

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département des Energies Renouvelables



Mémoire de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables En Mécanique

Présenté par :

**IBTIHAL SID
ILYES KHERFI
NAOURES BOUBLEL**

Thème

**UTILISATION DES ECHANGEURS AIR-SOL POUR LE CHAUFFAGE ET
LE RAFRAICHISSEMENT DES BATIMENTS : ETUDE DE
MODELISATION-SIMULATION**

Soutenu publiquement :

Le 08/06/2022

Devant le jury :

DR. AMAR ROUAG	MC A	Président	UKM Ouargla
DR. BACHIR BOUCHEKIMA	Professeur	Encadreur	UKM Ouargla
DR. DJAMEL BENMENINE	MC A	Examineur	UKM Ouargla
DR. SABRIN KORICHI	M	Co Encadreur	UKM Ouargla

Année Universitaire :2021/2022

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage, la patience pour mener à bien et à terme ce travail. La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toutes nos reconnaissances .Nous adressons toutes nos gratitudes et nos remerciements à Monsieur Pr. Bachir Bouchekima et Mme Dr. Sabrin Korichi pour avoir accepté l'encadrement scientifique et technique de ce travail et de l'avoir suivi minutieusement jusqu'à la fin et aussi pour leur patience et leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils qui ont contribué à alimenter nos réflexions.

Enfin, nous tenons à remercier tous les enseignants qui ont accompli leurs tâches délicates au cours de cette année.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers :
Les parents, les plus chers au monde, Maman Hayet et Papa Idris,
que Dieu les garde, mon frère Moatez et ma sœur Nada, mes tantes
et mon oncle*

Toutes mes amis, particulièrement Ibtihal Sid et Ilyes Kherfi

Merci pour m'avoir soutenue

Naoures BOUBLEL

Dédicaces

Je dédie ce travail à deux personnes les plus chères au monde : mon père et ma mère, que Dieu me les garde pour toujours Inchallah

A mes frères et sœurs.

A toute la famille du département énergies renouvelables

Et à tous ceux qui ont contribué avec moi durant mon parcours étudiant

Ibtihal SID

Dédicaces

Je dédie ce travail

à mes très chers parents et à mes frères et sœurs

Aussi, à mes chers enseignants

À toute ma famille et mes amis

Ilyes KHERFI

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Sommaire.....	V
Liste des tableaux.....	V
Liste de figures.....	V
Nomenclature	V
Introduction générale.....	1

Chapitre 01

1.1 Introduction :.....	4
1.2 La géothermie :	4
1.3 Différents types de géothermies :	4
1.3.1 La géothermie haute énergie :.....	4
1.3.2 La géothermie basse énergie :.....	5
1.4 Systèmes de captation de l'énergie géothermique.....	6
1.4.1 Echangeur de chaleur horizontale :.....	6
1.4.2 Echangeur de chaleur vertical :.....	7
1.5 Echangeur air-sol (puits canadien) :.....	8
1.5.1 Modes de fonctionnement d'un échangeur air-sol :	9
1.5.2 Caractéristiques des principaux composants d'un échangeur air-sol :	11
1.5.3 Emplacement de l'échangeur air-sol :.....	13
1.5.4 Les Avantages des échangeurs air / sol :.....	14
1.5.5 Les inconvénients des échangeurs air-sol :	14
1.6 La géothermie en Algérie	14
1.6.1 Les ressources géothermiques en Algérie :	14

1.6.2 Classification des zones climatiques en Algérie :	15
1.6.3 La géothermie à Ouargla :	15
1.7 Les avantages de l'énergie géothermique :	16
1.8 Les inconvénients de l'énergie géothermique :	16
1.9 Conclusion :	16

Chapitre 02

2.1. Introduction :	18
2.2 Localisation géographique limites la région de Ouargla :	18
2.3 Température du sol.....	19
2.4 Température de l'entrée du système	21
2.5 Etude analytique de l'échangeur enterré :	22
2.5.1 Modèle thermique de l'échangeur air-sol :	22
2.5.2. Description du modèle thermique d'échangeur air-sol :	23
2.5.3. Hypothèses simplificatrices du modèle :	23
2.5.4. Modélisation de la température de l'air le long du tube :	24
2.5.4.1. Tronçon horizontal :	25
2.6 Conclusion :	26

chapitre 03

3.1 Introduction :	28
3.2 Effets des paramètres de conception sur le comportement thermique :	28
3.2.1 Effet de la longueur de l'échangeur enterré	30
3.2.2 Effet du diamètre de l'échangeur enterré	31
3.2.3 Effet de la profondeur d'enfouissement de l'échangeur	32
3.2.4 Effet de la vitesse de l'air	33

3.3 Conclusion	34
Conclusion Générale.....	35
Références bibliographiques	38
Annexes_:	39
Résumé.....	43

Liste des tableaux :

Tableau 1 Les utilisations de la géothermie à travers le monde6
Tableau 2 Propriétés thermo-physiques du sol.20

Liste de figures :

Figure 1 Carte des ressources géothermiques mondiales [2].	5
Figure 2 échangeur de chaleur air/sol horizontal [5].	7
Figure 3 Echangeur de chaleur air/sol vertical[5].	8
Figure 5 Schéma de principe d'un puits canadien [7].	9
Figure 6 Description d'un puits canadien en hiver [8].	10
Figure 7 Description d'un puits canadien en été [8].	11
Figure 8 Emplacement de l'échangeur air-sol [10].	13
Figure 9 Carte de situation de la région de Ouargla [17].	19
Figure 10 Variations de la température du sol avec la profondeur (m), ville d'Ouargla [18].	21
Figure 11 Schéma descriptif de l'échangeur air/sol [20].	24
Figure 14 Schéma descriptif du tronçon horizontal II pour un cycle de refroidissement [20].	26
Figure 15 Schéma descriptif du tronçon horizontal II pour un cycle de refroidissement [20].	26
Figure 18 Évaluation de la température de sortie en fonction du temps pour différents longueurs, (a) le cas de refroidissement et (b) le cas de chauffage.	30
Figure 19 Évaluation de la température de sortie en fonction du temps pour différents diamètres, (a) le cas de refroidissement et (b) le cas de chauffage.	31
Figure 20 Évaluation de la température de sortie en fonction du temps pour différents profondeurs d'enfouissement, (a) le cas de refroidissement et (b) le cas de chauffage.	32
Figure 21 Évaluation de la température de sortie en fonction du temps pour différents vitesses d'air, (a) le cas de refroidissement et (b) le cas de chauffage.	33

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
T_{sol}	Température du sol	°C
T_a	Température de l'air à l'intérieur de l'échangeur	°C
T_s	Température de l'air à la sortie de l'échangeur	°C
T_{a1}	Température de l'air à la sortie de l'échangeur vertical 1	°C
T_{a2}	Température de l'air à la sortie de l'échangeur horizontal 2	°C
S	Surface d'échange	m^2
λ_{sol}	Conductivité thermique du sol	$W/m.K$
H	Coefficient d'échange moyen de l'air par convection	$W/m^2.K$
T	Temps	s
δ	Profondeur de pénétration de la chaleur dans le sol	m
m	Masse d'air	kg
\dot{m}	Débit massique de l'air	kg/s
C_p	Chaleur spécifique	$J/kg.K$
φ	Flux de chaleur	watt
u	Vitesse axiale de l'air à l'intérieur de l'échangeur	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	Cordonnée longitudinale suivant la direction du tube	m
x	Cordonnée horizontale	m
α	Diffusivité thermique	m^2/s

Z	Profondeur en dessous de la surface du sol	m
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
S	Surface d'échange	m^2
R	Résistance thermique	$m.K/W$
T_{amb}	Température ambiante journalière	$^{\circ}C$
T_i	Température du sol à une profondeur	$^{\circ}C$
R_{int}	Rayon intérieur du tube	m
R_{ext}	Rayon extérieur du tube enterré	m
R_{sol}	Rayon de la couche adiabatique du sol	m
R_{cnv}	Résistance thermique entre l'air et le tube	K/W
X	Longueur	m
V	Vitesse	$m.s^{-1}$
D	Diamètre	m
KH_{cnv}	Coefficient d'échange convectif	w/m^2

Groupes sans dimension

Nombre de Reynolds	Re
Nombre de Prandtl	Pr
Nombre Nusselt	Nu

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'homme vit dans un océan d'énergie, la nature travaille autour de nous sans s'arrêter, donnant d'énormes quantités d'énergie illimitée pour que l'homme ne puisse en utiliser qu'une petite partie, le générateur le plus puissant qui soit est le soleil, et seules les chutes d'eau sont capables de produire à partir de l'énergie hydroélectrique ce qui représente 80% de l'énergie totale consommée par l'homme.

Si les vents étaient maîtrisés, cela produirait deux fois plus d'électricité que l'eau produit aujourd'hui, et si nous utilisons la ruée des marées pour générer de l'énergie, cela nous fournirait la moitié de nos besoins. De toutes les alternatives au pétrole, l'énergie solaire et les autres alternatives renouvelables dominent, les vents, les résidus organiques, l'énergie marémotrice, les vagues, les gradients thermiques et les fluides géothermiques ont captivé l'imagination et les préoccupations de l'opinion publique et des décideurs. Elle est considérée comme une énergie dérivée des ressources naturelles de l'environnement et ne s'épuise pas, et elle produit de l'énergie renouvelable à partir du vent, du soleil et de l'eau, en plus de celle résultant des marées, ou de l'énergie géothermique. à augmenter, le réchauffement climatique, et la pollution de l'environnement avec ses déchets, qui ont affecté la vie des organismes vivants à la surface de la terre, y compris l'homme, et lui ont causé de nombreux problèmes de santé, et de nombreuses maladies qui n'existaient pas auparavant sont apparues. [1]

L'énergie provient des ressources naturelles de l'environnement et ne s'épuise pas, et l'énergie renouvelable est produite à partir du vent, du soleil et de l'eau, en plus de celle issue de la mer, ou de l'énergie géothermique. et polluer l'environnement avec ses déchets, ce qui affecte la vie des organismes vivants à la surface de la terre, y compris l'homme, et lui cause de nombreux problèmes de santé, et de nombreuses maladies qui n'existaient pas d'avant. Les sources d'énergie renouvelables sont devenues partie intégrante de la responsabilité de l'entreprise qui cherche à atteindre le développement durable, et la consommation de cette énergie augmente de jour en jour.

Une grande variété de technologies et d'équipements de production d'énergie ont été développés au fil du temps pour tirer parti de ces ressources naturelles. En conséquence, l'énergie utilisable peut être produite sous forme d'électricité, de chaleur industrielle, d'énergie thermique de conditionnement d'espace, d'eau et de carburants de transport . Nous nous concentrerons sur la technologie de refroidissement et de chauffage par la géothermie grâce à l'utilisation d'un échangeur de chaleur air-sol, aussi appelé puits canadien ou puits provençal, son principe est simple, où l'air de rénovation, avant d'entrer dans la maison, passe par un tuyau enterré sous

Introduction générale

terre. En hiver, l'air est préchauffé car le sol est beaucoup plus chaud que l'air extérieur. En été, l'air est rafraîchi et le phénomène inverse se produit. L'échangeurs de chaleur air-sol est une technologie basée sur l'inertie thermique du sol qui chauffe ou refroidit l'air entrant dans un bâtiment pour un confort thermique.

Le dimensionnement d'échangeur air-sol est délicat en raison du grand nombre paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de canalisations, vitesse, profondeur d'enfouissement, distance entre canalisations. Les instructions de dimensionnement fournies ici ont pour but de fournir des critères objectifs de sélection de ces différentes caractéristiques.

Nous présentons ici une étude de modélisation-simulation numérique pour la conception d'un échangeur air-sol adapté aux conditions climatiques de la région de Ouargla.

Notre travail se composé de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique de l'énergie géothermique et quelque différent type et utilisation. Ce chapitre se termine par une définition sur l'échangeur air-sol et principe de fonctionnement.
- Le deuxième chapitre, nous nous intéressons à la modélisation mathématique des échangeurs. Cette modélisation associe un modèle complémentaire : le modèle thermique sol et le modèle échangeur air-sol.
- Le troisième chapitre nous nous intéressons à l'interprétation des résultats obtenus pour éclairer le développement des équations théoriques présentées dans le chapitre précédent. [1]

Chapitre I: Etude bibliographique

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons abordé des concepts et des définitions utiles, qui sont les concepts de l'énergie géothermique et ses diverses utilisations et les caractéristiques du climat de la région dans laquelle nous allons appliquer notre système. On définit ce chapitre par l'échangeur air-sol, les caractéristiques de ses éléments constitutifs, les avantages et les inconvénients du système.

1.2 La géothermie :

La géothermie est une technologie qui permet d'exploiter la chaleur stockée sous la surface de la terre. L'intensité de cette chaleur peut varier selon l'environnement géologique et la température du sol qui augmente en fonction de la profondeur.

L'utilisation de divers procédés de captage, permet de récupérer l'énergie stockée sous la surface de la Terre et de s'en servir, notamment pour chauffer des bâtiments ou produire de l'électricité. L'énergie géothermique est une ressource énergétique renouvelable appartenant au domaine de la géo énergie.

1.3 Différents types de géothermies :

Les techniques géothermiques diffèrent selon la température, la profondeur et l'usage que l'on fait de cette chaleur. On distingue généralement deux catégories :

1.3.1 La géothermie haute énergie :

On exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C.

On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques et sismiques (frontières de plaques) où le gradient géothermique est particulièrement élevé.

La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité.

La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur [2].

1.3.2 La géothermie basse énergie :

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30°C et 150° C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions.

Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage des serres [2].

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

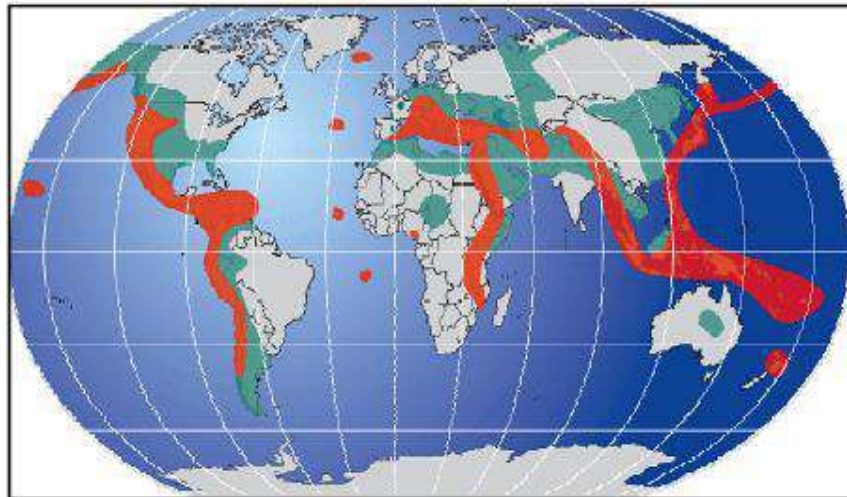


Figure 1 Carte des ressources géothermiques mondiales [3].

Le récapitulatif des types et usages des énergies géothermiques est présenté sur le tableau suivant :

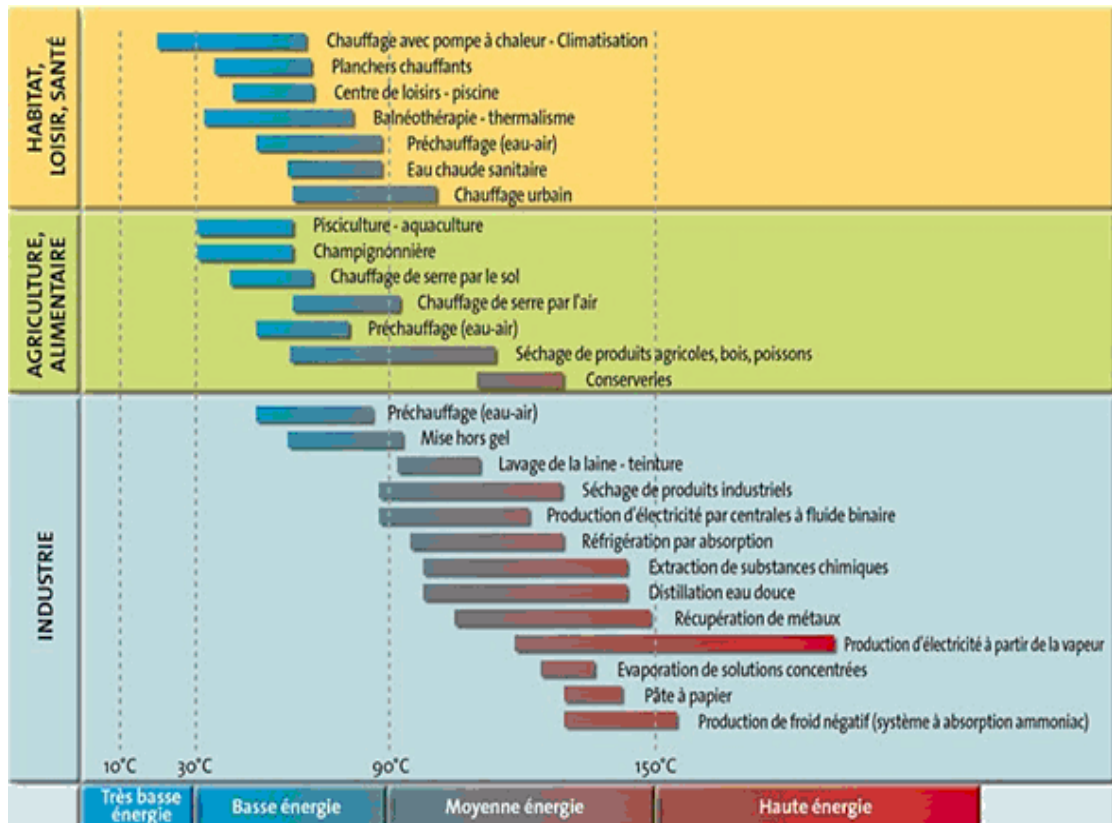


Tableau 1 Les utilisations de la géothermie à travers le monde [4].

1.4 Systèmes de captation de l'énergie géothermique

Les systèmes de captation de l'énergie géothermique sont constitués par des échangeurs, (appelés aussi capteurs) enterrés dans le sol. Suivant leurs dispositions, il Ya deux types : horizontaux, verticaux

1.4.1 Echangeur de chaleur horizontale :

Il n'existe actuellement pas de réglementation ou de normes concernant la mise en œuvre, des capteurs horizontaux utilisés dans des installations géothermiques. Seules de recommandations et des conseils pratiques sont accessibles [5].

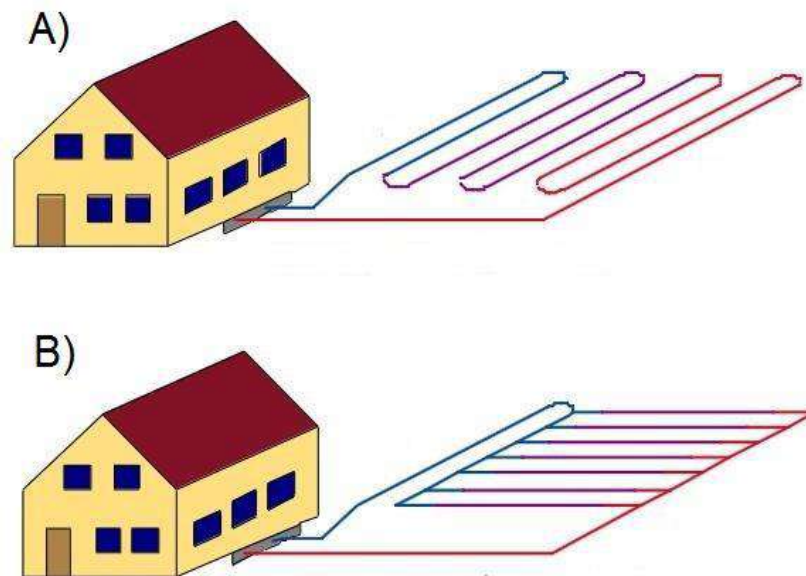


Figure 2 échangeur de chaleur air/sol horizontal [6].

1.4.2 Echangeur de chaleur vertical :

Les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment. La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau glycosée.

L'emprise au sol est minime par rapport aux capteurs horizontaux [5].

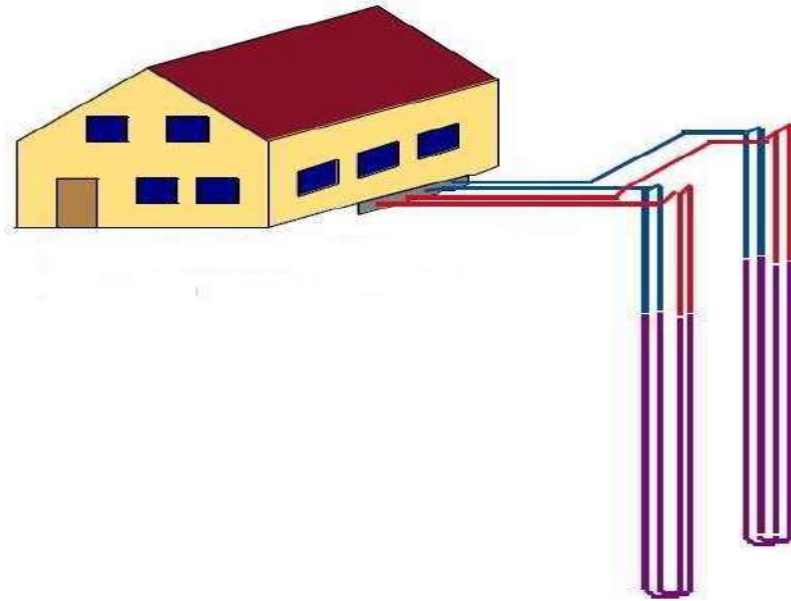


Figure 3 Echangeur de chaleur air/sol vertical[6].

1.5 Echangeur air-sol (puits canadien) :

Un puits canadien est un système d'un ensemble de tubes (éventuellement un seul tube) enterré horizontalement sous un bâtiment et intégré au système de ventilation.

Selon les conditions atmosphériques, la date et la saison, l'air extérieur subit de fortes variations de température. D'autre part, le sol, à plusieurs mètres sous la surface, subit très peu de variations de température en raison de son énorme inertie thermique. Les échangeurs air-sol profitent de cette énorme inertie pour ventiler en amenant l'air extérieur en contact thermique avec le sol par des conduits enterrés à plusieurs mètres de profondeur dans le sol, à proximité ou directement sous le bâtiment. L'air de l'extérieur est conduit à travers les conduits par des ventilateurs, puis soufflé dans le bâtiment [7].

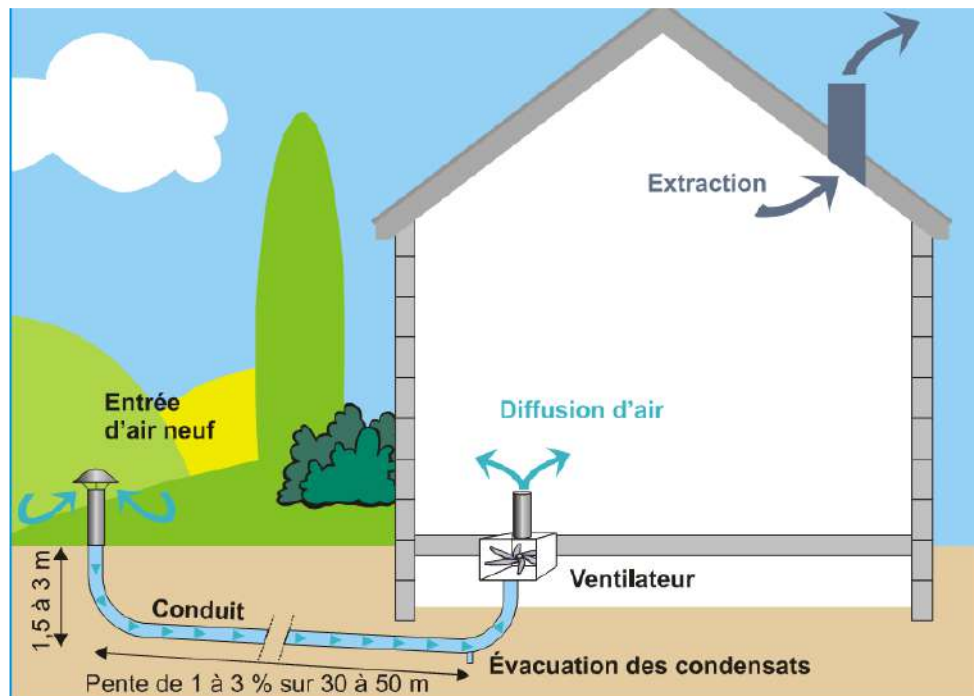


Figure 4 Schéma de principe d'un puits canadien [8].

1.5.1 Modes de fonctionnement d'un échangeur air-sol :

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

a. Fonctionnement en hiver :

En hiver, 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 [9].

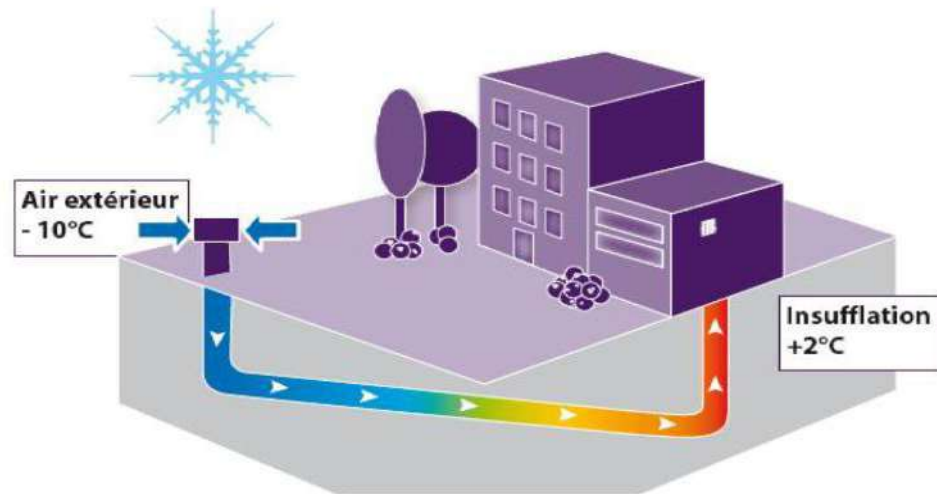


Figure 5 Description d'un puits canadien en hiver [9].

b. Fonctionnement en été :

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

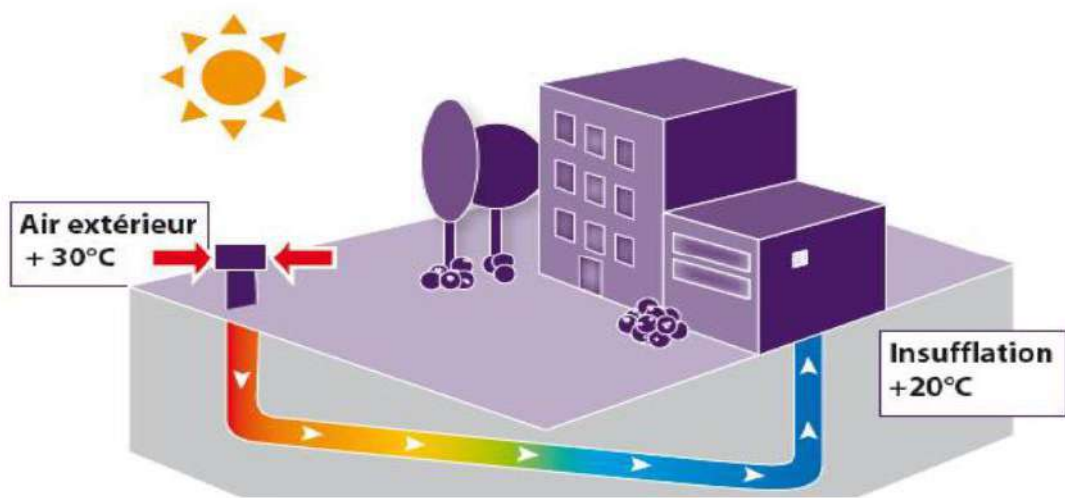


Figure 6 Description d'un puits canadien en été [9].

c. Fonctionnement au printemps / automne :

Pendant les intersaisons, la température extérieure subit des variations importantes (journées ensoleillées – nuits froides), mais la température du sous-sol reste stable (fraîche au printemps – encore chaude en automne). Par une chaude journée de printemps, il n'est pas souhaitable d'amener de l'air neuf par l'intermédiaire de l'échangeur géothermique, cet air serait plus frais que l'air extérieur. Par contre, le préchauffage de l'air par l'échangeur géothermique pendant les nuits fraîches du printemps est souhaitable. L'exemple inverse (journées fraîches, nuits chaudes) est valable pour les journées d'automne [10].

1.5.2 Caractéristiques des principaux composants d'un échangeur air-sol :

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

- L'entrée d'air neuf.
- L'échangeur géothermique.
- Le système d'évacuation des condensats.
- Le ventilateur.

1.5.2.1 Prise d'air neuf :

Tous les puits canadiens ont des entrées d'air frais. Il peut s'agir d'une colonne extérieure circulaire ou cubique, placée sur la façade du bâtiment ou aussi loin que le permet le sol. Il est généralement de la même taille que le tuyau auquel il est connecté, afin de ne pas provoquer de changements de vitesse et de chutes de pression. Il peut s'agir de colonnes omnidirectionnelles ou unidirectionnelles selon la source possible de contamination environnante. Il est généralement équipé de couvercles et d'ailettes qui empêchent l'eau de pluie de pénétrer dans le puits. Les entrées d'air sont généralement placées légèrement plus haut pour éviter d'emprisonner trop de poussière. Il est ancré au sol par une base en béton. Le matériau de l'entrée d'air peut être : acier inoxydable, acier galvanisé, béton, polyéthylène [10].

1.5.2.2 L'échangeur géothermique :

Il est constitué d'un ou plusieurs tubes et a une triple fonction : guider le flux d'air, échanger de la chaleur avec le sol et assurer la résistance mécanique de la structure.

Leurs principales caractéristiques sont leurs dimensions (diamètre, longueur) et leur matière. La connexion est ensuite sécurisée par plusieurs méthodes : vissage, emboîtement, collage... parfois avec des joints en caoutchouc.

Les échangeurs de chaleur sont généralement enterrés de 4 à 6 m dans le tertiaire et de 1 à 2 m dans les maisons individuelles. Il est suffisamment éloigné du sol du bâtiment pour empêcher toute fuite de chaleur du sol dans le puits. Définissez une pente constante de 2 à 3 % pour évacuer toute condensation.

1.5.2.3 Système d'évacuation des condensats :

Le fait que de l'air chaud et humide provenant de l'extérieur se refroidisse au contact des parois froides du puits canadien peut engendrer un phénomène de condensation dans les conduits [10].

1.5.2.4 Ventilateur :

Afin de garantir l'apport d'air frais au bâtiment, le système d'échangeur air-sol doit être associé à une ventilation mécanique capable de surmonter la perte de charge causée par l'échangeur. Le ventilateur doit être dimensionné pour assurer le débit spécifié.

Les ventilateurs peuvent être équipés de régulateurs. Un thermostat placé à l'extérieur favorisera l'air par l'échangeur air-sol ou par le by-pass, en fonction de la température extérieure (ex : faible gain de température en mi-saison, donc par le by-pass) [10].

1.5.3 Emplacement de l'échangeur air-sol :

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 étant le coût des terrassements, la deuxième option est la plus intéressante économiquement et ne nécessite pas de terrassements supplémentaires. Lors de l'installation de la tuyauterie, les coudes et les angles qui créent des pertes de charge doivent être évités autant que possible. De plus, un espace d'au moins 0,8 m doit être maintenu entre les tuyaux parallèles [11].

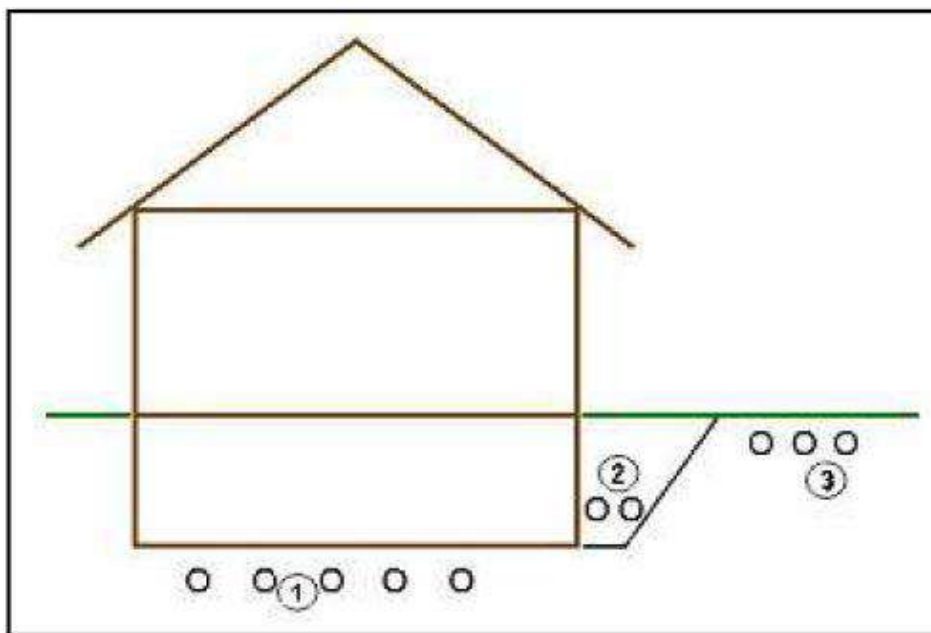


Figure 7 Emplacement de l'échangeur air-sol [11].

1.5.4 Les Avantages des échangeurs air / sol :

- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement (Pas de déchet, émissions gazeuses très réduites).
- Consommation énergétique très faible.
- La maintenance restreinte.
- Pas de rejets de CO₂, pas de liquides frigorigènes, pas de phénomène allergogène ou virales.

1.5.5 Les inconvénients des échangeurs air-sol :

- Mi-saison inutile.
- Technique de pose relativement délicate.
- Coût élevé des travaux de terrassement.
- Consommation supplémentaire : Il est à noter que tout en économisant de l'énergie, la consommation électrique des équipements auxiliaires (ventilateurs de circulation d'air, by-pass automatique, pompes de relevage des condensats, etc.) est également importante.
- Entretien du circuit - Un entretien régulier de la tuyauterie doit être prévu pour assurer sa qualité hygiénique. Un accès à la plomberie doit être fourni pour nettoyer le système et empêcher la croissance bactérienne après la condensation (été).
- Coût - Pour éviter des coûts d'excavation trop élevés, l'installation doit se faire lors des travaux de terrassement.

1.6 La géothermie en Algérie**1.6.1 Les ressources géothermiques en Algérie :**

L'Algérie dispose de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C, Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90 °C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara il existe d'énormes réserves d'eau chaude variant de 50°C à 65°C. Il convient de signaler l'existence de sources à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouelmen 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 plus de 1500 mètres dans la région à Touggourt, présentant une température de 40 à 60° C, ce qui donne de grandes possibilités pour le chauffage des serres [12].

1.6.2 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 représentatives 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 [13].

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

1.6.3 La géothermie à Ouargla :

La ville de Ouargla est située dans la partie nord-est du désert du Sahara en Algérie. Elle se situe à 164 m au-dessus du niveau de la mer, 31°57'0" de latitude nord, 5°21'0" de longitude est, avec une superficie totale d'environ 163 233 kilomètres carrés. Il a un climat désertique sec caractérisé par des hivers doux et des étés très chauds et secs. Variations mensuelles moyennes, minimales et maximales de la température, y compris les variations mensuelles moyennes de la vitesse du vent et de l'humidité relative mesurées avec la station météo de Ouargla. La zone d'étude de ces travaux est l'une des principales zones géothermiques d'Algérie. Elle se caractérise par une pente moyenne de 21°C/km, ce qui correspond à un flux de chaleur géothermique très important (varie entre 80 et 100 mW/m²). Forage hydraulique à travers le désert du Sahara Il montre que la zone est principalement recouverte de matériaux tertiaires et

quaternaires, qui se caractérise par la majorité des couches superficielles calcaires gréseux classées lithologiquement [14].

1.7 Les avantages de l'énergie géothermique :

- Énergie renouvelable pour la production de chaleur uniquement (basse géothermie).
- La chaleur est utilisée directement pour le chauffage des bâtiments, l'agriculture, l'industrie, l'aquaculture, la culture sous serre, les pompes à chaleur et les thermes.
- Possibilité de couplage avec centrales électriques (haute géothermie), réseaux de chaleur et cogénération. Séchage du bois, chauffage dans des serres ou des installations touristiques, pisciculture, séchage agricole et industries telles que le lavage de la laine, la distillation et la réfrigération.

1.8 Les inconvénients de l'énergie géothermique :

- Il existe en Côte d'Ivoire des sites géothermiques sur la planète ne sont pas encore exploités 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 disposer d'un terrain suffisant pour l'exploitation de l'énergie géothermique [15].

1.9 Conclusion :

Dans la conclusion de ce chapitre, nous avons présenté une généralisation sur les potentiels géothermiques dans l'Algérie en général et Ouargla en particulier. Il a été noté que l'ambiance thermique dans les bâtiments est un facteur important de confort pour les occupants, et un échangeur air-sol peut être un moyen efficace qui lui est confié pour assurer ceci est pratique et capable de consommer de l'énergie sans affecter l'environnement.

Chapitre 2:
FORMULATION MATHÉ
MATIQUE
ET MODELISATION

2.1. Introduction :

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

2.2 Localisation géographique limites la région de Ouargla :

La région de Ouargla est située dans la partie sud du pays. Avec une superficie de 162 628 kilomètres carrés. Elle est située à 820 km au sud de la capitale Alger. Il est pris en sandwich entre les états suivants [16] :

- Nord : Djelfa, Biskra
- Sud : Illizi et Tamanrasset
- Est : la Tunisie et El Oued
- Ouest : Ghardaïa

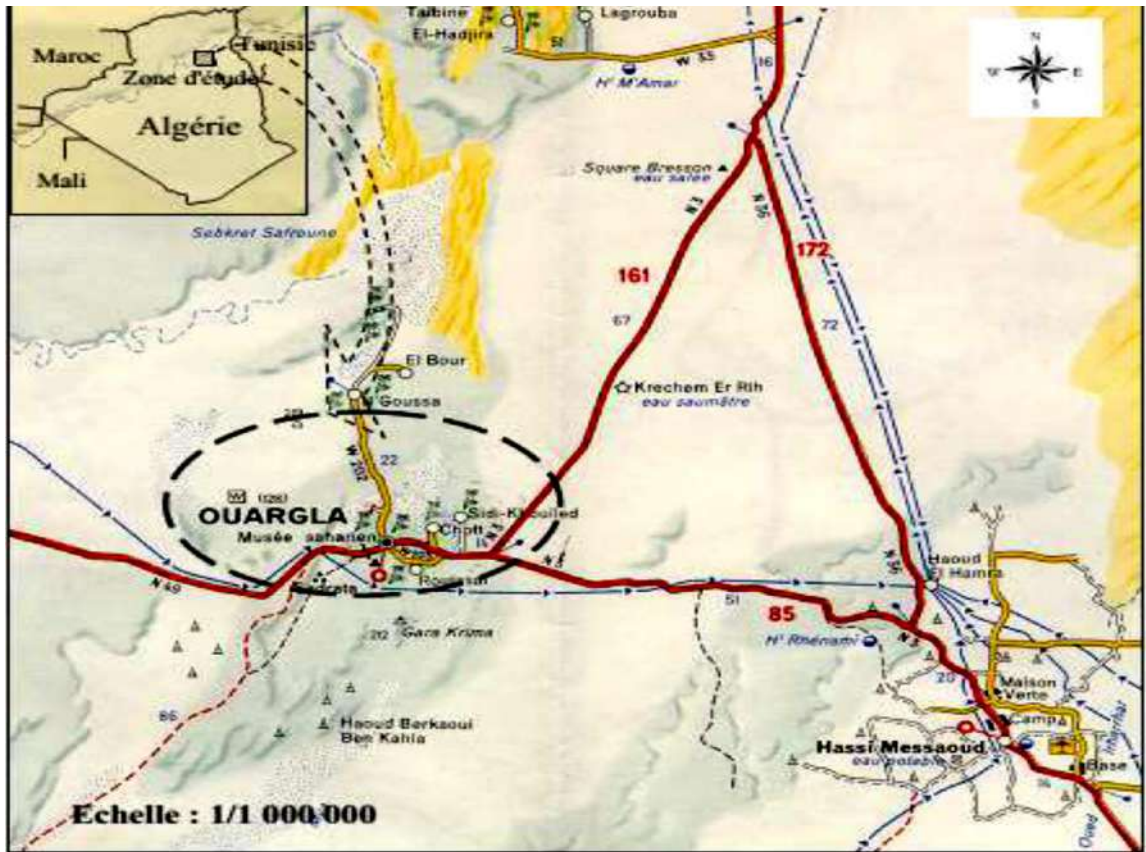
La ville de Ouargla, capitale de l'état de Ouargla, est située au fond de la vallée d'Oued M'ya

Ses coordonnées géographiques sont [17] :

- Altitude : 164 m ;
- Latitude : 29° 13' à 33° 42' N. ;
- Longitude : 3° 06' à 5° 20' E.

Elle est limitée géo morphologiquement [17]:

- Au Sud par les ruines de Sedrata ;
- Au Nord par Hassi El Khelif ;
- À l'Ouest par le plateau du M'Zab;
- À l'Est par les Ergs El Touil, Bou Khezana et Arifidji.



Légende :

	Plateau		Dunes de sable
	Sebka et Chott		Champs de pétrole ou de gaz
	Palmeraie		Lit d'oued
	Route principale		Oléoduc, gazoduc

Figure 8 Carte de situation de la région de Ouargla [18].

2.3 Température du sol

La conception des échangeurs de chaleur géothermiques dépend fortement sur la température du sol non perturbé (c'est-à-dire température avant toute injection ou extraction de chaleur). Ils affectent la résistance du sol, ce qui limite la chaleur échanges entre le sol et la paroi de l'échangeur, et donc affecte le coefficient de performance du système ainsi que les paramètres de conception de l'échangeur de chaleur air/sol.

La distribution de température initiale du sous-sol T_{sol} peut être calculée en fonction de la période de l'année et de la profondeur sous la surface du sol selon la corrélation suivante [18]:

$$T_{sol} = \overline{T_{sol}} - A_{sol} * \exp \left[-Z \left(\sqrt{\frac{\pi}{365 * \alpha_{sol}}} \right) \right] * \cos \left[\frac{2\pi}{365} (t_m - t_i - \frac{Z}{2} * \sqrt{\frac{365}{\pi * \alpha_{sol}}}) \right] \quad (2.1)$$

T_{sol} est la valeur moyenne de la température de surface du sol pour la ville de Ouargla sur une année entière, A_{sol} est l'amplitude de la température de surface de sol tout au long d'une année sur le site, le paramètre t_i est la différence de temps entre le début de l'année et l'occurrence de la température minimale de surface, α_{sol} est la diffusivité thermique du sol ($m^2/jour$). Les propriétés thermiques du sol ont été obtenues en se référant au tableau 2.1.

Paramètres	Valeurs
Conductivité thermique du sol (W/m.K)	0.93
Chaleur spécifique du sol (J/kg.K)	1390
Densité du sol (Kg/m ³)	1780

Tableau 2.1 Propriétés thermo-physiques du sol [18].

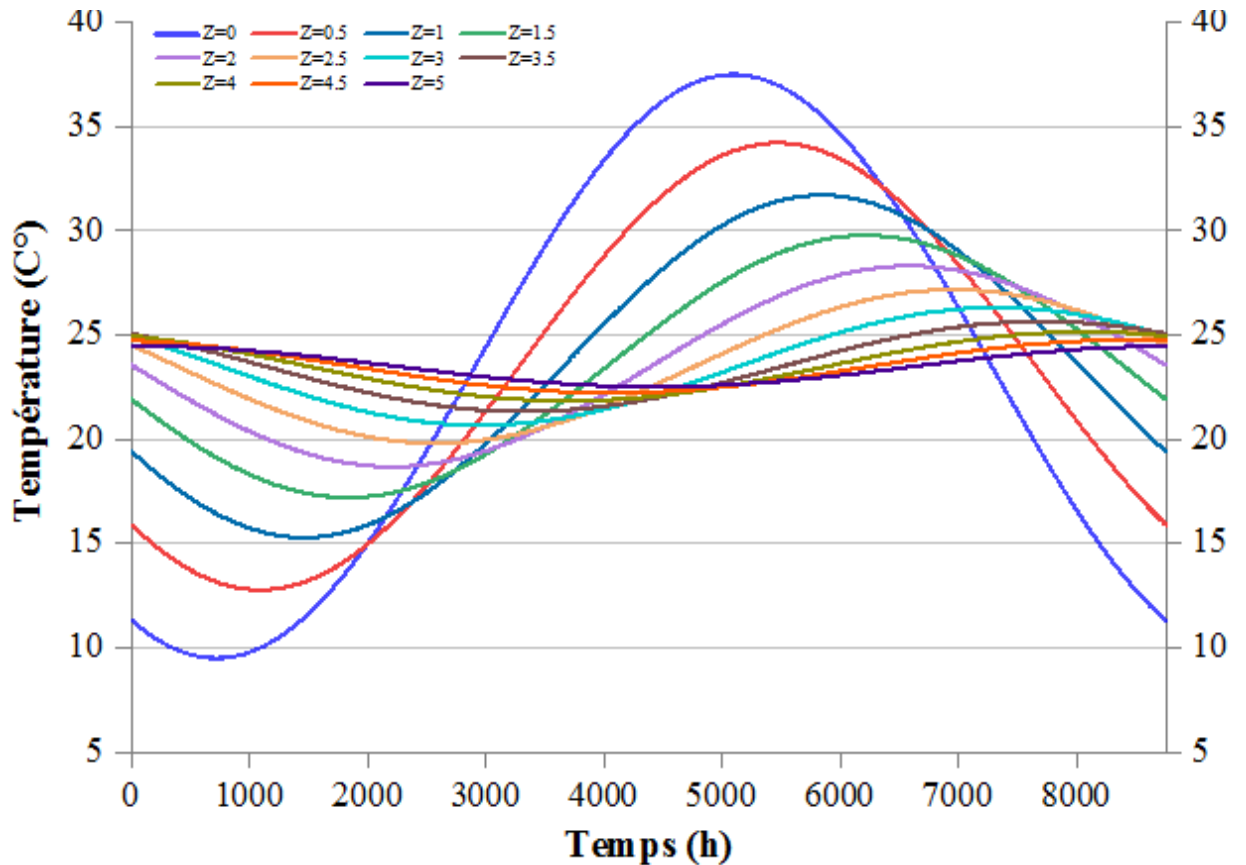


Figure 9 Variations de la température du sol avec la profondeur (m), ville d'Ouargla [19]

La figure 10 montre les profils de température du sol non perturbé sur une année pour le climat d'Ouargla. On peut observer que l'amplitude du signal de température du sol diminue avec l'augmentation de la profondeur.

Dans les 3 m supérieurs, où la température du sol est affectée par les facteurs externes des conditions climatiques, le sol a une grande pente thermique. Dans les distances plus profondes qui correspondent à la zone thermiquement stable, la température moyenne du sol est presque constante.

2.4 Température de l'entrée du système

Les facteurs météorologiques sont une base de données très importante pour représenter les phénomènes physiques les plus importants liés au calcul des charges thermiques, des

températures de surface du sol et pour obtenir les mesures de température du sol non perturbé dans les formations plus profondes.

La température ambiante, qui est la température d'entrée, affecte fortement la quantité d'énergie géothermique qui peut être transférée ou extraite du sol. Cela conduit à des différences significatives dans les performances thermiques de système géothermique d'une région à l'autre, ce qui modifie les critères de conception des échangeurs de chaleur au sol, en particulier pour les échangeurs horizontaux, car ils sont les plus proches de la surface du sol et les plus affectés par des facteurs externes. Les variations mensuelles moyennes, minimales et maximales des températures, y compris la variation mensuelle moyenne de la vitesse du vent et de l'humidité relative mesurées avec la station météorologique d'Ouargla au cours de l'année 2019 ont été recueillies et présentées dans le tableau annexe (A.1)

Il est clair du tableau ANNEXE (A.1) que cette région a un climat chaud et sec, qui se caractérise par un hiver doux et un été très chaud et sec, en effet, la température peut atteindre plus de 45 °C dans la saison d'été qui dure plus de 5 mois [13].

2.5 Etude analytique de l'échangeur enterré :

2.5.1 Modèle thermique de l'échangeur air-sol :

L'écoulement d'air au contact de la paroi provoque un transfert thermique dû à la différence de température entre la paroi (température sol imposée) et l'air dans un échangeur air-sol. Il est possible de suivre l'évolution de la température de l'air en circulation à l'aide d'un thermomètre.

Il est nécessaire d'utiliser un modèle qui calcule la température de l'air à la sortie de l'échangeur par rapport à la température de l'air à l'entrée de l'échangeur et à la température du sol[20]

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

Le domaine d'étude Il s'agit d'un tube en PVC enterré à une profondeur bien déterminée pour que le sol voisin du tube reste moins invariant au cours de l'année. L'écoulement de l'air à l'intérieur du tube est assuré par un ventilateur de débit variable. L'échange thermique entre le sol et l'air en écoulement à l'intérieur du tube (Figure 2.3) ensuite on va procéder au changement de la Longueur totale (L), le diamètre (D), la profondeur d'enfouissement (Z), débit injecter (Q), afin d'évaluer l'influence de ces dimensions sur la performance de l'échangeur. L'air entre dans la conduite avec une vitesse μ_0 et à une température uniforme en moyenne, T_e [21].

2.5.3. Hypothèses simplificatrices du modèle :

Nous admettons ici les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le sol loin de l'échangeur garde une température constante pendant les échanges thermiques.
- Le coefficient d'échange convectif entre l'air et le tube est constant le long de l'échangeur air sol.
- L'écoulement de l'air est unidirectionnel avec vitesse supposée constante.
- La conduction longitudinale et le taux d'humidité sont négligeables.
- Une température constante imposée en chaque intervalle du temps comme condition initiale à l'entrée de l'échangeur.

En divisant l'échangeur en trois tronçons, l'un horizontal et deux verticaux (**Figure 11**) :

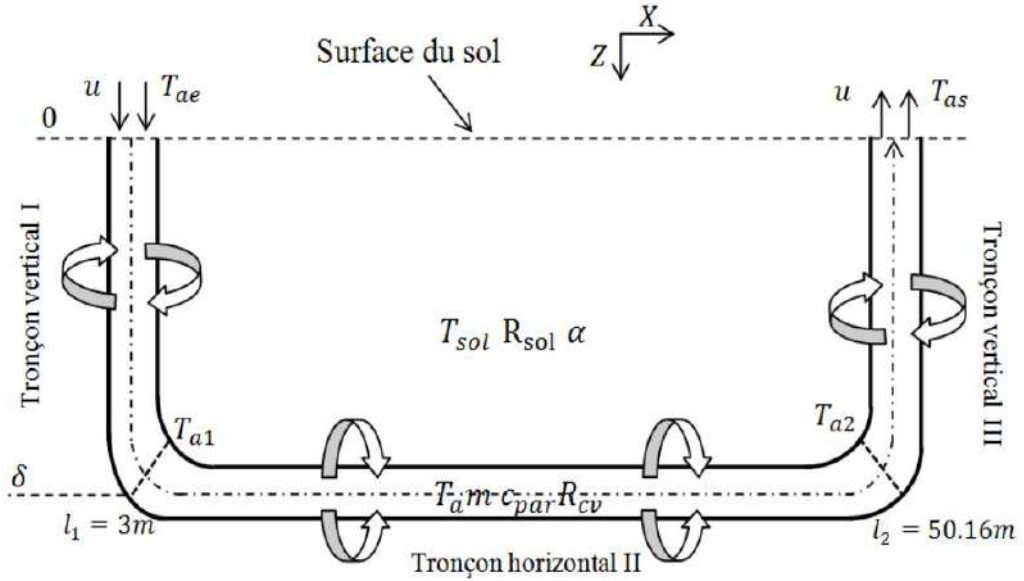


Figure 10 Schéma descriptif de l'échangeur air/sol[21]

2.5.4. Modélisation de la température de l'air le long du tube :

Soit :

T : Température du sol en [K] ; t : Temps en [s] ; z : Coordonnée verticale en [m] ; α : Diffusivité thermique du sol [$\alpha = \lambda/(\rho \cdot c_p)$] (m^2 / s) ; λ : Conductivité thermique du sol en ($W/m.K$) ; ρ : Masse volumique du sol en (kg/m^3) ; c_p : La chaleur massique du sol en ($J/kg.$)

La résistance thermique totale (R_{totale}) est composée d'une part, de la résistance à la conduction du sol (R_{sol}) et celle du tube (R_{tube}), et d'autre part de la résistance convective de l'air (R_{cv}).

$$R_{totale} = R_{sol} + R_{tube} + R_{cv} \quad (2.2)$$

Où la résistance du tube s'écrit comme suit :

$$R_{tube} = \frac{1}{\lambda_{tube} \cdot 2\pi \cdot \Delta z} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.3)$$

La résistance du sol est donnée par la relation (2.4) :

$$R_{sol} = \frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi \cdot \Delta z} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \quad (2.4)$$

Par contre, celle de l'air s'écrit sous la forme sous-dessous :

$$R_{cv} = \frac{1}{h_{cv} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta z} \quad (2.5)$$

$$\rightarrow R_{totale} = \frac{1}{\lambda_{tube} \cdot 2\pi \cdot \Delta z} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi \cdot \Delta z} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{h_{cv} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta z} \quad (2.6)$$

2.5.4.1. Tronçon horizontal :

L'échangeur horizontal est placé à une profondeur δ suffisamment profonde pour que la température du sol T_{sol} ne varie pas et reste constante égale à T_i figures. (2.6 et 2.7).

Le raisonnement fait sur le tronçon vertical I reste valable, le seul changement est que la température du sol voisin de l'échangeur reste invariante le long du tube, de l'équation (2.12) on tire :

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \frac{dT_a}{dx} = \frac{(T_{sol} - T_a)}{R_{itotale}} \quad (2.7)$$

$$\text{Et : } \ln(T_a - T_{sol}) = -\left(\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \cdot R_{itotale}}\right)x + C \quad (2.8)$$

Avec : $T_a(x = 0) = T_{ai}$

Où T_{a1} est la température à la sortie du tronçon vertical I.

Donc, le profil de température dans le tronçon horizontal II s'écrit sous la forme suivante :

$$T_a(x) = T_{sol} + (T_{a1} - T_i) \cdot \exp\left[-\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \cdot R_{itotale}}x\right] \quad (2.9)$$

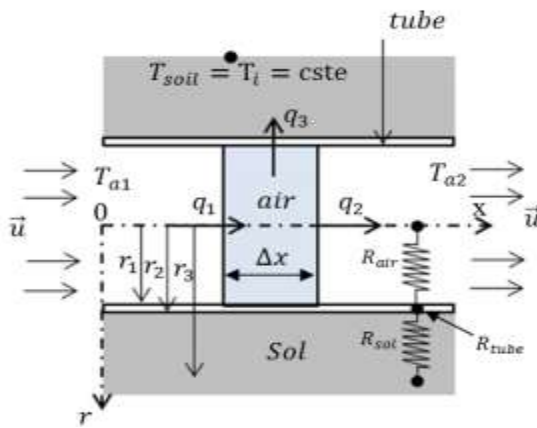


Figure 11 Schéma descriptif du tronçon horizontal II pour un cycle de refroidissement[21]

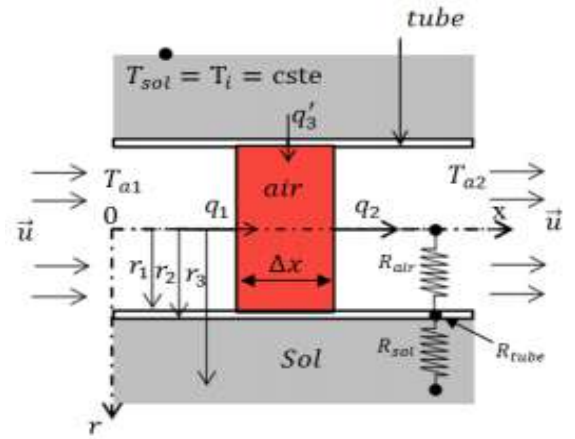


Figure 12 Schéma descriptif du tronçon horizontal II pour un cycle de refroidissement[21]

2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation d'un échangeur air-sol constituée de deux modèles, le premier relatif au comportement de sol, il détermine la température de sol en fonction de la profondeur et le temps. Le deuxième est un modèle d'échangeur air-sol détermine l'évolution de la température de l'air écoulé dans les tubes.

Chapitre 3: **RÉSULTAT ET** **DISCUSSION**

3.1 Introduction :

L'échangeur enterré représente un élément important dans les installations des systèmes géothermiques. Puisque la performance de ces systèmes commence nécessairement par une bonne exploitation de l'énergie géothermique qui est garantie par une bonne installation de l'échangeur enterré. Dans ce chapitre nous présenteront les différents résultats des modèles mathématiques que nous avons développé dans le deuxième chapitre pour la caractérisation des échangeurs air/sol et la détermination du comportement thermique de ce type d'échangeur sous le climat local.

3.2 Effets des paramètres de conception sur le comportement thermique :

Le comportement thermique de l'échangeur air/sol dépend d'une gamme de paramètres de conception tels que la longueur, le diamètre et la profondeur d'enfouissement des échangeurs de chaleur au sol, et de paramètres de fonctionnement tels que la vitesse de l'écoulement de l'air. Sur la base du modèle thermique d'échangeur air-sol présenté dans le dernier chapitre et à l'aide du Excel code, une étude paramétrique a été réalisée afin d'étudier les effets des différents paramètres de conception de l'échangeur air/sol sur le comportement thermique du système.

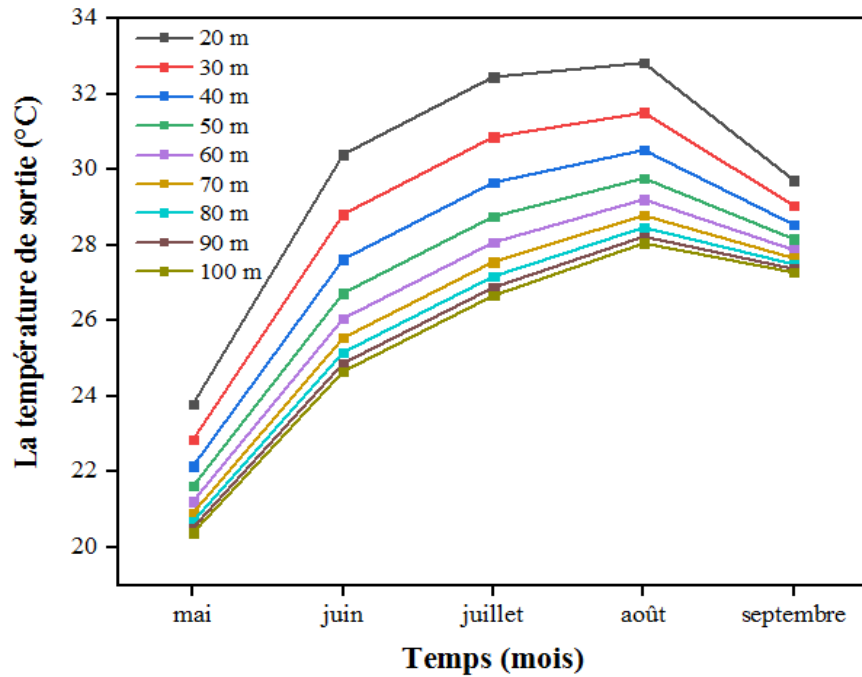
La conception optimale de l'échangeur air/dol a été obtenue en considérant la température de sortie du système. Ainsi, les effets des paramètres de conception sur le comportement thermique de l'échangeur ont été étudiés pendant un mois de période de refroidissement et de chauffage dans différents cas, comme résumé dans le tableau suivant.

Cas	L (m)	D (m)		Z (m)		U (m/s)		
	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage
Cas 1	20	20	0.2	0.2	2	2	0.2	0.2
Cas 2	30	30						
Cas 3	40	40						
Cas 4	50	50						
Cas 5	60	60						
Cas 6	70	70						
Cas 7	80	80						
Cas 8	90	90						
Cas 9	100	100						
Cas 10	70	/	0.2	/				
Cas 11			0.4	/				
Cas 12			0.6	/				
Cas 13			0.8	/				
Cas 14			0.2	/	1	/		
Cas 15					2	/		
Cas 16					3	/		
Cas 17					4	/		
Cas 18					3	/	0.2	/
Cas 19							0.4	/
Cas 20							0.6	/
Cas 21							0.8	/

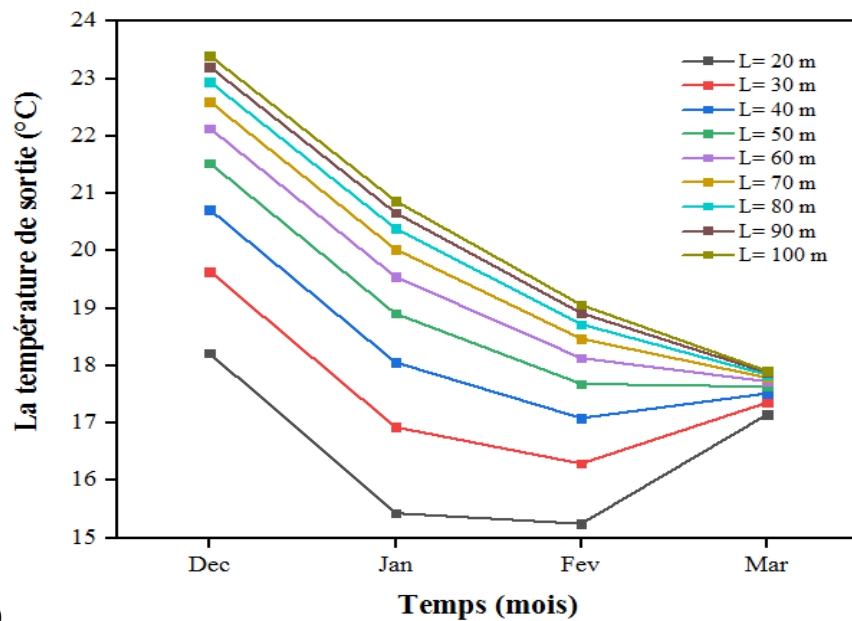
Tableau 3.1 Paramètres de conception pour tous les cas.

3.2.1 Effet de la longueur de l'échangeur enterré

D'après la figure 18, qui montre l'évolution de la température de sortie de l'échangeur en fonction du temps et de la longueur du canal enterré dans le cas du chauffage et du refroidissement, on remarque une légère diminution de la température à une longueur de 70 m et ceci est à cause de l'augmentation des surfaces d'échange



(a)



(b)

Figure 13 Évaluation de la température de sortie en fonction du temps pour différents longueurs, (a) le cas de refroidissement et (b) le cas de chauffage.

3.2.2 Effet du diamètre de l'échangeur enterré

La figure 19 montre l'évolution de la température de sortie en fonction du temps et du diamètre. Dans le cas du chauffage et du refroidissement, on note qu'il existe une relation directe entre le diamètre et la température de sortie, car plus le diamètre est élevé, plus la température de sortie est élevée, et plus le diamètre est petit, plus la température de sortie est basse, ce qui peut s'expliquer par la diminution considérable de la vitesse du fluide causée par l'augmentation de la surface du tube.

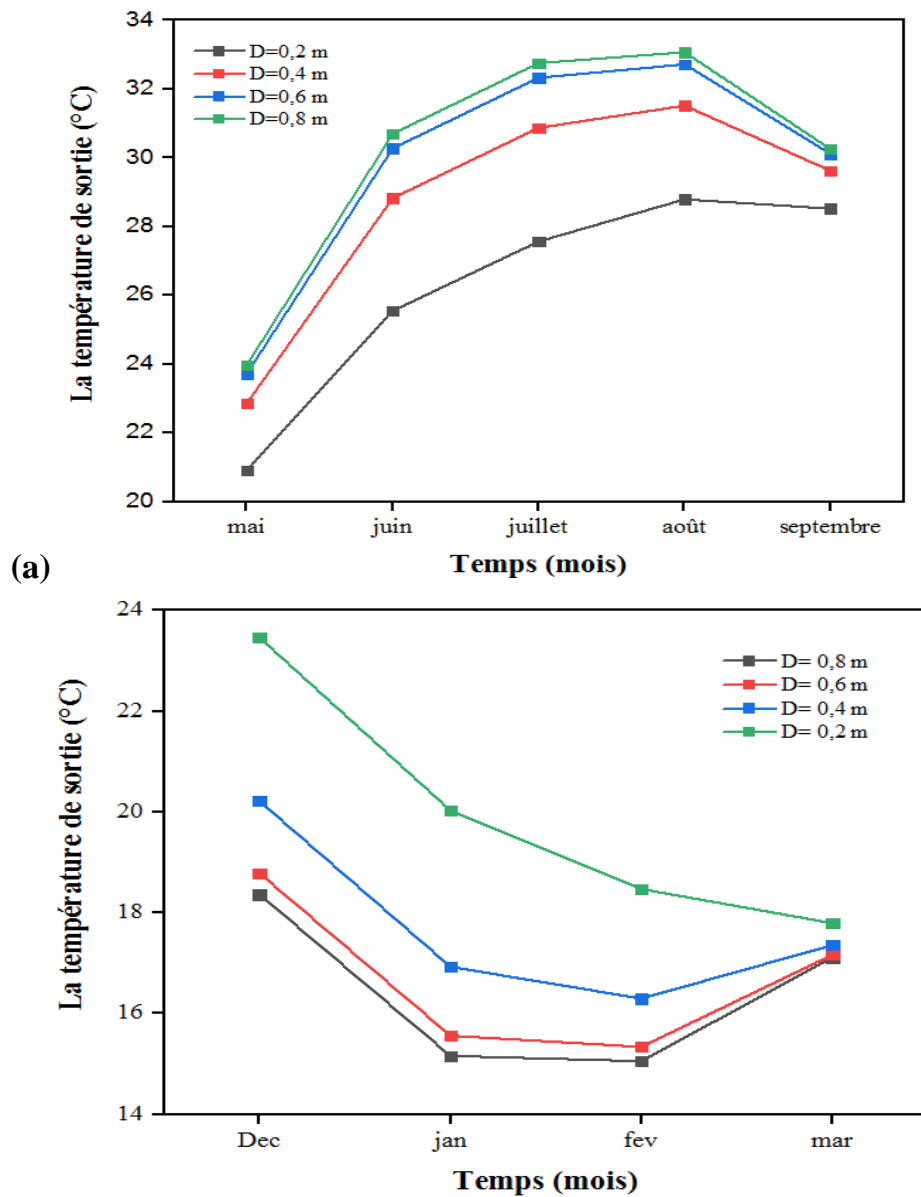


Figure 14 Évaluation de la température de sortie en fonction du temps pour différents diamètres, (a) le cas de refroidissement et (b) le cas de chauffage.

3.2.3 Effet de la profondeur d'enfouissement de l'échangeur

La figure 20 montre l'évolution de la température de sortie en fonction du temps et de la profondeur. Dans le cas du chauffage et du refroidissement, nous remarquons qu'à $z = 1\text{ m}$, la température du sol est affectée par la température ambiante c'est-à-dire qu'avec une augmentation de la profondeur, la température du sol va diminuer, ceci est dû à la variation de la température du sol.

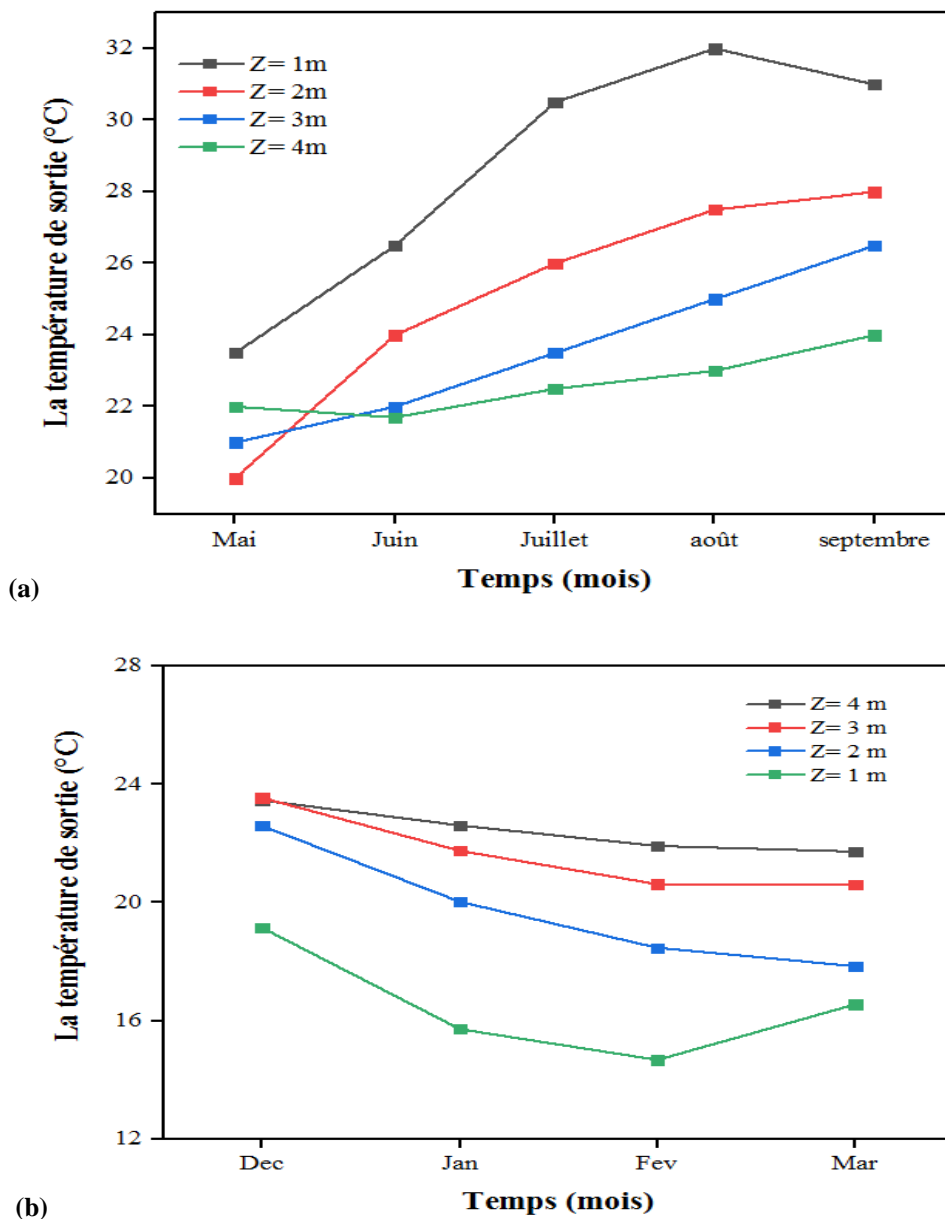


Figure 15 Évaluation de la température de sortie en fonction du temps pour différents profondeurs d'enfouissement, (a) le cas de refroidissement et (b) le cas de chauffage.

3.2.4 Effet de la vitesse de l'air

La figure 21 montre l'évolution de la température de sortie en termes de temps et de vitesse, nous notons qu'il existe une relation directe entre la vitesse et la température de sortie. En été, la température à la sortie de l'échangeur augmente avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air. En hiver, l'inverse se produit. Cela est dû à l'augmentation de la perte de charge dans l'échangeur de chaleur souterrain.

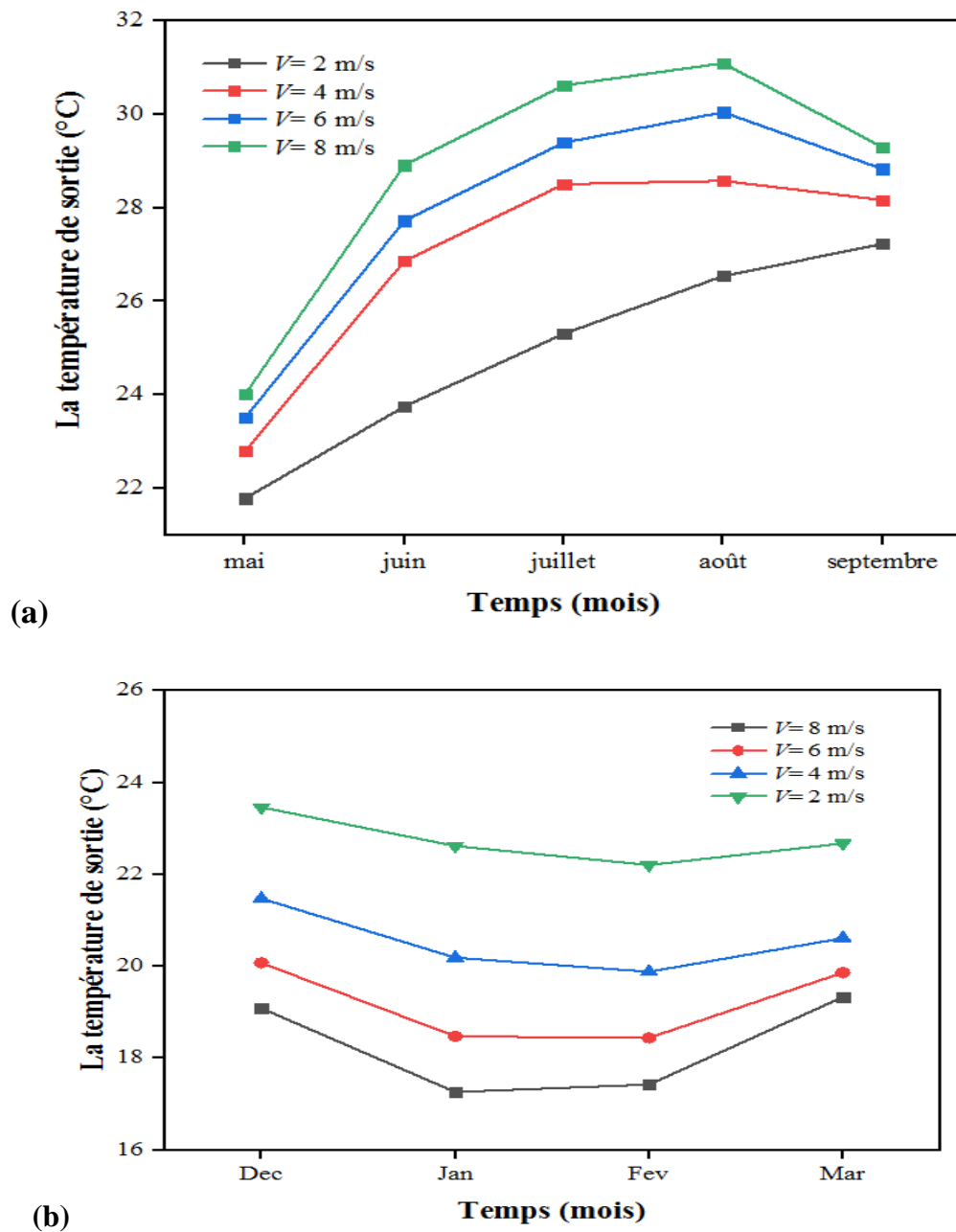


Figure 16 Évaluation de la température de sortie en fonction du temps pour différentes vitesses d'air, (a) le cas de refroidissement et (b) le cas de chauffage.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse de faisabilité de l'utilisation de systèmes d'échangeurs géothermiques air/sol pour fournir le chauffage et le refroidissement dans des conditions climatiques sahariennes. L'effet des paramètres de conception tels que la longueur des tubes, le diamètre des tubes, la profondeur d'enfouissement et la vitesse d'air sur la température de sortie de l'échangeur a été estimées à l'aide de modèles détaillés développés à l'aide de EXCEL.

Les conclusions principales de ce chapitre sont les suivantes :

- Des valeurs de longueur de tube élevées n'ont pas d'effet significatif sur la température de sortie de l'échangeur géothermique air/sol. La longueur du tube la plus efficace pour le refroidissement et le chauffage est de 70 m.
- La température de sortie de l'échangeur augmente en hiver et diminue en été lorsque les diamètres des tubes diminuent. Les petits diamètres de tube sont les plus pratiques.
- L'augmentation de la profondeur d'enfouissement affecte fortement l'amélioration de la température de sortie de l'échangeur air/sol. Les profondeurs d'enfouissement les plus pratiques pour les modes de refroidissement et de chauffage sont respectivement de 3 m et 4 m.
- Les températures de sortie sont affectées négativement lorsque les vitesses de l'air dans les tubes de l'échangeur augmentent. Des vitesses d'écoulement plus faibles (2 m/s) sont plus adaptées au fonctionnement de l'échangeur air/sol dans ce cas.

Conclusion générale

Conclusion générale

De nos jours, les échangeurs air/sol enterrés font partie des solutions très encourageantes, destinées au rafraîchissement de l'air en été et au chauffage en hiver. Les études qui ont été faites ont montré que ce système a une faible consommation d'énergie par rapport à d'autres technologies conventionnelles qui sont par contre très énergivores. Dans de nombreuses applications, concernant le chauffage et le rafraichissement des bâtiments, l'échangeur air-sol a fait ses preuves dans l'efficacité énergétique pour améliorer les conditions de confort thermique durant toute l'année. D'autre part, par rapport à d'autres technologies, ce système préserve la santé humaine grâce à la température générée par l'échangeur adapté au corps humain, qui fonctionne de manière propre et à l'écart des autres sources de pollution. Dans ce travail nous présentons une culture générale et un constat épistémologique sur l'extraction d'énergie de la terre : soit gain de chaleur soit refroidissement pour le confort thermique de l'habitat.

Les pays froids comme le Canada, la France et d'autres pays s'intéressent à l'extraction de la chaleur. Contrairement à ces pays et en raison de la nature désertique de l'Algérie (80%), nous nous intéressons dans ce travail à l'extraction du froid en été et au gain de chaleur en hiver. Notre objectif est de poser une gaine souterraine (échangeur) qui permet l'échange de chaleur avec le sol et restitue de l'air frais à la sortie. Dans la deuxième partie nous avons présenté les procédés techniques d'installation et dans la troisième partie nous avons effectué le travail de simulation et nous avons présenté les résultats nécessaires durant les mois d'été et d'hiver. La simulation qui est basée sur une modélisation numérique d'un échangeur, supposé implanté dans un site, qui possède les données météorologiques et les caractéristiques de sol similaires à celles de la wilaya de Ouargla, a montré que l'efficacité de cet échangeur dépend essentiellement des facteurs suivants :

- Profondeur d'enfouissement.
- La longueur de nappes des tubes.
- Le diamètre du tube.
- La vitesse de l'air.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] “énergies renouvelables web page: www.moqatel.com,” *www.moqatel.com*.
- [2] S. Ouali, “Etude géothermique du sud de l’Algérie,” mémoire de magister Université M’hamed Bouguerra Boumerdes, 2005.
- [3] F. Jean, “La géothermie <http://www.periple.net/blog-jfd/spip.php?article281>,” 2018.
- [4] “<http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/04-applications-01.html>. : consulté le ,” Feb. 25, 2016.
- [5] Mouloud AISSANI and ALL, “ALL Simulation des Flux Thermiques lors du soudage TIG et prédiction de la taille des zones du cordon dans les tôles d’Acier 304L.”
- [6] G. Florides and S. Kalogirou, *Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications*. Renewable Energy, 2007.
- [7] Stéphane THIERS and P. Bruno, “modélisation thermique d’un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments Journée thématique SFT-IBPSA Froid solaire et confort d’été 25 avril 2007,” *Aix-les-Bains Article présenté au Centre Énergétique et Procédés, École Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2007.
- [8] Y. Belloufi, “, Modélisation d’un échangeurs air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux,” mémoire de master, Université Mohamed Khider ,Biskra, 2012.
- [9] “Le puits canadien: solution environnementale,” 10) *[http://conseils.xpair.com/consulter parole expert/puits canadien solution environnementale.htm](http://conseils.xpair.com/consulter_parole_expert/puits_canadien_solution_environnementale.htm)*, Feb. 23, 2016.
- [10] Lucie Tome, “, Puits canadiens/provençaux et qualité de l’air intérieur : analyse des dégradations potentielles,” Mémoire de l’Ecole des Hautes Etude en Santé Publique, 2009.
- [11] S. Elbouti and A. Mabrouki, “Etude d’un échangeur de chaleur air/sol,” Mémoire deMaster, Université KASDI MERBAH. OUARGLA, 2016.
- [12] “, Situation des énergies renouvelables en Algérie,” *Présente à Journée sur la maitrise de l’énergie et de l’environnement dans un contexte d’économie de marché*, 5, p. 61, 2001.
- [13] C. Martinet and J. Meyer, “Travail à la chaleur et confort thermique,” *INRS*, 1999.

Références

- [14] S. Korichi, B. Bouchekima, N. Naili, and M. Azzouzi, “Performance analysis of horizontal ground source heat pump for building cooling in arid Saharan climate: thermal-economic modeling and optimization on TRNSYS,” *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, vol. 6, p. 1, 2021, doi: 10.1051/rees/2020008.
- [15] A. S. Eddine, “Dimensionnement d’un échangeur air/sol enterré destiné au rafraîchissement de l’air,” mémoire de master, Université de Biskra, 2014.
- [16] ANIREF, “Monographie de la Wilaya d’Ouargla,” (*Agence Nationale d’Intermédiation et de Régulation Foncière*), Mar. 15, 2022.
- [17] ROUVILLOIS and BRIGOL, *Le pays de Ouargla (Sahara algérien), Variation et organisation d’un espace rural en milieu désertique*. Univ. France, Paris, 1975.
- [18] R.Slimani, . “Contribution à l’évaluation d’indicateurs de pollution environnementaux dans la région de Ouargla: Cas des eaux de rejets (agricoles et urbaines),” univ de Ouargla, ouargla, 2006.
- [19] sabrin korichi, “Etude du gisement géothermique et l’exploitation de la géothermie pour les diverses applications dans les régions arides et semi-arides,” 2021.
- [20] T. SALOMON, “ Dimensionnement du puits climatique, Analyse, modélisation, validation d’un modèle de simulation dynamique pour les puits canadiens ou provençaux,” 2003.
- [21] Yousef 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.,” 2017.
- [22] Kakac S and Liu H, *Heat exchangers: selection, rating and thermal design*. CRC Press, 2002.

Annexes

I. Annexes :

Tableau : (A. 1) : Estimation des propriétés thermo physiques a variation mensuelle moyenne min max des températures extérieures et la variation mensuelle moyenne de l'humidité relative et de la vitesse du vent en 2019

Mois	Température minimal (°C)	Température maximal (°C)	Température moyenne (°C)	Humidité relative moyenne (%)	Vitesse moyenne du vent (m / s)
Jan	4	18.4	10.8	40.8	2.9
Fev	4.9	19.2	12	37.8	3.8
Mars	9.2	24.2	16.9	33.5	4.0
Avr	15.5	30.2	23.2	25.9	4.1
Mai	19	33.3	26.7	25	4.5
Jun	26.6	42.6	35.3	13.9	4.9
Juil	28.8	44.5	37.4	13.8	3.6
Aout	29.7	43.5	36.9	17.8	3.7
Sep	24	39.1	31.8	27.5	3.6
Oct	24.2	31	17.2	35.8	2.9
Nov	9.3	23.3	16.2	37.3	3.1
Dec	7.1	21.1	13.8	46.7	2.9

[Source]: ref[14]

Tableau : (b. 1) : propriétés de l'air sec à pression atmosphérique

Temperature (°C)	ρ (kg/m ³)	(kj/C _p kg.k)	k (w/m.k)	$\beta \times$ (1/10 ³ k)	$\mu \times 10^5$ (kg/m.s)	ν $\times 10^6$ (m ² /s)	α $\times 10^6$ (m ² /s)	Pr
-150	2.793	1.026	0.0120	8.21	0.870	3.11	4.19	0.74
-100	1.980	1.009	0.0165	5.82	1.18	5.96	8.28	0.72
-50	1.534	1.005	0.0206	4.51	1.47	9.55	13.4	0.715
0	1.2930	1.005	0.0242	3.67	1.72	13.30	18.7	0.711
20	1.2045	1.005	0.0257	3.43	1.82	15.11	21.4	0.713
40	1.1267	1.009	0.0271	3.20	1.91	16.97	23.9	0.711

$$R_{sol} = 0.55$$

[Source]: ref[22].

Tableau: (C. 1): Diffusivité de non-métaux à 20

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

Résumé

L'inertie thermique du sol lui permet de maintenir une température stable à une certaine profondeur, quelle que soit la température de l'air en surface. Cette propriété nous fait penser à l'exploiter en utilisant un échangeur de chaleur (air-sol) enterré à la profondeur appropriée, à travers lequel l'air circule pour une utilisation ultérieure en refroidissement ou en chauffage.

Dans cette étude nous avons commencé par une définition de la composante thermique de ces échangeurs, et pour calculer la température de sortie à différentes profondeurs d'enfouissement, diamètre de tube, vitesse et longueur et pour les mois d'été et d'hiver, nous avons réalisé un modèle mathématique débouchant sur un travail de simulation.

Ensuite nous avons fait une modélisation analytique pour simuler la température de l'air à la sortie de l'échangeur. Puis nous avons analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir : la profondeur, le diamètre, la vitesse de l'air et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur enterré.

Mots-clés : échangeur air-sol, géothermie, rafraîchissement, chauffage, simulation numérique.

ملخص

ان العطالة الحرارية للتربة تجعلها تحافظ على حرارة شبه مستقرة على اعماق معينة , بغض النظر عن درجة حرارة الهواء السطحي. هذه الخاصية تجعلنا نفكر في استغلالها باستخدام مبادل حراري (هواء -تربة)مدفون على العمق المناسب، والذي من خلاله يدور الهواء لاستخدامه لاحقاً في التبريد أو التدفئة.

في هذه الدراسة بدأنا بتعريف المكون الحراري من هذه المبادلات ،ولحساب درجة حرارة المخرج عند أعماق دفن مختلفة ،وأقطار الأنبوب ،والسرعات والأطوال ولشهور الصيف والشتاء ،قمنا بتنفيذ نموذج رياضياً. ثم قمنا بعمل نمذجة تحليلية لمحاكاة درجة حرارة الهواء عند مخرج المبادل. ثم تم تحليل تأثير بعض المتغيرات وهي العمق والقطر والسرعة وطول الأنبوب على درجة الحرارة الداخلية للمبادل.

الكلمات المفتاحية : مبادل حراري هواء- تربة , الطاقة الحرارية الأرضية, التبريد, التسخين, المحاكاة الرقمية.

Abstract

The thermal inertia of the ground allows it to maintain a stable temperature at a certain depth, regardless of the surface air temperature. This property makes us think of exploiting it by using a heat exchanger (air-soil) buried at the appropriate depth, through which the air

circulates for later use in cooling or heating. In this study we started with a definition of thermal component of these exchangers, and to calculate the outlet temperature at different burial depths, tube diameters, speeds and lengths and for the summer and winter months, we carried out a mathematical model.

Then we did an analytical modeling to simulate the air temperature at the outlet of the exchanger. Then we analyzed the influence of some parameters, namely: the depth, the diameter, the speed and the length of the tube on the internal temperature of the buried exchanger.

Keywords : earth heat exchanger air-ground, geothermal, cooling, heating, dimensioning, simulation.