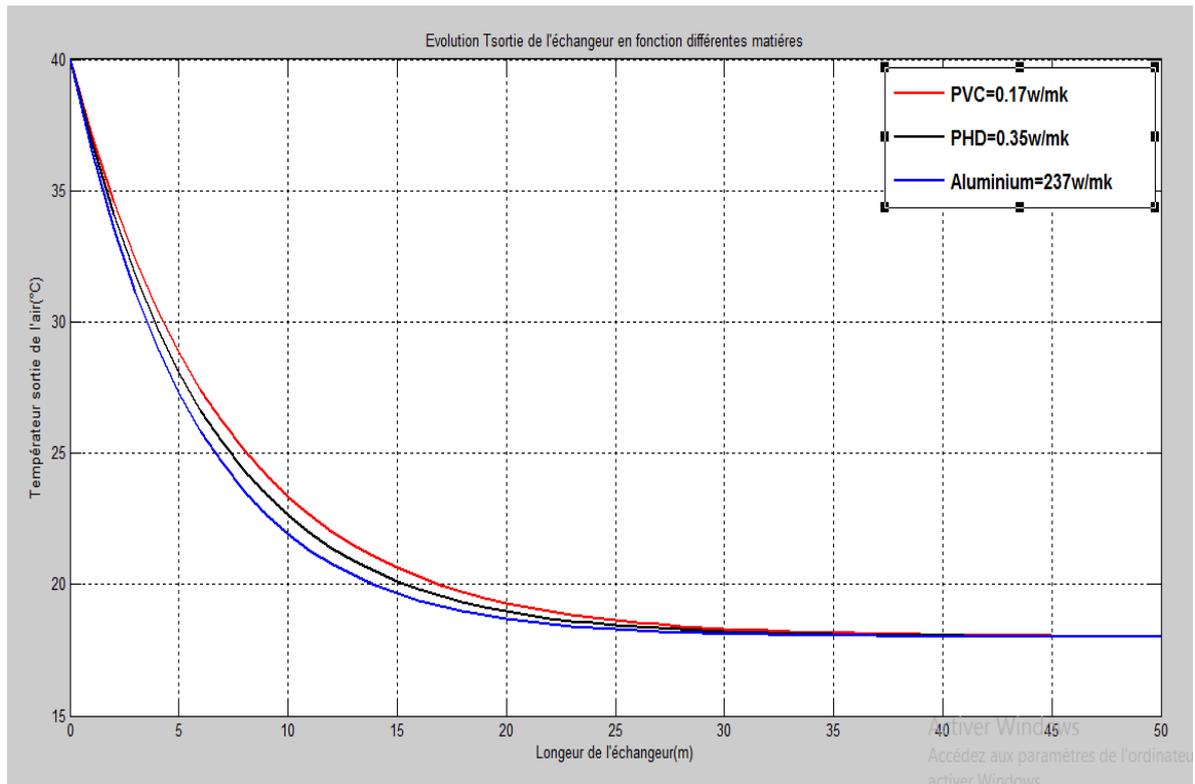


Figure IV.7: Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différentes matières de construction du tube échangeur enterré, cas d'un sol limon argileux-sableux à une profondeur de 03 m, dont le débit d'air injecté = 180Kg/h ($V=4.5$ m/s), $T_{\text{entrée}}= 40$ °C pour le 15^{ième} jour du mois de juillet.

On constate la même allure, c'est-à-dire une décroissance exponentielle de la température de l'air avec la longueur de tube pour les trois types de matériaux étudiés. Cependant, l'échangeur métallique en aluminium avec une conductivité thermique $\lambda=237$ W/m.K, présente de bonnes performances thermiques comparativement aux types d'échangeurs où les conductivités thermiques sont inférieures, en PHD où $\lambda=0.35$ W/m.K et en PVC avec $\lambda=0.17$ W/m.K.

Autrement, il est évident que pour obtenir une température de rafraîchissement de l'air à la sortie de l'échangeur qui se rapproche à celle de la température du sol, avec une longueur d'échange minimale, il faut utiliser une gaine d'échange de bonne conductivité thermique.

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.

Chapitre IV : Résultats et discussion

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.

IV.3.2 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.

Pour voir l'influence du débit sur la température de sortie de l'air, nous présentons dans la **Figure IV.8**, l'évolution de la température en fonction de trois valeurs de débits massiques égales à 400 Kg/h, 555 Kg/h et 648 Kg/h respectivement.

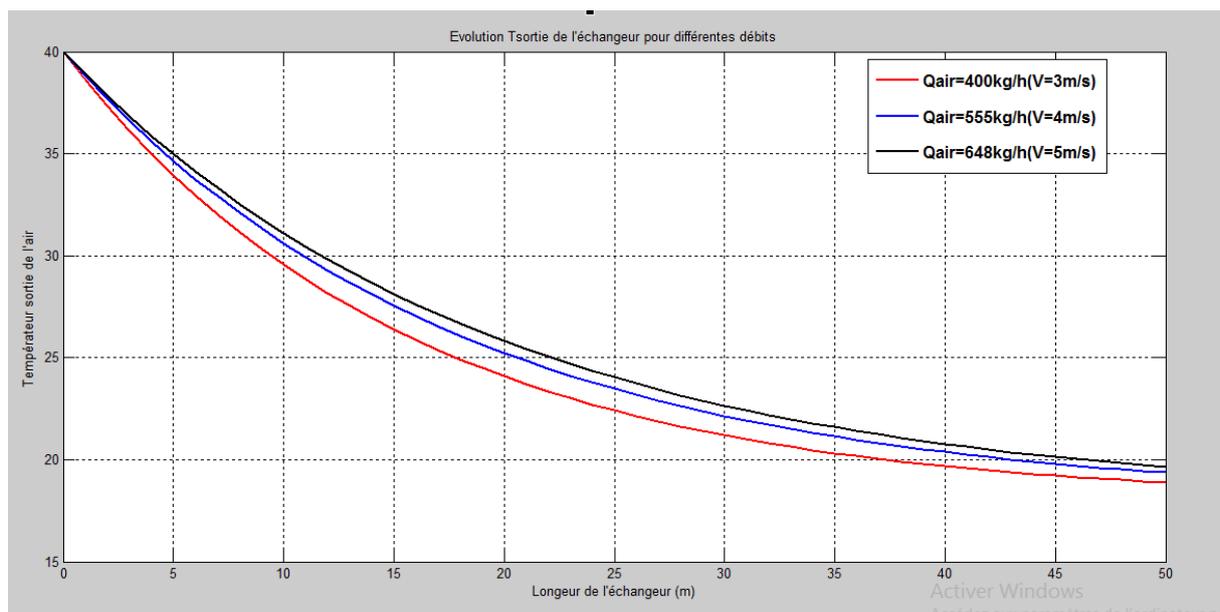


Figure IV.8 : Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différents débits d'air injectés, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110\text{mm}$) enterré à une profondeur de 03 m, $T_{\text{entré}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le 15^{ème} jour du mois de juillet.

On constate que l'allure des courbes, est de forme exponentielle décroissance de la température de l'air pour tous les différents débits étudiés. On remarque aussi, que la longueur d'échange pour atteindre la température du sol augmente au fur et mesure que le débit d'air injecté augmente également.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Le débit volumique de l'air influe essentiellement sur la longueur de la gaine. Plus le débit volumique de l'air est petit, plus la longueur d'échange nécessaire est réduite, OÙ la **Figure IV.8**, montre que c'est pour un débit d'air au voisinage de 400 Kg/h ($V_{\text{air}}= 03 \text{ m/s}$) que la température de l'air se rapproche de celle du sol pour une longueur d'échange comprise entre 45 et 50 m. Ceci s'explique par le fait que, lorsque la vitesse de l'air injecté est faible, l'air véhiculé s'séjourne plus longtemps en contact avec les parois du conduit échangeur pour céder sa chaleur au sol.

IV.3.3 Effet du diamètre du tube échangeur :

Pour voir l'effet du diamètre du conduit enterré sur la température de sortie de l'air injecté, la **Figure IV.9**, montre l'évolution de la température d'air en fonction de longueur d'échange pour différentes valeurs de diamètre du conduit, 75, 120, 200 et 300 mm, sous les conditions d'un sol limon argilo-sableux, cas d'un échangeur en PVC enterré à une profondeur de 03 mètres, dont le débit d'air injecté est égale à 180 Kg/h et $T_{\text{entrée}}= 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

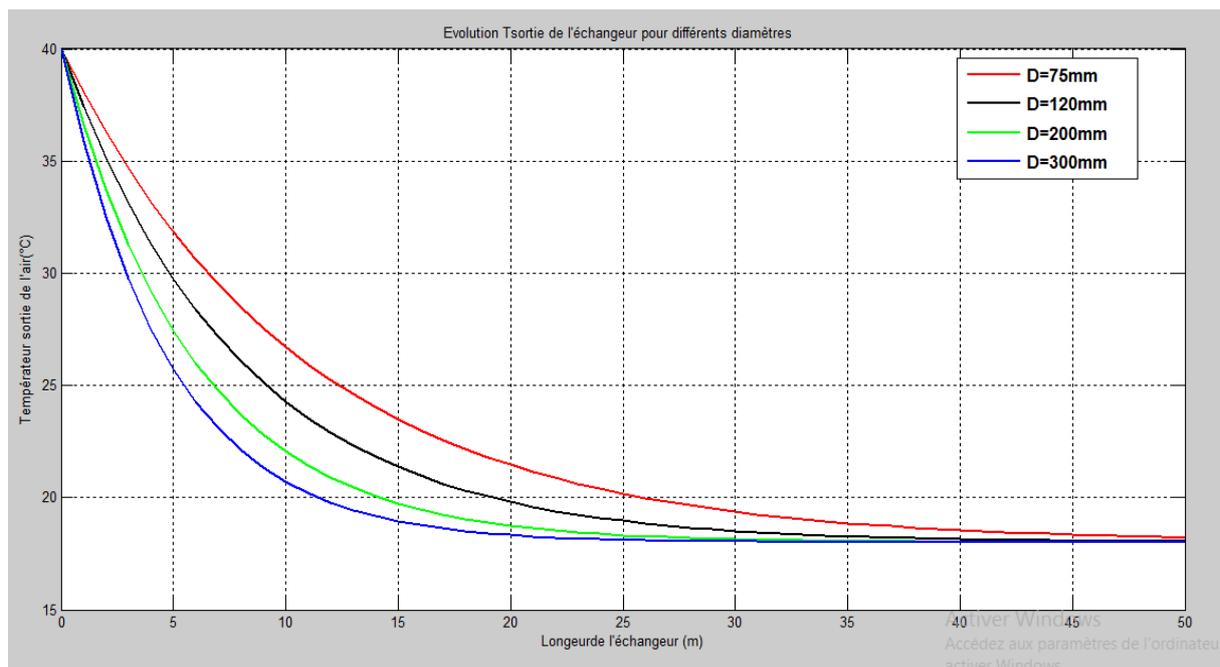


Figure IV.9 : Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différents diamètres, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC enterré à une profondeur de 03 m, débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5\text{m/s}$), $T_{\text{entrée}}=40 \text{ }^\circ\text{C}$ pour le 15^{ième} jour de mois de juillet.

On constate que l'allure des courbes qui montre l'évolution en fonction de la longueur est de forme exponentielle décroissance de pour toutes les valeurs de diamètre de tube étudiés.

Chapitre IV : Résultats et discussion

D'autre part, on remarque que plus le diamètre est important, plus la longueur d'échange nécessaire pour que la température de l'air véhiculée atteindra celle du sol diminuera. En effet l'air injecté se refroidit d'autant plus, en raison de l'augmentation de la surface d'échange entre l'air véhiculé et les parois du tube échangeur enterré d'une part et entre le tube et le sol d'une autre part.

Dans notre cas, le diamètre intérieur du tube enterré de l'ordre de 300 mm, assure de bonnes performances thermiques, 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.

IV.3.4 Effet de la température ambiante de l'air à l'entrée :

La **Figure IV.10** montre l'effet de la température ambiante à l'entrée de l'échangeur sur la température à la sortie de l'air véhiculé, où on a essayé de suivre son évolution pour différentes valeurs 28, 34 et 40 °C respectivement, sous les conditions d'un sol limon argilo-sableux, avec un échangeur en PVC, enterré à une profondeur de 03 mètres, dont le débit d'air est de 180 Kg/h et le rayon de tube $R_{\text{tube}}=110$ mm.

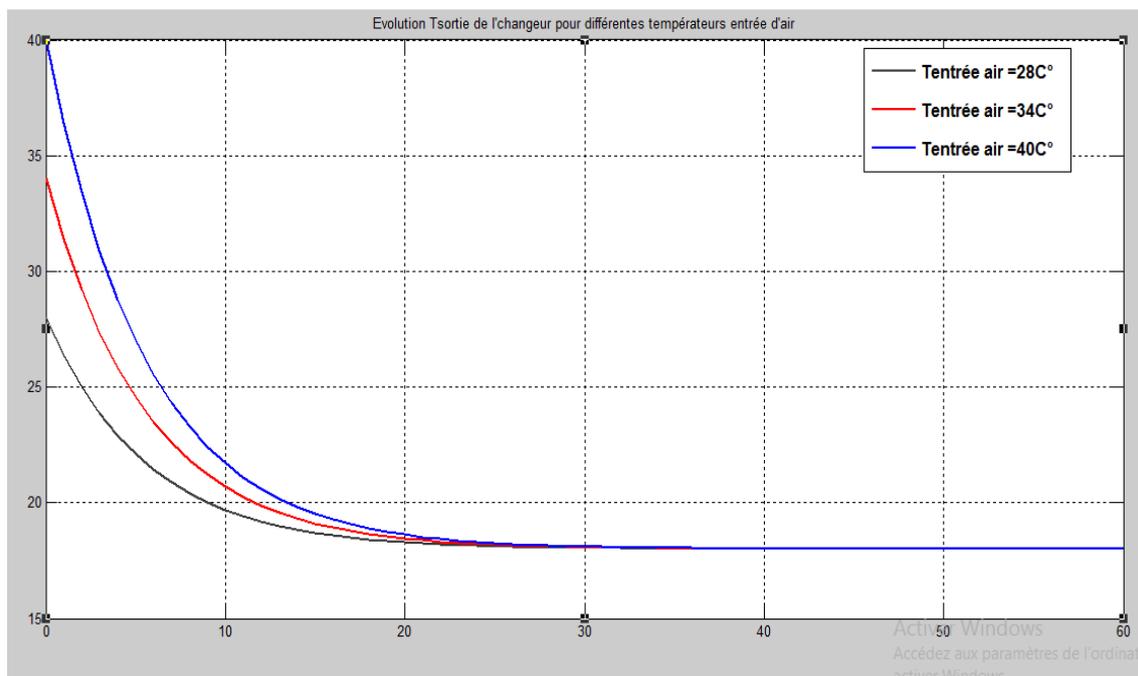


Figure IV.10 : Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différentes température d'entrée d'air, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110$ mm) à une profondeur de 03 m, avec un débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5$ m/s).

On constate que lorsque la température de l'air ambiante à l'extérieur augmente le cas de 40 °C, l'air véhiculé à l'intérieur de l'échangeur nécessite une longueur d'échange

Chapitre IV : Résultats et discussion

supplémentaire de l'ordre de 30 mètres (Figure (VI.10)), pour que sa température se rapproche à celle du sol. Par contre, il voit sa température proche à celle sol après avoir parcourue une longueur inférieure de 20 mètres dans le cas où la température de l'air injecté initialement est de l'ordre de 34 °C. Autrement, pour les températures élevées de l'air extérieur, il faut envisager une longueur d'échange suffisante pour assurer le rafraichissement de l'air.

IV.3.5 Effet de la profondeur :

Les courbes montrées par la **Figure IV.11** montrent l'effet de la profondeur de l'échangeur sur la température de sortie de l'air, où a considéré différentes profondeurs de 01, 02, 03, 04, 05, 06 jusqu'à 07 mètres, ce qui a permis de suivre l'évolution des profils de température en fonction de longueur du tube échangeur depuis l'entrée jusqu'à la sortie.

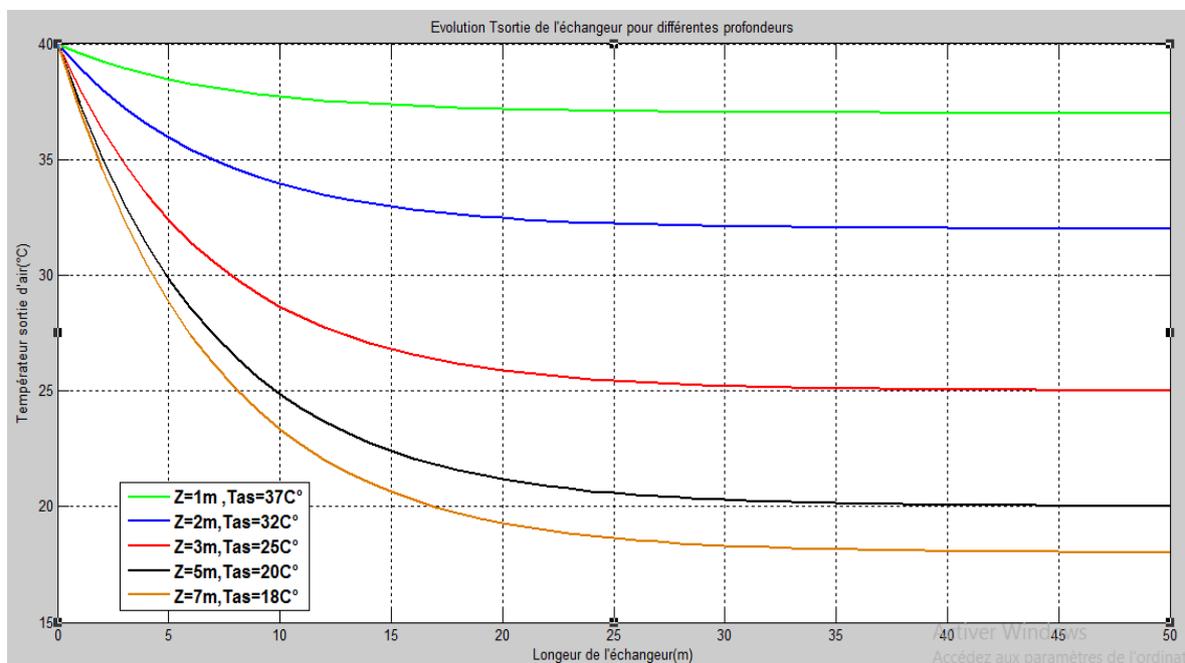


Figure IV.11: Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur, pour différentes profondeurs, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110$ mm), débit d'air injecté = 180 Kg/h, ($V=4.5$ m/s), $T_{\text{entrée}}=40$ °C pour le 15^{ième} jour du mois de Juillet.

A une profondeur de 07 m, on constate que la température de l'air décroît depuis la température ambiante à l'entrée de 40 °C, qui correspond au mois de juillet dans la région de Biskra jusqu'à atteindre la température du sol aux environ 18°C après avoir parcouru une longueur d'échange de 25 m depuis l'entrée de l'échangeur enterré.

De plus, au fur et à mesure que la profondeur diminue, la température de l'air sortant de l'échangeur devient plus élevée. Par exemple, dans le cas d'une profondeur de 01 mètres,

Chapitre IV : Résultats et discussion

l'écart de température de l'air entre l'entrée et la sortie de l'échangeur n'est que d'environ 2°C, ce qui n'est pas suffisant pour assurer le rafraîchissement des bâtiments et les conditions de confort souhaitable. D'autre part, on constate que la température de sortie de l'air de l'échangeur commence à prendre une valeur constante au delà d'une longueur $L=25$ mètres depuis l'entrée de l'échangeur géothermique.

IV.3.6 Effet du rayon du sol :

On définit le rayon du sol, comme étant le premier rayon thermique loin du tube où la température du sol ne change pas sous l'effet de la circulation d'air dans le tube. La **Figure IV.12** montre l'effet du rayon adiabatique du sol sur l'évolution de la température le long de l'échangeur.

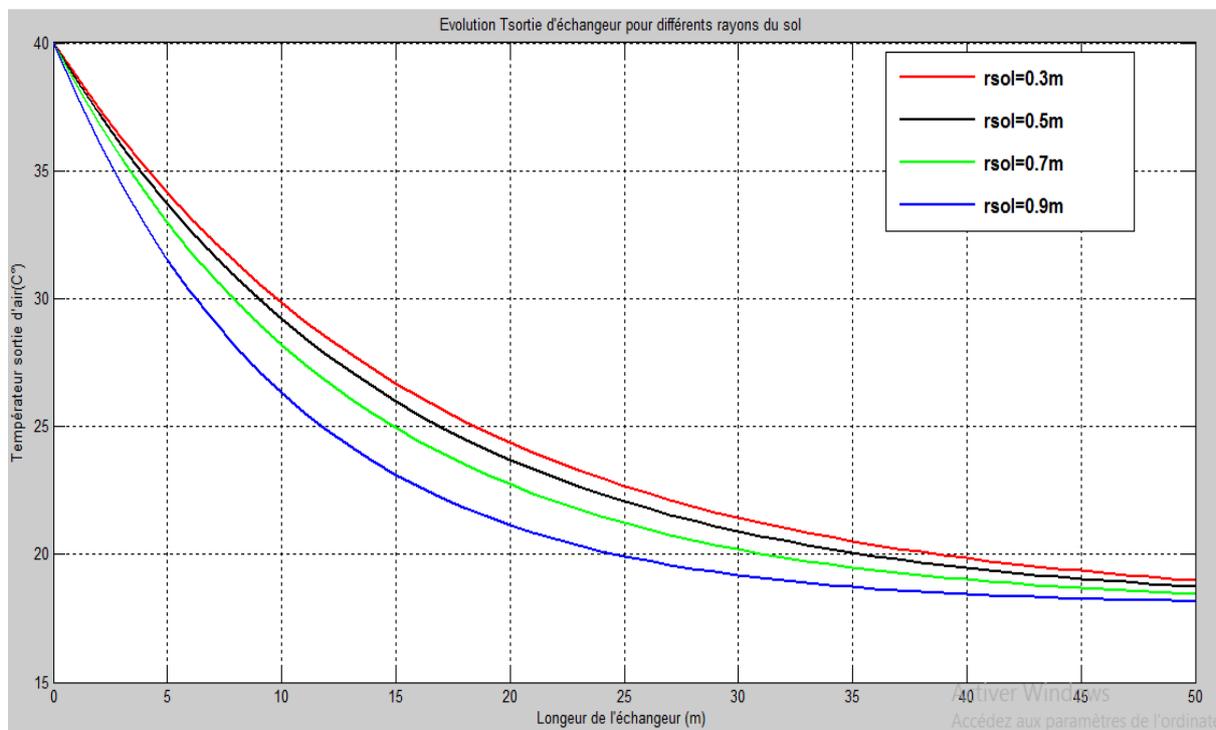


Figure IV.12: Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur pour différentes valeurs du rayon du sol, cas d'un sol limon argileux-sableux, échangeur en PVC ($R_{tube}=110$ mm), à une profondeur de 03 mètres, débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5m/s$), $T_{entrée}=40$ °C pour le 15^{ème} du mois de Juillet.

L'analyse des profils montre qu'un rayon ($r_{sol}=0.9m$) permis d'obtenir de bonnes performances thermiques, ceci étant dû au diamètre du tube échangeur important égale à 300 mm, qui permis au sol d'avoir un impact sur les échanges thermiques entre l'air et le sol à travers les parois du tube qui offre un périmètre thermique important, se traduit par un écart de température sensible en comparaison avec les autres valeurs.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.3.7 Effet de la longueur de l'échangeur :

Pour voir l'effet de la longueur sur le comportement thermique de l'échangeur, la **Figure IV.13**, permis de suivre l'évolution de la température de sortie de l'air pour différentes longueurs sous les conditions d'un sol limon argilo-sableux, avec un échangeur en PVC enterré à une profondeur de 03 mètres, dont le débit d'air soufflé est de 180 Kg/h et $R_{\text{tube}}=110$ mm.

On constate que la température varie proportionnellement avec la longueur, ce qui signifie que pour une longueur prolongée, l'air véhiculé à travers le conduit échangeur aura suffisamment du temps pour échanger sa chaleur avec sol à travers les parois de l'échangeur, en cédant son enthalpie et acquérir par conséquent les propriétés d'un fluide rafraichissant.

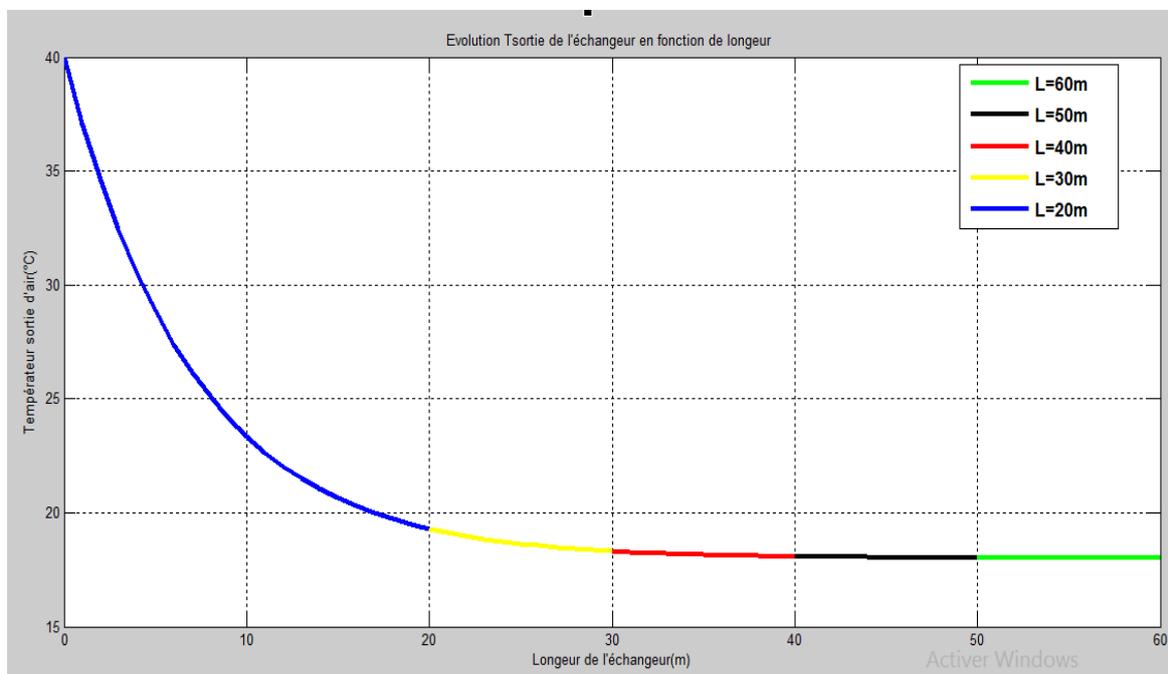


Figure IV.13: Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur, cas d'un sol limon argileux-sableau, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110$ m) , à une profondeur de 03m ,débit d'air injecté =180 Kg/h,($V=4.5$ m/s), $T_{\text{entrée}}=40$ °C pour le 15^{ième} jour du mois de juillet..

Les profils commencent à se stabiliser entre 40 et 50 m de longueur d'échangeur parcourue, qui correspond ainsi à une distance 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.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.3.8 Effet de diffusivité-thermique du sol :

Parmi les paramètres influençant le comportement thermique des échangeurs géothermiques enterrés étant la texture dite aussi type de sol, caractérisée par la diffusivité thermique qui regroupe 03 propriétés essentielles, la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique. Pour voir l'effet du type du sol sur l'air injecté, les courbes de la **Figure IV.14**, montrent l'évolution de la température de sortie de l'air pour différentes valeurs de diffusivités thermiques, en présence d'un échangeur en PVC, enterré à une profondeur de 03 mètres, dont le débit d'air est 180 Kg/h et $R_{\text{tube}}=110$ mm.

On remarque que la température de l'air décroît de l'entrée de l'échangeur jusqu'à la sortie, ce qui signifie qu'il y'a un échange de chaleur entre l'air et le sol, avec des écarts qui dépendent de la nature de sol, où on remarque que le sol de faible diffusivité thermique le cas du sol gypseux ayant une diffusivité $\alpha = 0.19 \times 10^{-6}$ offre un meilleur transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le sol.

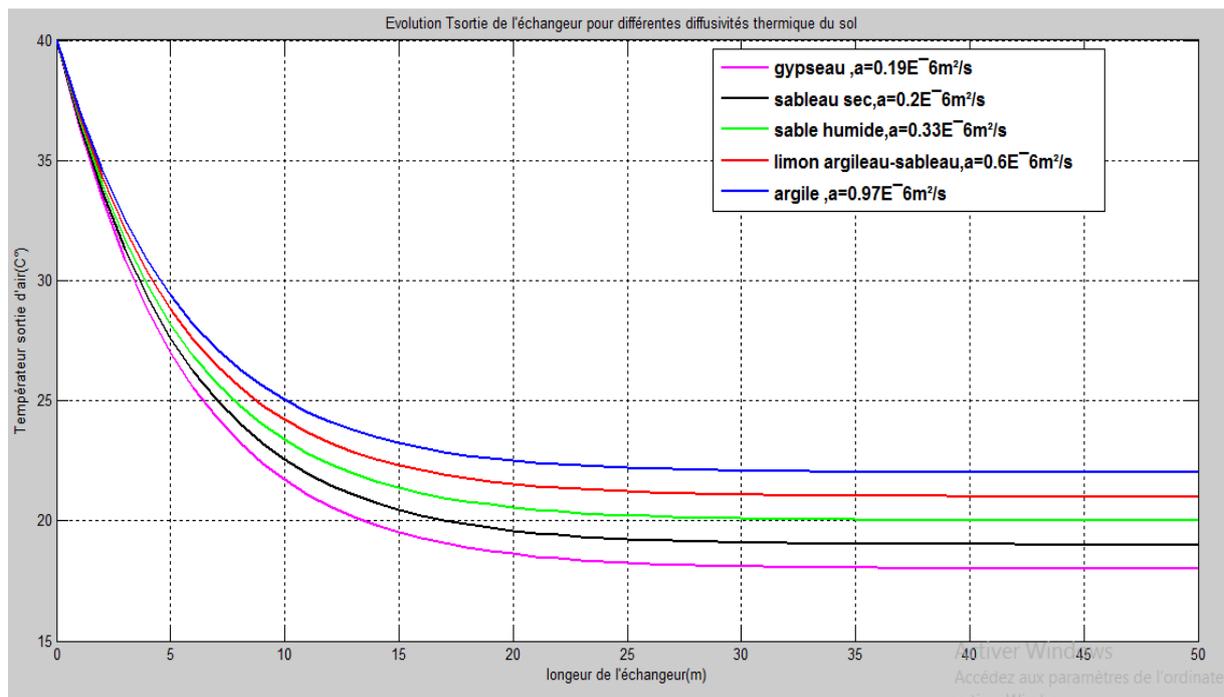


Figure IV.14: Evolution de la température de sortie de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur, pour différentes diffusivités thermiques du sol, échangeur en PVC ($R_{\text{tube}}=110$ m), à une profondeur de 03 mètres, débit d'air injecté =180 Kg/h, ($V=4.5$ m/s), $T_{\text{entrée}}=40$ °C pour le 15^{ième} jour du mois de juillet.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.4 Comparaison quelques résultats expérimentaux :

Pour vérifier la fiabilité du code de calcul réalisé lors de cette étude, on a voulu comparer les résultats de la simulation numériques obtenus, en particulier l'évolution de la température de l'air depuis l'entrée de l'échangeur jusqu'à la sortie, avec des travaux rencontrés dans la littérature, notamment expérimentaux effectués à l'université de Biskra en 2013, qui ont été réalisés par Hamdi [2], Belloufi [25] et Benabdi [26].

Pour que la comparaison soit réaliste et probante, on a essayé de respecter les conditions de fonctionnement de l'installation expérimentale vis-à-vis de la simulation numérique, telles que la nature du sol, le débit massique d'air, la longueur et le diamètre du tube échangeur ainsi que la température d'entrée de l'air véhiculé.

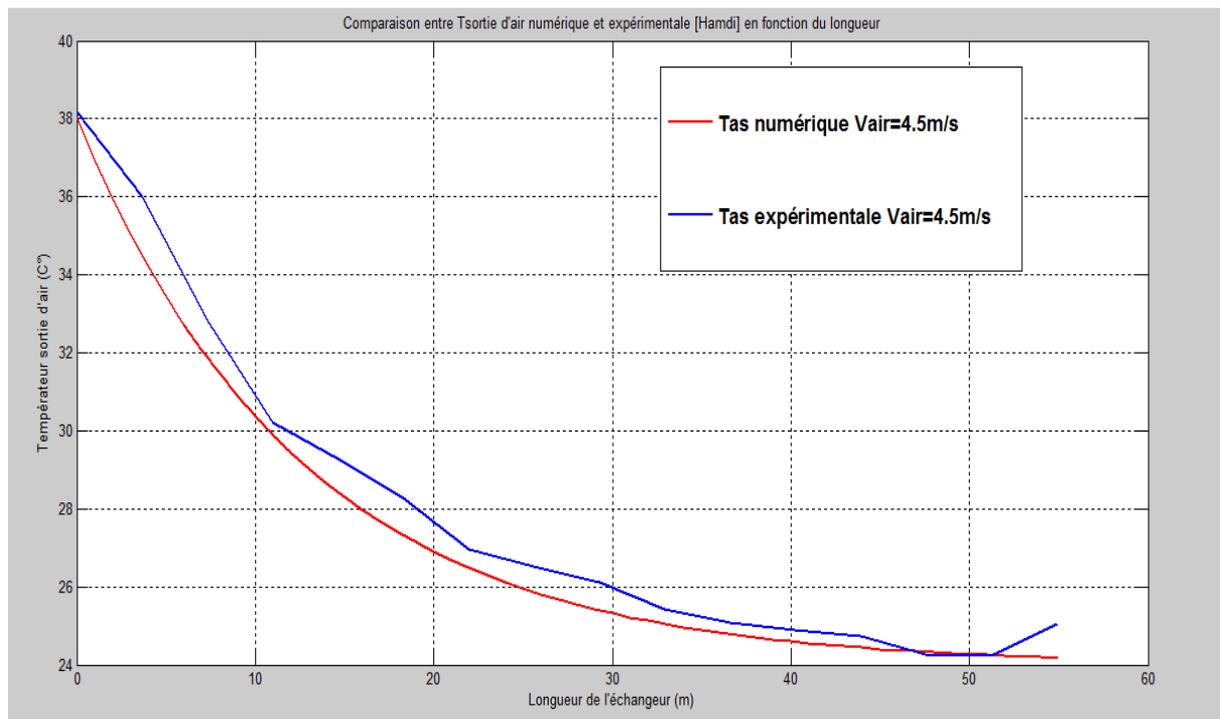


Figure IV.15 : Comparaison entre le profile de la température de sortie de l'air numérique et expérimentale (expérience effectuée le 21/05/2013 à Biskra **Hamdi** [2], sous les conditions de fonctionnement suivantes : ($L_{tu-ec} = 55$ m, en PVC, $\varnothing_{tube} = 110$ mm, profondeur = 03 m, sol Limon argilo-sableux, $Q_{air} = 184.74$ kg/h ($V = 4.5$ m/s)

Chapitre IV : Résultats et discussion

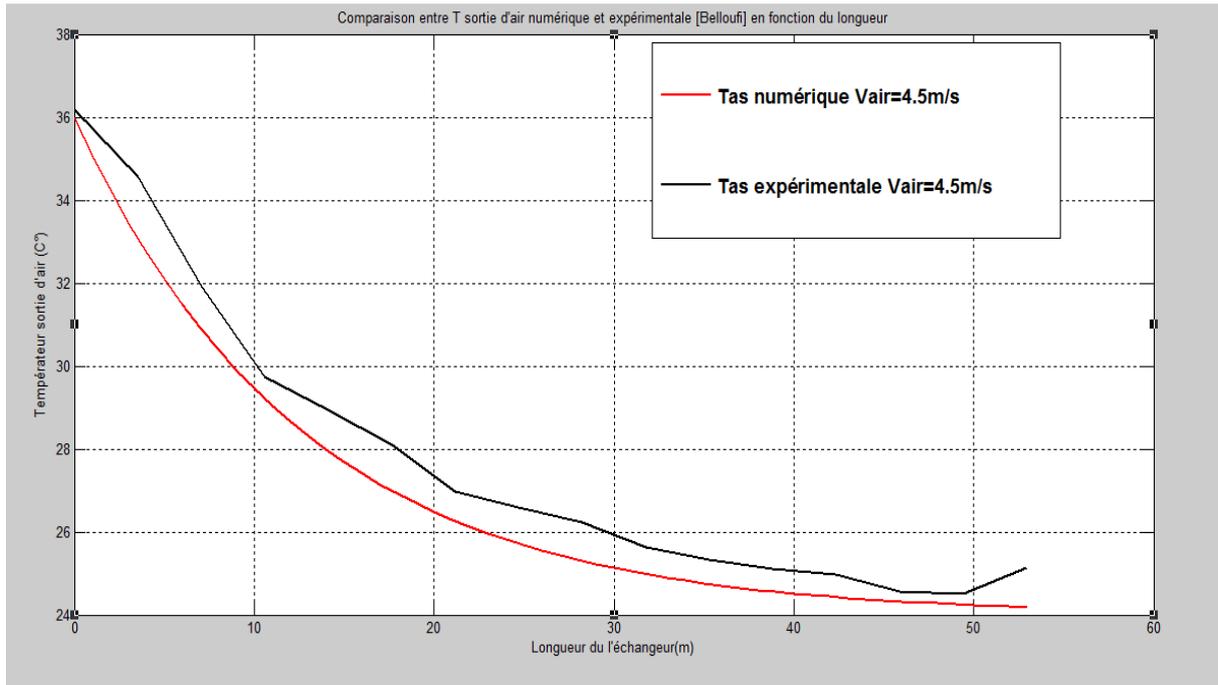


Figure IV.16 : Comparaison entre le profile de la température de sortie de l'air numérique et expérimentale (expérience effectuée le 27/05/2013 à Biskra **Belloufi** [25], sous les conditions de fonctionnement suivantes : ($L_{tu-ec} = 53$ m, en PVC, $\varnothing_{tube} = 110$ mm, profondeur = 03 m, sol Limon argile, $Q_{air} = 184.74$ kg/h ($V = 4.5$ m/s)

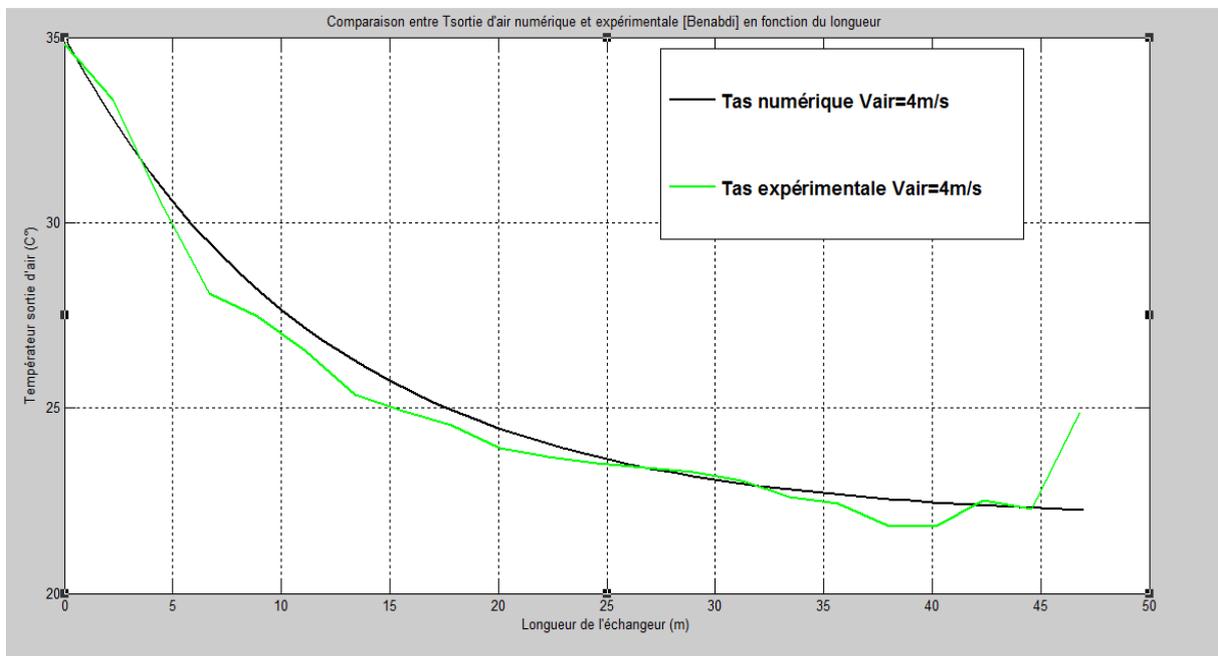


Figure IV.17 : Comparaison entre le profile de la température de sortie de l'air numérique et expérimentale (expérience effectuée le 21/04/2013 à Biskra **Benabdi** [26], sous les conditions de fonctionnement suivantes : ($L_{tu-ec} = 47$ m, en PVC, $\varnothing_{tube} = 110$ mm, profondeur = 03 m, sol Limon argile, $Q_{air} = 164.21$ kg/h ($V = 4$ m/s)

Chapitre IV : Résultats et discussion

L'analyse des profils de la température de sortie d'air en fonction de la longueur de l'échangeur montre un bon accord entre les résultats théoriques et expérimentaux telles que observés par figures **Figure (IV.15)**, **(IV.16)** et **(IV.17)** avec un écart de l'ordre de $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui correspond à une erreur relative de 3.5%.

Cet écart est dû aux valeurs approximatives des données utilisées dans le calcul, telles que les propriétés thermophysiques du conduit enterré, la nature du sol, les erreurs commises par les différents capteurs de mesures ainsi que les conditions climatiques, par conséquent les modèles employés de l'échangeur air/sol proposé fournissent des résultats probants et fiables par rapport à celles mesurés.

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a essayé d'analyser les résultats obtenus par une simulation numérique menée sur un échangeur géothermique à air destiné à la production du froid, sous les conditions climatiques de la région Biskra, ou a essayé d'examiner l'influence de différents paramètres sur le fonctionnement de l'échangeur air/sol.

Les principaux résultats obtenus sont récapitulés comme suit :

- La température de l'air à la sortie de l'échangeur est d'autant plus faible que la profondeur d'enfouissement dans le sol est grande.
- Plus l'échangeur est long, plus la température de l'air est basse à la sortie.
- La vitesse d'écoulement a un effet aussi important sur le fonctionnement de l'échangeur géothermique.
- La température de l'air à la sortie croît linéairement avec la vitesse de l'air. Donc, il est préférable de choisir une vitesse modérés ni très faible ni très grande.
- Concernant le diamètre du tube enterré, la simulation montre qu'il existe une valeur optimale pour laquelle la température de l'air à la sortie est minimale,
- Concernant le type du sol, un sol gypseux sera plus inerte que les autres types de sol simulés et donc offre de bonnes performances en terme d'échange thermique, car il permet d'atteindre la température de sol pour des profondeurs réalisables.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

La géothermie est une énergie renouvelable par comparaison à d'autres technologies conventionnelles qui exploitent des systèmes de refroidissement en été et de réchauffement en hiver en consommant peu d'énergie, ainsi les échangeurs enterrés air/sol sont de nos jours considérés comme une des solutions très encourageantes.

Dans de nombreuses applications, l'échangeur air/sol thermique n'a cessé de démontrer son efficacité dans le rafraîchissement et l'amélioration des conditions de vie et du confort thermique durant toute l'année. Comparativement aux autres techniques Il préserve la santé des occupants car la température de sortie de l'échangeur est modérée et favorable au corps humain, il fonctionne de manière propre sans altération avec les problèmes liés à la pollution de l'environnement.

Ce travail est consacré à l'étude des performances thermiques d'un échangeur air/sol enterré, en analysant les principaux paramètres physiques, thermo-physiques et techniques qui contrôlent et affectent son fonctionnement.

Pour analyser les principaux paramètres influençant le comportement thermique de l'échangeur enterré, on a écrit un programme informatique sous MATLAB, basé sur les modèles théoriques mentionnés précédemment. D'autre part, lors de la simulation on a supposé que l'échangeur est implanté dans un site, qui possède les données météorologiques et les caractéristiques de sol similaires à celles de la région de Biskra.

Le programmé informatique écrit sous Matlab est basé sur 03 codes de calcul, qui traitent la variation de la température ambiante, durant une année dans région de Biskra, l'évolution annuelle de la température du sol en fonction du temps, pour différentes types de sol et différentes profondeurs, ainsi que l'évolution de la température de l'air depuis l'entrée jusqu'à la sortie de échangeur air/sol, en fonction de plusieurs paramètres, physiques thermophysiques et conceptuels.

A partir l'analyse des résultats obtenus de cette simulation, il en résulte que l'efficacité et le comportement thermique de cet échangeur dépend essentiellement des facteurs suivants :

- ✓ La température de l'air à la sortie de l'échangeur se rapproche à celle du sol d'autant plus que la profondeur d'enfouissement dans le sol est importante.
- ✓ La température de l'air diminue et se rapproche à celle du sol à partir de 50 m et plus de longueur d'échange.

Conclusion Générale

- ✓ Pour que la température de l'air injecté dans le conduit échangeur se rapproche à celle du sol, le débit d'air recommandé doit être au voisinage de 400 kg/h qui correspond à une vitesse de 03 m/s.
- ✓ Plus le diamètre du conduit est important, plus la température de l'air véhiculé diminuera en raison de la surface d'échange entre l'air et le tube d'une part et entre le tube et le sol d'une autre part, la valeur de 220 mm correspond au diamètre optimal.
- ✓ Une matière de construction en PVC à haute pression est souhaitable en raison de ces nombreux avantages, bon prix que les matériaux métalliques, rigides et a une bonne résistance à la corrosion en présence des terrains et sols humides.
- ✓ Pour le type du sol, un sol gypseux sera plus inerte que les autres types de sol simulés et donc beaucoup plus performant en terme d'échange thermique, car il permet d'atteindre la température de sol.

A l'issue de ce travail, il a été possible de vérifier la fiabilité du modèle numérique décrivant l'évolution de la température de sortie de l'air de l'échangeur en comparant ses résultats avec des résultats expérimentaux menés sur le site de Biskra. Il a montré un bon accord qui nous a permis de conclure que ce modèle peut être amélioré et utilisé en l'absence de données expérimentales

Le rafraîchissement par le procédé géothermique est une solution peu coûteuse, apportant un gain thermique non négligeable durant toutes les périodes de l'année, nécessite des améliorations et mérite d'être approfondie et valorisé pour des applications diverses, notamment dans le bâtiment.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

Références Bibliographique

[1] B. Mebarki , B. Draoui , S. Abdessemed ,A. Keboucha , S. Drici, A. Sahli , Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar, Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3, pp 465 – 478, 2012.

[2] Omar HAMDI, Contribution à l'étude de l'efficacité d'un système géothermique (air-sol) placé dans une zone aride « cas de la région de Biskra », thèse du Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2020.

[3] Boultif Soufounizia, Étude des performances d'un échangeur air-sol enterré couplé à un humidificateur, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2020.

[4] AD Salah Eddine, Dimensionnement d'un échangeur air/sol enterré destiné au rafraîchissement de l'air, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2014.

[5] David Amitrano, Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit " puits canadien ", Université J. Fourier, Grenoble, 2006.

[6] M. Benhammou , B. Draoui, Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar - Effet de la nature du sol, Revue des Energies Renouvelables Vol.14 N°2 pp 219-228,2011.

[7] Belloufi Yousef, Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux, mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2012.

[8] Mohamed Saadeddine, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2013.

[9] N. Moummi , H. Benfatah , N. Hatraf , A. Moummi, S.Youcef Ali ,le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra, Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3, pp. 399 – 406,2010.

Références Bibliographique

[10] G. Mihalakakou, J.O Lewis, M. Santamouris, Sur le potentiel calorifique des techniques de conduites enterrées – application en Irlande, *Energie et Bâtiments* 24 , pp 19-25,1996

[11] Rohit Misra , Vikas Bansal , Ghanshyam Das Agrawal , Jyotirmay Mathur , Tarun K. Aseri , Étude paramétrique basée sur l'analyse CFD du facteur de déclassement pour l'échangeur de chaleur du tunnel d'air terrestre, *Énergie appliquée*103, pp 266–277, 2013.

[12] S. Barakat , Ahmed Ramzy , A.M. Hamed , S.H. El Emam, Amélioration de la puissance de sortie de la turbine à gaz à l'aide du système de refroidissement de l'échangeur de chaleur terre-air (EAHE) , *Conversion et gestion de l'énergie* 111 ,pp 137–146 , Université de Mansoura, El-Mansoura 35516, Égypte, 2016.

[13] Samia Hamdane, Prévion systématique de la température de sortie d'un échangeur de chaleur air/sol enfoui, mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2017.

[14] DOUH Abd elouahab ,SERRAOUI Khaled ,Dimensionnement d'un échangeur air/sol enterré destiné au rafraichissement de l'air, mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2017.

[15] SATARA Elbouti, MABROUKI Abdelhakim, Etude d'un échangeur de chaleur air/sol, mémoire de master , Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2016.

[16] Stéphane THIERS, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, thèse doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.

[17] TOUIL Abdelhak, SOUALAH MOHAMED Laid, Etude numérique d'un échangeur géothermique eau-sol, mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, Algérie, 2018.

[18] Mohamed Elghazali Benhamza, Contribution à l'étude du confort thermo-aéraulique par différents Typologies de constructions, thèse doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie,2018.

Références Bibliographique

[19] CHEBANA Abdelbasset ,Contribution à l'étude de la convection forcée à l'intérieur d'un échangeur en « U » à usage géothermique, mémoire de magister, Université Elhadj Lakhdar Batna, Algérie, 2016.

[20] Charaf-eddine MEHDID, Comportement thermo-physique d'un puits canadien : application aux sites de l'oasis algérien, thèse doctorat , Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2021.

[21] Nesrine HATRAF ,Etude systématique et optimisation des performances d'une chaîne énergétique utilisant un capteur solaire à air et un échangeur enterré pour le chauffage solaire et le rafraîchissement par la géothermie, thèse doctorat , Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2014.

[22] T. Salomon, R. Mikolasek, B. Peuportier, S. Thiers, Y. Jautard, A. Trombe, Dimensionnement du « puits climatique » Rapport final PREBAT ADEME 04 04C 000 1 Région Languedoc-Roussillon E200", 2003.

[23] Stéphane Thiers, Bruno Peuportier. Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiment. Journée thématique SFT-IBPSA : froid solaire et confort d'été, Avril 2007, Aix-les-Bains, France. pp.96-103.2007.

[24] <https://weatherspark.com/y/51506/Average-Weather-in-Biskra-Algeria-Year-Round> ,Site internet consulté le 28 février 2022

[25] Belloufi Yousef, Etude théorique et expérimentale de l'exploitation de la géothermie dans le réchauffement ou le refroidissement d'un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l'habitat, thèse doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2017.

[26] BENABDI Mohamed Larbi, Étude des performances thermiques d'un échangeur de chaleur enterré, mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2013.

Résumé

Résumé :

Dans ce travail, on s'intéresse à l'étude des performances thermiques d'un échangeur air/sol enterré, en analysant les principaux paramètres physiques, thermo-physiques et conceptuels qui contrôlent et affectent son fonctionnement. Il s'agit d'une étude de simulation numérique réalisée sur l'environnement Matlab 9.0. Où on a développée un code de calcul qui permet de conjuguer entre 03 modèles théoriques qui décrivent le fonctionnement des échangeurs air/sol enterré. Les trois modèles théorique ont fait l'objet du second chapitre consacré à l'étude théorique, regroupent plusieurs paramètres, physiques, thermo-physiques et conceptuels, qui ont un impact direct sur le comportement et les performances thermiques de ces installations, destinés au rafraichissement en été et le réchauffement en hivers.

Mots clés : Echangeur air/sol, comportement thermique, simulation numérique, performances, rafraichissement de l'air.

ملخص :

في هذا العمل ، قمنا بدراسة الأداء الحراري لمبادل هواء/تربة مدفون تحت سطح الأرض، من خلال تحليل أهم العوامل الفيزيائية والفيزيائية الحرارية و التصميمية التي تتحكم في تشغيله وتؤثر على أدائه. هذه دراسة محاكاة رقمية تم إجراؤها على برنامج Matlab 9.0، حيث قمنا بكتابة برنامج من خلاله تم دمج ثلاث نماذج نظرية تصف عمل المبادلات الأرضية / الهوائية المدفونة. كانت النماذج النظرية الثلاثة موضوع الفصل الثاني المخصص للدراسة النظرية، حيث جمعت ما بين عدة معايير فيزيائية وحرارية لها تأثير مباشر على السلوك والأداء الحراري لهذه التجهيزات المخصصة لتلطيف الهواء في الصيف والتدفئة في الشتاء

الكلمات المفتاحية : مبادل هواء/تربة، السلوك الحراري ، محاكاة عددية، كفاءة، تلطيف الهواء.

Abstract

In this work, we are interested in the study of the thermal performance of a buried air/soil exchanger, by analyzing the main physical, thermophysical and technical parameters which control and affect its operation. It's a numerical simulation study that will be carried out on the Matlab 9.0 environment. Where we will develop a computer code that allows combining between 03 theoretical models that describe the operation of buried air / ground exchangers. The three theoretical models were the subject of the second chapter devoted to the theoretical study, grouping together several parameters; physical, thermo-physical and conceptual, have a direct impact on the behavior and thermal performance of these installations, intended for cooling in summer and heating in winter.

Keywords : Air/soil exchanger, Thermal behavior, numerical simulation, air freshening