



UNIVERCITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des sciences des hydrocarbures de l'énergie
Renouvelable Et des sciences de la terre et de l'univers



Département d'énergie renouvelable

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : science et technique

Filière : génie mécanique

Option : énergie renouvelable en mécanique

Présenté par :

Mahdi CHENINE

Abdelhak BELHADJ

Thème

**Etude numérique d'un échangeur
géothermique air/sol**

Soutenu publiquement le : 11/06/2018

Devant le jury composé de :

Mr. Djamel BENMENINE	M. A. A	President	UKM Ouargla
Mr. Yousef BELLOUFI	M. A. B	Examineur	UKM Ouargla
Mr. Amar ROUAG	M. A. B	Rapporteur	UKM Ouargla

Jun 2018

Dédicace

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

(inchallah).

À mes soeurs

A toute la famille de Département

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

Mahdi CHENINE

Dédicace

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

(inchallah).

À mes frères et soeurs

A toute la famille de Département

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

Abdelhak BELHADJ

Remerciements

Louange à Allah, celui qui nous a illuminé le chemin de la science et nous a accordé pour accomplir ce travail.

Nous adressons tout d'abord mes remerciements les plus sincères au docteur Amar ROUAG, qui a très volontiers accepté d'être le directeur de ce travail. Sa grande Connaissance dans le domaine, ainsi que son expérience scientifique, ont joué un rôle Important dans la conception de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers l'ensemble des membres de jury qui ont accepté de lire et juger notre travail :

➤ *Mr. Djamel BENMENINE*

➤ *Mr. Yousef BELLOUFI*

Enfin, j'aimerais aussi remercier nos chers amis, collègues et tous ceux et elles qui nous ont aidé de près et de loin afin de réaliser ce travail.

Sommaire

Dédicace	I
Remerciements	III
Sommaire	IV
Liste de figures	VII
Liste de tableau.....	VIII
Nomenclature	9
Introduction générale.....	1
Chapitre I : La géothermie : techniques et application.....	3
1 Introduction :.....	4
2 Notions générales :	4
2.1 Types de l'énergie géothermique :	4
2.1.1 Géothermie haute énergie :	4
2.1.2 Géothermie basse énergie :	5
2.1.3 Géothermie très basse énergie :.....	5
2.2 Avantages de l'énergie géothermique :	6
2.3 Inconvénients de l'énergie géothermique :.....	6
3 Ressources géothermiques en Algérie :.....	6
3.1 Classification des zones climatiques en Algérie :	7
4 Caractéristiques climatiques de la région d'Ouargla :.....	7
5 Généralité sur l'échangeur air-sol :	7
5.1 Définition d'un échangeur air /sol :.....	7
5.2 Principe d'exploitation d'unéchangeur air/sol :	8
5.3 Principaux éléments d'un puits canadien/provençal :.....	11
5.4 Eléments pour la conception d'un puits canadien/provençal :.....	11

Tables des matières

5.5	Principaux paramètres de dimensionnement	11
5.5.1	Le débit d'air total :	11
5.5.2	Nombre et le diamètre des tubes :	11
5.5.3	Vitesse de l'air dans les tubes :	12
5.5.4	Longueur des tubes :	12
5.5.5	Distance entre tubes :	12
5.5.6	1.3.6. Profondeur d'enfouissement des tubes :	13
5.5.7	Nature du sol et son taux d'humidité :	13
5.5.8	Disposition des tubes :	13
6	Emplacement du puits canadien :	14
7	Avantages et inconvénients des échangeurs air / sol :	14
7.1	Avantages :	14
7.2	Inconvénients :	15
8	Conclusion :	15
Chapitre II : Synthèse bibliographique		16
1	Introduction :	17
2	Quelques installations expérimentales géothermales air/sol :	17
3	Quelques études théoriques sur les échangeurs air/sol :	20
4	Conclusion :	22
Chapitre III : Dimensionnement d'un échangeur air/sol		23
1	Introduction :	24
2	Modélisation de la température du sol :	24
2.1	Hypothèses :	24
2.2	Variation de la température dans le sol :	24
3.2	25
2.2.1	Discrétisation de l'équation de la chaleur 1D :	25
3	Modélisation de la température de l'air :	27

Tables des matières

3.1	Hypothèses :	27
3.2	Modélisation transitoire de la température de l'air le long du tube :.....	28
3.2.1	Résolution numérique du problème par la méthode de différences finies :.....	28
3.2.2	Discrétisation de l'équation du bilan énergétique :.....	28
4	Résolution numérique :	30
5	Organigramme de calcul :	31
Chapitre IV : Résultats et discussion.....		32
1	Introduction :.....	33
2	Conditions climatiques de la région de Ouargla :	33
2.1	Température ambiante :	33
2.2	Température du sol :.....	34
2.3	Etude paramétrique :.....	35
Conclusion générale		42
Références bibliographiques		44

Liste de figures

Figure 1-1 :	Carte des ressources géothermiques mondiales.....	06
Figure 1-2 :	Schéma d'un échangeur air/sol	09
Figure 1-3 :	Principe de la géothermie par échangeur enterré air/sol étudié.....	09
Figure 1-4 :	Description d'un puits canadien en Hiver	10
Figure 1-5 :	Description d'un puits canadien en été.....	11
Figure 1-6 :	Tube en serpentin	14
Figure 1-7 :	Tube en boucle	14
Figure 1-8 :	Emplacement d'un échangeur air/sol.....	15
Figure 2-1 :	Dispositif expérimentale de Moumimi et al	18
Figure 2-2 :	Banc d'essai expérimental de Bansal et al.....	19
Figure 2-3 :	Température de l'air et du sol à une section de 10 m de l'entrée du tube après 12 h de fonctionnement pour trois sols (a) 0,52, (b) 2,00 et (c) 4,00 $W m^{-1}K^{-1}$	20
Figure 2-4 :	Validation du modèle analytique de la température du sol durant toute l'année.....	21
Figure 2-5 :	Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour la 200 ^{ème} journée de l'année.....	22
Figure 3-1 :	Exemple de discrétisation du sol à l'entrée de l'échangeur.....	27
Figure 3-2 :	Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré	30
Figure 4-1 :	Température ambiante maximale dans la région de Ouargla durant la dernière décennie	34
Figure 4-2 :	Variation de la température du sol (à une distance de 1 cm) le long de l'échangeur en fonction de la durée de fonctionnement.....	37
Figure 4-3 :	Variation de la température du sol à l'entrée de l'échangeur pour différentes durées de fonctionnement.....	38
Figure 4-4 :	Variation de la température de l'air et du sol en fonction de la longueur des tubes pour différentes durées de fonctionnement.....	40
Figure 4-5 :	Influence de la conductivité thermique sur la température du sol pour différentes durées de fonctionnement.....	41

Liste de tableau

Tableau 4-1 : Température du sol dans la régionSidiKhouild.....	34
Tableau 4-2 : Les données de calcule	35

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
t_{sol}	Température du sol	[°C]
t_{air}	Température de l'air	[°C]
S	Surface d'échange	[m]
λ_{sol}	Conductivité thermique du sol	[W/m.K]
λ_{tube}	Conductivité du tube	[W/m.K]
λ_{air}	Conductivité thermique de l'air	[W/m.K]
h_{cv}	coefficient d'échange convectif	[w/m ² . °k]
t	Temps	[s]
cp	Chaleur spécifique	[j/kg.K]
u	Vitesse axiale de l'air	[m/s]
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]
L	Longueur du tube	[m]
x	Cordonnée horizontale	[m]
α	Diffusivité thermique	[m ² /s]
ρ	Masse volumique	[Kg/m ³]
R	Résistance thermique	[m.K/W]
T_{moy}	Température moyenne journalière	[°C]
γ	Masse volumique de l'air	[kg /m ³]

Introduction générale

Introduction générale

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

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

Le rafraîchissement de l'air par l'énergie géothermique, peut offrir un apport considérable à la climatisation conventionnelle au terme de réduction de la consommation en énergie électrique notamment dans les régions à climat chaud ; néanmoins, elle est non exploitée dans notre pays. Parmi les systèmes de rafraîchissement de l'air par la géothermie, l'échangeur air-sol est une technique basée sur l'inertie thermique du sol, pour chauffer ou refroidir l'air pénétrant dans les bâtiments pour atteindre le confort thermique.

A cet égard, nous présentons ici, une simulation numérique pour la conception d'un échangeur air-sol convenable aux conditions climatiques de la région de Ouargla.

Les utilisations de cette énergie sont multiples. Elles vont des utilisations telles que le chauffage des serres, la balnéothérapie, la production de l'électricité et le rafraîchissement de l'air. Pour le chauffage et la climatisation des locaux l'utilisation d'un échangeur air/sol, système appelé communément « puits canadien » et parfois « puits provençal » lorsqu'il sert à rafraîchir l'habitation, connaît un développement important depuis quelques années. Il consiste à utiliser comme entrée pour la ventilation de la maison, de l'air qui a préalablement circulé dans un tube enterré à une certaine profondeur. La température du sous-sol étant moins variable que celle de l'air extérieur cela permet d'avoir une entrée d'air plus tempérée. En hiver, l'air se réchauffe avant qu'il pénètre dans la maison ; en été il se rafraîchit. Il s'agit ainsi du système plus simple qui soit, avec une consommation d'électricité réduite par rapport aux systèmes de climatisation conventionnelle.

Le dimensionnement d'un puits canadien s'appuie sur un grand nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de tubes, profondeur d'enfouissement, distance entre les tubes, débit de

Introduction générale

ventilation. Le présent travail est basé sur des simulations numériques d'échanges thermiques par convection dans un tube enterré. Ceci permet de mettre en évidence l'effet du diamètre, de la longueur, du débit volumétrique de la différence de température entre le sol et l'air entrant sur le flux thermique fourni par le puits canadien.

Cette étude nous a permis aussi d'évaluer la variation de la température à l'intérieur de l'échangeur air-sol et d'expertiser les problèmes de saturation de la chaleur dans les couches du sol voisins de l'échangeur au cours du temps, et en utilisant l'équation de la chaleur en une dimension.

Le présent travail est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre introduit quelques notions indispensables pour la compréhension d'un système échangeur air-sol comme : généralité sur les échangeurs air-sol, principes et modes et le concept de l'énergie géothermique.

Nous exposons dans le deuxième chapitre quelques types d'échangeurs air-sol qui sont testés par de nombreux chercheurs dans le monde, l'objectif principal est d'extraire le maximum de l'énergie thermique froide contenue dans le sous-sol avec un coût réduit, évaluer la performance thermique de l'échangeur air-sol et de contrôler la couche adiabatique du sol enveloppant le tube enterré dans le cas du fonctionnement continu.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation mathématique et la simulation numérique afin de mettre en œuvre les approches mathématiques qui permettent de prédire et d'estimer convenablement la température du sol et celle de l'air durant son parcours à l'intérieur de l'échangeur air-sol.

Le quatrième chapitre est réservé à la discussion des différents résultats obtenus lors du chapitre précédent. Une étude paramétrique est illustrée dans ce chapitre à pour but de trouver les dimensions, profondeur d'enfouissement du tube et l'utilisation de l'échangeur en matière de durée de fonctionnement convenables pour le site de la ville de Ouargla.

Chapitre I : La géothermie : techniques et application.

1 Introduction :

Avant d'entamer le sujet de l'échangeur air-sol, on a préféré de discuter quelques notions et définitions utiles à savoir : notions sur l'énergie géothermique et ses différentes utilisations, les caractéristiques du climat de la région où on va appliquer notre système, et le confort thermique qui détermine la qualité de l'ambiance thermique recherchée, ainsi que quelques types de ventilation naturelle dans les pièces résidentielles, semblables à un système d'échangeur air-sol. On termine ce chapitre par la définition de l'échangeur air-sol, les caractéristiques de ses éléments constitutifs, les avantages et les inconvénients du système échangeur air-sol.

2 Notions générales :

Les scientifiques sont en train de développer des manières de produire de l'énergie en utilisant la chaleur contenue à l'intérieur de la terre, qu'on appelle l'énergie géothermique. L'énergie géothermique est l'une des sources d'énergies renouvelables les plus riches du monde.

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

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

Aujourd'hui, la géothermie est la troisième énergie renouvelable effectivement exploitée dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. L'utilisation de l'énergie géothermique est en pleine expansion, elle est développée dans une soixantaine de pays, comme par exemple les États-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse[1].

2.1 Types de l'énergie géothermique :

À la connaissance des auteurs de ce mémoire, il n'y a pas de catégorisation claire de l'énergie géothermique dans la littérature. Cependant, certains auteurs ont classé l'énergie géothermique en utilisant le niveau des champs de température en 3 classes: haute ($> 180^\circ\text{C}$), basse ($> 30^\circ\text{C}$) et très basse ($10-30^\circ\text{C}$)[2, 3]

2.1.1 Géothermie haute énergie :

La géothermie haute énergie, ou géothermie profonde, appelée plus rarement géothermie haute température, ou géothermie haute enthalpie, est une source d'énergie qui provient de la

croûte terrestre, où la profondeur est généralement plus de 1500 mètres, dans des zones où une activité volcanique a existé et dont la température est supérieure à 180°C[4].

2.1.2 Géothermie basse énergie :

On parle de « géothermie basse énergie » lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau entre 30 et 100 °C dans des gisements situés entre 1000 et 3000 m de profondeur [4]. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles.

La géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 50 ans en moyenne).

2.1.3 Géothermie très basse énergie :

La géothermie très basse énergie est une géothermie des faibles profondeurs dans lesquelles la température comprise entre 10 et 30 °C. Dans ce cas, la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique[5]. Cette technologie est appliquée à :

- La climatisation (échangeur air-sol) ;
- Le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

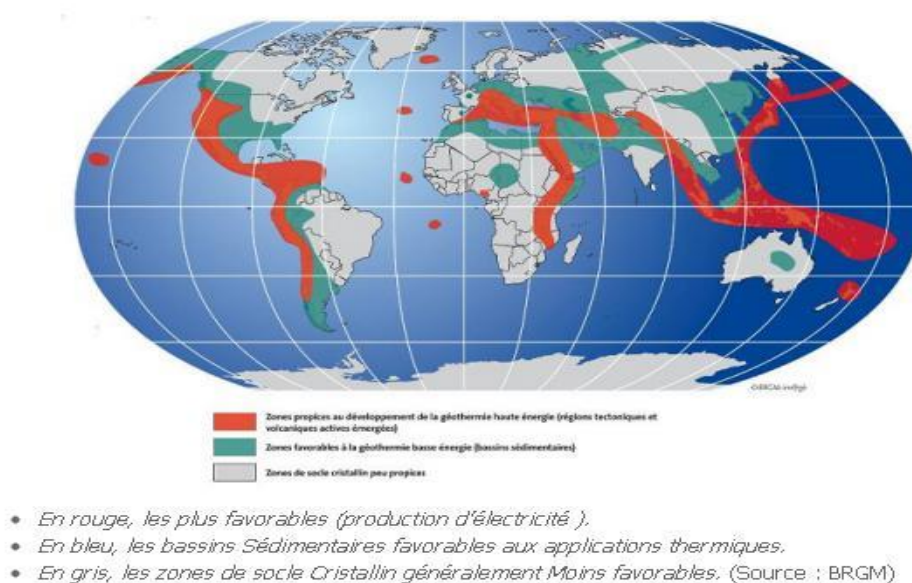


Figure 1.1. Carte des ressources géothermiques mondiales[5].

2.2 Avantages de l'énergie géothermique :

- Source d'énergie renouvelable pour la production de chaleur seulement.
- La chaleur est utilisée directement dans le chauffage des bâtiments, l'agriculture, l'industrie, l'aquaculture, la culture en serres, les thermopompes et les thermes.
- Source d'énergie à haute température de l'ordre de 200°C, propre, fiable et économique.
- Possibilité du couplage avec les centrales électriques, les réseaux de chaleur et de faire de la cogénération. Le séchage de bois, le chauffage des serres ou d'installations touristiques, la pisciculture, les séchages agricoles, également dans l'industrie tel que le lavage de la laine, distillation et réfrigération .[6]

2.3 Inconvénients de l'énergie géothermique :

- Les sites les plus intéressants sur la planète sont déjà exploités.
- Source d'énergie non renouvelable pour la production d'électricité (en raison du tarissement des puits géothermiques).
- Coût très élevé en raison du prix de réalisation du forage qui parfois ne peut être rentable qu'à une profondeur considérable.
- Nécessité de trouver un terrain suffisant pour l'exploitation de l'énergie géothermique.[6]

3 Ressources géothermiques en Algérie :

L'Algérie dispose de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C. Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90 °C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C. Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouellen et 119 °C à Biskra.

On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser. Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région d'El Meni'a à 1500 mètres à Touggourt, présentant une température de 40 à 60°C, ce qui donne de grandes possibilités pour le chauffage des serres[7].

3.1 Classification des zones climatiques en Algérie :

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

En Algérie la première classification en zones climatiques a été faite par le CSTB en 1962 qui sert de base de calcul pour le dimensionnement de chauffage ou de climatisation. Une deuxième classification prenant en compte les données climatiques plus représentative de la période (1974 –1984) permet de définir avec plus de précision les zones climatiques de l'Algérie. Cette vaste étendue territoriale correspond à une diversité de zones climatiques qui peuvent se classer en trois catégories[8].

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

4 Caractéristiques climatiques de la région de Ouargla :

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

Selon l'Office National de la Météorologie 2009, les températures moyennes mensuelles enregistrées au mois le plus chaud (Aout) sont de 43°C. Alors que celles du mois le plus froid (janvier) sont de 11.1°C. Les précipitations sont rares et irrégulières et varient entre 0.1 mm et 8 mm. Les précipitations moyennes annuelles sont de 77 mm/an à Touggourt et de 48.8 mm/an à Ouargla. Le Sirocco (vent chaud et sec) peut être observé à toute époque de l'année, avec une vitesse pouvant atteindre 4.2 m/s. L'humidité relative enregistre des taux tournant de 25 à 61 %. Alors que l'évaporation est très importante pouvant aller jusqu'au 484mm[9].

5 Généralité sur l'échangeur air-sol :

5.1 Définition d'un échangeur air /sol :

L'échangeur air-sol est un système géothermique consiste à rafraîchir l'air pour ventilation des bâtiments. Il suffit d'enterrer un ou plusieurs tuyaux sur un trajet suffisamment long et de faire circuler l'air. L'air extérieur transite dans ce réseau de gaines par convection forcée, se

réchauffé en hiver ou se refroidit en été, avant d'être soufflé dans le bâtiment. Le principe de l'échangeur air-sol est de faire circuler l'air neuf dans un conduit enterré grâce à un ventilateur, avant de l'insuffler dans le bâtiment. En hiver, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré, le puits est alors dit puits canadien. En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à celle d'extérieure, le puits est alors dit puits provençal[10].

5.2 Principe d'exploitation d'un échangeur air/sol :

Le puits canadien consiste à faire passer avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf par des tuyaux enterrés, Il peut être réalisé de plusieurs façons :

- Soit en utilisant le vide sanitaire de la maison, que l'on aurait rempli de galets de grosses tailles et permettant la circulation de l'air.
- Soit 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.

Généralement, à une profondeur située de deux à trois mètres la température du sol est pratiquement constante tout au long de l'année, elle varie entre 10 et 18°C selon les saisons, alors que l'air extérieur peut varier de -5°C à + 45°C dans la plupart des climats, l'exemple de l'Algérie. Un puits canadien semble une solution évidente pour exploiter cette température constante : l'air, au lieu d'être amené directement de l'extérieur, va circuler dans un collecteur enterré qui se trouve en contact avec le sol pour échanger ses calories. L'objectif étant que l'air à la sortie du collecteur soit très proche à la température du sol.

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

- En été, le sol est relativement froid que la température extérieure, ce qui permettra

l'exploitation de la fraîcheur relative du sol pour tempérer l'air entrant dans le logement [11].

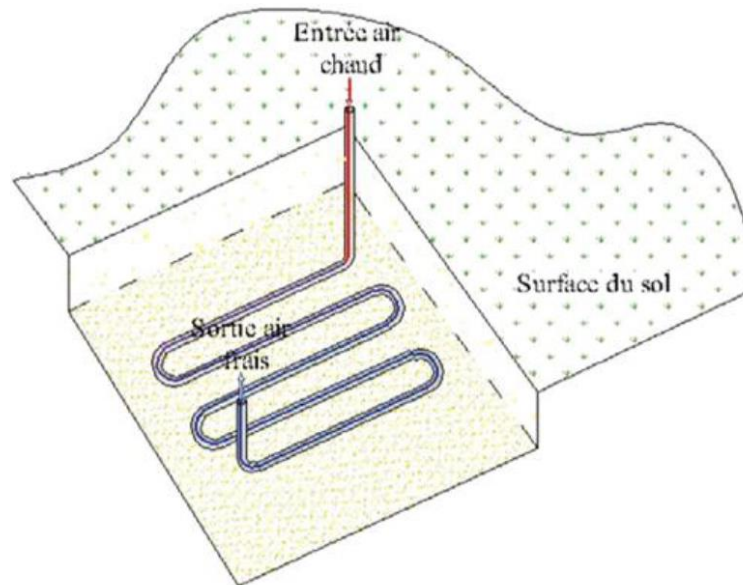


Figure 1.2. Schéma d'un échangeur air/sol [12]

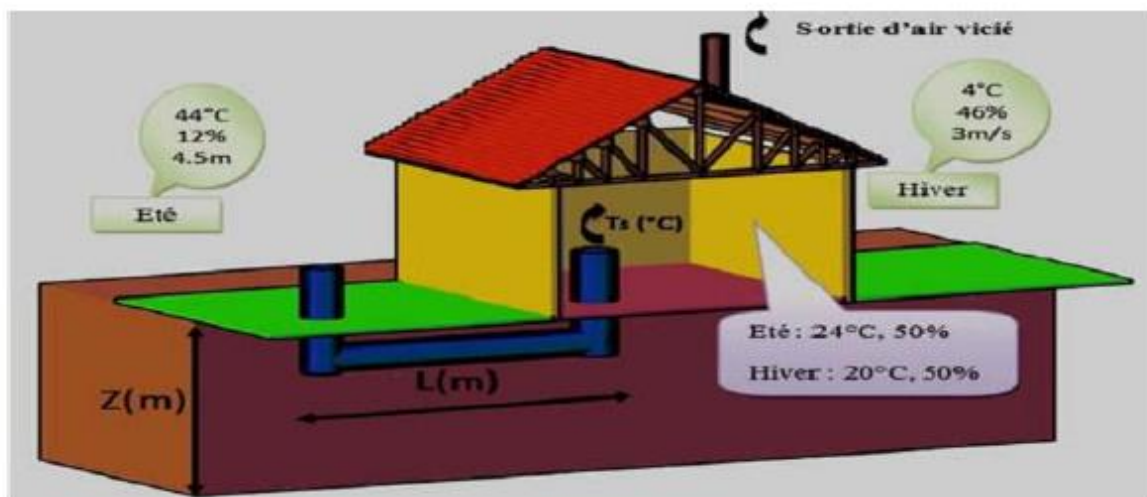


Figure 1.3. Principe de la géothermie par échangeur enterré air/sol étudié [13]

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

En hivers à deux mètres de profondeur, la température du sol est comprise entre 4 et 7°C, dans le cas d'une température extérieure de -10°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +2°C permettant ainsi une économie de chauffage pouvant aller jusqu'à 15% suivant les

régions. Le puits canadien permet également de maintenir hors gel un bâtiment. Lorsque ces puits sont couplés à un système de ventilation double flux avec échangeur. D'autre part avec le puits canadien, il n'est plus nécessaire de prévoir un dispositif anti-condensation, permettant ainsi de réaliser des économies de chauffage en cas d'utilisation d'un échangeur thermique [14].

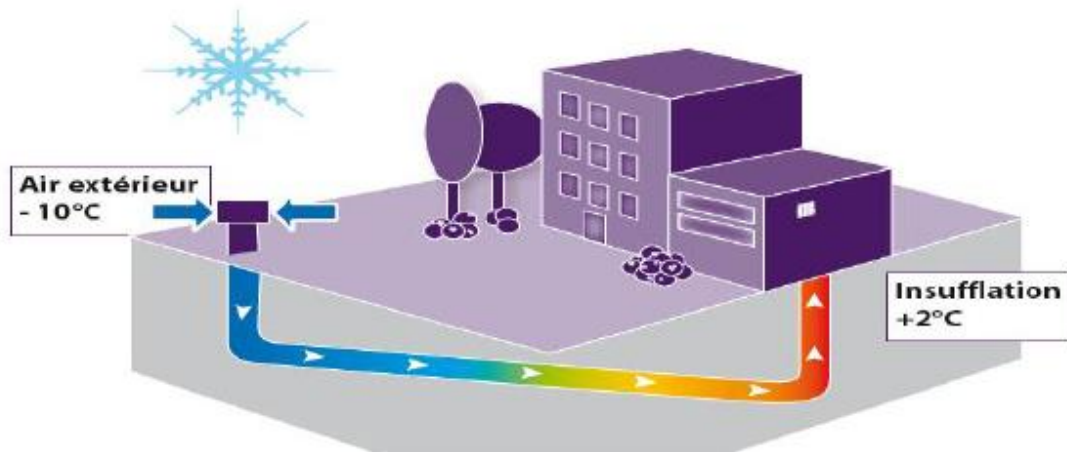


Figure 1.4.Description d'un puits canadien en Hiver [9]

En été à deux mètres de profondeur, la température du sol est d'environ 15°C, dans le cas d'une température extérieure de +30°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +24°C permettant un rafraîchissement de l'air ambiant sans avoir recours à un système de climatisation et de renoncer à une climatisation classique en raison des avantages obtenus qui permettent d'obtenir des conditions de vie acceptables, un logement sain et agréable [9]

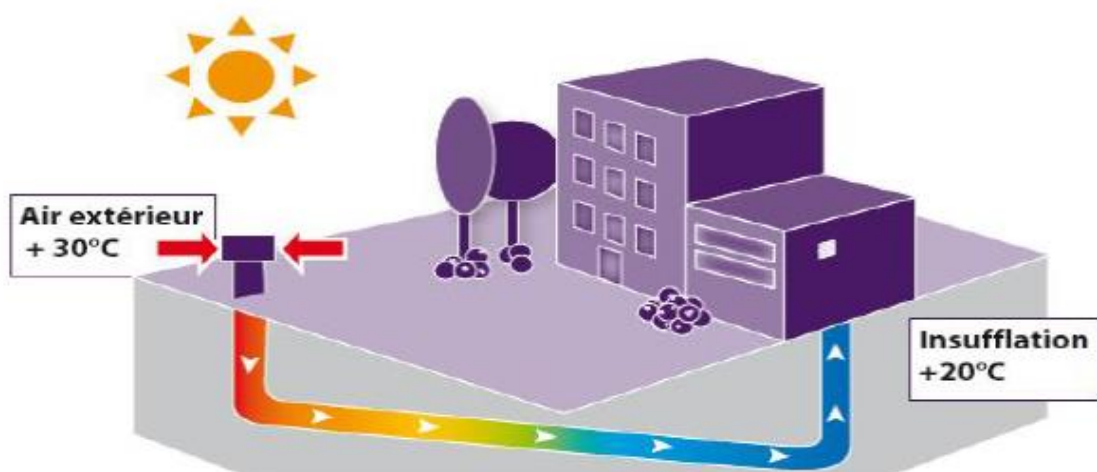


Figure 1.5.Description d'un puits canadien en été [6]

En périodes intermédiaires, l'amenée d'air neuf passé soit par le collecteur enterré soit par la prise d'air directe en fonction de la température extérieure. la commande est automatique par thermostat ou manuelle par la régulation de débit, dont 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 sol, et comprendra une pente d'environ 2% et une évacuation des condensats produits en été cette pente permet à l'eau éventuelle de couler vers le point d'évacuation.

5.3 Principaux éléments d'un puits canadien/provençal :

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

5.4 Eléments pour la conception d'un puits canadien/provençal :

- Nature du sol
- Localisation géographique
- Place disponible pour l'enfouissement du conduit et coût
- Type de bâtiment et ventilation hygiénique
- Besoins en chauffage et refroidissement

5.5 Principaux paramètres de dimensionnement

De nombreux paramètres doivent être pris en considération dans le dimensionnement des échangeurs ai/sol. Dans ce mémoire on cite : Ces paramètres sont considérés pour le dimensionnement d'un échangeur air-sol.

5.5.1 Le débit d'air total :

Le débit total de l'air circulant dans l'échangeur doit assurer l'ensemble des besoins de renouvellement d'air des pièces à ventiler. Le régime de ventilation peut varier selon le mode de fonctionnement (réduit en préchauffage, plus élevé en rafraîchissement). La détermination du débit d'air total maximal constitue le premier paramètre de dimensionnement de l'échangeur[15, 16].

5.5.2 Nombre et le diamètre des tubes :

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

pratique, pour les installations domestiques, le diamètre utilisé se situe entre 16 cm et 20 cm, 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 [15, 16].

5.5.3 Vitesse de l'air dans les tubes :

La vitesse de l'air ne constitue pas un paramètre indépendant, puisqu'elle découle directement du choix des trois paramètres précédents. Néanmoins, elle impose le type d'écoulement (laminaire, turbulent) et influe donc non seulement sur la valeur du coefficient d'échange convectif entre l'air et les tubes, mais aussi sur les pertes de charges mécaniques qui doivent être compensées par le ventilateur. Afin de limiter les pertes de charge, cette vitesse est le plus souvent maintenue en deçà de 3 à 4 m/s [12, 15, 16].

5.5.4 Longueur des tubes :

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur, liée à la longueur caractéristique de l'échange thermique L , qui peut être obtenue en confrontant le surcoût économique de l'échangeur (constant avec la longueur) à l'économie d'énergie apportée par l'allongement des tubes. Par conséquent, il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un ou deux tubes beaucoup plus longs. [17]

5.5.5 Distance entre tubes :

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

L'influence de la distance entre les tubes sur les performances de l'échangeur est peu abordée dans la littérature. Pourtant, il semble important d'assurer une distance minimale afin de limiter l'interaction entre deux tubes adjacents et d'optimiser ainsi l'exploitation de l'inertie du sol. Donc, une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour des variations journalières. Par contre, un stockage thermique saisonnier nécessiterait un espacement de l'ordre de 3 m, qui n'est généralement pas envisageable en pratique [17].

5.5.6 1.3.6. Profondeur d'enfouissement des tubes :

Pour un échangeur air-sol, le sol joue le rôle d'isolant et de tampon thermique entre l'atmosphère et les canalisations enterrées. La profondeur d'enfouissement influe sur la qualité de cette isolation. Les variations de température de l'air extérieur sont d'autant plus amorties et déphasées par le sol que la profondeur est grande. Au-delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne dépend quasiment plus des conditions atmosphériques.

5.5.7 Nature du sol et son taux d'humidité :

La capacité calorifique et la conductivité 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 en son sein. La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau. L'eau possède une capacité et une conductivité thermiques supérieures à celles des autres constituants du sol. Ainsi, un sol humide emmagasine mieux la chaleur qu'un sol sec et la transmet plus facilement à l'air dans les canalisations de l'échangeur. Cet effet est mis à profit pour augmenter temporairement la performance des échangeurs thermiques air-sol en humidifiant le sol par arrosage [17].

5.5.8 Disposition des tubes :

Afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter son entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes. Deux dispositions sont majoritairement utilisées lorsque le puits ne comporte qu'un seul tube [14]:

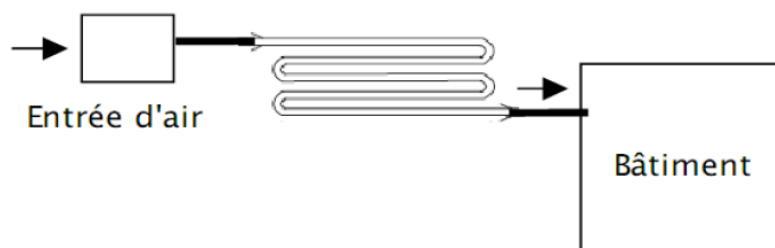


Figure 1.6. Tube en serpentin

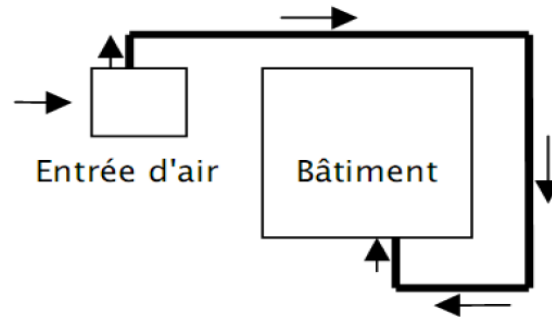


Figure 1.7. Tube en boucle[11]

6 Emplacement du puits canadien :

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

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

Techniquement, ces variantes sont équivalentes, la différence se situe au niveau des coûts de terrassement, la deuxième variante étant la plus intéressante financièrement, aucun terrassement supplémentaire n'étant à réaliser. Lors de la mise en place des tuyaux, il faut éviter au maximum les coudes et angles créant des pertes de charge. De plus un écart entre les tuyaux parallèles d'au moins 0,8m doit être conservé.

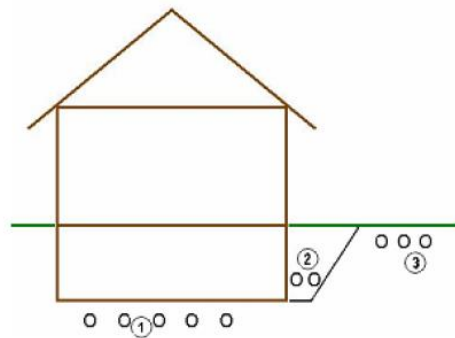


Figure1.8. Emplacement d'un échangeur air/sol

7 Avantages et inconvénients des échangeurs air / sol :

7.1 Avantage :

- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement (Pas de déchet, émissions gazeuses très réduites) ;
- Consommation énergétique très faible ;

Chapitre I : La géothermie : techniques et application.

- Coût du matériel faible ;
- La maintenance restreinte ;
- Pas de rejets de CO₂, pas de liquides frigorigènes, pas de phénomène allergogène ou virales.

7.2 Inconvénients :

- Inutile à la mi-saison ;
- Technique de pose relativement délicate ;
- Coût de terrassement important ;
- Consommation supplémentaire : il est à souligner qu'en parallèle des possibilités d'économie d'énergie, la consommation électrique des auxiliaires (ventilateur de circulation d'air, by-pass automatisé, pompe de relevage de l'eau condensée, etc.) peut s'avérer importante.
- Entretien du circuit – il faut prévoir un entretien régulier de la conduite pour garantir une qualité hygiénique de celui-ci. Des accès à la conduite sont à prévoir pour nettoyer le système et éviter la prolifération des bactéries consécutive à la condensation (estivale) ;
- Coût – pour éviter des coûts excessifs au déblai des terres, l'installation doit se faire pendant les travaux de terrassement.

8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une généralité sur le potentiel géothermique dans le monde en générale et dans l'Algérie et le site de Ouargla en cas particulier. Puis, l'application de cette source d'énergie dans un échangeur air/sol est étudiée en donnant les paramètres de dimensionnement et les avantages et les inconvénients de ces systèmes. Il a été observé que l'exploitation de l'énergie géothermique à travers l'installation d'un échangeur air-sol peut être un moyen efficace pour assurer le confort, et capable de réduire la consommation énergétique sans impact environnemental.

Chapitre II : Synthèse bibliographique

1 Introduction :

Dans la littérature, plusieurs échangeurs air/sol ont été réalisés et testés par plusieurs chercheurs dans le monde, l'objectif principal est de libérer et /ou récupérer le maximum de chaleur un coût réduit et expertiser la performance thermique de l'échangeur air sol. Pour atteindre ces objectifs, de grands travaux sont récemment explorés. Pour cela, nous exposons dans ce chapitre quelques travaux théoriques, analytiques, numériques et expérimentaux disponibles dans la littérature qui traitent les phénomènes thermiques des échangeurs air/sol.

2 Quelques installations expérimentales géothermales air/sol :

Moumimi et al [12], ont menés une étude théorique et expérimentale en 2010 sur le procédé du rafraîchissement de l'air par la géothermie dans le site de Biskra (figure 2.1). Le banc des essais expérimentaux est monté sur site à l'université de Biskra. Il s'agit d'un réseau de quatre tractions d'une longueur totale d'environ 60 m. Le diamètre interne du tube est de 110 mm. L'ensemble est placé à une profondeur de 3 m sous une pente de 2 %.

Pour le site de Biskra, cette profondeur (3 m) a été déterminée préalablement grâce à une étude effectuée en fonction des données locales du site) [12, 18]. Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 2 m.

Une fosse de réception en béton est construite à la sortie de l'échangeur. Un extracteur d'air de débit variable est placé à l'entrée de l'échangeur. Une série de sondes thermiques a été placées le long de l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie. Les sondes sont reliées à une centrale d'acquisition[12].



Figure 2.1.Dispositif expérimentale de Moumimi et al. [12]

Chapitre II : Synthèse bibliographique.

Les auteurs ont examiné et vérifié expérimentalement les modèles théoriques qui ont été établis jusqu'à présent, qui traduisent l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction des différents paramètres. 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.

Bansal et al. [19, 20] ont étudié expérimentalement et numériquement l'effet de la conductivité thermique du sol et la période de fonctionnement continu de l'EAHE pour différentes longueurs de tuyaux. Les auteurs ont constaté que les performances de l'échangeur dépendent principalement de la conductivité thermique et aussi de la durée de fonctionnement. Les résultats montrent également que l'épaisseur du sol de la couche du sol est constant est égal 2 fois le rayon du tube.

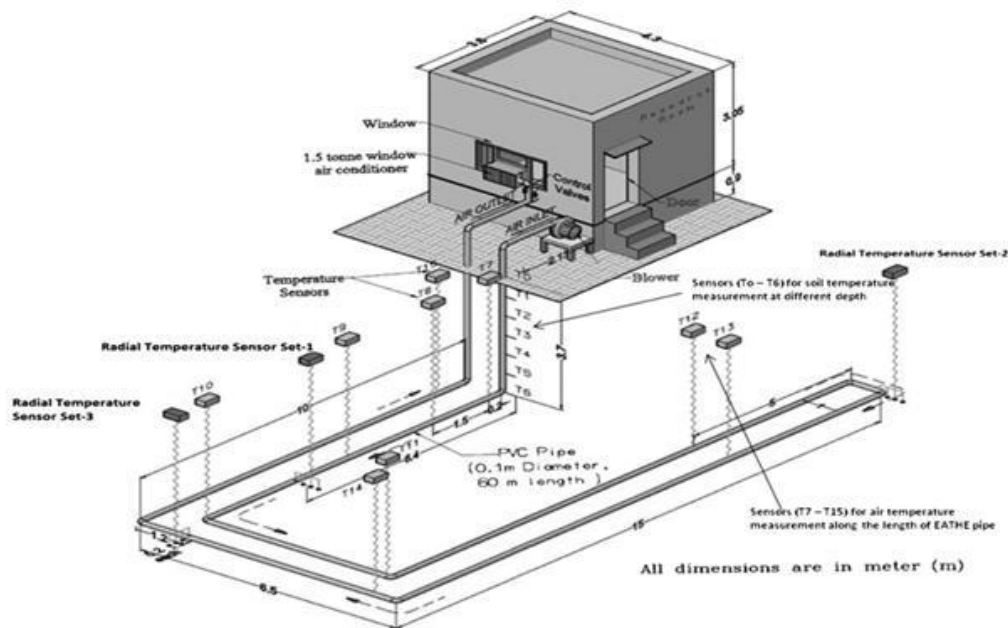
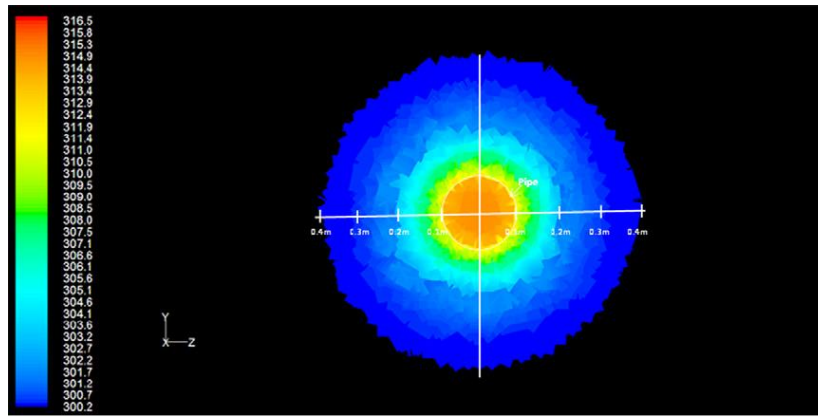
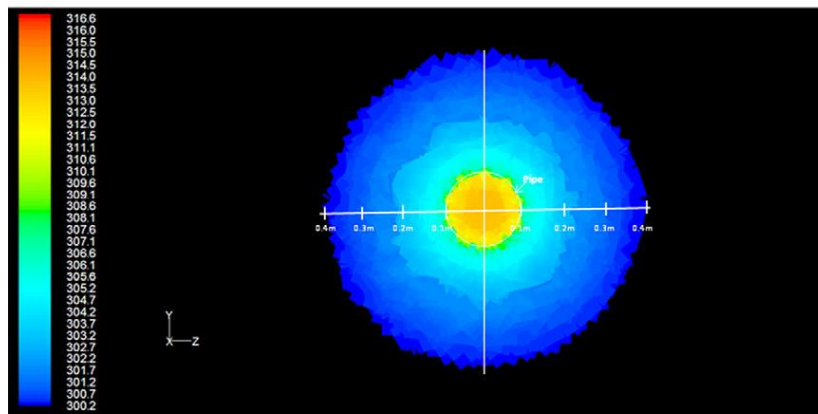


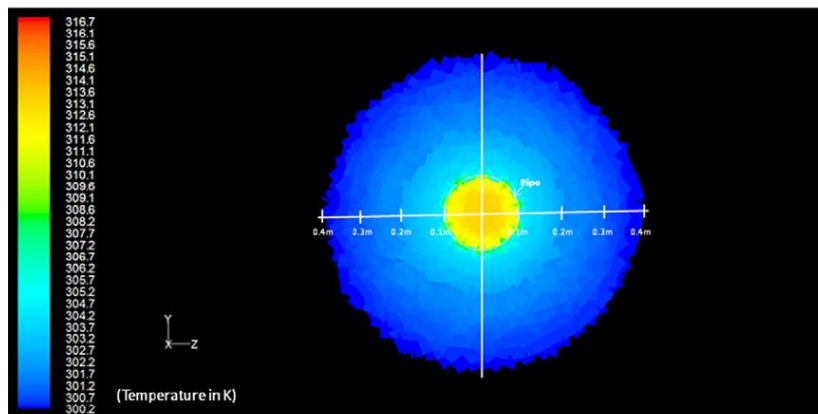
Figure 2.2. Banc d'essai expérimental de Bansal et al. [19]



(a)



(b)



(c)

Figure 2.3.Température de l'air et du sol à une section de 10 m de l'entrée du tube après 12 h de fonctionnement pour trois sols (a) 0,52, (b) 2,00et (c) 4,00 $W m^{-1}K^{-1}$ [20]

Une autre étude par Thanu et al. [21]qui ont présenté une étude expérimentale sur les échangeurs air/sol pour le confort thermique d'un bâtiment, indique que le système fonctionne et possède une grande efficacité pendant la période estivale.

Ozgener et al. [22] Ont conçu et installé un échangeur air sol en Turquie pour déterminer et évaluer les propriétés thermiques de l'échangeur. Une résistance thermique moyenne totale de l'échangeur de chaleur a été estimée à 0,021 (K.m/W) comme une valeur constante dans l'état stationnaire.

3 Quelques études théoriques sur les échangeurs air/sol :

L'étude présentée par B. Mebarki et al [13] en 2011 a été réalisée sur un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar. Dans ce travail, une étude des performances d'un échangeur air-sol a été effectuée par voie de modélisation analytique. Le modèle de la température du sol et la température de l'air dans l'échangeur a été validé (voir figure 2.4), puis ils ont étudié l'influence de quelques paramètres (la profondeur, le diamètre et la longueur du tube) sur la température de l'air à l'intérieure de l'échangeur [13].

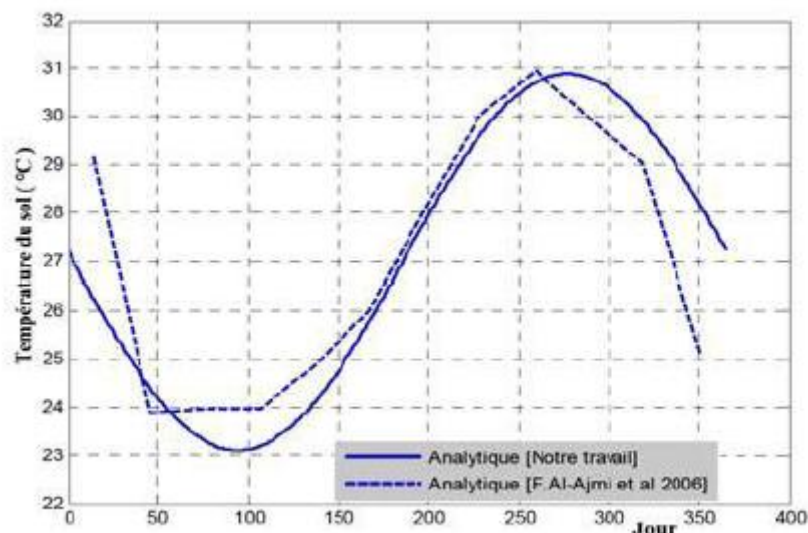


Figure 2.4 validation du model analytique de la température du sol durant toute l'année [13]

Mathur et al. [23] ont effectué des simulations numériques pour évaluer les performances thermiques et l'évolution de la température du sol pendant le fonctionnement d'été à Jaipur afin d'estimer l'étendue de la dégradation du sol. Les résultats de la simulation indiquent qu'à la fin de l'été, le sol conduit à une saturation thermique qui, à son tour, peut le rendre inutilisable pour l'été prochain. Pour résoudre ce problème, trois stratégies, à savoir la purge de nuit pendant l'exploitation estivale, l'exploitation de jour en hiver et l'exploitation de nuit en hiver ont été tentées pour estimer le degré de la récupération du sol. Les résultats de la simulation montrent que les COP moyens pour l'été, l'été avec purge de nuit, le jour d'hiver et le mode d'opération de nuit d'hiver sont respectivement de 4,23, 3,68, 5,01 et 6,65. Cette

Chapitre II : Synthèse bibliographique.

situation peut être améliorée en utilisant le système en mode de fonctionnement hiver / nuit. Cela offre une meilleure utilité d'EAHE (Earth-to-Air Heat Exchanger) pour l'été prochain[23].

Un modèle numérique transitoire unidimensionnel modèle est présenté par Benhammou et Draoui[24] pour étudier performance d'EAHE pour le refroidissement d'été. Selon les auteurs, la performance d'EAHE est plus influencée par l'opération période de temps du système, le diamètre du tuyau et la vitesse de l'air Barakat et al. [25] Ont développé un modèle transitoire unidimensionnel pour prédire l'impact des principaux paramètres géométriques et dynamiques, y compris la longueur du tube, le diamètre du tube intérieur et la vitesse d'entrée de l'air sur les performances thermiques de l'échangeur air sol.

Saad Eddine[26] en 2012 a donné une description et définition détaillée des échangeurs air/sol ainsi que leurs composants, il a étudié les différents paramètres qui influent les performances thermiques d'un tel système. Ensuite, il s'est intéressé à la profondeur où la température du sol reste stable qui peut être exploité dans le rafraîchissement par l'utilisation d'échangeur air/sol enterré à cette profondeur. Puis, l'auteur a proposé un modèle analytique pour suivre l'évolution de la température du sol en fonction de la profondeur et la 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. La figure ci-dessous montre l'évolution la température de l'air dans l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie pour trois débits différents.

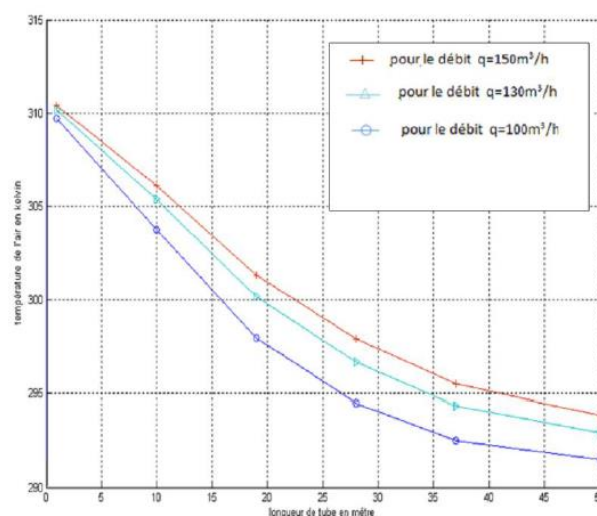


Figure 2.5. Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour la 200^{ème} journée de l'année [26]

Chapitre II : Synthèse bibliographique.

Récemment Rouag et al. [27] ont développé un nouveau modèle analytique pour calculer la température du sol et sa résistance thermique dans un échangeur air/sol. Par la suite, la résistance thermique totale est calculée pour l'ensemble : air, tuyau et sol. Enfin, les paramètres déterminés sont utilisés pour évaluer la température de sortie de l'air de la couche en cours. Le modèle a été validé avec d'autres travaux dans la littérature et les résultats montrent que le fonctionnement continu de l'échangeur air/sol provoque la saturation thermique du sol qui diminue les performances du système.

4 Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, nous avons donné un aperçu sur quelques travaux théoriques et expérimentaux réalisés dans la littérature. On a essayé de présenter pour chaque travail réalisé, les objectifs et quelques résultats à travers des courbes.

A travers cette étude bibliographique, plusieurs chercheurs ont modélisé les échangeurs géothermiques air sol horizontaux et verticaux pour n'importe quelle géométrie de l'échangeur.

Le problème d'accumulation de la chaleur dans le sol voisin autour du tube enterré apparaît dans le cas de fonctionnement continu et en longue période durant le mode de refroidissement.

Pour cela, la suite de cette section est consacrée à l'étude numérique des transferts thermiques entre l'air et le sol en fonction de la durée de fonctionnement pour voir en premier lieu l'effet de temps d'opération sur les performances thermiques de tel système et en deuxième lieu l'effet de la nature du sol sur le transfert de chaleur dans les échangeurs air sol.

Chapitre III : Dimensionnement d'un échangeur air/sol

1 Introduction :

Comme tout échangeur thermique, l'échangeur air-sol met en contact thermique deux sources de températures différentes. Durant le mode rafraîchissement, la source chaude est l'air et la source froide le sol[16]. En outre, le succès final d'une installation de rafraîchissement par un échangeur air/sol dépend largement de la bonne étude, conception et réalisation de ces échangeurs. Par conséquent, il est évident que le fait de disposer un échangeur géothermique air/sol bien adapté et bien dimensionné donne un bon rendement et permet un gain d'énergie.

Le présent chapitre est consacré au dimensionnement d'un échangeur air/sol typique à la région d'Ouargla. La méthode de différences finies avec un schéma implicite a été utilisée pour résoudre l'équation de la chaleur dans l'air et dans le sol. Un code en Fortran90 est élaboré pour dimensionner cet échangeur.

2 Modélisation de la température du sol :

L'estimation de la variation de la température dans le sol entourant le tube est importante pour l'évaluation de l'épaisseur du sol perturbé en fonction du temps. Dans ce mémoire, cette épaisseur est considérée variable dans le calcul de la résistance thermique du sol en fonction du temps de fonctionnement de l'échangeur air/sol.

La variation radiale de la température du sol pourrait être calculée en utilisant l'équation de la conduction de chaleur dans le sol comme (pour notre cas nous supposons que le transfert de chaleur est suivant l'axe des (x))

Pour simplifier l'analyse, les hypothèses suivantes ont été considérées lors du réglage du modèle mathématique

2.1 Hypothèses :

- I. Les propriétés thermo-physiques du sol sont isotropes avec une conductivité thermique homogène dans toutes les couches du sol.
- II. L'air est incompressible et ses propriétés thermiques sont constantes.
- III. L'air est bien mélangé dans le tube, et le flux d'air est uniforme sur toute la longueur des tubes.
- IV. Dans le calcul numérique, la température de l'air d'entrée est considérée constante.

2.2 Variation de la température dans le sol :

L'estimation de la variation de la température dans le sol entourant le tube est importante pour

La variation radiale de la température du sol pourrait être calculée en utilisant l'équation de la conduction de chaleur dans le sol comme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Sachant que la diffusivité thermique est aussi donnée par :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2)$$

Le calcul de la variation de la température du sol a été fait en se basant sur les conditions initiales et aux limites suivantes :

Condition initiale

Il faut fournir au modèle numérique de la condition initiale qui représente l'état du sol à l'instant où commence la simulation. Toutefois, ces conditions initiales ne constituent qu'une base de démarrage.

$$T(x, 0) = T_{\text{sol}} \quad (3)$$

Conditions aux limites :

$$T(0, t) = T_{\text{air}} \quad (4)$$

$$T(\infty, t) = T_{\text{sol}} \quad (5)$$

3.2 Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies est basée sur l'approximation de dérivées de fonctions, considérées suffisamment régulières, sur un ensemble discret de points au moyen de quotients de deux différences. Introduites dans les équations différentielles, ces approximations permettent de créer des schémas numériques itératifs qui fournissent une approximation de la solution[28].

2.2.1 Discrétisation de l'équation de la chaleur 1D :

La géométrie de l'échangeur air/sol a été discrétisée en domaine de calcul par des nœuds uniformes dans la coordonnée axiale (voir figure ci-dessous). Les Nœuds dans les coordonnées de l'axe des (x) qui sont limités au domaine du sol ont un intervalle de $\Delta x = 0,01 \text{ cm}$ et un intervalle suivant $\Delta t = 0,01 \text{ h}$. la figure III.3 illustre la discrétisation de ce domaine. Les nœuds sont étiquetés de $i=1$ à N ou le premier nœud ($i = 1$) est la surface extérieure du tube enterré et le dernier nœud ($i = N = 100$) représente le nœud final loin du tube dans la discrétisation du domaine du sol.

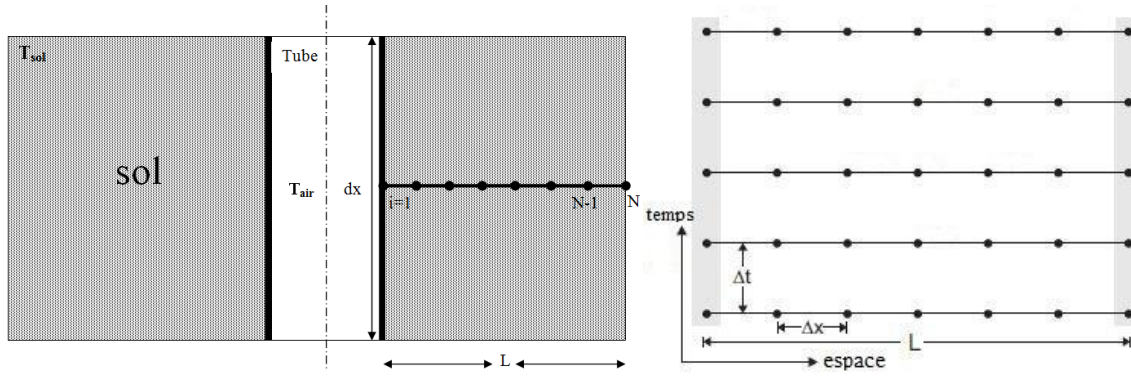


Figure 3.1. Exemple de discrétisation du sol à l'entrée de l'échangeur.

L'équation différentielle (équation (1)) est discrétisée en utilisant la méthode des différences finies avec schéma implicite.

En utilisant une étape temporelle Δt , et une étape spatiale Δx et en appliquant le schéma de différence central, l'équation (1) devient :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^{n+1} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^{n+1} \quad (6)$$

Nous utilisons un schéma avant d'ordre 1 pour évaluer la dérivée temporelle et un schéma centré d'ordre 2 pour la dérivée seconde en espace

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^{n+1} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^{n+1} = \frac{T_i^{n+1} - 2T_{i-1}^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (8)$$

En posant $\lambda = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$. La température à l'itération $n + 1$ est donnée par :

$$T_i^n = (1 + 2\lambda)T_i^{n+1} - \lambda(T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}) \quad (9)$$

On constate que les inconnues à l'itération $n+1$ sont reliées entre elles par une relation implicite (d'où le nom de la méthode).

En appliquant les conditions initiales :

$$T_i^1 = (1 + 2\lambda)T_i^2 - \lambda(T_{i+1}^2 + T_{i-1}^2) = T_{s0} = 21,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

Fixer le temps

Pour $n = 1$ et i varie de 1 à $N-1$

$$i = 2 \quad T_2^1 = (1 + 2\lambda)T_2^2 - \lambda(T_3^2 + T_1^2) \quad (11)$$

$$i = 3 \quad T_3^1 = (1 + 2\lambda)T_3^2 - \lambda(T_4^2 + T_2^2) \quad (12)$$

.

.

$$i = 49 \quad T_{49}^1 = (1 + 2\lambda)T_{49}^2 - \lambda(T_{50}^2 + T_{48}^2)$$

Pour $n = 2$ et i varie de 1 à $N-1$

$$i = 2 \quad T_2^2 = (1 + 2\lambda)T_2^3 - \lambda(T_3^3 + T_1^3)$$

$$i = 3 \quad T_3^2 = (1 + 2\lambda)T_3^3 - \lambda(T_4^3 + T_2^3)$$

.

.

$$i = 49 \quad T_{49}^2 = (1 + 2\lambda)T_{49}^3 - \lambda(T_{50}^3 + T_{48}^3)$$

Le résultat final est sous la forme d'un système linéaire $Ax=b$

$$\begin{bmatrix} 1+2\lambda & -\lambda & 0 & \dots & 0 \\ -\lambda & 1+2\lambda & -\lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & -\lambda & 1+2\lambda & -\lambda \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda & 1+2\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{N-2} \\ T_{N-1} \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} T_{sol} + \lambda T_{air} \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{N-2} \\ T_{sol} + \lambda T_{sol} \end{bmatrix}^n$$

3 Modélisation de la température de l'air :

L'échangeur horizontal est placé à une profondeur d suffisamment profonde pour que la température du sol reste invariante.

3.1 Hypothèses :

- I. Le sol loin de l'échangeur garde une température constante pendant les échanges thermiques ;
- II. Le coefficient d'échange convectif entre l'air et le tube est constant le long de l'échangeur air sol ;
- III. L'écoulement de l'air est unidirectionnel avec vitesse supposée constante ;
- IV. La conduction longitudinale et le taux d'humidité sont négligeables

3.2 Modélisation transitoire de la température de l'air le long du tube :

Rappelons le bilan énergétique cité dans l'équation qui est valable pour le tronçon de l'échangeur air sol et pour les deux cycles de fonctionnement.[29]

Ritotale évolue proportionnellement avec la durée de fonctionnement de l'échangeur.

$$\rho S c p_{air} \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) \lambda S \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{(T_{sol} - T_a)}{\frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi} \ln\left(\frac{r_3(t)}{r_2}\right) + \frac{1}{\lambda_{tube} \cdot 2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{h_{cv} \cdot 2\pi \cdot r}} \quad (13)$$

$r_3(t)$ représente le rayon de la couche perturbée du sol voisin de l'échangeur ou la profondeur de pénétration de la chaleur dans le sol [15]. A partir de cette distance ($r_3(t)$) la température du sol commence à se stabiliser.

$$r_3(t) = \sqrt{\frac{\alpha \cdot t}{\pi}} \quad (14)$$

Après application des hypothèses simplificatrices proposées à l'équation 1, on obtient :

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -u \frac{\partial T_a}{\partial x} + \frac{(T_{sol} - T_a)}{\gamma} \quad (15)$$

Avec $\gamma = \rho \pi r_1^2 c p_{air} R_{itotale}(t)$

Les conditions aux limites et la condition initiale suivantes sont choisies pour résoudre l'équation 7

$T_a(x = 0) = T_{ae}$, qu'est la température mesurée à l'entrée de l'échangeur

$T_a(t = 0) = T_{s0}$

3.2.1 Résolution numérique du problème par la méthode de différences finies :

La méthode de différences finies a pour objectif de transformer une équation continue valable en un système à N équations pour N inconnues associées à un domaine discret appelé maillage.

3.2.2 Discrétisation de l'équation du bilan énergétique :

En raison de stabilité de la méthode, il est préférable d'utiliser le schéma implicite dans la discrétisation de l'équation à résoudre (équation 15).

La figure ci-dessous représente la configuration et le domaine discrétisé de l'échangeur air sol.

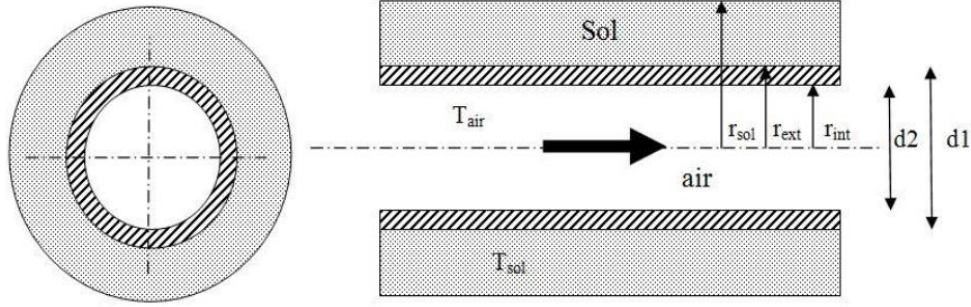


Figure 3.2. Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré.

Rappelons l'équation du bilan énergétique simplifiée en régime transitoire éq (16).

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -u \frac{\partial T_a}{\partial x} + \frac{(T_{sol} - T_a)}{\gamma} \quad (16)$$

Dans la discrétisation de l'équation 3, on utilise les différences centrées de 2^{ème} ordre jusqu'au nœud N-1 et pour le nœud final N on utilise les différences à gauche du 1^{er} ordre.

De façon plus précise, si l'indice i repère la variable x et l'indice n repère la variable t on obtient une équation implicite en écrivant le second membre de l'équation 4 à l'instant t = k+1 où la solution n'est pas connue[28], ce qui donne

$$\frac{1}{\Delta t} (T_i^{n+1} - T_i^n) = -\frac{u}{2\Delta x} (T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}) - \frac{1}{\gamma} T_i^{n+1} + \frac{T_{sol}}{\gamma} \quad (17)$$

$$-\frac{1}{\Delta t} T_i^k = \frac{u}{2\Delta x} T_{i-1}^{k+1} - \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\Delta x}\right) T_i^{k+1} - \frac{u}{2\Delta x} T_{i+1}^{k+1} + \frac{T_{sol}}{\gamma} \quad (18)$$

Par séparation des variables, le membre gauche est réservé aux variables connues par contre le membre droit est réservé aux variables inconnues, comme suit :

$$T_i^k + \frac{u}{\gamma} T_{sol} = -\frac{u\Delta t}{2\Delta x} T_{i-1}^{k+1} + \left(\frac{\Delta t}{\gamma} + 1\right) T_i^{k+1} + \frac{u\Delta t}{2\Delta x} T_{i+1}^{k+1} \quad (19)$$

La forme finale discrétisée (éq.6) est conçue pour un maillage allant du premier nœud jusqu'au nœud N-1.

Pour le nœud final N (température de sortie), nous avons utilisé les différences à gauche du 1^{er} ordre à l'équation comme suit :

$$\frac{1}{\Delta t} (T_n^{k+1} - T_n^k) = -\frac{u}{2\Delta x} (T_n^{k+1} - T_{n-1}^{k+1}) - \frac{1}{\gamma} T_n^{k+1} + \frac{T_{sol}}{\gamma} \quad (20)$$

$$-\frac{1}{\Delta t} T_i^k = -\left(\frac{1}{\gamma} + \frac{u}{\Delta x}\right) T_n^{k+1} + \frac{u}{2\Delta x} T_{n-1}^{k+1} - \frac{1}{\gamma} T_n^{k+1} + \frac{T_{sol}}{\gamma} \quad (21)$$

$$T_i^k + \left(\frac{\Delta t}{\gamma}\right) T_{sol} = -\frac{u\Delta t}{\Delta x} T_{n-1}^{k+1} + \left(\frac{u\Delta t}{\Delta x} + \frac{\Delta t}{\gamma} + 1\right) T_n^{k+1} \quad (22)$$

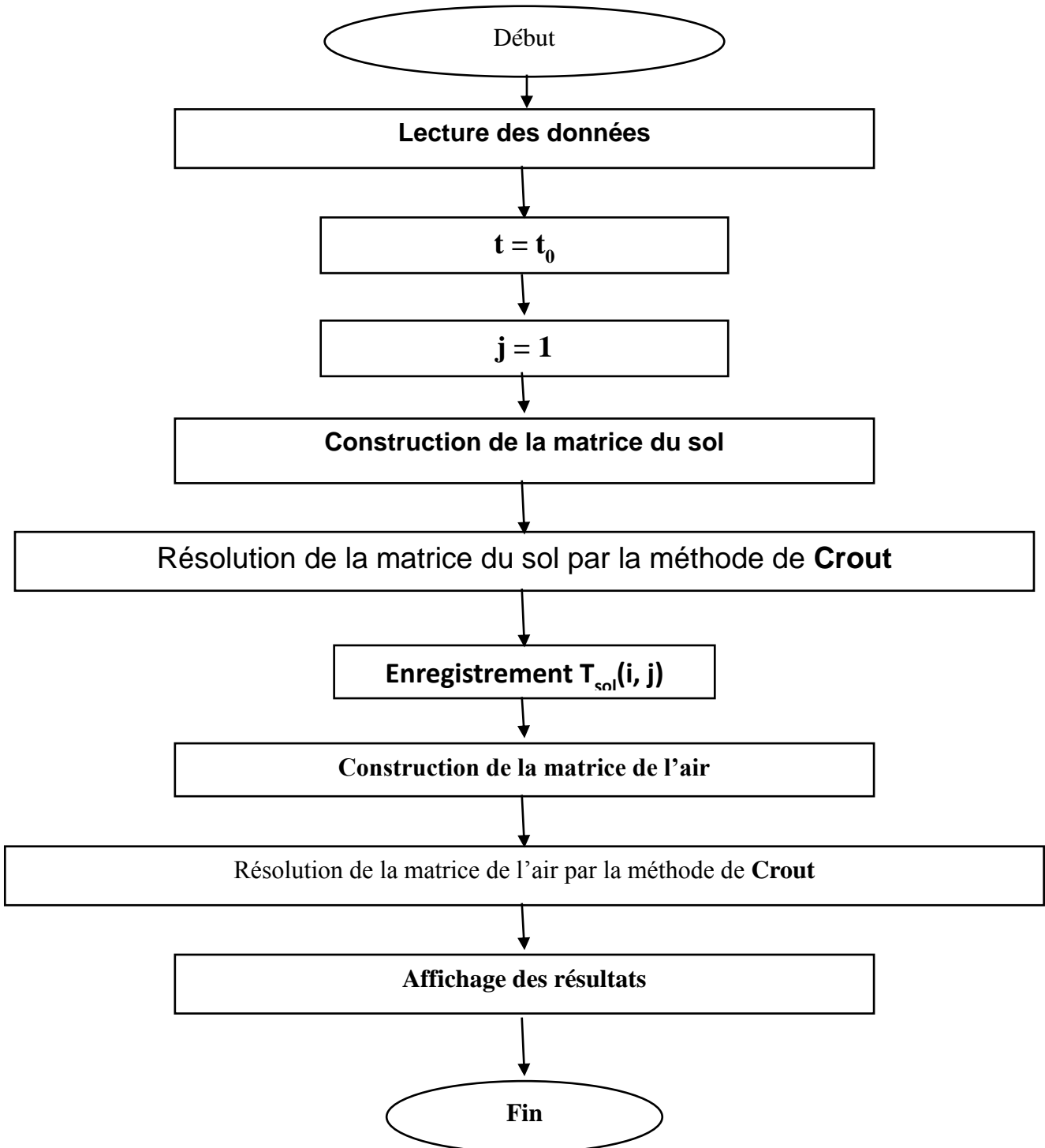
Les équations 20 et 23 représentent la forme finale discrétisée de l'équation du bilan énergétique simplifié (éq. 16) où leurs système matriciel s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{\gamma} + 1 & \frac{u\Delta t}{2\Delta x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{u\Delta t}{2\Delta x} & \frac{\Delta t}{\gamma} + 1 & \frac{u\Delta t}{2\Delta x} & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & -\frac{u\Delta t}{2\Delta x} & \frac{\Delta t}{\gamma} + 1 & \frac{u\Delta t}{2\Delta x} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{u\Delta t}{2\Delta x} & \left(\frac{u\Delta t}{2\Delta x} + \frac{\Delta t}{\gamma} + 1 \right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_2 \\ T_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{n-1} \\ T_n \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} T_2 + \frac{\Delta t}{\gamma} T_{sol} + \frac{u\Delta t}{2\Delta x} T_{ae} \\ T_3 + \frac{\Delta t}{\gamma} T_{sol} \\ \cdot \\ T_{n-1} + \frac{\Delta t}{\gamma} T_{sol} \\ T_n + \frac{\Delta t}{\gamma} T_{sol} \end{bmatrix}^k$$

4 Résolution numérique :

La résolution numérique des systèmes linéaires (Ax=B) du sol et de l'air a été faite par la méthode de Crout qui se base sur la décomposition LU de la matrice A et donc le système devient LUX=B. Puis, on suppose que UX=Y et on résout le système LY=B par la méthode de la descente triangulaire pour trouver le vecteur Y. Enfin, le système UX=Y est résolu par la méthode de la remontée triangulaire.

5 Organigramme de calcul :



Chapitre IV : Résultats et discussion

1 Introduction :

Un programme Fortran est élaboré pour dimensionner un échangeur de chaleur air/sol en appliquant des conditions climatiques extrêmes de la région de Ouargla où les résultats sont donnés sous forme des courbes. Nous tacherons de faire ici une étude paramétrique qui montre l'influence de la durée de fonctionnement de l'échangeur sur la température de sortie de l'air et la température du sol pour voir l'influence de ces paramètres sur les performances de l'échangeur.

2 Conditions climatiques de la région de Ouargla :

2.1 Température ambiante :

Pour adapter l'échangeur de chaleur à la région d'Ouargla, on a choisi la température la plus chaude de la dernière décennie. A partir des données météorologiques de la température maximale durant la période entre (2008-2018) nous concluons que le l'année2015 est l'année la plus chaude de cette période comme le montre la figure (4.1).D'après la figure 4.1, on remarque que la température 50.4 °C et la température maximale dans la dernière décennie et par conséquent nous allons considérer cette température comme température d'air à l'échangeur air/sol.

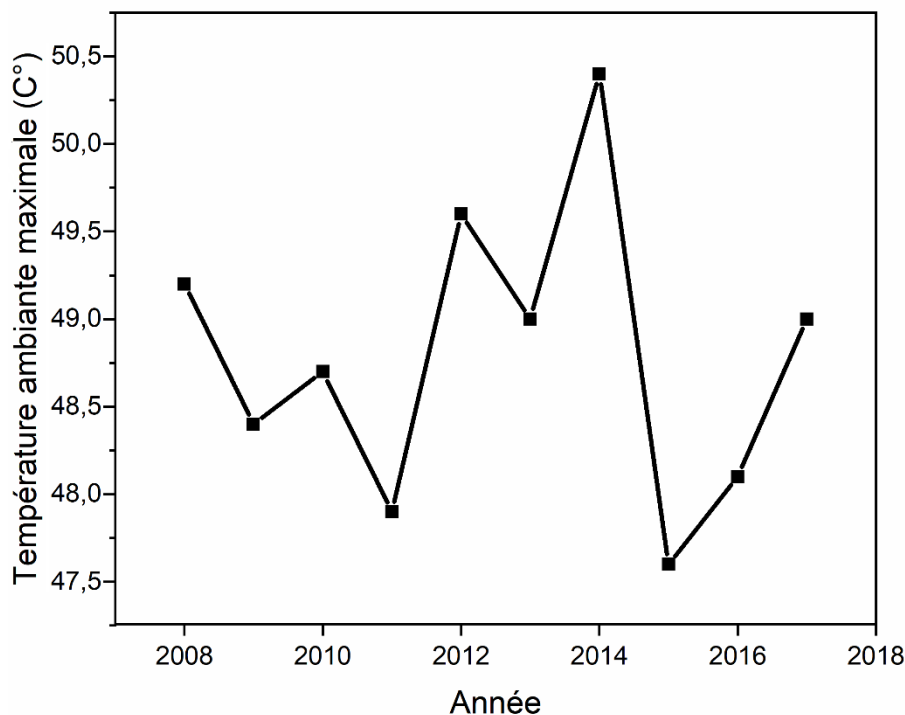


Figure 4.1. Température ambiante maximale dans la région de Ouargla durant la dernière décennie[9].

2.2 Température du sol :

Dans le tableau 4.1 nous représentons les résultats de travail expérimentale de Hathat et Doudane[30] qui ont mesuré la température du sol à une profondeur de 2.5 m dans la région de Sidi-Khouiled. Les résultats montrent que la température de sol dans cette profondeur et de l'ordre de 21.5 °C. Dans ce travail, nous avons considéré cette valeur de température comme valeur initiale pour la température du sol.

Tableau 4.1. Température du sol dans la région Sidi Khouild

Profondeur [m]	Température de sol T _{sol} [°C]								T _{moy}
	9:00	10:00	11:00	12:00	14:00	18:00	19 :00	20 :00	
temps									
1.0	23.3	23.0	23.1	23.2	25.0	25.1	24 .2	24.4	24.0
1.5	22.5	22.1	22.4	22.3	23.8	23.8	23.2	23.7	23.0
2	21.5	21.6	21.8	21.5	22.3	23.5	23.7	23.9	22.5
2.5	20.7	21.1	20.5	20.8	21.0	22.3	22.7	22.7	21.5

2.3 Etude paramétrique :

Les courbes représentées ci-dessous ont été calculées pour les données suivantes :

Tableau 4.2 : les données de calcul

Paramètre	valeur
Dt[m]	0.01
Dx[m]	0.01
Dint[m]	0.11
Dext[m]	0.116
Cpsol[j/kg.K]	1995.4
Cpair[j/kg.K]	1005
$\rho_{sol}[\text{Kg/m}^3]$	1868
$\rho_{air}[\text{Kg/m}^3]$	1.2
$\lambda_{sol}[\text{W/m.K}]$	1.74
$\lambda_{air}[\text{W/m.K}]$	0.025
$\lambda_{tube}[\text{W/m.K}]$	0.17
T _{sol} [°C]	21.5
T _{air} [°C]	50.4
Ep[m]	0.003
VisC[m ² /s]	115000
Lo[m]	100
Debit[m ³ /s]	130
V _{air} [m/s]	5

La figure 4.2 représente la variation de la température du sol à une distance de 1 cm le long de l'échangeur (100 m) pendant une durée de fonctionnement de 24 heures. Comme le montre la figure 4.2, lorsque que la durée de fonctionnement augmente, l'allure de la température du sol augmente. Ainsi, la température su sol est plus importante dans les premiers mètres de l'échangeur où la température de l'air est plus élevée. Par conséquent, une détérioration maximale des performances thermiques est observée dans cette région après un fonctionnement continu de l'échangeur pendant 24 heures. Ceci suggère que la pénétration de la chaleur dans le sol est principalement influencée par la durée de fonctionnement continu.

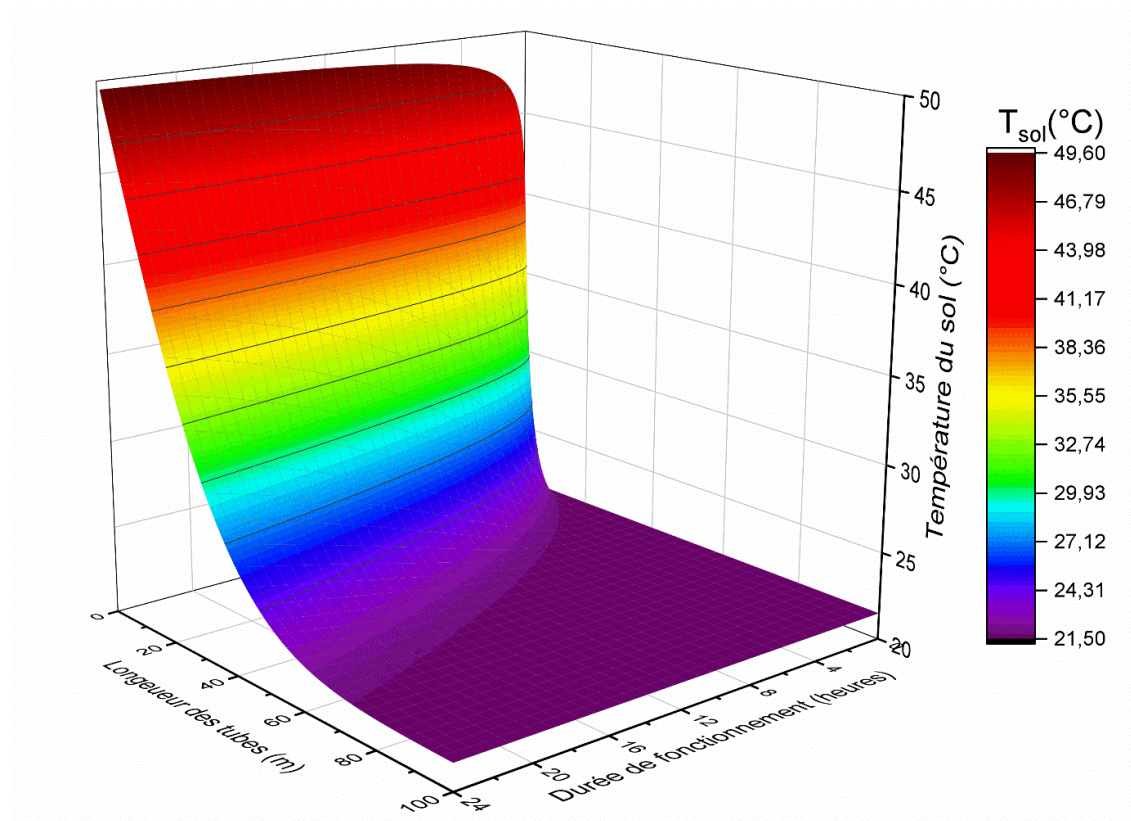


Figure 4.2. Variation de la température du sol (à une distance de 1 cm) le long de l'échangeur en fonction de la durée de fonctionnement.

La figure 4.3 présente la distribution de la température du sol entourant l'entrée de l'échangeur sur un plan horizontal à 2.5 m de profondeur. A titre d'exemple, selon la figure 4.3 et pour une durée de fonctionnement maximale ne dépasse pas 24 heures et une température constante de l'air 50.4 °C, la propagation de la chaleur dans le sol peut atteindre 0,8 m de la surface du tube (voir la figure 4.4). Par conséquent, pour assurer un refroidissement continu de l'air, la distance minimale entre les tubes est de 1,6 m.

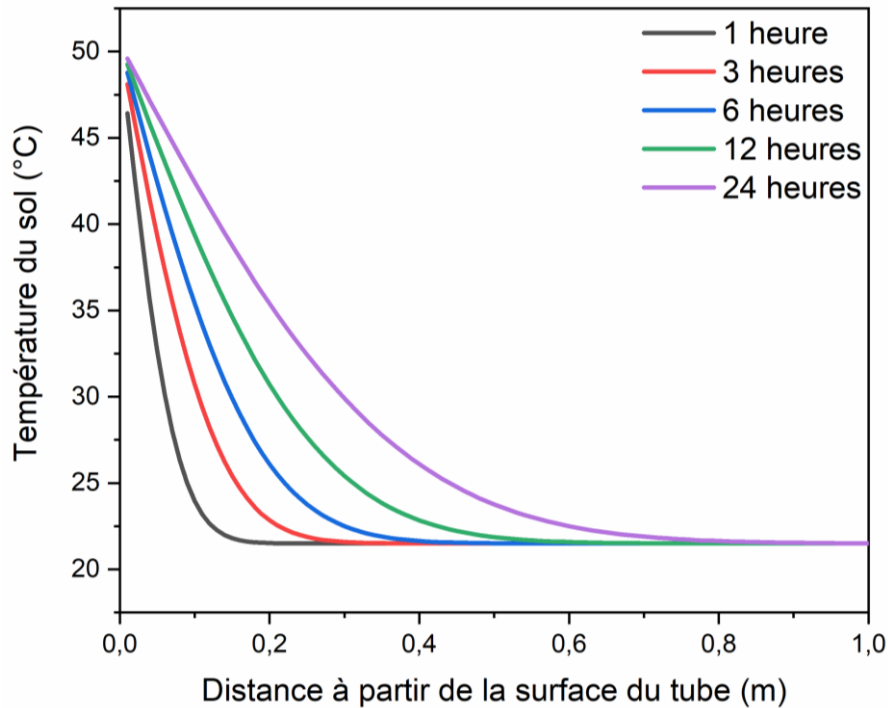
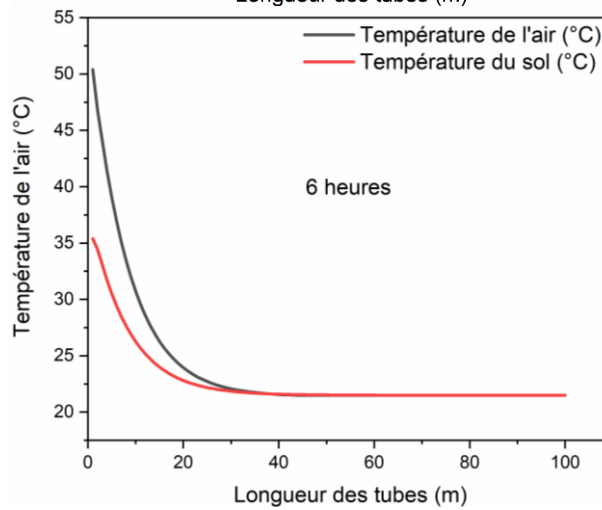
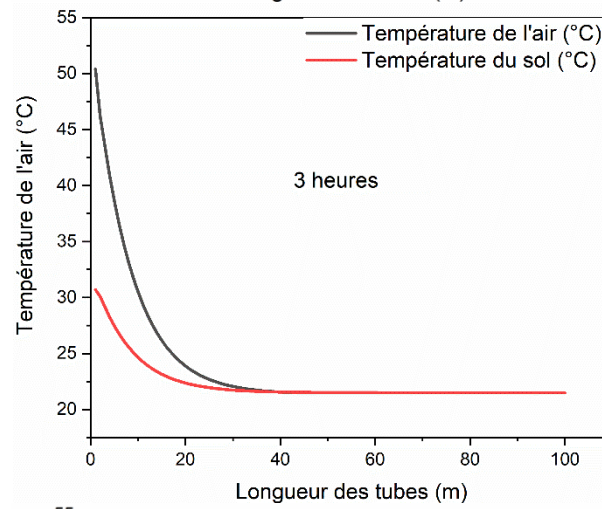
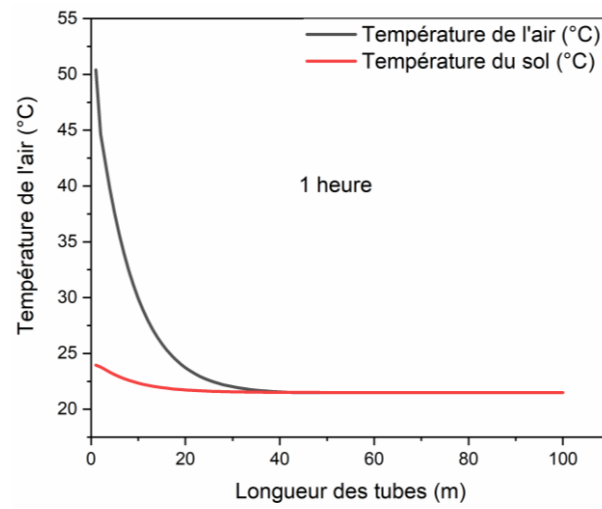


Figure 4.3. Variation de la température du à l'entrée de l'échangeur pour différentes durées de fonctionnement

La figure 4.4 représente variation de la température de l'air et du sol à 10 cm de distance sur la surface du tube en fonction de la longueur des tubes pour différentes durées de fonctionnement. On note que la température du sol augmente à l'entrée de l'échangeur pour différentes durées de fonctionnement et diminuent progressivement le long de l'échangeur de chaleur. Les résultats de la figure 4.4 indiquent que, l'augmentation de la température du sol près de l'entrée est plus rapide que la sortie d'échangeur air/sol. L'air à l'intérieur de échangeur air/sol est refroidi sur toute la longueur, ce qui réduit le transfert de chaleur et, par conséquent, réduit l'apport d'énergie thermique au sol. Par conséquent, la différence de température entre l'air et la température du sol à l'entrée est supérieure à celle de la sortie. En outre, les performances du système en termes de températures d'air de sortie sont meilleures au début, puis la température de l'air de sortie commençait à augmenter et la performance diminuait.

Par ailleurs, l'augmentation de la température du sol entraîne une diminution du flux de chaleur entre l'air et le sol au cours des périodes suivantes, car la différence de température disponible pour le transfert de chaleur est faible (voir la figure 4.4)

Chapitre IV : Résultats et discussion



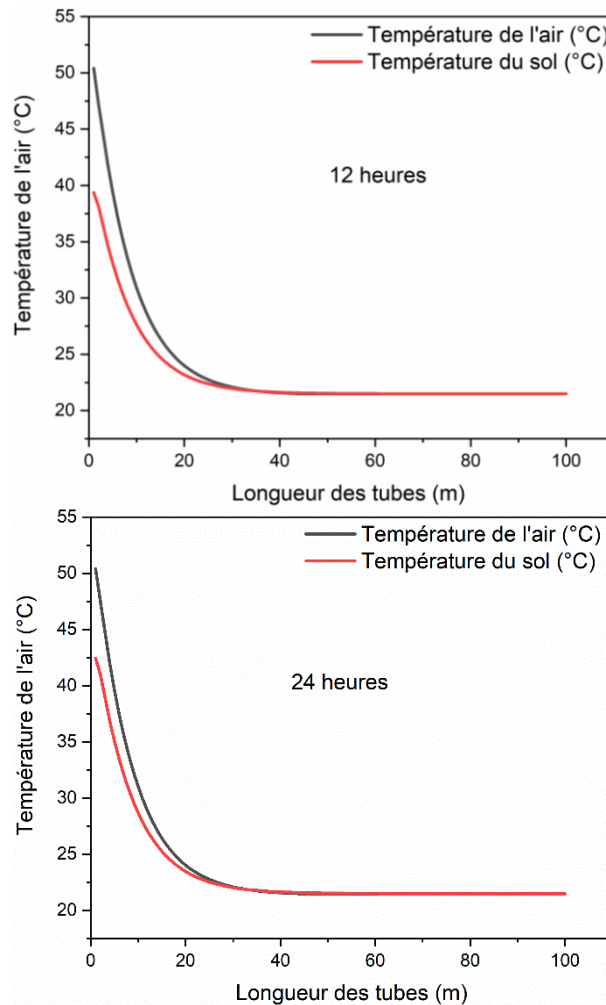


Figure 4.4 Variation de la température de l'air et du sol en fonction de la longueur des tubes pour différentes durées de fonctionnement.

La figure 4.5 le représente Influence de la conductivité thermique sur la température du sol pour différentes durées de fonctionnement. Les résultats montrent que l'allure de la température du sol est plus importante dans le cas des grandes conductivités thermique. Comme montré dans la Figure 4.5, il est révélé que la pénétration de la chaleur du tube vers les couches de sol adjacentes est beaucoup plus rapide pour un sol ayant une conductivité thermique plus élevée. Toutefois, dans le cas du sol de faible conductivité (0.5W/mK), la couche de sol jusqu'à une distance de $0,4\text{ m}$ de la surface de la conduite se réchauffe seulement après une opération continue de 24 heures en raison de la mauvaise conductivité thermique du sol. Cela montre qu'une quantité substantielle de chaleur transférée de l'air au sol est effectivement pénétrée dans les couches de sol subséquentes et donc une élévation moindre de la température du sol est observée pour les couches de sol à proximité immédiate de la surface du tube.

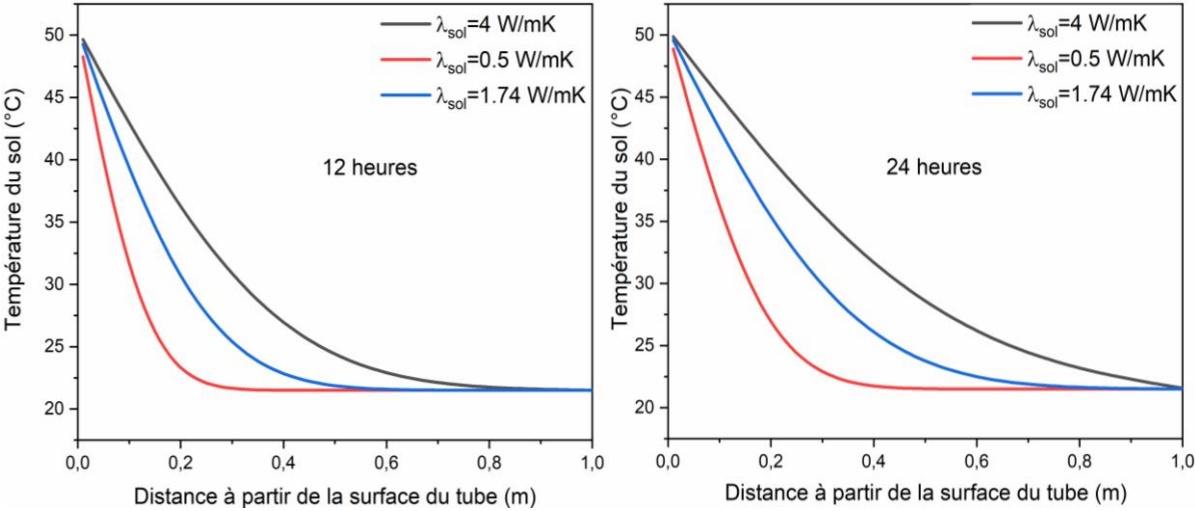


Figure 4.5. Influence de la conductivité thermique sur la température du sol pour différentes durées de fonctionnement.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de notre étude est de faire une étude numérique de l'échangeur géothermique air/sol. La méthode de différences finies en régime instationnaire a été utilisée pour étudier de la distribution de la température de l'air et de sol en fonction de la durée de fonctionnement de l'échangeur.

L'étude bibliographique a montrée fonctionnement continu de l'échangeur provoque l'accumulation de la chaleur dans le sol voisin autour du tube.

Pour cela, un code de calcul numérique par le langage Fortran 90 a été élaboré pour dimensionner un échangeur air-sol convenable aux conditions climatiques de la région d'Ouargla.

Le code prend en compte tous les paramètres affectant les performances du système (propriétés thermo-physiques de l'air et du sol, température de l'air d'entrée, paramètres géométriques des tuyaux et durée de fonctionnement) qui rendent la conception des échangeurs géothermiques horizontaux peu profonds plus fiable.

Une étude paramétrique a été faite pour l'analyse et la prévision de l'influence des différents paramètres de durée et conductivité thermique sur la performance de notre système.

On peut conclure que la dissipation continue de la chaleur pendant le fonctionnement continu de l'air au sol se traduit par une température du sol plus élevée. Par conséquent, une détérioration des performances thermiques des échangeurs de chaleur air/sol est observée pendant les longues durées. Il est également conclu que l'élévation de la température des couches de sol est plus grande pour la longueur initiale du tube que les longueurs du tube qui suit.

La détérioration maximale de la performance thermique obtenue par le système étudié est pour le sol ayant la plus faible conductivité thermique. Ceci conduit à la conclusion que les propriétés du sol jouent un rôle clé dans la conception de ces échangeurs.

Ce travail a le potentiel d'être un outil pratique pour de futures recherches et développements de projets pour les systèmes géothermiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] B. e. DOUNANE and B. HATHAT, Conception et analyse de fonctionnement d'un échangeur air/sol, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2011.
- [2] J. Bergougnoux, Des technologies compétitives au service du développement durable, Centre d'analyse stratégique, Août 2012 2012.
- [3] Y. d. Kerorguen, Energoscope: guide de toutes les énergies, connues et inconnues, Éd. Technip; Paris: Éd. Technip, 2009.
- [4] P. Géothermie, <http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/04-applications-01>, consulté le 04/06/2018.
- [5] F. Jean, La géothermie, <http://www.periple.net/blog-jfd/spip.php?article281>, consulté le 04/06/2018.
- [6] A. S. Eddine, Dimensionnement d'un échangeur air/sol enterré destiné au rafraîchissement de l'air, Université de Biskra, 2014.
- [7] M. Brahimi, Situation des énergies renouvelables en Algérie, Presented at Journée sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marché, pp. 61, Mai 2001.
- [8] C. Martinet and J. Meyer, Travail à la chaleur et confort thermique, INRS, 1999.
- [9] INFO-CLIMAT, Climatologie de l'année 2018 à Ouargla, <http://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2014/biskra/valeurs/60525.html>, consulté le 25/05/2018.
- [10] J. Romuald, Le puits canadien ou puits provençal, *Centre d'Etudes Techniques de l'équipement de Lyon (CETE)*, vol. pp. 2005. DOI:
- [11] Y. Belloufi, Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux (mémoire de Master), University of Biskra, 67, 2012.
- [12] N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi and S. Y. Ali, Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra, *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 13 3, pp. 399-406, 2010. DOI:
- [13] B. Mebarki, B. Draoui, S. Abdessemed, A. Keboucha, S. Drici and 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 3, pp. 465-478, 2012. DOI:
- [14] Y. Belloufi, 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 de Doctorat, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 130, 2017.
- [15] P. Hollmuller, Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique, University of Geneva, 2002.
- [16] S. Thiers, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.
- [17] E. SATARA and A. MABROUKI, Etude d'un échangeur de chaleur air/sol, Mémoire de Master, Mémoire de Master Université de Ouargla, 38, 2016.
- [18] Y. Belloufi, A. Brima, S. Zerouali, R. Atmani, F. Aissaoui, A. Rouag and N. Moummi, Numerical and experimental investigation on the transient behavior of an earth air heat exchanger in continuous operation mode, *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY*, vol. 35 2, pp. 279-288, 2017. DOI:
- [19] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal and J. Mathur, Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling, *Energy and Buildings*, vol. 42 5, pp. 645-648, 2010. DOI:
- [20] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal and J. Mathur, Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied energy*, vol. 103 pp. 1-11, 2013. DOI:
- [21] N. Thanu, R. Sawhney, R. Khare and D. Buddhi, An experimental study of the thermal performance of an earth-air-pipe system in single pass mode, *Solar Energy*, vol. 71 6, pp. 353-364, 2001. DOI:

Références bibliographiques.

- [22] O. Ozgener, 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*, vol. 38 6, pp. 711-716, 2011. DOI:
- [23] A. Mathur, A. K. Surana and S. Mathur, Numerical investigation of the performance and soil temperature recovery of an EAHE system under intermittent operations, *Renewable Energy*, vol. 95 pp. 510-521, 2016. DOI:
- [24] M. Benhammou and B. Draoui, Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44 pp. 348-355, 2015. DOI:
- [25] S. Barakat, A. Ramzy, A. Hamed and S. 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:
- [26] M. Saaddine, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/Sol enterré, Université Mohamed Khider de Biskra, 2012.
- [27] A. Rouag, A. Benchabane and C.-E. Mehdid, Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I a new transient semi-analytical model for determining soil temperature, *Journal of Cleaner Production*, vol. 182 pp. 538-544, 2018. DOI:
- [28] J.-P. Nougier and J. Nougier, Méthodes de calcul numérique, Masson Paris, 1985.
- [29] Y. Belloufi, 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, 04/07/2017
- Devant le.
- [30] B. e. DOUNANE and B. HATHAT, conception et analyse de fonctionnement d'un échangeur air-sol, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 107, 2011.

Etude numérique d'un échangeur géothermique air/sol

Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'étudier numériquement un système de rafraîchissement de l'air dit « échangeur air/sol ». La grande inertie thermique du sol assure une température moins variable à certaines profondeurs quel que soit les conditions climatiques externes. Cette caractéristique peut être utilisée pour le refroidissement ou le réchauffement de l'air. La température de l'air au cours de l'échangeur a été calculée en reposant sur le concept des bilans énergétiques appliqués entre l'air en écoulement et le sol voisin de l'échangeur. Une équation de la chaleur en une dimension est proposée pour évaluer l'accumulation de la chaleur dans le sol voisin du tube enterré lors de l'utilisation continue de l'échangeur en longue période. Un code en langage FORTRAN a été développé pour résoudre les différentes équations utilisées dans ce travail. Les résultats trouvés peuvent être utilisés dans des analyses plus poussées.

Mots-clés : échangeur air/sol, géothermie, différences finies, température du sol, température de l'air, énergie renouvelable.

دراسة عددية لمبادل حراري هواء/تربة

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو دراسة نظام تبريد الهواء المسمى "المبادل الحراري هواء تربة". تتضمن العطالة الحرارية الكبيرة للتربة درجة حرارة أقل في بعض الأعماق مهما كانت الظروف المناخية الخارجية. يمكن استخدام هذه الميزة لتبريد الهواء أو تسخينه. تم حساب درجة حرارة الهواء خلال المبادل على أساس مفهوم موازين الطاقة المطبقة بين الهواء المتدفق والأرض المجاورة للمبادل. يقترح معادلة حرارية أحادية البعد لتقييم تراكم الحرارة في الأرض المجاورة للأنبوب المدفون أثناء الاستخدام المعزول للمبادل في فترة طويلة. تم تطوير رمز بلغة (FORTRAN) لحل المعادلات المختلفة المستخدمة في هذا العمل. النتائج التي يمكن العثور عليها يمكن استخدامها في مزيد من التحليلات. الكلمات المفتاحية: مبادل حراري هواء / تربة، الطاقة الحرارية الأرضية، الفروق المحدودة، درجة حرارة التربة، درجة حرارة الهواء، الطاقات المتجددة.