



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministre de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Hydrocarbures et des Énergies Renouvelables et des Sciences de la Terre et de L'Univers

Mémoire

Présente pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Énergies renouvelables

Option : Énergies renouvelables en mécanique

Présenté par :

BOUCHANDOUKA Rabah

LAYEB Ismail

Thème :

Etude du comportement thermique d'un échangeur air/sol

Soutenu publiquement le :09/07/2019

Devant le jury :

Mr. BOUCHKIMA Bachir	Pr	Université d'OUARGLA	Président
Mr. DOUAK Mohamed	Mr	Université d'OUARGLA	Examineur
Mr. BELLOUFI Youcef	Dr	Université d'OUARGLA	Encadreur

Année universitaire : 2018/2019

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Table des figures	III
Liste de tableaux	IX
Nomenclature	X
Introduction générale	1
Chapitre I : Etude Bibliographique	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Etude Bibliographique.....	4
Chapitre II généralités sur la géothermie	
II.1 Introduction.....	12
II.2 Principe de la géothermie.....	12
II.3 Types de gisements géothermiques.....	13
II.4 Types de la géothermie.....	14
1. Géothermie à haute température.....	14
2. Géothermie à basse température.....	14
3. Géothermie à très basse température.....	14
II.5 Les avantages et les inconvénients de la géothermie.....	14
II.5.1 Les avantages de l'énergie géothermique.....	15
II.5.2 Les inconvénients de l'énergie géothermique.....	15
II.6 La géothermie dans le monde.....	15
II.6.1 Les applications.....	15
II.6.2 La capacité énergétique.....	15
II.7 Forage géothermique.....	16
II.8 La géothermie en Algérie.....	17
II.8.1. Les ressources géothermiques en Algérie.....	17
II.8.2. L'exploitation.....	18
Chapitre III Modélisation analytique de l'échangeur air/sol	
III.1 Modélisation transitoire de la température du sol.....	20
III.1.1 température à la surface du sol variable.....	20

III.2 Modélisation thermique de l'échangeur air sol.....	23
III.2.1 Modélisation stationnaire de la température de l'air le long du tube.....	24
III.3 Quantité de chaleur échangée avec le sol par unité la longueur.....	26
III.4 Conclusion.....	26
Chapitre IV Résultats et discussion	
IV.1 Modèle thermique du sol.....	28
IV.1.1 Introduction.....	28
IV.1.2 Température en profondeur du sol.....	28
IV.2 Modélisation stationnaire de la température de l'air le long du tube.....	30
IV.3 Influence de différents paramètres sur le comportement thermique de l'échangeur air sol.....	31
IV.3.1 Influence de la vitesse d'écoulement de l'air.....	31
IV.3.2 Influence de la conductivité thermique du sol.....	32
IV.3.3 Influence de rayon du sol.....	33
IV.3.4 Influence de rayon de tube.....	33
IV.3.5 Quantité de chaleur échangée par unité de longueur	34
Conclusion générale	36
Références	38

Dédicace

À nos parents nobles et plus chers au monde pour leur soutien moral et matériel et leurs encouragements dans toutes nos vies. Que Dieu les garde.

A tous nos amis et collègues sans exception.

Pour tous les membres de la famille du département des énergies renouvelables de l'Université de Ouargla.

A tous ceux qui nous ont aimés et nous ont souhaité du bonheur et du succès.

Remerciements

Tout d'abord, remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force, la santé, la persévérance et de nous permettre de terminer ce travail dans les meilleures circonstances.

*Nous voudrions remercier le directeur de notre thèse, **Belloufi Youssef**, pour l'honneur qu'il nous a donné en guidant ce travail, en nous aidant et en nous conseillant tout au long du développement de ce travail modeste.*

Nous remercions également nos professeurs, amis et collègues du département des énergies renouvelables de l'université d'Ouargla.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

Merci.

Listes des figures:

Chapitre I

Figure 1.1 Montage expérimental de systèmes d'échangeur air sol secs et humides	4
Figure 1.2 Implantés conduites horizontales et verticales pour l'alimentation en eau.	5
Figure 1.3 Installation et test du réseau hydratant.	5
Figure 1.4 Schéma de la multi-pipe d'échangeur air sol.	6
Figure 1.5 pourcentage du débit de chaque conduite dans le débit total des Conduites	6
Figure 1.6 Énergie fournie par la conduite d'air enterrée pendant un an (Oran, Bechar et Adrar).	7
Figure 1.7 Configuration expérimentale d'échangeur air sol couplée avec le chauffage à air solaire Canal.	8
Figure 1.8 Evolution de l'efficacité moyenne et du COP en fonction de la vitesse de l'air: (a) chauffage et (b) refroidissement	9
Figure 1.9 Potentiel de refroidissement et de chauffage dans le cas de Rio do Janeiro, au Brésil.	9
Figure 1.10 Potentiel de refroidissement et de chauffage dans le cas de Montpellier, en France.	10
Figure 1.11 Installation expérimentale d'un échangeur de chaleur à tuyau d'air.	10

Chapitre II

Figure 2.1 Installation productrice de chaleur pour les particuliers.	13
Figure 2.2 Certaines sources thermales dans le Sud algérien.	18

Chapitre III

Figure 3.1 Schéma du milieu semi-infini du sol avec température variable à la surface.	21
Figure 3.2 Schéma descriptif de l'échangeur air sol.	23

Chapitre IV

Figure 4.1 Evolution horaire de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol de sable humide.	29
Figure 4.2 Evolution horaire de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol d'argile.	29

Figure 4.3 Evolution horaire de la température du sol en fonction de la profondeur Pour un sol de limon argilo-sableux.	30
Figure 4.4 Validation des résultats analytiques par ceux de l'expérimentale.	31
Figure 4.5 Evolution de la température du sol en fonction de la longueur de tube.	32
Figure 4.6 Effet de la conductivité thermique du sol sur l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur.	32
Figure 4.7 Effet du rayon du sol sur l'évolution horaire de la température de l'air le long de l'échangeur.	33
Figure 4.8 Effet de variation du rayon du sol sur l'évolution horaire de la température de l'air le long de l'échangeur.	34
Figure 4.9 Profil de la quantité de chaleur échangée par unité de longueur le long du tube.	35

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Energie fournie (Oran, Bechar et Adrar).	7
Tableau 2.1 Evolution de la capacité géothermique installée dans le monde pour la production d'électricité en MW.	16
Tableau 4.1 Propriétés thermo-physiques des différentes natures du sol.	28
Tableau 4.2 Paramètres de l'échangeur de chaleur (air/sol)	30

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
A	Amplitude des variations de température	°C
α	Diffusivité thermique	m ² /s
D	Diamètre du tube	m
L	Longueur	m
Nu	Nombre de Nusselt	(-)
R _{tot}	La résistance thermique totale par unité de longueur	m.K.W ⁻¹
R	Résistance thermique	m.K.W ⁻¹
r ₁	Rayon intérieur de tube enterré	m
r ₂	Rayon extérieur de tube enterré	m
r ₃	Rayon de la couche adiabatique du sol	m
Re	Nombre de Reynolds	(-)
T _i	Température moyenne annuelle a la surface du sol	°C
T _s	Température du sol	°C
T _e	Température de l'air à la entrée de l'échangeur	°C
T	Temps	S
ω	Fréquence angulaire	rad.J ⁻¹
U	Vitesse de l'air	m.s ⁻¹
Z	Profondeur	m
λ_{sol}	Conductivité thermique du sol	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
λ_{tube}	Conductivité thermique du tube	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
h _{air}	Coefficient d'échange moyen de l'air par convection	W.m ⁻² .K ⁻¹
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	kg.m ⁻³
ρ_{sol}	Masse volumique de sol	kg.m ⁻³
C _{pair}	Chaleur spécifique de l'air	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
C _{psol}	Chaleur spécifique de sol	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
S	Surface d'échange	m ²
μ	Viscosité dynamique	kg.m ⁻¹ .s ⁻¹
ν	Viscosité cinématique	m ² .s ⁻¹

INTRODUCTION GENERALE

Les études démographiques indiquent que la population des pays en développement va croître très vite et leurs besoins d'énergie seront très importants. Le recours à des énergies propres pour les besoins énergétiques et le développement économique et social devient incontournable. Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique et énergie géothermique). L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et parmi les moins chères[1].C'est de l'énergie stockée sous la surface de terre.

Les profondeurs de la terre recèlent d'énormes quantités de chaleur naturelle, dont l'origine réside essentiellement dans la désintégration d'éléments radioactifs.

Selon les connaissances actuelles, les températures culminent à 6000 °C dans le noyau et atteignent jusqu'à 1300 °C environ dans le manteau supérieur du globe terrestre. La température augmente à partir de la surface du sol de 3 °C environ par 100 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient géothermique normal.

La géothermie fait partie des énergies renouvelables. Elle consiste à extraire les calories stockées dans le sol pour la production de l'électricité (géothermie à haute température) ou du chauffage (géothermie à basse température) [2].

Nous intéressons dans cette étude à l'échangeur de chaleur air/sol qui est l'une des techniques efficaces d'énergie verte pour le chauffage et le refroidissement des locaux. Ce type d'échangeur utilise la température du sous-sol non perturbée à une profondeur de trois à quatre mètres[3].

Lorsque l'air circule à travers le tube enterré, la chaleur est échangée entre le sol et l'air et peut être directement utilisée pour le chauffage ou le refroidissement d'un espace donné. Par conséquent, l'échangeur air/sol permet d'améliorer le confort thermique dans les bâtiments. Récemment, de nombreux chercheurs ont effectué un certain nombre d'analyses (expérimentales et/ou numériques) de performance des systèmes échangeur air sol pour améliorer leur performance thermique[4, 5].

Le présent mémoire est articulé sur quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous présentons certaines expériences menées par les chercheurs et les résultats de leurs expériences sur le terrain à travers des figures ou des courbes.

Le deuxième chapitre traite le concept et les principes de la géothermie et ses applications, des types de sédiments géothermiques et de la géothermie pour le monde et l'Algérie.

Le troisième chapitre est consacré à l'estimation de l'équation de la chaleur unidirectionnelle transitoire dans le sol et la modélisation analytique de la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur air-sol en reposant sur le principe des bilans énergétiques.

Les résultats obtenus lors de la modélisation sont affichés et validés dans le quatrième, en étudiant certains paramètres qui influent sur la performance thermique de l'échangeur air sol. Enfin, on sort par une conclusion générale.

Chapitre I :

Etude Bibliographique

1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude des échangeurs de chaleur air/sol. L'objectif est de mener une revue bibliographique résumant les études théoriques, analytiques, préparatoires et expérimentales de certains chercheurs travaillant dans cet échangeur.

1.1 Etude Bibliographique:

Misra et al[6] ont présenté une étude sur les technologies de chauffage et de refroidissement passifs de l'air par l'exploitation des échangeurs air sol (figure 1). Un modèle thermique stationnaire basé sur le principe des bilans énergétiques est développé et validé avec des résultats expérimentaux réalisés sur site. Ils ont obtenu une efficacité énergétique de l'ordre de 52,25% et 53,18% pour un sol sec et humide respectivement, ils ont conclu aussi que la performance thermique peut améliorer par l'augmentation de teneur en eau contenue dans le sol où l'échangeur est implanté (figure 2)



Fig1: Montage expérimental de systèmes d'échangeur air sol secs et humides [6].



Fig2: Conduites horizontales implantés et verticales pour l'alimentation en eau [6].

Wasseem et al [7] ont comparé la performance thermique de l'échangeur air sol dans deux natures de sols différentes (sol sec et mouillé artificiellement). Des tests ont été effectués à Basra (Irak) pour les deux natures du sol citées précédemment. Les résultats expérimentaux ont confirmé que l'augmentation de la teneur en eau dans le sol enveloppant le tube enterré améliore (figure3) l'efficacité et l'échange thermique entre l'air en écoulement à l'intérieur du tube et le sol.



Fig3: Installation et test du réseau hydratant [7]

Amanowicz et al [8] ont présenté une étude dynamique sur l'écoulement de l'air à l'intérieur des échangeurs air sol en développant une simulation numérique à l'aide du logiciel CFD Ansys FLUENT, Le modèle de maillage de cellules coupées et le modèle turbulent k-ε avec des valeurs

de coefficients par défaut et un traitement de paroi amélioré ont été utilisés. Les pertes de charge et le débit d'air totaux dans chaque tuyau d'échangeurs à tubes multiples ont été étudiés à la fois expérimentalement et numériquement (figure 4.) Les résultats montrent que le débit d'air dans chaque tube de tuyaux multiples n'est pas égal (figure 5).

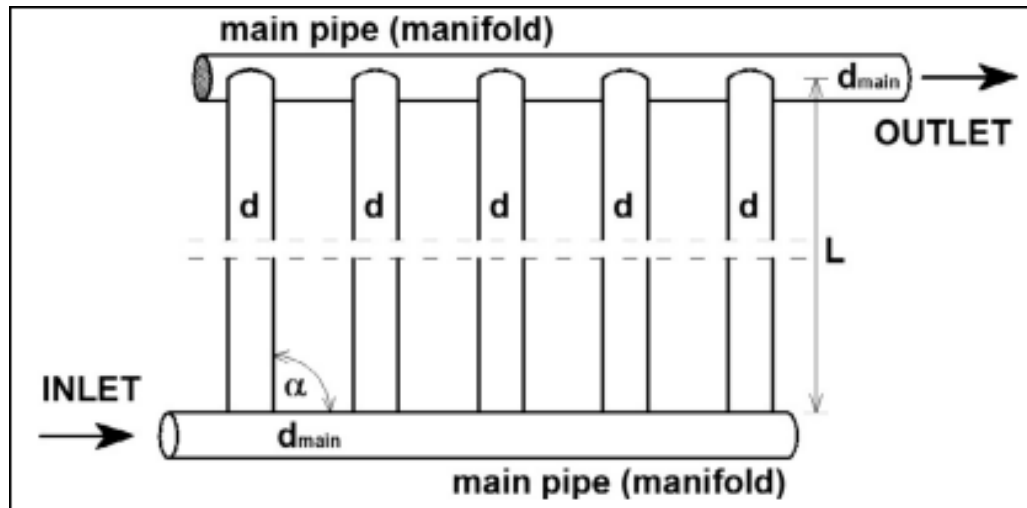


Fig4:Schéma de la multi-pipe d'échangeur air sol [8].

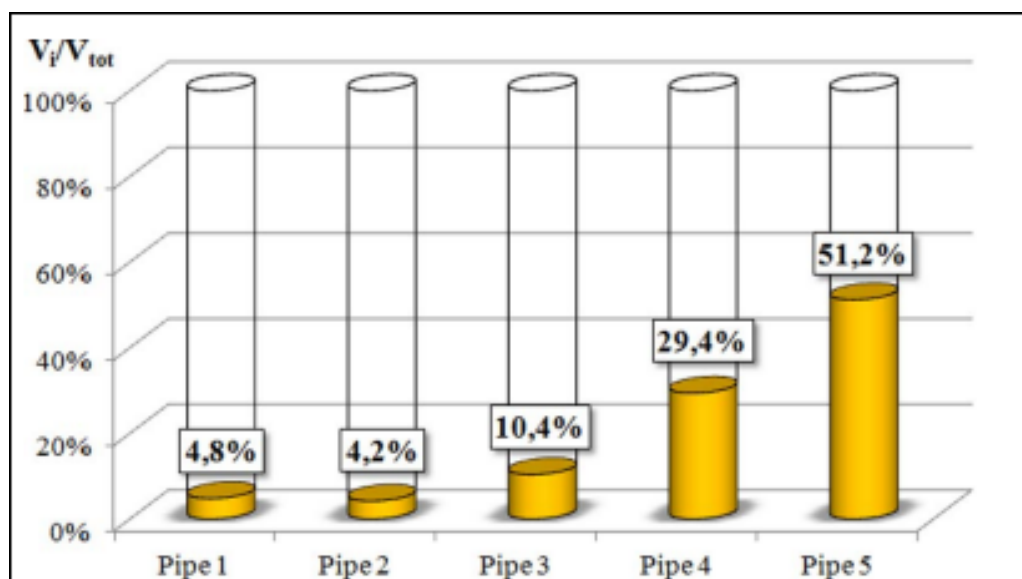


Fig5: pourcentage du débit de chaque conduite dans le débit total des conduites multiples [8]

Menhoudj et al [9] ont présenté une étude sur la performance énergétique d'un échangeur air sol à savoir) Différentes conditions climatiques du Maghreb (villes d'Oran, Béchar et Adrar en Algérie. Deux types de matériaux de tube utilisés comme le galvanisé et le PVC sont considérés

pour la même géométrie (20 m de longueur et 120 mm de diamètre enfouillé à 2 m de profondeur). Des tests expérimentaux sont réalisés dans la période de rafraîchissement à l'université d'Oran pour valider le modèle numérique simulé par TRNSYS .Ils ont conclu que les zones d'Adrar et Bechar ayant une performance énergétique plus que la ville d'Oran (figure6) et (tableau 3.)

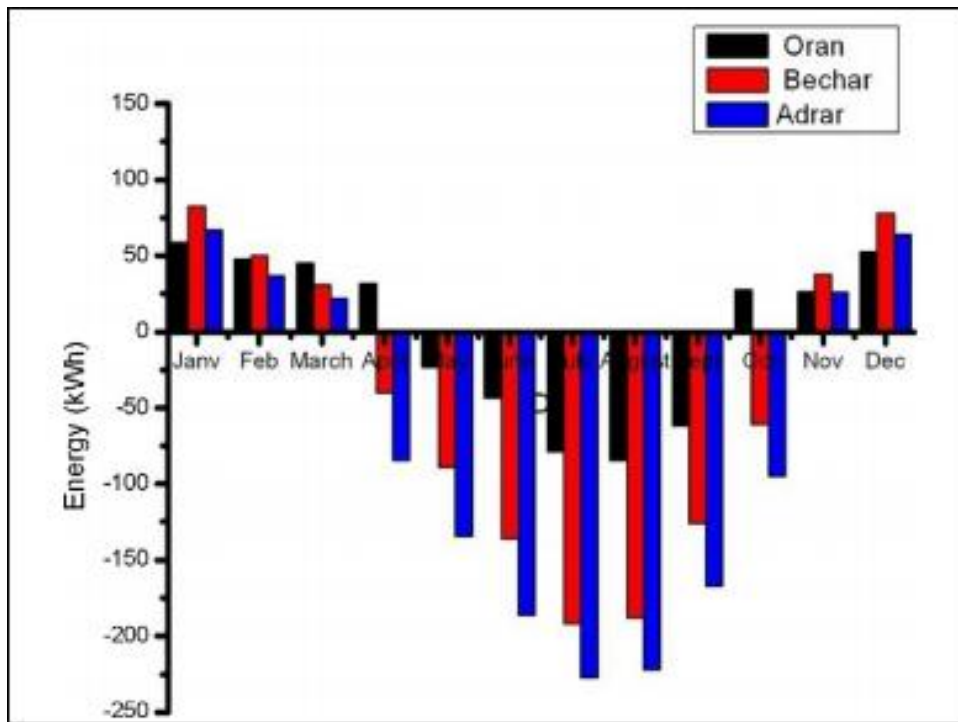


Fig6: Énergie fournie par la conduite d'air enterrée pendant un an (Oran, Bechar et Adrar) [9]

Tableau 1. Energie fournie (Oran, Bechar et Adrar)[9]

Month	Energy provided . Zinc (kWh)			Energy provided . PVC (kWh)		
	Oran	Bechar	Adrar	Oran	Bechar	Adrar
August	-84.51	-187.91	-222.25	-79.93	-198.78	-240.44

Guohui[9]a développé une nouvelle méthode pour générer les profils d'humidité et de température dans un sol aux propriétés thermo-physiques variables dans le temps et dans l'espace. Les différences maximales entre les installations avec ou sans humidité en qualité de flux échangé entre l'air à l'intérieur de l'échangeur et le sol environnant sont de l'ordre de 24%, 17% et 18% pour les sols argileux, limoneux et sableux respectivement. En conclusion, il est

nécessaire d'utiliser un couplé modèle de transfert de chaleur et d'humidité afin de prédire avec précision la performance thermique saisonnière d'un échangeur air sol.

Jakhar[10] a installé un échangeur air sol en Inde pour étudier les performances thermiques pour les deux modes de fonctionnement estival et hivernal. La température du sol à une certaine profondeur à environ 3 m est maintenue constante tout au long de l'année, elle est donc utilisée comme dissipateur de chaleur ou source de chaleur lors des sessions d'été ou d'hiver. L'échangeur de chaleur air sol consomme moins d'énergie électrique que le climatiseur conventionnel et il n'a pas d'impact négatif sur l'environnement (figure7.)



Fig7: Configuration expérimentale d'échangeur air sol couplée avec le chauffage à air solaire Canal [10]

Rosa et al [11] ont étudié la performance énergétique d'un système d'échangeur air sol qui consiste un ensemble de conduites souterraines conduisant l'air extérieur dans une salle à ventilé et en collectant de l'énergie géothermique pour économiser de l'énergie. Des tests expérimentaux ont été réalisés pour les utilisations résidentielles à Coimbra (Portugal) pendant 1 an. Un modèle analytique est développé et vérifié avec les données du système de surveillance. Ils constatent de nombreux variables influents sur les résultats du modèle qui sont inclus dans l'étude paramétrique, à savoir la longueur et le diamètre de la conduite, la vitesse d'écoulement de l'air, le matériau de la conduite et le type de sol. Pour cela, le facteur le plus important est la vitesse d'écoulement de l'air à l'intérieur de la conduite (figure8), tandis que le matériau du tuyau n'a pas d'effet significatif.

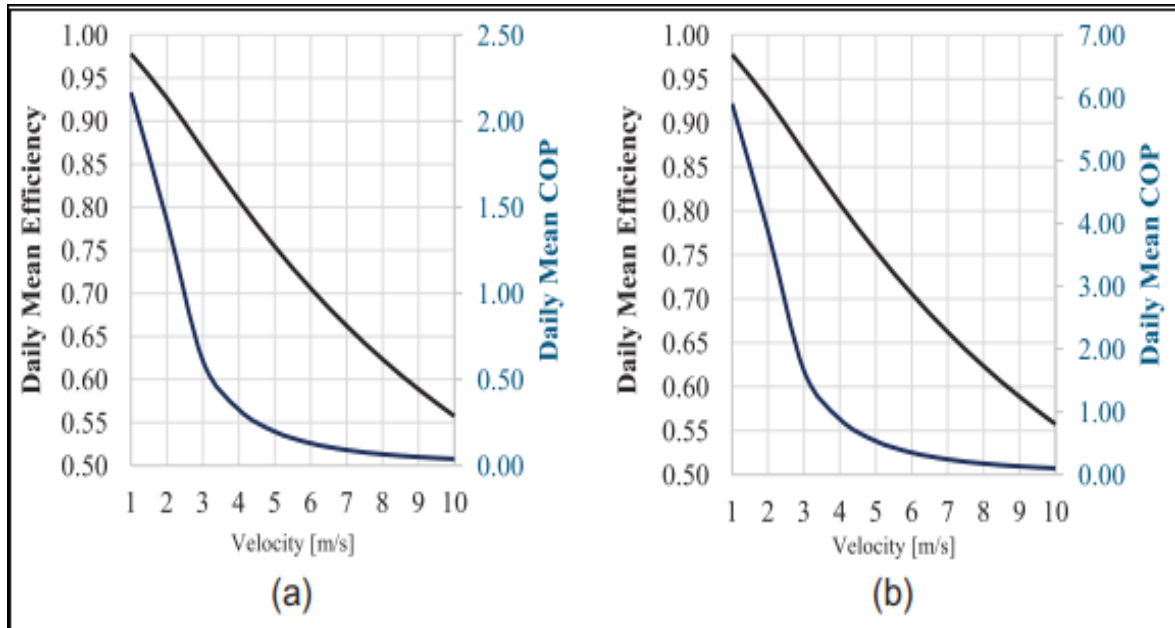


Fig8: Evolution de l'efficacité moyenne et du COP en fonction de la vitesse de l'air:
 (a) chauffage et (b) refroidissement [11]

Emanuel et al [12] ont traité un document sur la conception des échangeurs air sol basés non seulement sur la chaleur sensible de transfert, mais aussi sur la chaleur latente d'échange. Ils ont comparé l'impact du climat du Brésil et du sud de la France sur le fonctionnement du système (figure9) et (figure10.) La longueur optimale du conduit est déterminée pour les différents climats afin d'obtenir le maximum d'échanges thermiques entre le sol et le tube enterré. Un modèle dépendant du temps combine les données météorologiques réelles pour indiquer quand un échangeur air sol devient une bonne option dans un climat tropical.

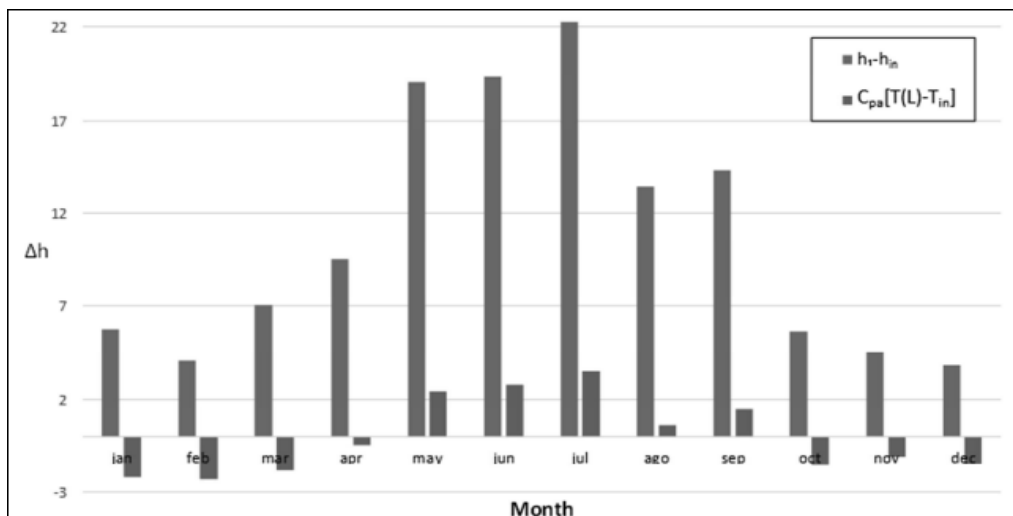


Fig9: Potentiel de refroidissement et de chauffage dans le cas de Rio do Janeiro, au Brésil [12]

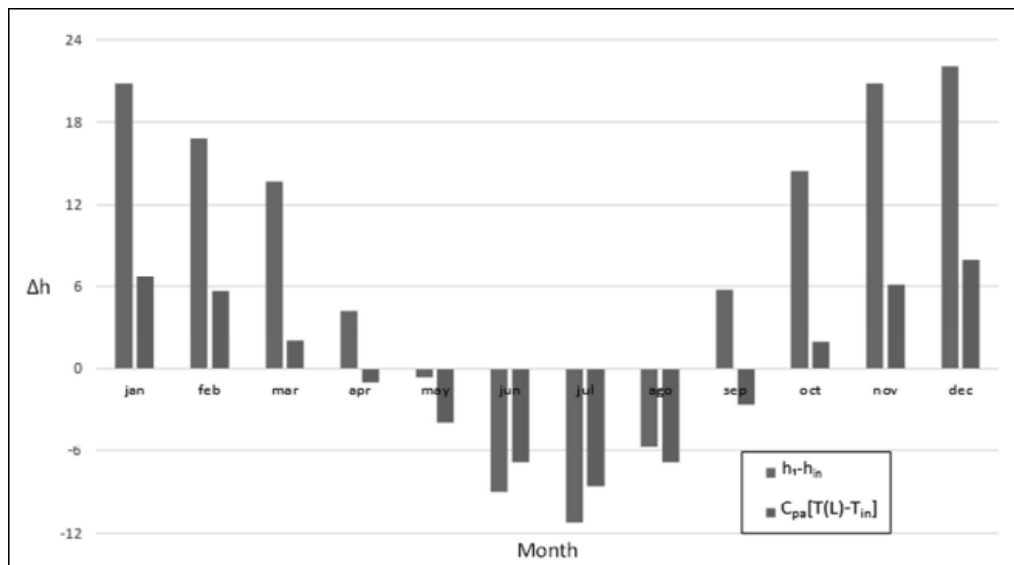


Fig10:Potentiel de refroidissement et de chauffage dans le cas de Montpellier, en France [13]

Vishalet al [13] ont technique d'ingénierie est utilisée pour réduire problème Réchauffement et Ozone Déplétion dans le Monde.. Les échangeurs de chaleur sol-air(figure9) sont une technique émergente qui réduit la charge de refroidissement et de chauffage des bâtiments en été et en hiver et réduit ainsi la consommation énergétique globale du bâtiment. Il est analysé de la performance de la chaleur dans les tuyaux d'air de la Terre Echangeur (EAPHE) Fait en variant les divers paramètres comme l'air vitesse, débit massique, profondeur des tuyaux et matériau destuyaux etc. Les résultats obtenus ont révélé que la température à l'intérieur du la terre peut être augmentée de 8-10 ° C pendant la saison d'hiver et peut être Diminution de 12 ° C à 13 ° C pendant la saison estivale.

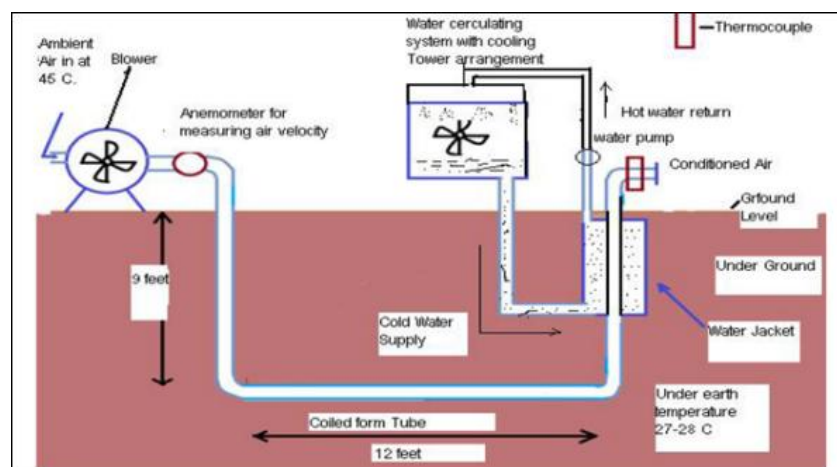


Fig11: Installation expérimentale d'un échangeur de chaleur à tuyau d'air. [13]

Chapitre II

Généralités sur la géothermie

II.1 Introduction:

La géothermie est la chaleur présente à l'intérieur de la Terre. Elle est constituée à 30 % par la chaleur subsistant de son processus de création et à 70 % par les émissions radioactives des isotopes radioactifs[15].

Ce dernier provient de l'exploitation de la chaleur qui existe sous la surface de la terre. On emploie de nombreuses méthodes pour l'obtenir et la transformer en chaleur utile ou en électricité. Les sources chaudes ou brûlantes sont exploitées depuis la préhistoire, essentiellement pour le bain, la cuisson des aliments ou le lavage des vêtements. Aujourd'hui, on se sert de l'eau chauffée par géothermie de nombreuses manières, pour le chauffage et la transformation de la chaleur, et dans les réseaux de chauffage urbain de plusieurs villes de Chine, des États-Unis, de France, de Hongrie, d'Islande, d'Italie, du Japon.

Une autre application géothermique faisant intervenir des pompes à chaleur consiste à se servir de la masse thermique des trois premiers mètres de la surface terrestre. A cette profondeur, la terre conserve une température presque constante (de 10° à 16°C dans les climats tempérés, par exemple), de sorte qu'elle est plus chaude que l'air en hiver, et plus fraîche en été. Les pompes à chaleur géothermiques utilisent cette différence de chaleur pour réchauffer ou rafraîchir les bâtiments. Contrairement aux ressources géothermiques à haute température, relativement rares, la ressource que constitue un sol chaud à faible profondeur est répandue partout dans le monde[16].

II.2 Principe de la géothermie:

Le principe de la géothermie se caractérise par l'exploitation de la chaleur contenue dans la croûte et les couches superficielles de la terre. Ainsi pour comprendre, il faut distinguer ses deux principes : la géothermie de surface et la géothermie profonde.

D'une part, le principe de fonctionnement de la géothermie de surface exploite la récupération de la chaleur en hiver et de la fraîcheur en été dans la couche superficielle du sol. Cette énergie est exploitée facilement pour des besoins thermiques en utilisant l'inertie thermique du sol comme énergie renouvelable.

D'autre part, le principe de fonctionnement de la géothermie profonde consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage en récupérant l'eau circulant dans des couches géologiques jusqu'à plusieurs de mètres de profondeur. Cette eau est captée

sous forme liquide ou de vapeur pour produire du chauffage (figure 1) et/ou de l'électricité. [17]

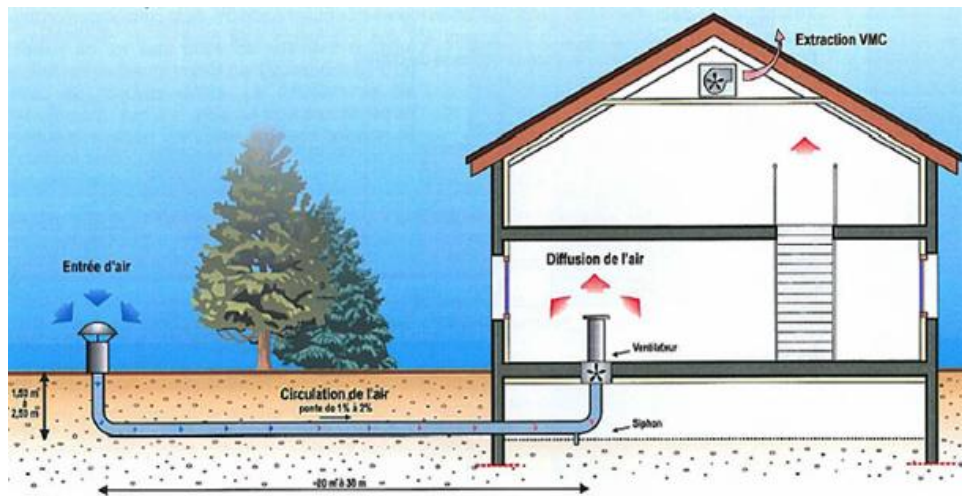


Fig1: Installation productrice de chaleur pour les particuliers. [18]

II.3 Types gisements de géothermiques:

A travers le monde, il existe trois catégories de gisements géothermiques :

- Les gisements géothermiques des zones volcaniques récentes : Ce type de gisement se caractérise par l'existence en profondeur d'une chambre magmatique très chaude (1300°C) (Cristopher, H., Armstead, H., 1978) qui représente la source de chaleur naturelle. Cette chambre magmatique cède sa chaleur aux couches géologiques superficielles. Dans ce cas, les eaux sont très chaudes; elles sont plus adaptées à la production d'électricité. Parmi les pays concernés par ce type de gisements, on peut nommer la Nouvelle-Zélande et l'Islande.
- Les gisements des zones de plateforme continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires. Dans ce type de gisement il n'existe pas de source de chaleur particulière en profondeur, mais la chaleur est uniquement due au gradient géothermique. Dans ce cas les réserves sont généralement très profondes et leur exploitation nécessite la réalisation de forages.

Ce type de gisements est rencontré en France (les bassins parisien et aquitain) et en Algérie (le bassin du Sahara septentrional.).

- Les gisements géothermiques des zones continentales actives : Dans ce troisième cas, les eaux résultent de la circulation d'eau thermale à travers les failles et les discontinuités géologiques et arrivent en surface sous forme de sources. On retrouve ce type de gisement en

Algérie, à travers les diverses sources thermales qui jaillissent au Nord. Exemple : Hammam Bouhadjar[19].

Suivant leurs thermalismes, ces gisements géothermiques sont classés en deux types de champs géothermiques :

1- Les champs hyperthermiques :Concernent la première catégorie de gisements correspondants aux gisements géothermiques des zones volcaniques récentes.

2- Les champs semi-thermiques :Concernent la deuxième et la troisième catégorie de gisements correspondant aux gisements des zones de plate-forme continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires et aux gisements géothermiques des zones continentales actives [20].

II.4 Types de la géothermie

L'énergie géothermique consiste à exploiter le flux de chaleur naturelle des sous-sols de la terre dont la température augmente avec la profondeur, pour le transformer en chauffage ou en électricité. Ce type d'énergie est renouvelable et ne dépend pas des conditions atmosphériques (contrairement à l'énergie éolienne ou solaire par exemple), ce qui permet de l'utiliser d'une manière continue.

On distingue trois types de géothermie selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

1-La géothermie à haute température:

Qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité.

2- La géothermie à basse température :

Géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres). Elle est généralement utilisée pour les réseaux de chauffage urbain.

3- La géothermie à très basse température :

Géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle [21].

II.5 -Avantages et inconvénients de la géothermie:

II.5.1 -Les avantages de l'énergie géothermique:

- permet la préservation de l'environnement car dégage peu de gaz à effet de serre.
- n'a pas besoins d'un espace de stockage comme les cuves à fioul.
- ce type d'installation est réversible, il peut remplacer la climatisation en produisant du froid pour les particuliers.
- cette ressource énergétique renouvelable et préservai de l'environnement par diminution d'émission de gaz à effet de serre.

II.5.2 -Les inconvénients de l'énergie géothermique:

- Le prix de revient est très élevé.
- l'installation géothermique pourra empêcher les plantations de pousser.
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.
- Les sites de forages sont limités en fonction du type de avec le terrain [22].

II.6 La géothermie dans le monde:

II.6.1 Les applications:

La géothermie, comparée aux autres sources d'énergies renouvelables, se place au premier rang avec 79,6 % de la production électrique mondiale évaluée en 1996, à 42 053 GWh/an pour une capacité installée de 7 049 MWe [23] Pour ce qui est de l'utilisation directe, mode d'exploitation le plus répandu dans le monde, la puissance totale est évaluée à près de 37.000 GWh/an pour une capacité installée de près de 10.000 GWh/an[24]. Selon les références citées plus haut, l'utilisation directe de cette énergie, se répartit comme suit : Chauffage des locaux: 33 %, Balnéothérapie: 19 %, Chauffage des serres: 14 %, Pompe à chaleur: 12 %, Pisciculture: 11 %, Industrie:10% [25].

II.6.2La capacité énergétique:

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui produit deux types d'énergies, l'énergie électrique et l'énergie calorifique. Sur le plan exploitation, elle est classée troisième dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. Aujourd'hui, elle représente 3 % de la production énergétique mondiale dont 0.4 % dans l'énergie électrique.

L'énergie géothermique est aujourd'hui utilisée dans plus de soixante pays, mais cependant elle est particulièrement développée dans certains pays seulement comme les Etats-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse.

Chapitre II généralités sur la géothermie

L'Islande étant un pays volcanique, il est par conséquent très riche en eau thermale. Aujourd'hui ce pays satisfait pratiquement la totalité de ces besoins en chaleur et en électricité à partir de l'énergie géothermique.

Un très bon exemple est donné aussi par les philippines qui produisent 21.5% de son énergie électrique à partir de la géothermie. Afin de rentabiliser ce type de gisements il faut surtout une bonne étude d'intérêt économique qui concerne tous les aspects, tels que, le coût des installations géothermiques, quantité de calorie fournie, transformation des calories en énergie[26].

Tableau 1 : Evolution de la capacité géothermique installée dans le monde pour la production d'électricité en MWe [27].

Pays	1995	2000	2002
Amériques du Nord	3 570	2 983	2 971
Amériques centrale et du sud	231	407	416
Total Amériques	3 801	3 390	3 387
Asie	1 979	3 075	3 220
Union européenne	641	805	883
Autres pays d'Europe	81	213	297
Total Europe	722	1 018	1 180
Océanie	286	437	441
Total monde	49	54	128
Afrique	6 837	7974	853

II.7 Les forages:

L'exploitation de la géothermie nécessite l'existence en profondeur de la terre de deux paramètres importants la chaleur et l'eau. En effet c'est l'eau qui permet de véhiculer cette chaleur profonde en surface. L'eau contenue dans les réservoirs géothermiques est remontée à la surface grâce à un forage; le plus fréquent est le forage Rotary [28].

Si la pression dans le gisement est insuffisante pour que le forage soit artésien, la production peut s'établir par l'intermédiaire d'une pompe. Une fois l'eau géothermale utilisée, elle est soit rejetée dans l'environnement si l'eau n'est pas salée. Dans le cas contraire, elle est réinjectée dans la nappe d'origine à l'aide de puits de réinjection. Le forage rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier. Dans le cas de la circulation directe, le fluide est injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, il sort par les événements de l'outil et remonte à la surface dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou) [29].

La profondeur du forage peut être très importante, pendant l'exécution de celui-ci, il n'y a pas de perturbation par les terrains peu stables ou plastiques, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage adapté.

Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.

Le forage rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake[26].

II.8 La géothermie en Algérie:

II.8.1 Les ressources géothermiques en Algérie:

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien, Carte Géothermique Préliminaire du Nord de l'Algérie' (M. Abouriche et al. 1988); (S. Rezig, 1991, 1992)]. Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nord algérien, majoritaires au Nord-Est. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence; au Nord-Ouest, au Nord-est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Oranie, de la Kabylie et du Constantinois.

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional, une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du continental intercalaire(figure 2) [30].

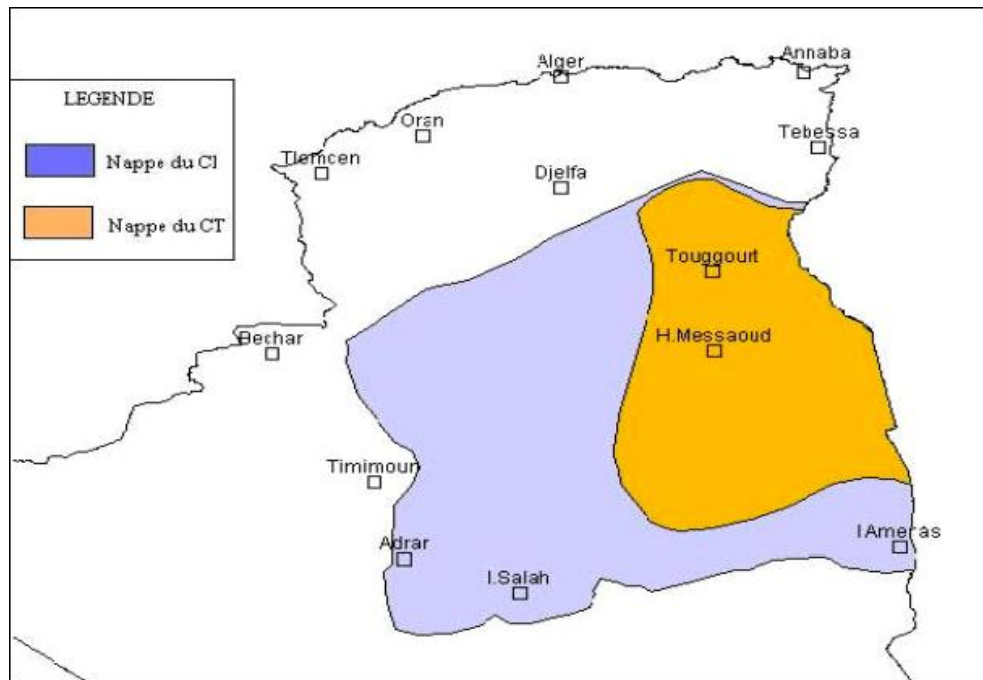


Fig2: Certaines sources thermales dans le Sud algérien [30].

II.8.2 L'exploitation:

Bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du continental intercalaire.

L'exploitation de l'énergie géothermique dans le Sud de l'Algérie peut être facilitée considérablement grâce aux nombreux forages pétroliers qui traversent le territoire saharien [31].

Chapitre III

**Modélisation analytique de l'échangeur
air/sol**

1 Modélisation transitoire de la température du sol

1.1 Température à la surface du sol variable

L'équation de la chaleur unidimensionnelle (1) s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

En appliquant le changement de variables suivant :

$$\theta(z, t) = T(z, t) - T_i \quad (2)$$

L'équation (1) devient:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (3)$$

Nous choisissons les conditions aux limites suivantes:

$$\begin{aligned} \theta(z = 0, t) &= A \cdot \cos(\omega t) \\ \theta(z \rightarrow \infty, t) &= 0 \\ \theta(z, 0) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Où :

T_i : Température moyenne annuelle invariante à l'intérieur du sol.

ω : Fréquence angulaire [$\omega=2\pi/365$] (rad/j).

A : Amplitude de la variation de température (A= 11.9°C pour La ville de Ouargla) [32].

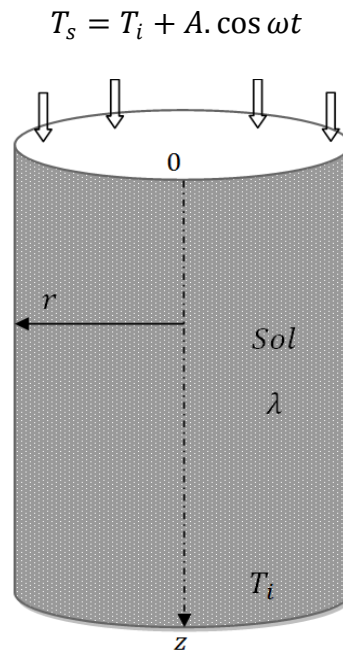


Fig1: Schéma du milieu semi-infini du sol avec température variable à la surface.

La méthode de séparation des variables a été choisie pour résoudre l'équation (3).

$$\theta(z, t) = Z(z). \tau(t) \quad (5)$$

Après substitution de l'équation (5) dans l'équation (3), on aura :

$$Z(z). \tau'(t) = \alpha. Z''(z). \tau(t) \quad (6)$$

En divisant les deux membres de l'équation (6) par $Z(z). \tau(t)$, on obtient :

$$\alpha \frac{Z''(z)}{Z(z)} = \frac{\tau'(t)}{\tau(t)} = \beta = cste \quad (7)$$

Tel que : $\beta = iw$ (Nombre complexe constant)

De l'équation (7), on déduit :

$$Z''(z) - \frac{\beta}{\alpha}. Z(z) = 0 \quad (8)$$

$$\tau'(t) - \beta. \tau(t) = 0 \quad (9)$$

La solution des équations (8) et (9) s'écrivent respectivement comme suit :

$$Z(z) = a. \exp\left(-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}z\right) + b. \exp\left(\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}z\right) \quad (10)$$

$$\tau(t) = c. \exp(\beta t) \quad (11)$$

La solution générale de l'équation (3) Soit comme suit:

$$\theta(z, t) = \left[C_1. \exp\left(-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}z\right) + C_2. \exp\left(\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}z\right) \right]. \exp(\beta t) \quad (12)$$

C_1 et C_2 sont deux constantes d'intégration, on applique les conditions aux limites citées plus haut, pour les déterminer :

- Pour que la solution reste finie lorsque $z \rightarrow \infty$; il faut que la constante C_2 soit nulle.

Donc : $C_2=0$

$$\theta(z, t) = \left[C_1. \exp\left(-\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}z\right) \right]. \exp(\beta t) \quad (13)$$

- Sur la surface du sol $z=0$, on doit avoir :

- $\theta(0, t) = \text{réelle} [C_1. \exp(\beta t)] = \text{réelle} [C_1. (\cos(\omega t) + i. \sin(\omega t))] = A. \cos[\omega t]$

En remarquant :

$$\sqrt{i\omega} = \sqrt{\frac{\omega}{2}}(1 + i) \quad (14)$$

La solution complexe de l'équation (13) s'écrit

$$\theta(z, t) = A. \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}(1 + i).z\right). \exp(i\omega t) \quad (15)$$

Qui se transforme en:

$$\theta(z, t) = A. \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}.z\right). \left[\exp(i\omega t). \exp\left(-i\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}.z\right) \right] \quad (16)$$

L'écriture trigonométrique est :

$$\theta(z, t) =$$

$$A. \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \left[(\cos \omega t + i \sin \omega t) \cdot \left(\cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) + i \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \right) \right] \quad (17)$$

Après arrangement, on aura:

$$\theta(z, t) = A. \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \cdot \left[\cos \omega t \cdot \left(\cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) + \cos \omega t \cdot i \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \right) + i \sin \omega t \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) + i^2 \sin \omega t \cdot \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \right] \quad (18)$$

$$\theta(z, t) = A. \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \cdot \left[\cos(\omega t) \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) - \sin(\omega t) \cdot \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) + i \cos \omega t \cdot \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) + i \sin \omega t \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \right] \quad (19)$$

La température requise est la partie réelle de la solution complexe existante [33-36]:

$$\theta(z, t) = A. \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \cdot \left[\cos(\omega t) \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) + \sin(\omega t) \cdot \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \right] \quad (20)$$

Enfin, l'expression T (z, t) prend la forme suivante:

$$T(z, t) = T_i + A. \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \cdot \cos\left(\omega(t) - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right) \quad (21)$$

2 Modèle thermique de l'échangeur air sol

Hypothèses simplificatrices

L'échangeur air sol a été enterré suffisamment profonde pour que la température du sol adjacent du tube reste moins sensible aux conditions climatiques externes. La conduction longitudinale est négligeable et le transfert s'effectue en régime stationnaire à une dimension.

2.1 Modélisation stationnaire de la température de l'air le long du tube

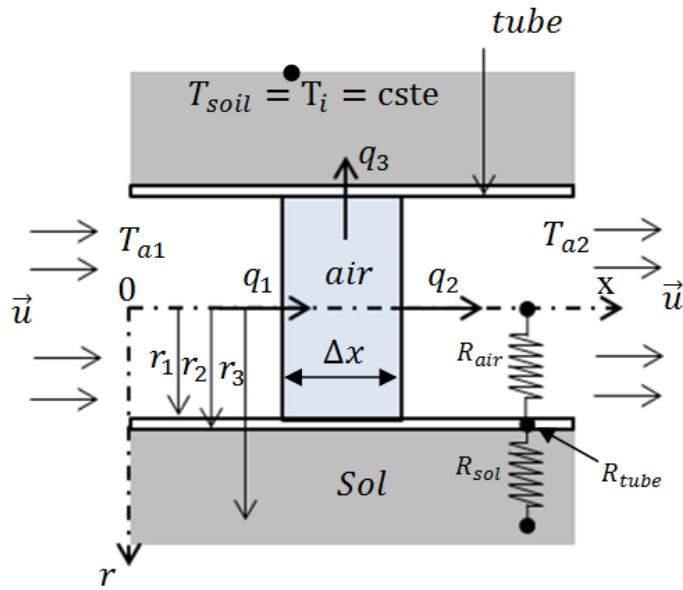


Fig. 2: Schéma descriptif de l'échangeur air sol [37].

Le bilan d'énergie entre deux sections de Δx de distance fig. (2) s'écrit sous la forme suivante [38] :

$$m \cdot C_p \cdot \frac{DT_a}{Dt} = q_1 - q_2 - q_3 \quad (22)$$

Où:

$$\begin{aligned} q_1 &= -\lambda s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \\ q_2 &= -\lambda s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \\ q_3 &= \frac{T_{air} - T_{sol}}{R_{totale}} \end{aligned} \quad (23)$$

Donc l'équation (22) s'écrit comme suit :

$$m \cdot C_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = -\lambda \cdot s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x + \lambda \cdot s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + \frac{(T_{sol} - T_{air})}{R_{totale}} \quad (24)$$

Chapitre III Modélisation analytique de l'échangeur air/sol

La résistance thermique totale est la somme de la résistance à la conduction du sol, du tube et de la résistance convective de l'air.

$$R_{totale} = R_{sol} + R_{tube} + R_{air} \quad (25)$$

La résistance du tube s'écrit:

$$R_{tube} = \frac{1}{\lambda_{tube} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (26)$$

La résistance du sol est donnée comme suit:

$$R_{sol} = \frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \quad (27)$$

Par contre, la résistance de l'air prend la forme suivante:

$$R_{air} = \frac{1}{h_{air} \cdot 2\pi \cdot r_1 \cdot \Delta x} \quad (28)$$

Soit donc:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot s \cdot \Delta x$$

Où: m est la masse d'air

ρ est la masse volumique d'air

V le volume de l'air

En divisant l'équation (24) par Δx , on obtient:

$$\rho \cdot s \cdot C_p \cdot \mu \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-\lambda \cdot s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x + \lambda \cdot s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + \frac{(T_{sol} - T_{air})}{R_{totale}}}{\Delta x} \quad (29)$$

Avec R' est la résistance totale par unité de longueur

$$R' = \frac{R_{totale}}{\Delta x} \quad (30)$$

Et:

$$\frac{-\lambda \cdot s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x + \lambda \cdot s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x}}{\Delta x} = \lambda s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (31)$$

Où $\lambda s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ est la conduction longitudinale qui est négligeable par hypothèse:

Donc

$$m \cdot C_p \cdot \mu \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{(T_{sol} - T_{air})}{R'_{totale}} \quad (32)$$

Notons par s , la section interne du tube, $s = \pi \cdot r_1^2$ et $h = (Nu \cdot k) / 2r_1$ [38], le coefficient moyen de transfert de chaleur par convection.

Où le nombre de Nusselt, $Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3}$ [38-40] et le nombre de Reynolds, $Re = \rho v / \mu$ [40].

L'intégration de l'équation relation (32) donne la forme suivante:

$$\ln(T_{\text{air}} - T_{\text{sol}}) = -\frac{1}{m \cdot C_p \cdot \mu \cdot R'_{\text{totale}}} x + c_1 \quad (33)$$

Ainsi:

$$T_{\text{air}}(x) = c e^{-\frac{1}{m \cdot C_p \cdot \mu \cdot R'_{\text{totale}}} x} + T_{\text{sol}} \quad (34)$$

$x = 0 \rightarrow T = T_e$, qu'est la température ambiante.

T_e : température à l'entrée de l'échangeur

$$T_e = c + T_{\text{sol}}$$

$$c = T_e - T_{\text{sol}}$$

Le profil de température dans le tube s'écrit comme suit:

$$T_{\text{air}} = (T_e - T_{\text{sol}}) \cdot e^{-\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot u \cdot R'_{\text{totale}}} x} + T_{\text{sol}} \quad (35)$$

3. Quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur

On note q : quantité de chaleur échangée de l'air dans le tube vers le sol.

Donc la quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur prendra la forme suivante :

$$q/l = (T_{\text{sol}} - T_{a(l)}) / \left(\frac{1}{\lambda_{\text{sol}} \cdot 2\pi} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{\lambda_{\text{gainé}} \cdot 2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{h_{\text{cv}} \cdot 2\pi \cdot r} \right) \quad (36)$$

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la formulation mathématique permettant la détermination de la température de l'air le long de l'échangeur air/sol.

Chapitre VI

Résultats et discussion

1 Modèle thermique du sol:

1.1 Introduction:

Nous exposons et discutons dans ce chapitre les résultats de la présente étude sous l'évolution de températures moyenne annuelle en profondeur du sol pour trois différentes natures du sol (sable humide, argile et limon argilo-sableau). Et l'influence de différents paramètres sur le comportement thermique de l'échangeur air sol.

1.2 Température en profondeur du sol

Les figures 1, 2 et 3 montrent l'évolution de la température moyenne annuelle en profondeur du sol pour trois différentes natures du sol. Le tableau 1 représente les différentes propriétés thermo-physiques des trois natures des sols étudiés (sable humide, argile et limon argilo-sableau). On remarque dans les figures 1, 2 et 3 que les températures du sol se stabilise lorsqu'on pénètre d'avantage dans le sol, les températures du sol de sable humide se stabilise rapidement par rapport aux autres natures du sol à cause de sa faible diffusivité thermique. Ce qui nous a permet de conclure que le sol de sable humide est le meilleur sol pour l'enfouissement de l'échangeur de côté financier.

Tableau 1. Propriétés thermo-physiques des différentes natures du sol.

Nature du sol	Conductivité thermique λ_{sol} (W/m.K)	Chaleur spécifique C_p (J/kg.K)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
Sable humide	0,58	1000	1750
Argile	1,25	880	1450
Limon argilo-sableau	1,5	1340	1800

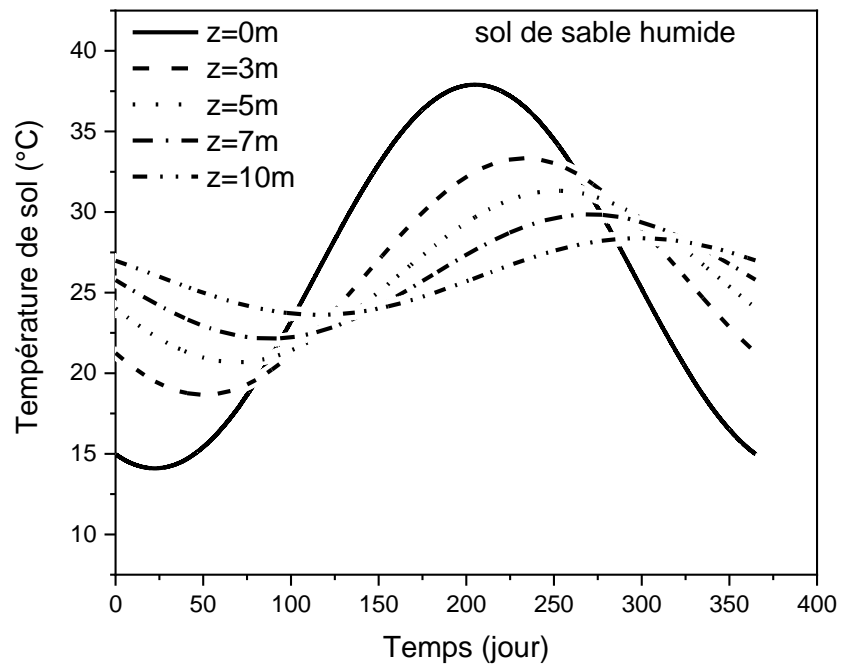


Figure 1. Evolution horaire de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol de sable humide.

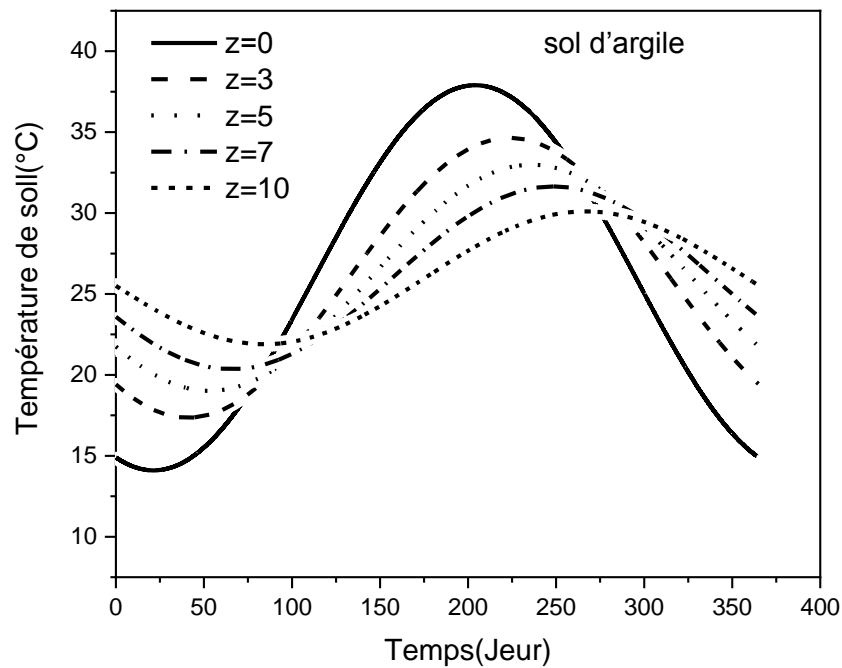


Figure 2. Evolution horaire de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol d'argile.

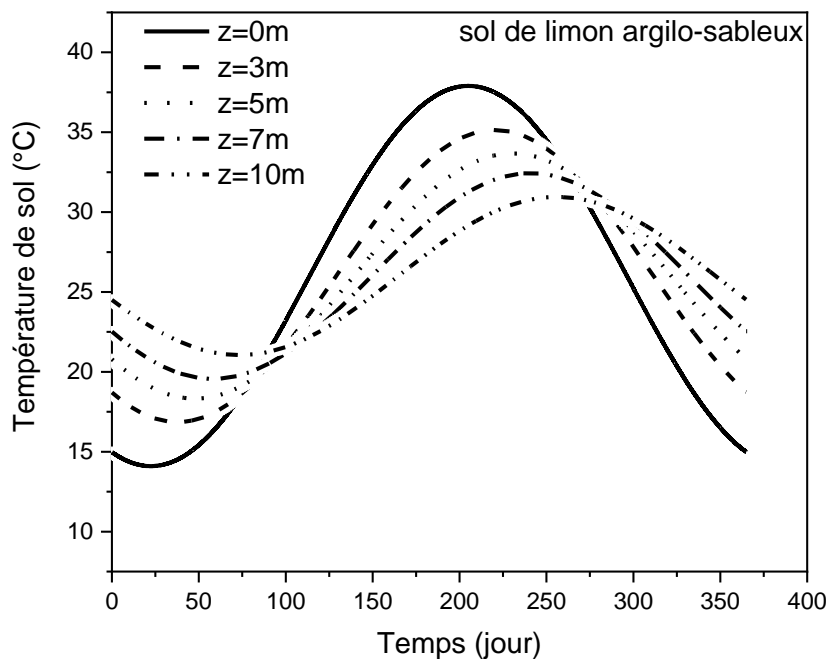


Figure 3. Evolution horaire de la température du sol en fonction de la profondeur Pour un sol de limon argilo-sableux.

2 Modélisation stationnaire de la température de l'air le long du tube:

La figure (4) montre une validation de nos résultats obtenus de la solution analytique développée dans le chapitre 3 avec les résultats expérimentaux de Belloufi et all [35]. Lors de la validation, un bon accord est observé avec une erreur moyenne obtenue de l'ordre de 5.14 %. Donc, le model développé peut être utilisé pour une analyse plus poussée.

Tableau2: Paramètres de l'échangeur de chaleur (air/sol)

Nature de fluide	Air
Conductivité du sol (w. m-1. k-1)	1.5
Conductivité du tube (w. m-1. k-1)	0.17
Longueur de l'échangeur air /sol (m)	50
Diamètre interne (mm)	110
Température d'entrée (°C)	45
Température de sortie (°C)	26
Epaisseur de tube (mm)	2.5

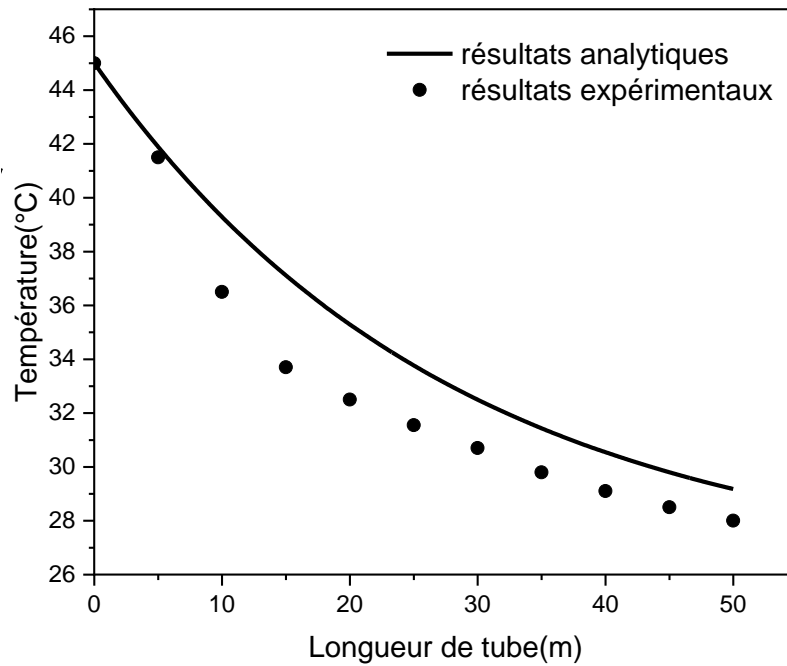


Figure 4. Validation des résultats analytiques par ceux de l'expérimentale [37].

3 Influence de différents paramètres sur le comportement thermique de l'échangeur air sol :

3.1 Influence de la vitesse d'écoulement de l'air (u) :

La figure (5) montre la variation des température de l'air en fonction de la longueur du tube , l'effet de la vitesses d'écoulement de l'air est illustré en prenant en compte trois vitesses différentes (5 m/s ,10 m/s ,15 m/s) . La température de l'air diminue avec la diminution de la vitesse d'écoulement à cause de l'augmentation du temps de séjour de l'air à l'intérieur du tube, ceci permet à l'air de transférer le maximum de sa chaleur vers le sol .

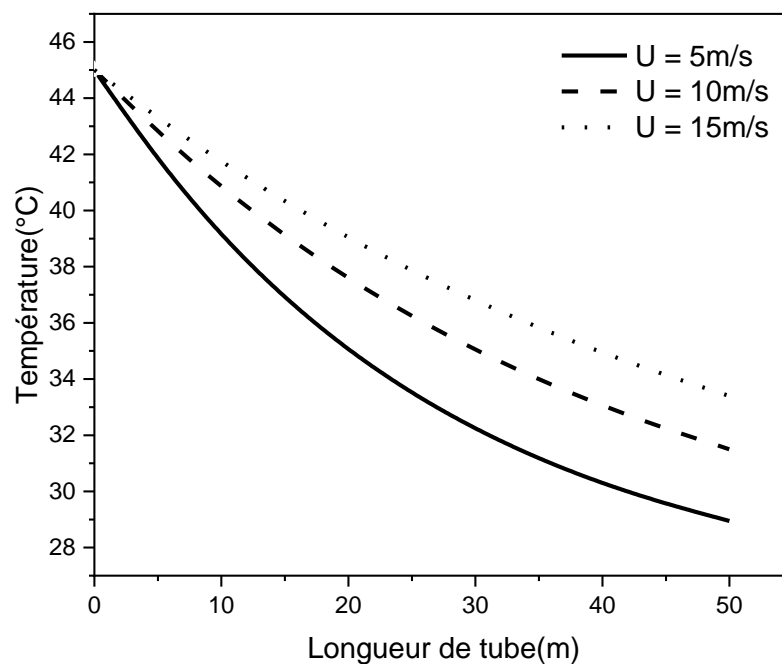


Figure 5. Evolution de la température du sol en fonction de la longueur de tube.

3.2 Influence de la conductivité thermique du sol (λ_{sol}) :

La figure (6) montre l'évolution de la température de l'air en fonction de la longueur du tube, ainsi que l'effet de la conductivité de sol dans chacune des affectations suivantes (0.5 w/m.k , 2w/m.k , 4w/m.k), la température de l'air diminue avec l'augmentation du contact du sol en raison de la densité du sol, car elle absorbe la quantité maximale de chaleur, permettant ainsi à l'air de transférer sa température maximale au sol.

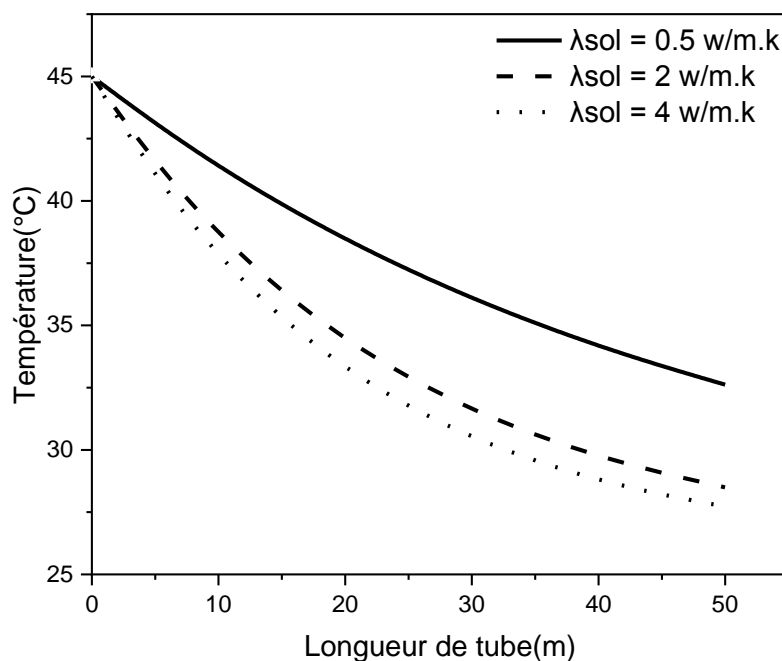


Figure 6. Effet de la conductivité thermique du sol sur l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur

3.3 Influence du rayon du sol :

La figure (7) montre l'effet du rayon adiabatique du sol sur l'évolution de température le long de l'échangeur. Ce rayon adiabatique représente l'épaisseur de la couche perturbée thermiquement du sol environnant l'échangeur, à partir de ce rayon les températures du sol loin de l'échangeur reste invariables. Les températures de l'air à l'intérieur de l'échangeur ayant un grand rayon adjaçant sont plus chaud que les faibles rayons en raison de l'accumulation de la chaleur dans les couches voisines de l'échangeur, ce qui affecte sur l'évacuation de la chaleur de l'air vers le sol. Donc la performance thermique de l'échangeur air sol est affectée négativement par les grands rayons adiabatiques.

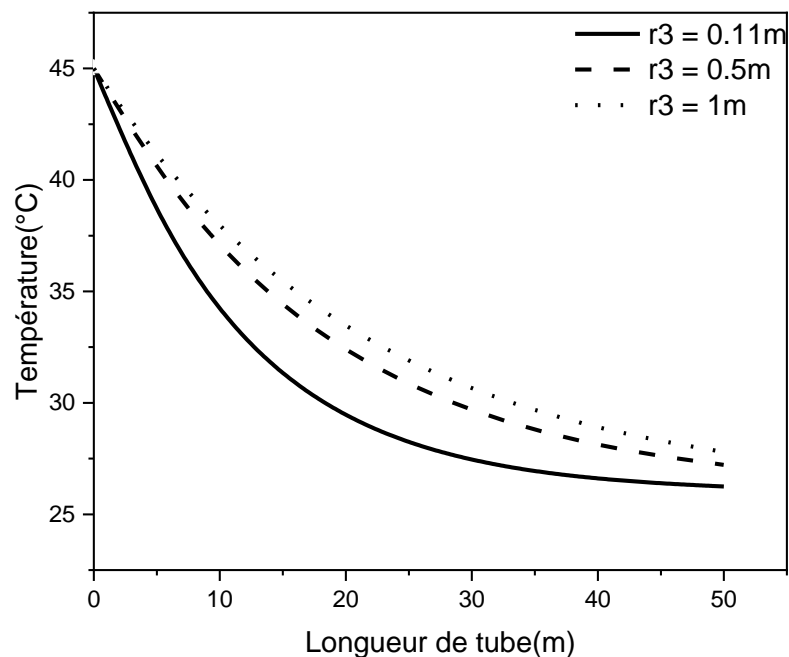


Figure 7. Effet du rayon du sol sur l'évolution horaire de la température de l'air le long de l'échangeur

3.4 Influence de rayon de tube :

La figure (8) montre l'effet du rayon du tube sur la température de chacun des diamètres suivants; (0.055m, 0.11m, 0.2m). Et nous notons que le rayon ($r_1=0.055$) est celui qui a donné la bonne valeur et cela est dû au fait que plus le diamètre du tube était petit, plus l'impact du sol était grand.

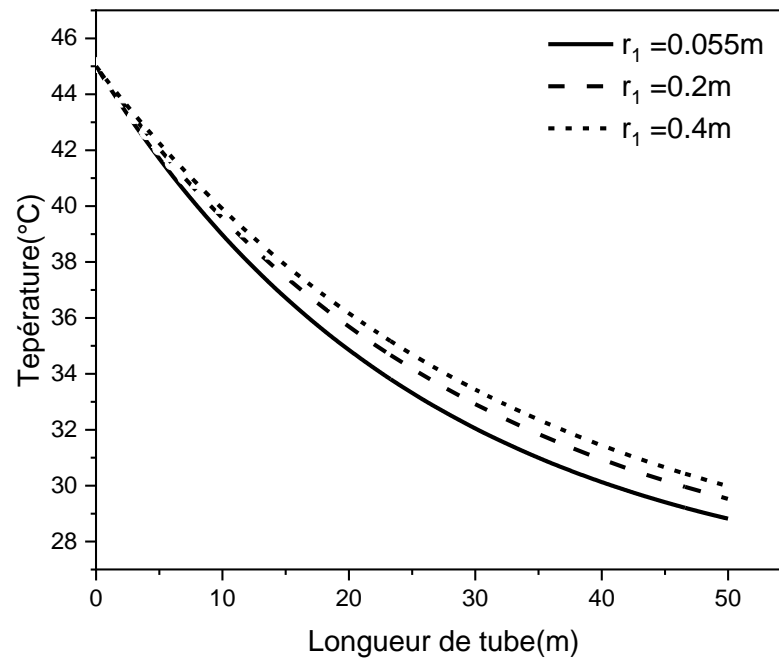


Figure 8. Effet de variation du rayon du sol sur l'évolution horaire de la température de l'air le long de l'échangeur

3.5 Quantité de chaleur échangée par unité de longueur

La figure (09) représente la variation de la quantité de chaleur échangée par unité de longueur entre l'air à l'intérieur de l'échangeur et le sol. Quand ces températures sont égales, la quantité de chaleur échangée est nulle comme il est indiqué à la sortie du tube. La quantité de chaleur échangée diminue quand l'air perd une énergie vers le sol est vice versa. Elle atteint un maximum de dégagement de la chaleur à l'entrée du tube, celui-ci apparaît à cause de la différence maximale entre la température de l'air et celle du sol.

Pour des aspects économiques, il est préférable et rentable de limiter l'échange à une certaine longueur où le transfert est établi, parce qu'on n'a pas besoin d'augmenter la longueur de l'échangeur s'il n'y a pas d'échange de la chaleur entre l'air et le sol.

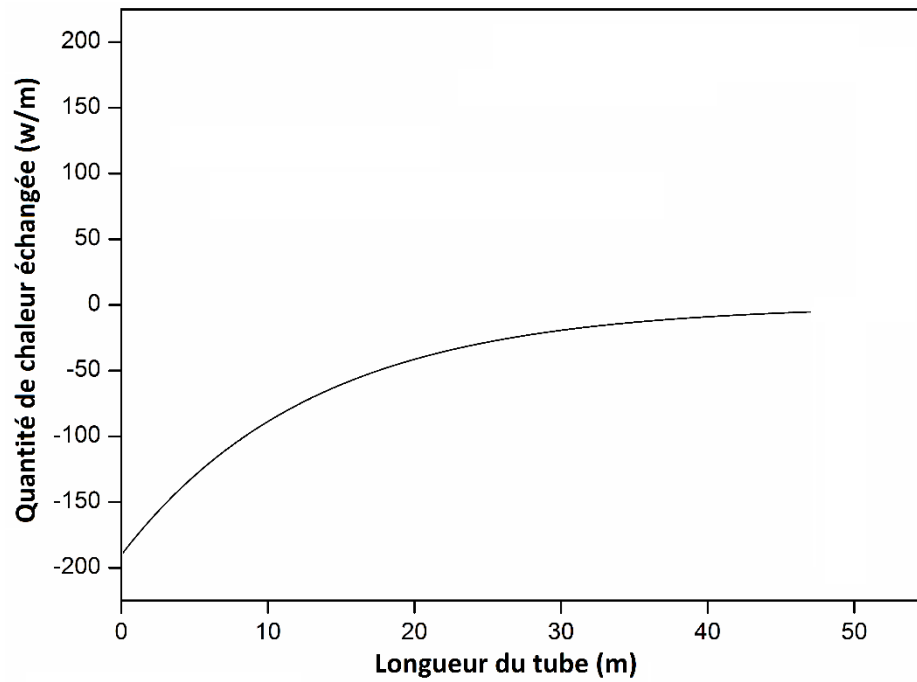


Figure 9. Profil de la quantité de chaleur échangée par unité de longueur le long du tube.

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 chauffage en hiver en consommant peu d'énergie. Les échangeurs de chaleur air /sol, est aujourd'hui l'un des plus conçus pour le refroidissement de l'air en été et pour le chauffage en hiver, Il a également été démontré que cette technique n'avait pas encore été adoptée dans notre pays.

Vue de la nature climatique de notre ville, nous nous intéressons dans ce travail à l'extraction du froid par l'énergie géothermique en utilisant des échangeurs air sol. Nous avons développé analytiquement la température annuelle du sol dans le sens vertical pour déterminer la profondeur optimale de l'enfouissement du tube, où la température reste peu variable au cours de l'année. Ainsi, la température de l'air le long du tube a été trouvée en revenant au premier principe de la thermodynamique pour expertiser la performance thermique de lu système.

A travers cette étude, on cite les taches suivantes:

- La conductivité thermique du sol et donc la diffusivité thermique joue un rôle très important pour l'enfouissement de l'échangeur. Lorsque sa conductivité est plus faible, la température du sol se stabilise rapidement dans le sens vertical ce qui minimise les couts financiers. Par conséquent cette faible conductivité affecte négativement la température de l'air à la sortie de l'échangeur.
- Les grandes vitesses d'écoulement de l'air s'élèvent les températures de l'air à la sortie du tube. De cette raison, on propose de trancher le tube en sous-tronçons horizontaux pour distribuer la totalité de la vitesse sur tous les tronçons.
- Une modification du rayon adiabatique contribue à l'augmentation ou à la diminution de la chaleur des couches voisines de l'échangeur. Un grand rayon adjacent est plus chaud que le rayon faible pour accumuler de la chaleur dans les couches adjacentes, libérant ainsi la chaleur de l'échangeur vers le sol.

De ce travail, on propose pour les futures études d'étudier :

- Les tronçons verticaux qui sont assemblés au tronçon horizontal.
- La variation transitoire de la température du sol environnant le tube pour déterminer le rayon adiabatique du sol autour du tube ou la distance de pénétration de la chaleur.

Références

- [1] Rouag, A., *Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption*, 2017, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [2] Benhammou, M. and 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*, 2011. **14**(2): p. 219-228.
- [3] Moumimi, N., et al., *Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra*. *Revue des Energies Renouvelables*, 2010. **13**(3): p. 399-406.
- [4] Ozgener, O., L. Ozgener, and D.Y. Goswami, *Experimental prediction of total thermal resistance of a closed loop EAHE for greenhouse cooling system*. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011. **38**(6): p. 711-716.
- [5] Trombe, A. and L. Serres, *Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation*. *Energy and Buildings*, 1994. **21**(2): p. 155-162.
- [6] Misra, R., et al., *Field investigations to determine the thermal performance of earth air tunnel heat exchanger with dry and wet soil: Energy and exergetic analysis*. *Energy and Buildings*, 2018. **171**: p. 107-115.
- [7] Morshed, W., et al., *Cooling performance of earth-to-air heat exchangers applied to a poultry barn in semi-desert areas of south Iraq*. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018. **11**(3): p. 47-53.
- [8] Amanowicz, Ł. and J. Wojtkowiak, *Validation of CFD model for simulation of multi-pipe earth-to-air heat exchangers (EAHEs) flow performance*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018. **5**: p. 44-49.
- [9] Menhoudj, S., et al., *Study of the energy performance of an earth—Air heat exchanger for refreshing buildings in Algeria*. *Energy and Buildings*, 2018. **158**: p. 1602-1612.
- [10] Gan, G., *Dynamic thermal performance of horizontal ground source heat pumps—The impact of coupled heat and moisture transfer*. *Energy*, 2018. **152**: p. 877-887.
- [11] Jakhar, O., C.S. Sharma, and R. Kukana. *Experimental temperature analysis of simple & hybrid earth air tunnel heat exchanger in series connection at Bikaner Rajasthan India*. in *AIP Conference Proceedings*. 2018. AIP Publishing.
- [12] Rosa, N., et al., *Modelling and performance analysis of an earth-to-air heat exchanger in a pilot installation*. *Journal of Building Physics*, 2018. **42**(3): p. 259-287.
- [13] Estrada, E., et al., *The impact of latent heat exchanges on the design of earth air heat exchangers*. *Applied Thermal Engineering*, 2018. **129**: p. 306-317.

- [14] Tyagi, V.K., *Experimental performance analysis of earth air heat exchanger*. Journal of Material Science and Mechanical Engineering, 2015. 2(14): p. 40-44.
- [15] «L'énergiegéothermique-ClimateChallenge ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/quelles-sont-lesolutions/lenergie-renouvelable/lenergie-geothermique.aspx>. [Consulté le: 12-avr-2018].
- [16] Steenblik, R. "Libéralisation des échanges dans le domaine des énergies renouvelables et des technologies associées: biodiesel, énergie solaire thermique et énergie géothermique."
- [17] https://www.xpair.com/lexique/definition/principe_fonctionnement_geothermie.htm. consulter le 13/05/2019.
- [18] <https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/energie-geothermie/geothermie-particuliers.php4>. consulter le 13/05/2019
- [19] S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister enGéophysique, Université de Boumerdès, Mars 2006.
- [20] BRGM, 1978 : La géothermie en France.
- [21] Ballouti, A. (2018). Modélisation et simulation comportementale des systèmes à énergie renouvelable par VHDL-AMS.
- [22] <http://tpegeothermie.e-monsite.com/pages/iii-les-avantages-et-les-inconvenients-de-la-geothermie.html>. consulter le 10/05/2019
- [23] I.BFridleifsson, 'Geothermal in Comparison with other Energy Resources'; IGA NEWS, Newsletter of the International Geothermal Association. N°35,1999.
- [24] I.B. Fridleifsson, 'Direct Use of Geothermal Energy Around the World', GEO-HEAT, Center Bulletin, Vol. 19, N°4; 1998.
- [25] Fekraoui, A. and A. Abouriche (1999). "Ressources Géothermiques du Nord de l'Algérie-Eléments de l'Atlas Géothermique." RevEnergRenouv: 159-162
- [26] Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement, 2005: Les énergies renouvelables, la géothermie. Rapport d'activité 2005. www.ciel.org
- [27] EurObserv'ER, août2003)
- [28] BRGM, 1978 : La géothermie en France
- [29] Jay F.K., Richard G.B., Ken F., Dennis G. Elliot Z., 1979: Reservoirdevelopment and managment .revueGeothermalRessourcesCouncil - specialreport N° 7, pp 3-1,3-36.
- [30] Ouali, S., A. Khellaf, et al. (2006). "Etude géothermique du Sud de l'Algérie." Revue des énergies renouvelables 9(4): 297-306.

- [31] Ouali, S., A. Khellaf, et al. (2007). "Etude des ressources géothermiques du sud algérien." Revue des Energies Renouvelables **10**(3): 407-414.
- [32] <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/ouargla/ouargla-3694/#climate-table>.consulté le 12/06/2019
- [33] J. Pfafferott, Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency, *Energy and Buildings*, vol. 35 10, pp. 971-983, 2003. DOI: 10.1016/S0378-7788(03)00055-0.
- [34] M. Krarti and J. F. Kreider, Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel, *Energy Conversion and Management*, vol. 37 10, pp. 1561-1574, 1996. DOI: 10.1016/0196-8904(95)00208-1.
- [35] J. W. Stevens, Optimal placement depth for air-ground heat transfer systems, *Applied Thermal Engineering*, vol. 24 2-3, pp. 149-157, 2004. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2003.09.004.
- [36] M. Cucumo, S. Cucumo, L. Montoro and A. Vulcano, A one-dimensional transient analytical model for earth-to-air heat exchangers, taking into account condensation phenomena and thermal perturbation from the upper free surface as well as around the buried pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51 3-4, pp. 506-516, 2008. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.006.
- [37] BELLOUFI, Y. (2017). 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, Université Mohamed Khider-Biskra.thèse Dr.
- [38] S. Barakat, A. Ramzy, A. M. Hamed and S. H. El Emam, Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system, *Energy Conversion and Management*, vol. 111 pp. 137-146, 2016. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.12.060
- [39] A. de Jesus Freire, J. L. C. Alexandre, V. B. Silva, N. D. Couto and A. Rouboa, Compact buried pipes system analysis for indoor air conditioning, *Applied Thermal Engineering*, vol. 51 1, pp. 1124-1134, 2013. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.09.045.
- [40] F. Al-Ajmi, D. L. Loveday and V. I. Hanby, The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, *Building and Environment*, vol. 41 3, pp. 235-244, 2006. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.01.027.

Résumé: Etude du comportement thermique d'un échangeur air/sol

Le but de ce travail est d'évaluer le comportement thermique de l'échangeur air sol. Un modèle analytique est présenté pour trouver la profondeur optimale de l'enfouissement de du tube dans le sol, en utilisant l'équation de la chaleur unidimensionnelle en régime transitoire. Ainsi, un bilan énergétique est appliqué sur l'échangeur air sol en régime stationnaire pour examiner la performance thermique de l'échangeur air sol. Les résultats développés sont validés avec une bonne concordance avec la littérature.

Mots clés: Energie géothermique, échangeur air sol, performance thermique.

Abstract : Study of the thermal behavior of an air / ground heat exchanger

The purpose of this work is to evaluate the thermal behavior of the ground air exchanger. An analytical model is presented to find the optimal depth of burial of the tube in the soil, using the transient unidimensional heat equation. Thus, an energy balance is applied to the ground air exchanger in steady state to examine the heat performance of the exchanger. The results developed are validated with good agreement.

Key words: Geothermal energy, air-to-ground heat exchanger, thermal performance.

ملخص: دراسة السلوك الحراري لمبادل حراري للهواء / الأرض

الغرض من هذا العمل هو تقييم السلوك الحراري لمبادل الهواء الأرضي. يتم تقديم نموذج تحليلي للعثور على العمق الأمثل لدفن الأنبوب في التربة ، باستخدام معادلة الحرارة العابرة الأحادية البعد. وبالتالي ، يتم تطبيق توازن الطاقة على مبادل الهواء الأرضي في حالة مستقرة لفحص الأداء الحراري للمبادل. يتم التحقق من صحة النتائج المتقدمة مع اتفاق جيد.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الحرارية الأرضية، مبادل حراري من الجو إلى الأرض، الأداء الحراري.