



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Université Kasdi Merbah - Ouargla
Faculté des hydrocarbures, des Energies
Renouvelable et des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Energies Renouvelables



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Energies Renouvelables en mécanique
filère : Génie mécanique

Présenté par :
Anfel Babasaci
Ines Bouguenara
Abderahman Chaouche

Thème

**Etude de la performance d'un échangeur de chaleur air -
sol couplé avec la cheminée solaire pour des applications
de chauffage et de refroidissement dans les régions arides**

Soutenu publiquement le :

Devant le jury composé de

Djamel Benmenine	MCA	Université Kasdi Merbah - Ouargla	Président
Amar Rouag	MCA	Université Kasdi Merbah - Ouargla	Examineur
Abdelmadjid Dobbi	Pr	Université Kasdi Merbah - Ouargla	Rapporteur
Oussama Benali	PHD	Université kasdi merbah-ouargla	Co-rapporteur
Abdessamia Hadjadj	MCP	Université Kasdi Merbah - Ouargla	Co-Rapporteur

Année universitaire 2021 / 2022

Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur
pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs
qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire
en particulier notre encadreur Pr: **Dobbi Abdelmadjid** pour ses conseils et l'aide qu'il nous
a apportés.*

Nous voudrions aussi exprimer toute notre gratitude à :

*Mr :Hadjaje Abdessami pour les directives et conseils qu'il m'a donnés jusqu'à
l'aboutissement de ce travail.*

*Mr : Benali Oussama pour les orientations et
les conseils.*

Mr : Rouag Amar et Belloufi Youcef

*Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à
l'accomplissement de ce travail, et en particulier :*

*Maammeur Hocine ,Dr à l'université de Kasdi Merbah Ouargla, de m'avoir fait l'honneur
de présider mon jury de mémoire .*

*Monsieur Brahim Gharbi,Dr à l'université de Kasdi Merbah Ouargla,d'avoir accepté
d'examiner ce travail.*

*Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de
près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes parents

Pour tous leur sacrifices ,leur soutiens ,leur encouragements et leurs amours qui ont été la raison de ma réussite. Que dieu leur présenté une bonne santé et une longue vie .

Je remercie également ma sœur oumaima et mes sœurs rbiha et chahrazed , et leus maris larbi et bachir ,mes frères, Azzou et Riad Pour leur disponibilité à entendre mes frustrations et les sources de mon stress

Avec mes souhaits de bonheur et de réussite dans leur vie.

A tous les petites enfants de ma famille .

A tous ceux que j'aime et qu'ils m'aiment.et A tous ceux qui m'ont aidé.

BaBasaci Anfel

Dédicaces

Tout d'abord, je remercie Dieu qui m'a permis de terminer mon mémoire de fin d'études afin de le dédier à :

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études, Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération.

A celui qui m'a appris les fondements de la vie et de la confiance en soi, à celui qui m'a élevé sur les principes de la religion, un ordre pour que je les mentionne de ma part avec fierté "mon grand-père et ma grand-mère"

A ceux qui sont le réservoir de mes souvenirs et la source de mon bonheur, mes chers frères

À mon cher fiancé Rafik, qui m'a aidé à traverser mes moments difficiles

A Mes Tantes et mes ancles selma, houda, asma, aicha, souad, khled, abdeallh, mustapha.

Aux meilleurs professeurs tout au long de mes études, à tous ceux qui m'ont encouragé à poursuivre le chemin de la science et le droit chemin

A tous mes collègues et cadres du Département des Energies

Renouvelables de l'Université Kasdi Merbah de Ouargla

Bouguenara ines

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma mère bien-aimée qui m'a soutenu et encouragé à mon cher père qui a été la lumière de mon chemin pendant mes années d'école. Je vous dédie tout mon amour et ma gratitude, à ma grand-mère de mon père et à ma grand-mère de ma mère à mes chers frères et soutien dans la vie à mes neveux et à ceux qui ont partagé avec moi tous les moments durant la réalisation de ce travail. Et tous ceux qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de mon parcours académique. A ma famille et à mes proches et à tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, à qui je souhaite plus de succès et à tous ceux que j'aime de près ou de loin avec tous mes respects à vous tous

CHAOUCHE ABDERAHMANE

Résumer

L'étude que nous présentons dans cette mémoire concerne d'un échangeur air\ sol couple avec une cheminé solaire pour système chauffage et refroidissement dans les zone aride .Notre L'objectif étant de trouver la conception optimale qui permet un contrôle thermique adéquat et une performance énergétique maximale. On considérera en particulier l'influence des paramètres suivants : la longueur, diamètre, profondeur d'enfouissement et vitesse d'entrée .en utilisant un logiciel CFD pour évaluer la température de l'air le long du tube enterré(40m) les deux tronçons verticaux d'entrée et de sortie qui sont reliés au tronçon principal horizontal ont été considérés dans la modélisation et la simulation numérique. Lors des problèmes d'accumulation de la chaleur dans le sol aux environs du tube enterré, Notre procédure de simulation a été validée en comparant les résultats qu'on obtient avec ceux d'autre travail expérimental.

Les mots clés

Echangeur air-sol , ANSYS , CFD , Géothermie énergétique , expérimental .

ملخص

الدراسة التي نقدمها في هذه المذكرة تتعلق بمبادل حراري هوائي / أرضي مقترن بألة هواء شمسي لأنظمة التدفئة والتبريد في المناطق القاحلة هدفنا هو إيجاد التصميم الأمثل الذي يسمح بالتحكم الحراري الكافي وأقصى أداء للطاقة. على وجه الخصوص ، سيتم النظر في تأثير المعلمات التالية: الطول والقطر وعمق الدفن وسرعة الدخول. استخدام برنامج CFD لتقييم درجة حرارة الهواء على طول الأنبوب المدفون (40 م) قسمين مدخل ومخرج عمودي متصل إلى القسم الرئيسي الأفقي في النمذجة والمحاكاة العددية. عند حدوث مشاكل تراكم الحرارة في الأرض حول الأنبوب المدفون ، تم التحقق من صحة إجراء المحاكاة لدينا من خلال مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع نتائج الأعمال التجريبية الأخرى.

الكلمات المفتاحية

مبادل هوائي أرضي ، ANSYS ، CFD ، طاقة حرارية أرضية ، تجريبي.

The study That we present in this thesis concerns an air \ soil exchanger coupled with a solar chimney for heating and cooling systems in arid areas. Our objective is to find the optimal design that allows adequate thermal control and maximum energy performance. In particular, the influence of the following parameters will be considered: the length, diameter, depth of burial and entry speed. Using CFD software to assess the air temperature along the buried tube (40m) the two sections Inlet and outlet verticals that are connected to the horizontal main section were considered in the modeling and numerical simulation. When dealing with heat accumulation problems in the ground around the buried tube, our simulation procedure has been validated by comparing the results obtained with those of other experimental work.

Keywords : *Air-to-ground exchanger, ANSYS, CFD, geothermal energy, experimental*

Liste des tableaux

No table of figures entries found.

Tableau. III. 1. Propriétés physiques et thermiques utilisées dans la présente étude	35
Tableau. III. 2. Différents paramètres du système	35

Liste des figures

Figure. I. 1. Distribution du programme national des énergies renouvelables	5
Figure.I. 2. Les panneaux solaires.....	6
Figure.I. 3. Un champ d'énergie éolienne.	7
Figure.I. 4. Une centrale hydraulique.	7
Figure.I. 5. Schéma de principe du fonctionnement de l'énergie biomasse	8
Figure.I. 6. Une centrale géothermique	8
Figure.I. 7. Schéma de principe du fonctionnement de la géothermie haute énergie	9
Figure.I. 8. Schéma de principe du fonctionnement de la géothermie basse énergie	10
Figure.I. 9. Carte des ressources géothermiques mondiales [5]	11
Figure.I. 10. Les Zones de concentration les ressources géothermiques en Algérie	13
Figure.II. 1. Schéma d'un échangeur air/sol[21]	16
Figure.II. 2. Principe de la géothermie par échangeur enterré air/sol étudié	17
Figure.II. 3. Description d'un puits canadien en Hiver	17
Figure.II. 4. Description d'un puits canadien en été	18
Figure.II. 5. Tube en serpentin	21
Figure.II. 6. Tube en boucle	21
Figure.II. 7. Présentation schématique de l'échangeur de chaleur terre-air avec la cheminée solaire	22
Figure.II.8. Répartition de la température de l'air le long du système EAHE à $t = 9h$ ($T_a, in = 4,5 \text{ } ^\circ\text{C}$) en mode chauffage (premier modèle CFD)	23
Figure.II.9. Photos de l'installation de l'EAHX	24
Figure.II.10. Emplacement des capteurs le long de l'échangeur de chaleur	24
Figure.II.11. Image de l'échangeur de chaleur horizontal pour différentes profondeurs.....	24
Figure.II.12. Images de la configuration expérimentale (a) échangeur de chaleur en PVC et (b) mesures du profil de température du sol.....	26
Figure. III. 1 . Vue général de l'échangeur d'air au sol.....	30
Figure.III. 2. Emplacement détaillé des sondes de l'air	30
Figure.III. 3. Ventilateur.....	31
Figure.III. 4. Thermocouples type K utilisés dans l' EAHE system	32
Figure.III. 5. Outils de l'expérimental et instruments des mesures.....	32
Figure.III. 6. Géométrie d'échangeur d'air au sol.....	34
Figure.III. 7.Evolutions de température du sol en fonction de temps ($T_1= 1,75 \text{ m}$, $T_2= 2,5 \text{ m}$, $T_3= 0$ m).....	36
Figure.III. 8. Mesure de la température de l'air sur la longueur de l'échangeur	37
Figure.III. 11. Simulation de la distribution de température pour deux vitesses différentes de $V_1= 1.5$ m/s	40
Figure.III. 13. Comparaison de la distribution de température entre l'expérimentale et simulation	41
Figure. III. 14. Comparaison de simulation de la distribution de température pour deux vitesse différentes $V_1= 1.5 \text{ m/s}$ et $V_2= 2.5 \text{ m/s}$	42
Figure III.15. la cheminée solaire.....	43

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I La géothermie techniques et applications	4
I.1. Introduction	4
I.2. Les énergies renouvelables en Algérie	4
I.2.1 Historique	4
I.2.2 Situation actuelle	4
I.3. Les énergies renouvelables	5
I.3.1 Les types énergies renouvelables	6
I.3.1.1 Energie solaire	6
I.3.1.2 Energie éolienne	6
I.3.1.3 L'énergie hydraulique	7
I.3.1.4 Les biomasses	7
I.3.1.5 La géothermie	8
I.3.1.5.1 Types de l'énergie géothermique	9
I.3.1.5.2 Climatisation par échangeur air-sol	10
I.3.1.5.3 Le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique	10
I.3.1.5.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermique	11
I.3.1.5.5 Ressources géothermiques en Algérie :	11
I.4. Caractéristiques climatiques de la région d'Ouargla	12
I.5. CONCLUSION	13
II Etat de l'art sur l'échangeur géothermique.....	15
II.1. Introduction	15
II.2. Généralité sur l'échangeur air-sol.....	15
II.3. Principe d'exploitation d'un échangeur air/sol	15
II.4. Principaux éléments d'un puits canadien/provençal	18
II.5. Eléments pour la conception d'un puits canadien/provençal	18
II.6. Principaux paramètres de dimensionnement	19
II.6.1. Le débit d'air total	19
II.6.2. Nombre et le diamètre des tubes.....	19
II.6.3. Vitesse de l'air dans les tubes	19
II.6.4. Distance entre tubes.....	19
II.6.5. Profondeur d'enfouissement des tubes.....	20
II.6.6. Nature du sol et son taux d'humidité	20

II.7.	Synthèse Bibliographique.....	21
II.8.	Avantages et inconvénients de l'échangeur air/sol.....	26
II.9.	CONCLUSION	27
	Résultats et discussions.....	29
III.1.	Introduction	29
III.2.	Etude expérimental.....	29
III.2.1.	Description du dispositif expérimental	29
III.2.2.	Acquisition et traitement.....	30
III.2.3.	Emplacement des capteurs de température	31
III.3.	Définition de fluent	32
III.3.1.	Principales étapes pour définir un problème de CFD.....	33
III.3.2.	Configuration de la simulation CFD.....	33
III.4.	Résultat et discussion.....	36
III.5.	Résultats CFD	39
III.6.	Les solutions bioclimatiques	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
	CONCLUSION GENERALE.....	43
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	62

Liste des symboles

T°: température(C°)

D:diamètre (m)

X:longueur (m)

Z: profondeur (m)

: ρ densité (kg/m³)

C: capacité (J/kg k)

K: thermal conductivité

U: vitesse (m/s)

T: temps (h)

abréviation

EAHE:échangeur de chaleur

PVC :la qualité des tubes utilises

CFD : computationnel fluid Dynamics

Annexes

Anémone mètre

pyranoMètre

Ventilateur

Thermocouples type K

INTRODUCTION
GENERALE

INRODUCTION GENERALE

La maîtrise de la consommation d'énergie ne cesse d'être la préoccupation majeure dans tous les domaines de la recherche. L'épuisement des ressources fossiles, leur effet sur l'environnement, et leur surcoût de plus en plus croissant en matière d'exploitation, fait que la recherche sur l'utilisation des énergies renouvelables soit en plein essor. Le bâtiment, lieu de travail, de production et d'habitation, consomme à lui seul jusqu'à 40% de l'énergie totale consommée dans le monde. Malgré les efforts apportés sur la technique d'isolation thermique dans le bâtiment, il en demeure que la consommation d'énergie pour le conditionnement d'air reste importante et ne cesse de marquer son implication dans la production des gaz à effet de serre[1].

Le recours à des énergies propres pour les besoins énergétiques et le développement économique et social devient incontournable. Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique et énergie géothermique qui présente la quantité d'énergie assez grande. L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et les moins chères du monde entier[2].

Le sol constitue un potentiel thermique très important qui peut être exploité dans la climatisation. La récupération de l'énergie thermique du sol se fait essentiellement à travers des échangeurs de chaleur enterrés. Nous nous intéresserons ici à la technique de rafraîchissement utilisant l'échangeur air-sol (appelé en France puits canadien ou encore puits provençal), son principe est simple, on fait passer l'air de renouvellement, avant qu'il n'entre dans la maison, dans un tube enterré. En hiver, l'air est ainsi préchauffé car le sol est plus chaud que l'air extérieur. En été, l'air est rafraîchi car c'est le phénomène inverse qui se produit[3].

L'étude, présentée dans ce mémoire, s'inscrit dans le cadre de l'étude de la convection forcée turbulente dans une conduite horizontale. Notre but étant de trouver la conception optimale qui permet un contrôle thermique adéquat et une performance énergétique maximale. On considérera en particulier l'influence des paramètres suivants : la longueur, diamètre, profondeur d'enfouissement et vitesse d'entrée.

Le mémoire est structuré comme suit :

➤ Le premier chapitre donne état de lieu des énergies renouvelables en Algérie et de ses sources en référence à la possibilité de remplacer les énergies fossiles par des sources

renouvelables nous mettons en lumière la géothermie de toutes sortes et ses applications en Algérie, ses avantages et ses inconvénients, aussi, quelques caractéristiques climatiques de la Wilaya de Ouargla ont été exposées ;

➤ Le deuxième chapitre dresse un état de l'art des différents travaux qui ont été mis en œuvre sur les conditions de fonctionnement de l'échangeur de chaleur géothermique. Aussi, des études et des analyses des travaux antérieurs permettront d'anticiper les enjeux à prendre en compte ont été examinées dans ce chapitre.

➤ Le troisième chapitre est consacré à la modélisation analytique et à la simulation numérique avec le programme ANSYSFluent : Dans sa première partie, nous étudions la répartition de la température terrestre dans la direction perpendiculaire à la surface de la Terre pour atteindre la profondeur d'enfouissement optimale de la conduite dans le sol, dans la deuxième partie nous avons testé si la capacité de refroidissement peut être améliorée par l'insertion d'une cheminée solaire à la sortie de l'échangeur. Il est conseillé d'utiliser cette technique si l'échangeur est en fonctionnement continu et de longue durée.

La présente étude est achevée par une conclusion générale et recommandation.

Chapitre I

L' géothermique techniques et applications

I La géothermie techniques et applications

I.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 les énergies renouvelables qu'il sont alimentées par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées... Elles permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, du froid, du gaz, du carburant, du combustible .Ces sources d'énergie, considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain, n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles se distinguent des énergies fossiles, polluantes et dont les stocks diminuent. Enfin, les EnR sont plus résilientes, notamment en cas de crise[3], et ses différents types, sa réalité en Algérie, on a aussi parler sur l'énergie géothermique et ses types et ses ressources en Algérie et ses avantages et inconvénients. On a terminé ce chapitre par quelques caractéristiques climatiques de la région d'Ouargla.

I.2. Les énergies renouvelables en Algérie

I.2.1 Historique

La promotion des énergies renouvelables en Algérie ne date pas d'aujourd'hui, mais bien avant, pendant la période coloniale, à titre d'exemple on cite :

- En 1942 à l'institut national d'agronomie d'El Harrach (Alger) : un groupe de chercheur a installé un digesteur anaérobie pour la production de biogaz pour alimenter les cuisines et les laboratoires de l'institut ;
- En 1953 à Adrar les services de l'hydraulique ont installé une éolienne de 25CV pour irriguer un périmètre agricole. C'était l'une des trois éoliennes existantes à travers le monde (Allemagne Argentine et Algérie) ;
- En 1954 à Bouzarde, Alger construction du plus puissant four solaire du monde ;
- Cyril Gomel la a installé des distillateurs solaires de type serre pour dessaler les eaux saumâtres de Biskra, El Oued et Touggourt[4].

I.2.2 Situation actuelle

- Electrification à l'énergie solaire par Sone gaz de 18 villages isolés du grand sud de l'Algérie ; répartis sur 4 wilayas du grand Sud, à savoir : Tamanrasset, Adrar, Illizi et Tindouf et cela dans le cadre du programme d'électrification (1995-2002) des zones isolées.

- Inauguration en 2011 de la centrale électrique hybride solaire/gaz de 150MW dont 25 MW solaire, située à Hassi-R'mel dans la wilaya de Laghouat ;
 - Balisage de la route Bordj Badji Mokhtar- Reggane en 1986 et alimentation des relais de télécommunication par photovoltaïque
 - Pompage de l'eau par énergie éolienne ;
- Ci-dessous quelques chiffres des faibles puissances renouvelables engagées dans les diverses applications à travers le territoire national ;

Les énergies renouvelables présentent 2.35 MW dans le bilan énergétique global du pays. C'est très infime pour un pays qui regorge de soleil. La région Afrique du Nord et le Moyen-Orient(région MENA) est une des régions du monde la plus favorable aux énergies solaires.

I.3. Les énergies renouvelables

Le développement de nouvelles ressources énergétiques reste l'une des principales préoccupations des pouvoirs publics en Algérie. En fait, la combinaison des énergies renouvelables. Le mix énergétique national constitue un enjeu majeur pour la préservation des ressources fossiles par la diversification des filières de production d'électricité et la contribution au développement durable En 2011, notre pays s'est doté d'un ambitieux programme de production d'énergies renouvelables. Ce programme a fourni les bases, les moyens de sa mise en œuvre et un calendrier à l'horizon 2030[5].

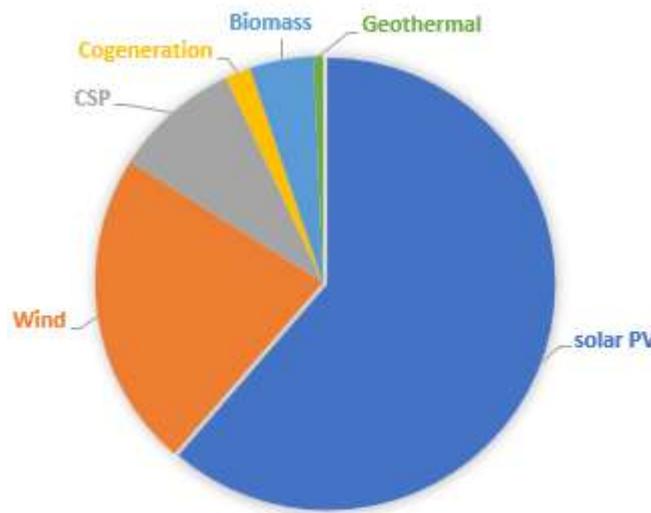


Figure. I. 1. Distribution du programme national des énergies renouvelables

I.3.1 Les types énergies renouvelables

I.3.1.1 Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil, elle est intermittente être le jour et la nuit, aussi, elle est diluer. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. On peut distinguer le solaire passif, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique[6].

A. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque peut être définie comme étant l'origine de l'électricité par une transformation d'une partie du rayonnement solaire par des cellules photovoltaïques. Plusieurs cellules sont reliées entre-elles pour constituer un module solaire photovoltaïque. Les modules sont regroupés pour former une installation solaire, qui alimente un réseau de distribution électrique.



Figure. I. 2. Les panneaux solaires

B. Énergie solaire thermique

Le solaire thermique donne la possibilité d'utiliser la chaleur du rayonnement solaire pour diverses applications tels que le séchage, centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau, chauffage solaires, rafraîchissement solaire, cuisinières et sècheurs solaires.

I.3.1.2 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie extraite du vent. L'échauffement de la terre crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. Ces surpression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de produire de l'électricité dans des éoliennes, appelées aérogénérateurs, grâce à la force du vent.



Figure. I. 3. Un champ d'énergie éolienne

I.3.1.3 L'énergie hydraulique

A partir de la force de l'eau on peut produire de l'électricité dans les centrales hydroélectriques, la force produite dépend soit de la hauteur de la chute d'eau, soit du débit des fleuves et des rivières.



Figure. I. 4. Une centrale hydraulique

I.3.1.4 Les biomasses

L'énergie de la biomasse dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale. L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet aussi de produire de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz extrait de la fermentation de ces matières.

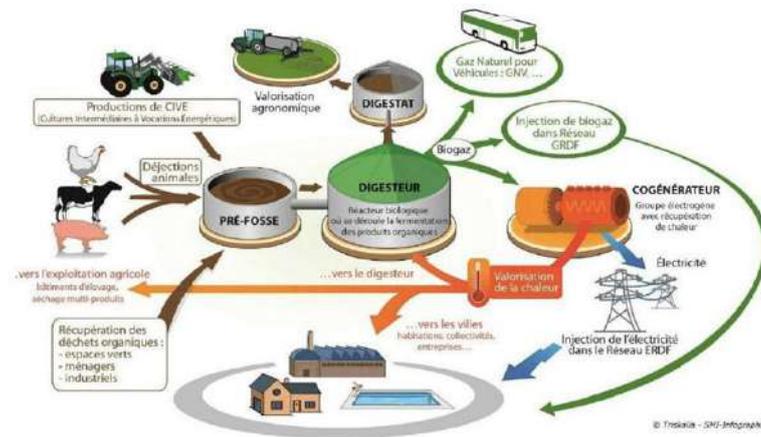


Figure. I. 5. Schéma de principe du fonctionnement de l'énergie biomasse

I.3.1.5 La géothermie

L'énergie de la géothermie permet de produire de l'électricité dans des centrales géothermiques par l'intermédiaire de l'eau chaude des nappes dans le sous-sol de la terre avec un gradient de température moyen de 1/30. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques ce gradient peut aller jusqu'à 100 °C par 100 m.

Une centrale géothermique est composée de 3 parties :

- La pompe ;
- L'usine qui produit l'électricité ;
- Les lignes électriques qui la transportent.

En France, le site de Bouillante en Guadeloupe est le seul à produire de l'électricité grâce à la géothermie et un autre site est en cours d'expérimentation en Alsace .C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, la chaleur de la Terre, est totalement gratuite[7].



Figure. I. 6. Une centrale géothermique

I.3.1.5.1 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 ($10\text{-}30^{\circ}\text{C}$)

A. 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 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 [8].

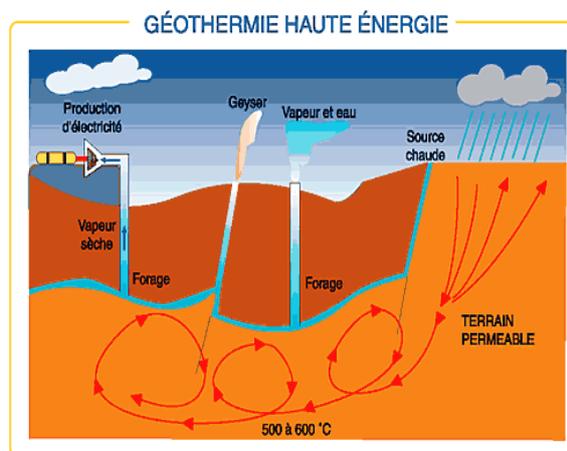


Figure. I. 7. Schéma de principe du fonctionnement de la géothermie haute énergie

B. 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. 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)[8].

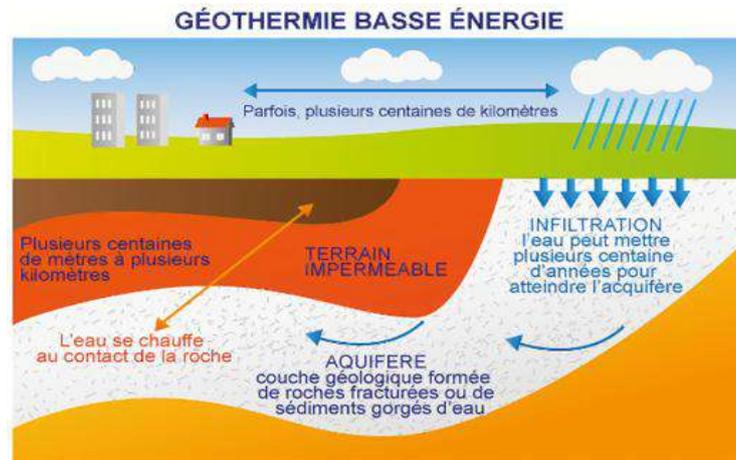


Figure. I. 8. Schéma de principe du fonctionnement de la géothermie basse énergie

C. 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.

Cette technologie est appliquée à :

I.3.1.5.2 Climatisation par échangeur air-sol

Ensemble d'opérations créant et maintenant dans un local des conditions déterminées de température, d'humidité relative, de vitesse et de pureté de l'air. (Abréviation familière : clim.) Terme souvent étendu, en particulier dans l'industrie automobile, à des techniques qui n'assurent que le chauffage et/ou la ventilation[9].

I.3.1.5.3 Le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique

Une pompe à chaleur géothermique (également pompe à chaleur géothermique) est un système de chauffage/refroidissement pour les bâtiments qui utilise un type de pompe à chaleur pour transférer la chaleur vers ou depuis le sol, en profitant de la constance relative des températures de la terre au fil des saisons. Les pompes à chaleur géothermiques (GSHP) - ou pompes à chaleur géothermiques (GHP) comme on les appelle communément en Amérique du Nord - sont parmi les technologies les plus éco énergétiques pour fournir CVC et chauffage de l'eau, en utilisant beaucoup moins d'énergie que ce qui peut être obtenu en brûlant un combustible dans une chaudière/fournaise ou en utilisant des radiateurs électriques résistifs.

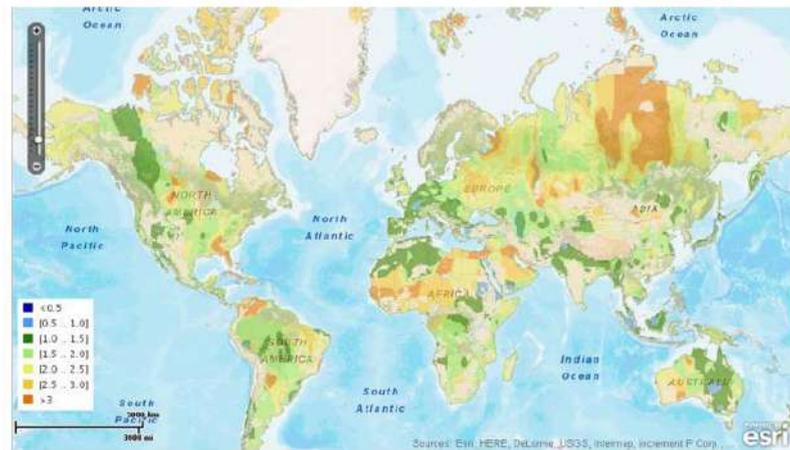


Figure. I. 9. Carte des ressources géothermiques mondiales [5]

I.3.1.5.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermique

A. Avantages

- Une source d'énergie renouvelable;
- 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 2000°C, propre, fiable et économique ;
- Possibilité du couplage avec les centrales électriques, les réseaux de chaleur et de faire d'a 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[10].

B. Inconvénients

- Les sites les plus intéressants sur la planète sont presque exploités ;
- Coût très élevé en raison du prix de réalisation du forage qui parfois ne peut rentable qu'à une profondeur considérable ;
- Nécessité de pose d'un terrain suffisant pour l'exploitation de l'énergie géothermique[10].

I.3.1.5.5 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 Ouellet 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 [11].

L'Algérie, avec plus de 240 sources thermales, possède un fort potentiel en ressources énergétiques d'origine géothermale. Une représentation cartographique des ressources géothermiques disponibles sur le territoire national permet de visualiser et d'évaluer le potentiel exploitable de cette ressource. Cet atlas présente des cartes d'inventaire et de température des principales ressources géothermales de l'Algérie. Il fournit aussi des cartes du gradient géothermique, de la conductivité thermique et du flux de chaleur.

Les cartes présentées dans cet atlas permettent de disposer d'un outil d'évaluation et d'aide à la prise de décision pour l'exploitation des gisements géothermiques disponibles en Algérie. L'inventaire des ressources géothermales nationales est le résultat d'un travail initié par le CDER dès 1985. Il se base sur des données récentes concernant les sources, stations, forages et foggaras thermaux et sur les nouveaux outils de géo localisation. Les principales ressources géothermales sont classées en fonction de la température. La plus renommée de ces ressources est la source thermale de Hammam Debagh (Ex-Hammam Maskoutaine). Elle est classée parmi les sources thermales les plus chaudes au monde, sa température d'eau à l'émergence est de 98°C.

La géothermie peut être exploitée pour la production de l'électricité, le chauffage des locaux (hôtels, bungalows,...) des stations géothermales ainsi que le chauffage des serres agricoles.

Un projet piloté a été réalisé par l'Office National de l'Irrigation et du Drainage (ONID) du Ministère des Ressources en eau qui consistait à exploiter la géothermie à partir de l'énergie de l'eau chaude (60°C) fournie par des forages de la nappe albienne au niveau du complexe agro-industriel de Touggourt, Wilaya de Ouargla pour le chauffage des serres agricoles[11].

I.4. Caractéristiques climatiques de la région d'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[12, 13].

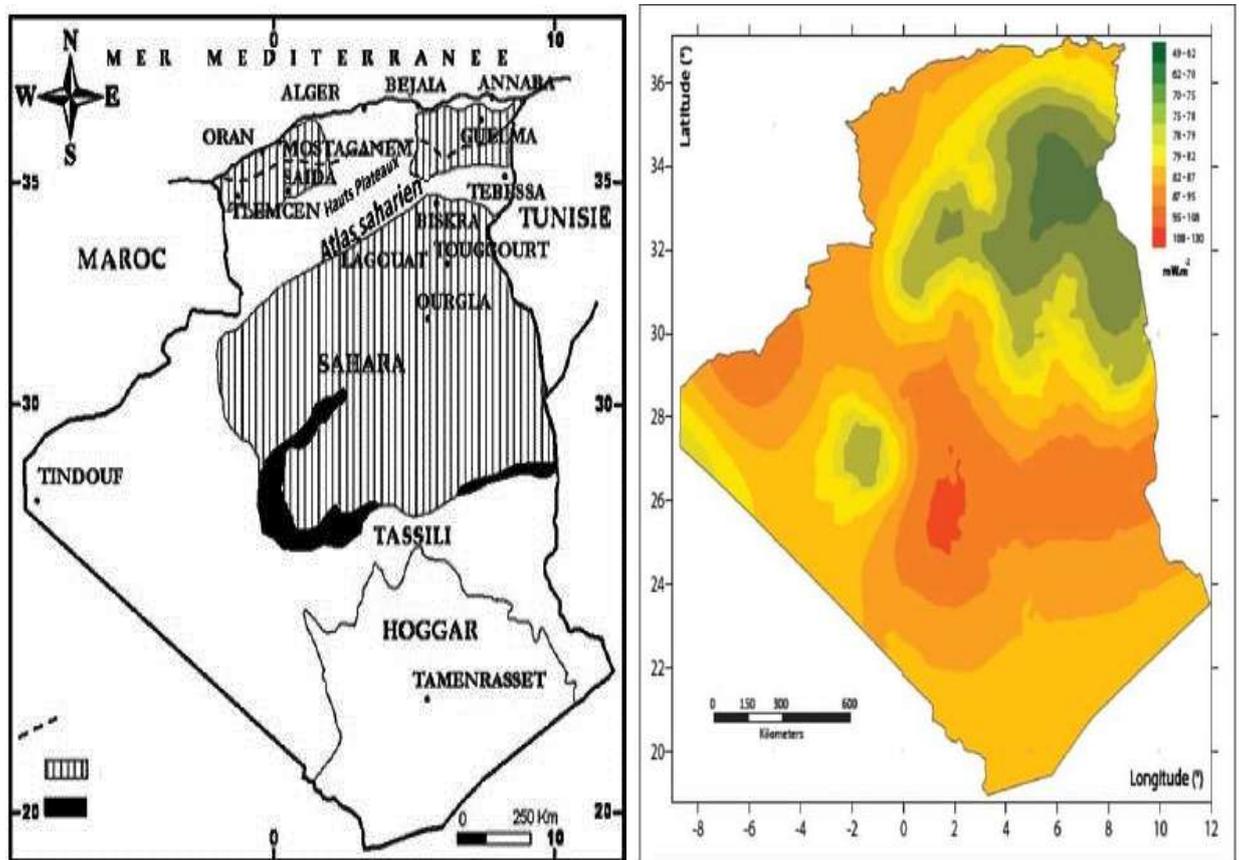


Figure. I. 10. Les Zones de concentration les ressources géothermiques en Algérie

I.5.CONCLUSION

En conclusion, les énergies renouvelables sont des sources d'énergie les plus prometteuses en termes écologiques et climatique. Les applications issues de la géothermie sont nombreuses et efficaces de point de vue thermique, aussi, ce type d'énergie peut substituer aux différentes sources fossiles en terme d'efficacité notamment les application domestiques. géothermie présente pourtant de nombreux atouts. Enfin la géothermie, source de production de chaleur, peut être associée à de la production d'eau potable, à du thermalisme, etc. Cette activité est actuellement présente dans plus de cinquante pays et permet annuellement de substituer 4 M tep d'énergie fossile. D'un point de vue environnemental, la géothermie est probablement l'une des énergies les moins polluantes [21].

Chapitre II

Etat de l'art sur l'échangeur géothermique air / sol

II Etat de l'art sur l'échangeur géothermique

II.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. Nous examinerons également quelques articles qui ont travaillé sur la même expérience l'échangeur air /sol[14].

II.2. Généralité sur l'échangeur air-sol

L'échangeur air-sol est un système géothermique qui consiste à rafraîchir l'air pour la 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 réchauffe 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'extérieur, le puits est alors dit puits provençal [15]

II.3. 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 (voire figure II.1).

- 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 (voire figure II.1)[16-18]

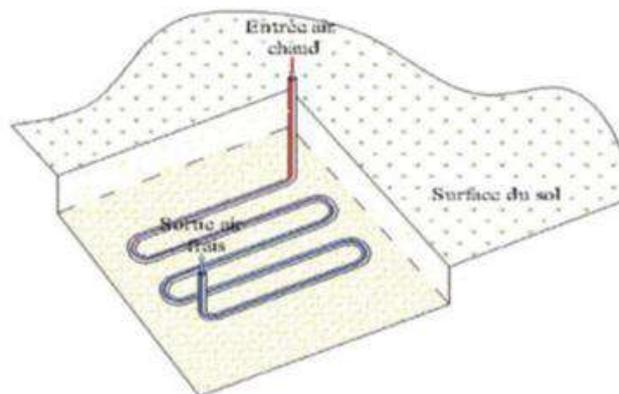


Figure. II. 1. Schéma d'un échangeur air/sol[21]

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.

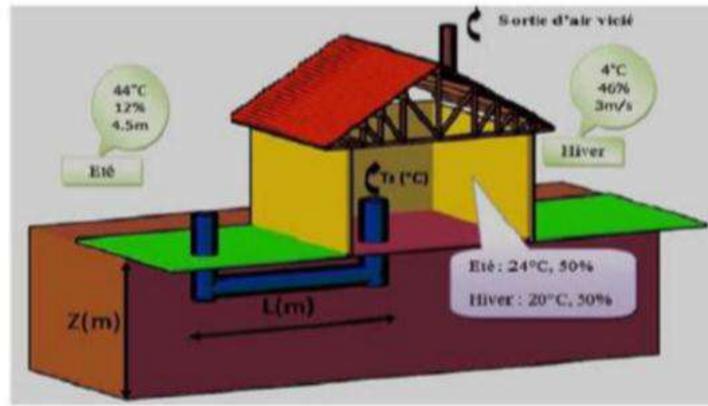


Figure. II. 2. Principe de la géothermie par échangeur enterré air/sol étudié

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 [19]



Figure. II. 3. Description d'un puits canadien en Hiver

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[20].

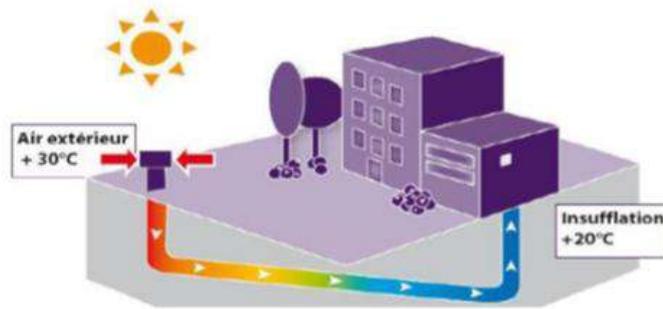


Figure. II. 4. Description d'un puits canadien en été

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[20].

II.4. Principaux éléments d'un puits canadien/provençal

Il y a plusieurs éléments d'un puits canadien /provençal en définir:

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

II.5. Eléments pour la conception d'un puits canadien/provençal

Il y a plusieurs éléments de la conception d'un puits canadien /provençal en définir:

- 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.

II.6. 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.

II.6.1. 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[21, 22].

II.6.2. 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 [23-26].

II.6.3. 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[23-27].

II.6.4. 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 [28, 29]

II.6.5. 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[18, 28-31]

II.6.6. 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[28, 29, 32]

II.6.1. Disposition des tubes :

Afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter son entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes. Deux dispositions sont majoritairement utilisées lorsque le puits ne comporte qu'un seul tube[23, 26, 33]

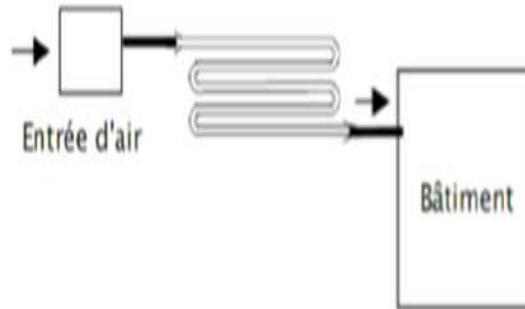


Figure.II. 5. Tube en serpentin

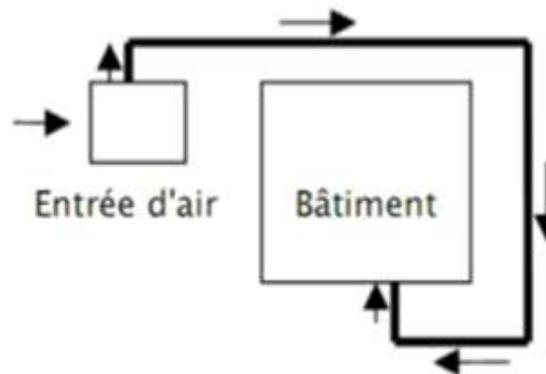


Figure. II. 6. Tube en boucle

II.7. Synthèse Bibliographique

Plusieurs études ont abordé la technologie des échangeurs air-sol, et pour cela nous faisons une analyse des différentes approches rencontrées dans la littérature, pour connaître d'une façon générale les résultats des principaux sujets qui sont menés dans le même domaine de la géothermie, pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Cette analyse constitue une intéressante base de travail préalable à la conception d'un modèle.

La synthèse des principales approches rencontrées dans la littérature, a permis d'élaborer les grandes lignes des travaux essentiels développés. Parmi ces études, nous citons celles de :

Nasreddin. S et al[34]. Dans le présent travail, une étude expérimentale est menée sur les performances d'un système couplé : échangeur de chaleur terre-air et cheminée solaire. L'objectif principal est de réduire les coûts et de maximiser l'effet direct entre les deux techniques. Les résultats obtenus ont montré que le nouveau système était capable de créer deux régimes thermiques principaux dans la même journée. Le premier est un « chauffage » en augmentant la température de l'air de sortie passant par le tuyau enterré et la cheminée

solaire pour atteindre un gain maximal de 14 ° C au jour 3. Le deuxième régime thermique est le « refroidissement » qui est fait en réduisant la température de l'air à la sortie EAHE de 11,6 ° C le jour 5. On observe également que le système augmente l'humidité relative de l'air de sortie de 46% en raison des phénomènes de condensation et la réduit parfois de 45%. Le modèle récent composé des deux techniques a pu produire entre 3 et 20 Watts de capacité de chauffage/refroidissement à la sortie du système.

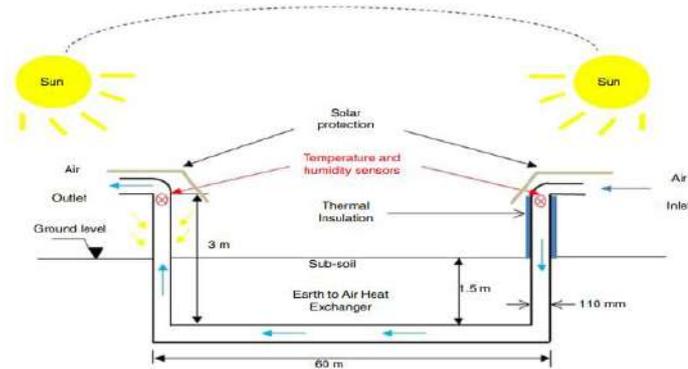


Figure. II. 7. Présentation schématique de l'échangeur de chaleur terre-air avec la cheminée solaire N. ROSA et al[35]. Ce travail vise à évaluer numériquement l'influence de trois paramètres sur la performance thermique globale d'un système EAHE pour les bâtiments résidentiels dans un climat méditerranéen chaud d'été: l'espacement entre les tuyaux, le diamètre des tuyaux et la vitesse de l'air qui circule. ANSYS-CFX a été utilisé pour simuler le comportement transitoire de l'EAHE pendant les modes de fonctionnement du chauffage et du refroidissement, et pour évaluer l'influence de chaque paramètre sur la température de l'air de sortie et le taux de transfert de chaleur sol-air. Les résultats numériques ont été validés par rapport aux données expérimentales et comparés aux résultats analytiques obtenus précédemment. Il a été conclu que pour un certain diamètre de tuyau et une certaine distance entre les tuyaux adjacents, plus la vitesse de l'air est élevée, plus les performances thermiques du système sont faibles, principalement pour le refroidissement. Les résultats ont également montré que pour une certaine vitesse de l'air et un certain diamètre de tuyau, la distance entre les tuyaux peut être réduite de 1,0 m à 0,5 m sans compromettre les performances EAHE, permettant ainsi une réduction de la surface terrestre nécessaire pour les tuyaux EAHE jusqu'à environ 50%

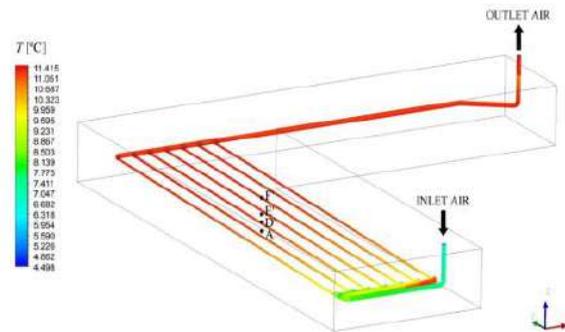


Figure. II.8. Répartition de la température de l'air le long du système EAHE à $t = 9h$ ($T_{a, in} = 4,5 \text{ } ^\circ\text{C}$) en mode chauffage (premier modèle CFD)

MOHHAMED.K et al[36]. Ont réalisée travail qui porte sur une étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur terre-air (EAHX) pour le refroidissement de l'air, connecté à un immeuble résidentiel situé à Marrakech (Maroc) dont le climat est semi-aride chaud. L'EAHX se compose de trois tuyaux parallèles en PVC de 72 m de long chacun et de 15 cm de diamètre intérieur, enterrés à une profondeur de 2,2 à 3,2 m. Chaque tuyau est équipé d'un ventilateur qui souffle de l'air traité dans le bâtiment. L'étude expérimentale consiste en un suivi estival de l'EAHX via des mesures de température et d'humidité de l'air dans l'ensemble de l'échangeur, ainsi qu'à son entrée et sa sortie vers le bâtiment pour deux valeurs fixes du débit d'air. Les résultats expérimentaux montrent que l'EAHX est un bon système semi-passif pour le rafraîchissement de l'air, car la température de l'air soufflé enregistrée dans le bâtiment est quasi-constante à $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ avec une humidité de l'air autour de 40 %, même si la température extérieure atteint plus de $40 \text{ } ^\circ\text{C}$. De plus, la diminution des amplitudes journalières et annuelles de température de l'air se caractérise par une chute exponentielle en fonction de la longueur des canalisations. La longueur caractéristique se situe autour de 20m et 70m respectivement pour la réduction des amplitudes de température de l'air journalière et annuelle. De plus, il est montré que les recommandations de conception issues de la littérature ne peuvent pas être directement appliquées à un EAHX qui est soumis à des perturbations météorologiques d'extrados et/ou qui n'est pas exploité toute l'année, pour lequel une simulation numérique avec des modèles validés reste nécessaire. D'autre part, des simulations dynamiques de l'EAHX à l'aide du logiciel TRNSYS (TYPE 460) ont été réalisées avec un tuyau ou trois tuyaux fonctionnant en continu. Un bon accord a été trouvé entre la simulation et les résultats expérimentaux. Les résultats de la simulation montrent que l'EAHX peut effectuer une baisse maximale de la température de l'air jusqu'à $19,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $18,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ respectivement pour un EAHX à un et trois tuyaux. La puissance frigorifique spécifique

obtenue est de 58 W/m^2 (un tuyau) et 55 W/m^2 (trois tuyaux) obtenues pour des températures d'air de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $26 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivement, à la sortie de l'EAHX et de $44,6 \text{ }^\circ\text{C}$ à son entrée.



Figure. II.9. Photos de l'installation de l'EAHX

Mohammed. B [37]. et al Ont réalisé un travail très important ,Dans cette étude, une simulation a été réalisée via la plateforme de calcul de dynamique des fluides FLUENT 6.3 pour la prédiction des performances thermiques de l'EAHE qui décrit la variation de la température de l'air à l'intérieur du tube. Pour cela, il a fallu concevoir l'échangeur de chaleur en respectant le design et les dimensions réelles du montage expérimental, et en précisant que la température de la paroi du tube horizontal de l'échangeur est égale à celle du sol à 3 m profondeur. Il est à noter qu'en évaluant la température le long des deux tronçons verticaux (entrée et sortie) de l'échangeur, en optant pour une fonction (UDF) l'utilisateur définit la fonction. Enfin, notant un bon accord entre l'étude expérimentale et numérique, et montrant qu'une diminution significative de la température à la sortie de l'échangeur jusqu'à une différence de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, confirme l'efficacité de l'échangeur de chaleur.



Figure. II.10. Emplacement des capteurs le long de l'échangeur de chaleur



Figure. II.11. Image de l'échangeur de chaleur horizontal pour différentes profondeurs

Ahmed et al.[38, 39] Ont fait un travail très important, les performances thermiques d'un échangeur de chaleur terre-air (EA IE) utilisé à des fins de battage et de refroidissement sont étudiées dans les conditions météorologiques égyptiennes. Le profil de température du sol et la distribution de la température de l'air circulant à travers l'échangeur de chaleur terre-air horizontal (EAHE) sont étudiés expérimentalement. En outre, un modèle mathématique basé sur l'état in stationnaire, unidimensionnel et quasi-état est développé pour l'équation de conservation de l'énergie. De plus, une méthode numérique explicite aux différences finies est utilisée pour résoudre le modèle mathématique développé à l'aide du code MATLAB. Enfin, un modèle de simulation tridimensionnel, stable et à double précision de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) ANSYS Fluent est établi pour prédire la température de l'air et du sol. Considérant que, la norme k pour simuler l'énergie cinétique de turbulence du fluide en écoulement. Le modèle développé mathématiquement et le résultat de la simulation CFD ont été validés par rapport aux résultats expérimentaux. Un bon accord est obtenu avec une erreur moyenne et un coefficient de corrélation de 209,97 % et 33 et 95,5 % pour la simulation CFD et le modèle mathématique respectivement. Le modèle CFD est utilisé dans l'investigation paramétrique, une étude paramétrique réalisée pour explorer l'impact de différents paramètres tels que le diamètre du tuyau et la vitesse du fluide en écoulement. Les résultats montrent que certains de ces paramètres ont des effets notables sur la température de l'air, alors que plus le diamètre du tuyau augmente, plus la température de l'air diminue. La température de l'air de sortie baisse de 204 C à 187 C lorsque le diamètre du tuyau augmente de 2 à 3 pouces. La température change de 19,7 à 199 C lorsque la longueur du tuyau s'allonge de 545 m à 7 m Un peu de changement se produit dans la température de l'air de sortie de 197 C à 198 C lorsque la crue du tuyau change de 02 à 05 m De plus, trois matériaux de tuyaux différents tels que l'acier PVC et le cuivre sont La température de l'air a été de 19,7 C dans les tuyaux en PVC et de 19,8, 19,8 C pour l'acier et le cuivre respectivement. Sortie a température de chnestrom 204 C € modèle est matériau appliqué, espace de tuyau, longueur de tuyau Cas l'air accélère de 1 à 3 m/s. 2016 Publié par seevier Etd.



Figure. II.12. Images de la configuration expérimentale (a) échangeur de chaleur en PVC et (b) mesures du profil de température du sol

II.8. Avantages et inconvénients de l'échangeur air/sol

L'échangeur air-sol présente les avantages suivants[24] :

A. Avantage

- **Economiques:** faible consommation électrique ;
- **Ecologiques :** les puits canadiens n'utilisent pas de fluides frigorigènes, ni de compresseur et consomme peu d'électricité ;
- **La maintenance** est restreinte ;
- **L'investissement** est en fait reporté sur l'enfouissement des puits dans le sol ;
- **Coût énergétique :** très faible par rapport à une climatisation classique ;
- **Coût de maintenance :** très faible par rapport à une climatisation classique ;
- Intégration possible avec d'autres systèmes de climatisation ;
- Possibilité de raccorder le puits à un caisson de ventilation mécanique contrôlé (VMC) double flux.

B. Inconvénients

L'échangeur air-sol présente les Inconvénients suivants [24] :

- Efficacité des grilles anti-rongeurs imparfaites
- Difficultés pour nettoyer correctement le ou les conduits
- Nettoyage régulier des filtres nécessaire
- Risque pour la santé s'ils sont mal entretenus (développement des organismes pathogènes « Légionellose » (dû à la mauvaise évacuation de condensat)
-

II.9. CONCLUSION

Dans chapitre nous avons présenté une généralité sur le potentielle 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 III

Etude expérimentale et validation

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Le sud algérien se caractérise par un climat sec et chaud avec la température de l'air ambiante la plus élevée notamment en mois de juillet et août avec une moyenne maximale qui atteint l'après-midi 50°C .

A Ouargla l'été commencé généralement au début de mai et se termine vers le mois d'octobre, avec une température maximale de l'air d'environ 48 et 52 °C, la climatisation est souvent utilisée dans les climats chaud et aride, par conséquent il y a une consommation énergétique très forte, qui oblige de trouver des techniques pour réduire la consommation qui pourraient avoir des avantages économiques et environnementaux. Parmi ces techniques :Le rafraîchissement de l'air ambiant à partir des pipes enterrées, qu'on appelle échangeur de chaleur air/sol (EAHE), ce dispositif économe et réduire la consommation d'énergie ; sert à réduire la charge de refroidissement du bâtiment.

À cet effet, le présent chapitre consacré à l'étude expérimentale d'un échangeur de chaleur intégré dans un système de climatisation géothermique. Cette partie est développée dont le but d'étudier l'efficacité de l'échangeur de chaleur enterré dans les régions chaudes et arides .Puis, on présentera l'influence des différents paramètres thermo-physiques et géométriques sur le comportement thermique de l'échangeur air sol.

III.2. Etude expérimental

III.2.1. Description du dispositif expérimental

L'échangeur réalisé par le l'équipe de recherche Hydrocarbures et transition énergétique dans le cadre d'une thèse de doctorat de l'étudiant BENALI Oussama, se trouve à l'intérieur de l'enceinte de l'université Ouargla latitude 31°57' N, longitude 5° 24' E et altitude 140m, figures III.1. L'intégration de ce dispositif pour le but de rafraichir l'air dans une habitation, ce qui assure une économie d'énergie. Les canalisations dans lesquelles on fait circuler l'air nécessaire à ce rafraichissement, sont enfouies à une profondeur de 2,5 m, sous la forme de lettre S au niveau horizontal de sol. Les tubes sont en PVC, comportant une longueur de 47 m et un diamètre de 0.11 m disposés et séparés les uns des autres d'une distance entre axes de 2 m avec 3 nombres de tours. Une cellule de réception en pierre locale est construite à la sortie

de l'échangeur. Un extracteur (ventilateur portatif de 50 Watt) d'air de débit variable est placé(à l'entrée de l'échangeur pour assurer la circulation continue de l'air.

La vue isométrique de l'expérimental d'EAHE évaluée est montrée dans la figure III.2. Une série des sondes thermocouples (type K) a été placée tout a long du tube de l'échangeur avec une distance variable, pour mesurer la température de l'air sur la longueur de la conduite.



Figure. III. 1 .Vue général de l'échangeur d'air/ sol

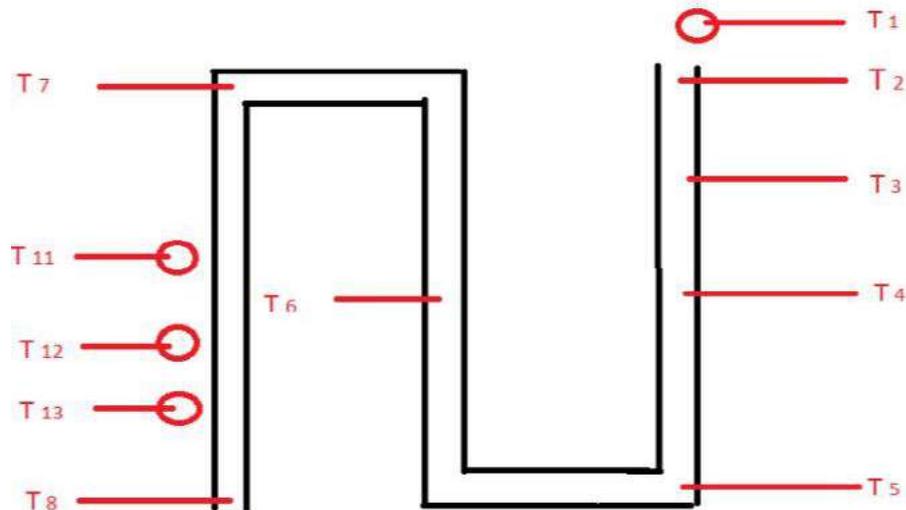


Figure.III. 2. Emplacement détaillé des sondes de l'air

III.2.2. Acquisition et traitement

Le système d'acquisition est utilisé afin d'évaluer le comportement thermique à l'intérieur de la conduite de notre échangeur air/sol, pour différentes profondeurs et débits d'air entrant.

Le système de mesure est basé sur 13 sondes thermiques, il s'agit en particulier de la mesure des températures de sol au niveau des plusieurs positions, et de celle d'air dans les circuits de l'air débité à l'intérieur des conduites de l'échangeur. Ces sondes sont reliées à une centrale d'acquisition, pour transférer les données mesurées vers l'ordinateur d'acquisition. Avec des appareils de mesures secondaires ; tel qu'un débitmètre (anémomètre), mesure les débits de l'air à la sortie de l'échangeur de chaleur, et un appareil de mesure du rayonnement solaire, appelé Solari mètre.



Figure.III. 3. Ventilateur

III.2.3. Emplacement des capteurs de température

Les mesures de température ont été effectuées à l'aide de capteurs fixes de température qui thermocouples de type K (Figure III.4). Deux thermocouples étalonnés et calibrés ont été placés à la sortie des deux conduits pour la mesure de la température de l'air,



Figure.III. 4. Thermocouples type K utilisés dans l'EAHE system



Figure.III. 5. Outils de l'expérimental et instruments des mesures

III.3. Définition de fluent

Fluent est intégré dans la suite de logiciels de simulation ANSYS. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA,

Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres .Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence.

Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dual coré, plateforme multi-CPU)

III.3.1. Principales étapes pour définir un problème de CFD

Les étapes suivantes constituent la procédure à suivre pour simuler les écoulements à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT R21 :

- Lancer SPACECLAIM ;
- Définition du model (La géométrie) ;
- Changer du modèle du maillage ;
- Vérifier son maillage ;
- Choix des condition limites ;
- Lancer FLUENT ;
- Choix du modèle physique ;
- Contrôle de la convergence ;
- Afficher les résultats.

III.3.2. Configuration de la simulation CFD

Pour simuler à la fois les processus de flux d'air et de transfert de chaleur dans un système EAHE, un progiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD) ANSYS FLUENT v. 2021 a été utilisé dans cette étude. Le logiciel ANSYS Fluent contient les vastes capacités de modélisation physique nécessaires pour modéliser l'écoulement, la turbulence, le transfert de chaleur et les réactions. Il a des modèles de turbulence qui couvrent une variété d'applications. De plus, les effets d'autres phénomènes physiques, tels que la flottabilité et la compressibilité peuvent être modélisés. Enfin, un modèle de transfert de chaleur par convection naturelle, forcée et mixte avec ou sans transfert de chaleur conjugué et milieu poreux peut également être modélisé . La géométrie tridimensionnelle est dessinée pour les domaines solides et fluides avec les dimensions indiquées à la Figure III.6. Une analyse basée sur CFD a été utilisée pour résoudre le champ de température dans le tuyau enterré horizontal d'EAHE, en utilisant une grille non structurée pour le domaine fluide. Nombre de cellules de maillage optimisé pour réduire le temps de calcul et obtenir une solution plus précise. Pour ce faire,

une technique de solution indépendante du maillage est appliquée pour avoir la meilleure densité de grille.



Figure.III. 6. Géométrie d'échangeur d'air /sol

Un schéma d'interpolation stable avec implicite utilisé pour la simulation. L'algorithme SIMPLE appliqué pour le couplage pression-vitesse dans le solveur séparé. Dans le cas d'un état stationnaire résolu itérativement un problème comme notre cas, il n'est pas nécessaire de résoudre complètement le couplage linéaire pression-vitesse, car les changements entre les solutions consécutives ne sont plus faibles. Ainsi, pour des problèmes relativement peu compliqués dans lesquels le couplage pression-vitesse limite la convergence, le schéma SIMPLE a préféré obtenir une solution convergée plus rapidement. Le schéma upwind du second ordre adopté pour la discrétisation des équations gouvernantes. Le critère de convergence pour toutes les variables a été fixé à 10^{-6} . Le modèle turbulent standard $k-\epsilon$: l'énergie cinétique de turbulence, k et son taux de dissipation, ϵ est appliqué pour modéliser le transport de l'énergie cinétique turbulente. Le modèle $k-\epsilon$ est l'un des modèles de turbulence les plus courants. Il comprend deux équations de transport supplémentaires pour représenter les propriétés turbulentes de l'écoulement. En outre, il donne de bons résultats pour les écoulements délimités par les murs et internes avec de petits gradients de pression moyens.

Le modèle de turbulence retenu pour la modélisation thermique de l'écoulement traversant les conduites enterrées était turbulent (Nombre de Reynolds, $Re > 4000$), où le nombre de Reynolds variait de 4900 à 13 000. Le modèle satisfait des contraintes mathématiques définies sur les contraintes de Reynolds et est compatible avec la physique des écoulements turbulents. De plus, cela permet à un modèle à deux équations de tenir compte des effets historiques tels que la convection et la diffusion de l'énergie turbulente. Alors que le modèle K-epsilon s'est avéré utile pour les écoulements de couche à cisaillement libre avec

des gradients de pression relativement faibles. De même, pour les écoulements murés et internes. Dans la présente étude, les hypothèses suivantes sont utilisées :

- L'air est incompressible ;
- Le sol est homogène et ses propriétés physiques sont constantes ;
- La température du sol entourant le tuyau reste constante ;
- La propriété des tuyaux et des matériaux de base ne change pas avec la température.

Les matériaux d'ingénierie utilisés dans le modèle CFD sont isotropes et homogènes.

Tableau. III. 1. Propriétés physiques et thermiques utilisées dans la présente étude [39]

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Conductivité thermique (W/m K)
Air	1.225	1006	0.024
Sol	2050	1840	2.6
PVC	1380	900	0.17

Tableau. III. 2. Différents paramètres du système

Propriétés	Valeurs
Logeur de tube (m)	47
Diamètre de tube (m)	0.11
Profondeur du tube (m)	2.5
Vitesse de l'air (m/s)	1.5 ; 2.5
Température d'entrée (°c)	30.2
Température du sol (z= 2.5 m) (° C)	23

T1	Température ambiante
T2	0 m
T3	3 m
T4	6 m
T5	12 m
T6	20 m
T7	28 m
T8	40 m
T9	Sortie de l'échangeur
T10	chambre
T11	-1,75 m de sol
T12	- 2,5 m de sol
T13	0 m de sol

III.4. Résultat et discussion

Cette section présente les différents résultats des expériences et simulations développées. Pour commencer, des profils de température de la profondeur du sol sont fournis afin d'estimer la profondeur optimale d'enfouissement des conduites pour ce système. Les résultats de simulation dérivés des résultats expérimentaux sont ensuite validés. Ensuite, nous discuterons de la manière dont différents paramètres thermo physiques et géométriques affectent le comportement thermique de l'échangeur air-sol. Enfin, les résultats de l'amélioration des performances thermiques de l'échangeur de chaleur

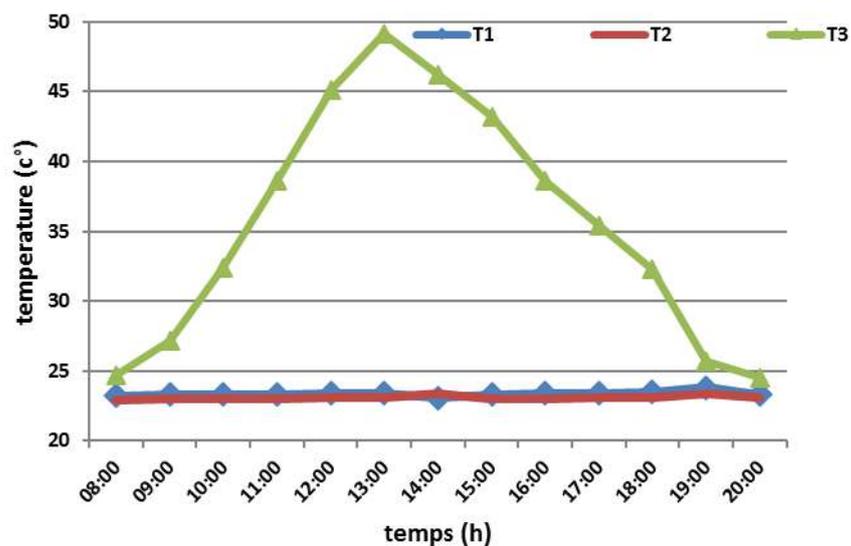


Figure.III. 7. Evolutions de température du sol en fonction de temps (T1= 1,75 m, T2= 2,5 m, T3= 0 m)

Nous avons fait plusieurs essais durant le mois de Mai, mois un peu chauds, pour étudier le comportement de l'échangeur et son efficacité. La figure (III.8) représente la différence entre la température ambiante et celle du sol. Ces mesures sont réalisées le 11/05/2022 et le 12/05/2022 à partir de 08:00 h jusqu' à 20:00 h avec une vitesse d'écoulement de l'air $V = 1.5\text{m/s}$.

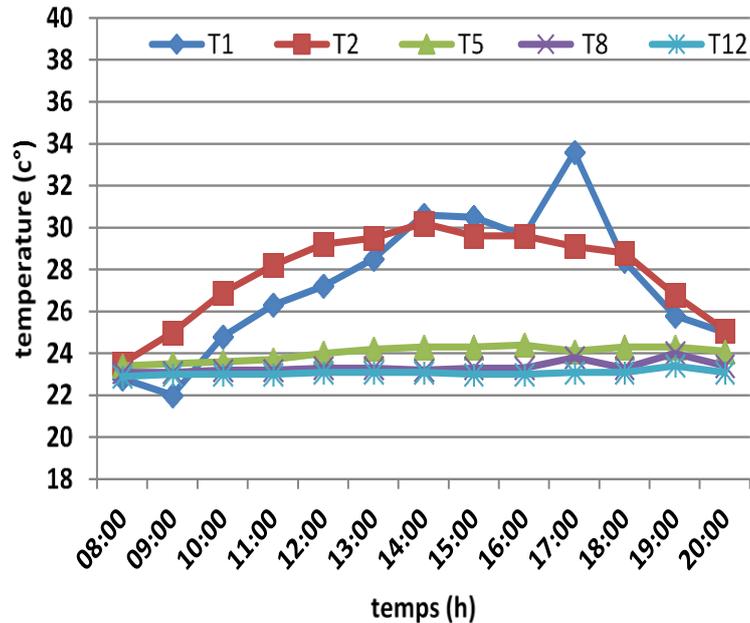


Figure.III. 8. Mesure de la température de l'air sur la longueur de l'échangeur

La figure III.8 montre la variation de la température du sol avec le temps, à différentes profondeurs. Comme indiqué, la fluctuation de température s'atténue avec la profondeur. L'amplitude de la variation de température en surface est de 25 C° , alors qu'à 2 m de profondeur elle est déjà tombée à inférieure à 1 C° à 2.5 m de profondeur, la température du sol est quasi constante ou présente des variations de faible amplitude.

Cela indique que la température de surface est affectée par les conditions climatiques environnantes.

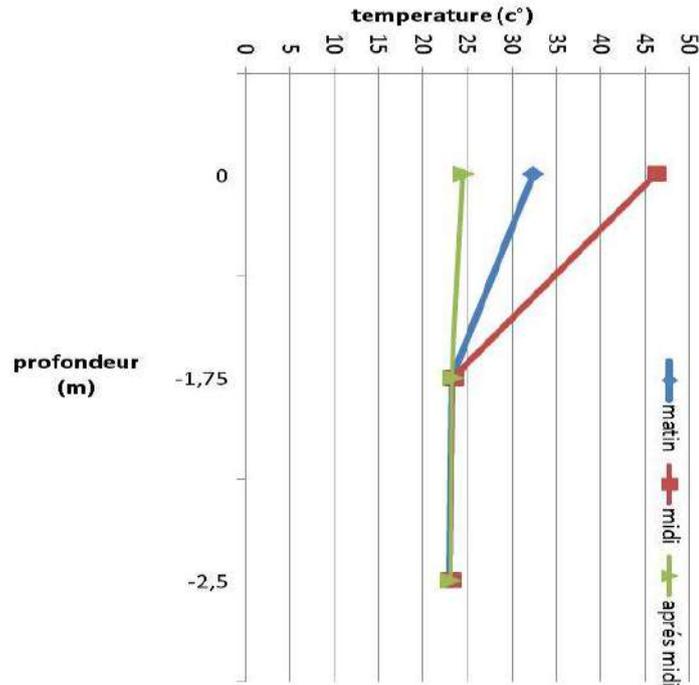


Figure. III. 9. Evolutions de température du sol en fonction de profondeur pour les moments suivants : matin = 10:00 , midi = 13:00 , après-midi = 20 :00

La figure III.9 montre la variation de la température du sol avec la profondeur ; la température semble diminuer avec la profondeur, à cause de la saison à laquelle l'expérience a été réalisée. Par exemple pour le midi, Il a commencé par 46 C° à la surface, puis est descend à 23.4 C° à la profondeur de 2.5 m. Pendant cette période de l'année, ce profil de température du sol peut être utilisé dans de nombreuses applications, telles que le rafraîchissement et climatisation.

Afin de contrôler les mesures de la température de l'air sur la longueur des tubes, la figure (III.10) représente la distribution de la température de l'air pour chaque sonde (thermocouple) installée le long de l'échangeur pour les journées du 11/05/2022 et du 11/05/2022 à partir de 08 :00 h jusqu'à 20 :00 h avec une vitesse d'écoulement de l'air $V = 1.5$ m/s.

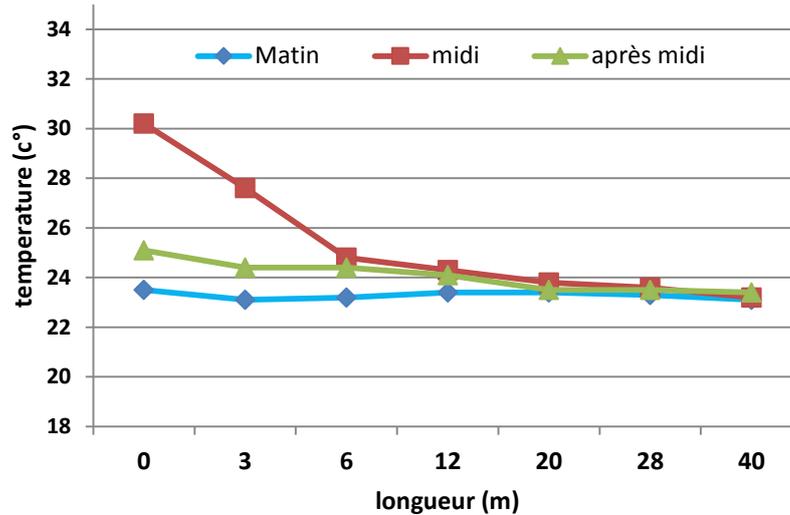


Figure.III. 10. L'évolution de la température sur la longueur d'EAHE pour des temps différents

Pour l'effet de la longueur du tuyau, la figure III.10 montre que la température d'air diminue avec l'augmentation de la longueur du tuyau. Par exemple, on observe pour une température d'entrée d'air de 30,2 C° va diminuer par 6 C° lorsque la longueur de canalisation passe de 0 à 6 m. Cependant, le taux de réduction n'est pas constant et il diminue également avec la longueur du tuyau. En effet, on obtient une réduction de 1 C° seulement pour une augmentation de 20 à 40 m de la longueur de conduite. Par ailleurs, pour une longueur donnée, la diminution de la température de l'air est d'autant plus importante que la température d'entrée d'air est plus élevée. On constate que pour une longueur de conduite de 40m, la diminution de la température de l'air est de 2 C° pour une température d'entrée d'air de 25,1 C° et de 7 C° pour une température d'entrée de 30,2 C°. Ceci peut s'interpréter par le fait qu'une augmentation de la longueur de la conduite entraîne une augmentation de la surface d'échange et que la quantité de chaleur perdue par l'air en circulation est proportionnelle à la surface d'échange. Par conséquent, la température de l'air diminuera davantage.

III.5. Résultats CFD

Nous sommes appuyés sur logiciel de simulation numérique (Ansys), qui est utilisé dans le développement de produits industriels, à travers ses étapes nécessaires aux simulations. Le travail de l'échangeur géothermique et que la longueur de l'échangeur n'est pas une condition de l'efficacité apportée lors du refroidissement. Nous avons également conclu que la vitesse contrôle la répartition de la chaleur, et au final, les résultats des simulations étaient très proches du travail expérimental.

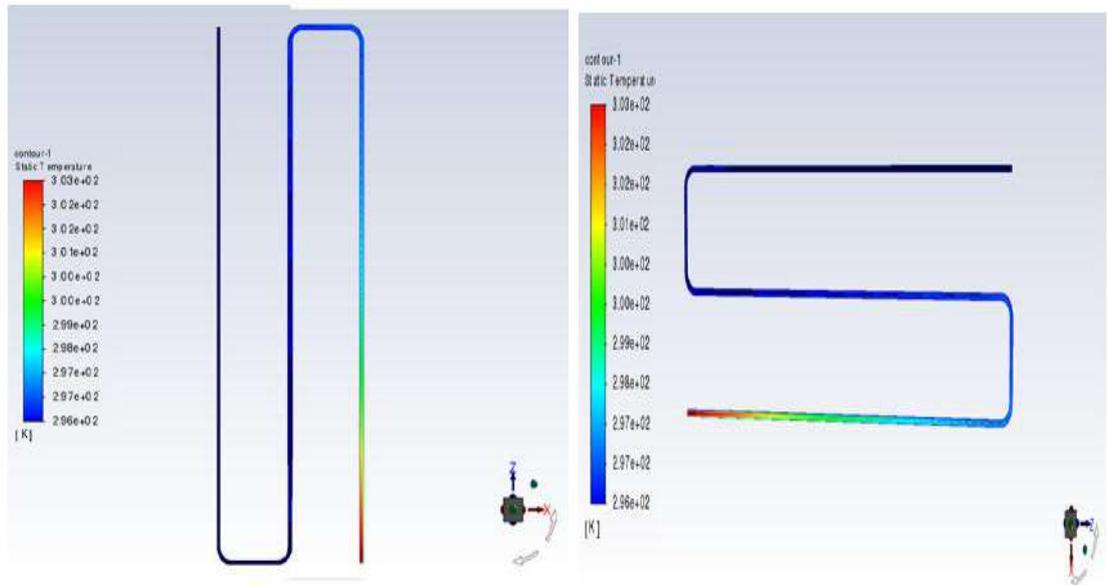


Figure.III. 9. Simulation de la distribution de température pour deux vitesses différentes de $V_1= 1.5 \text{ m/s}$

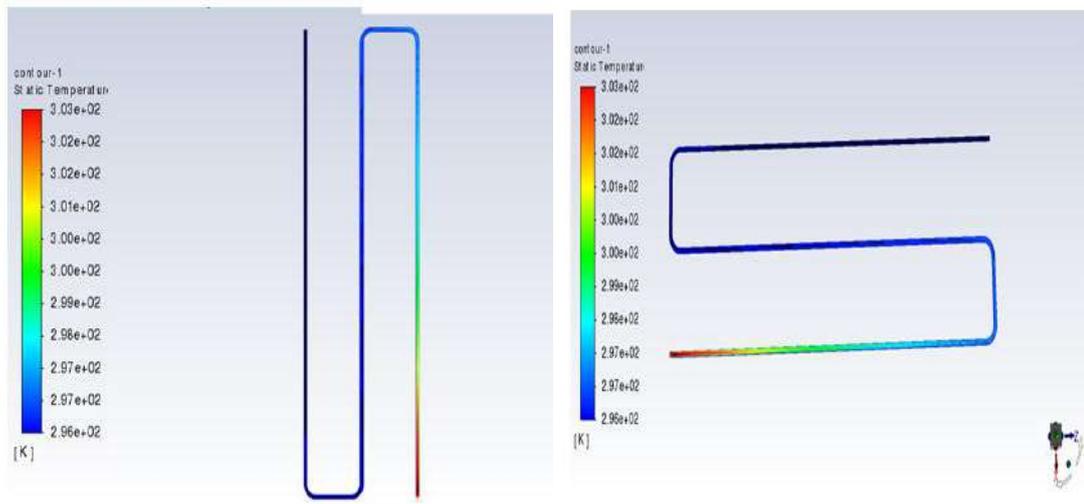


Figure.III. 12. Simulation de la distribution de température pour deux vitesses différentes $V_2= 2.5 \text{ m/s}$

Le modèle de simulation CFD validé utilisé pour visualiser et analyser les contours de température pour le domaine fluide. Les contours de température des domaines du fluide sont illustrés à la Figure (III.11)et (III.12).la température du fluide diminuait avec l'augmentation de la longueur du tuyau en mode refroidissement. Le contour de température au niveau du plan horizontal croise l'échangeur de chaleur horizontal indique que le gradient de

température peut dépasser 7 C°, comme illustré à la Figure, Ainsi, l'échange de chaleur important se produit dans la partie horizontale de l'EAHE. Ainsi, la longueur de cette partie de tuyau joue un rôle important dans le processus de transfert de chaleur. D'autre part, ces propagations deviennent plus évidentes avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement du fluide, car à mesure que la vitesse du fluide augmente, il n'y a pas assez de temps pour que la chaleur s'échange entre le fluide et le sol, ce qui maintient la différence de température entre le fluide et le sol encore plus grande que ce qui se passe à faible vitesse de l'air.

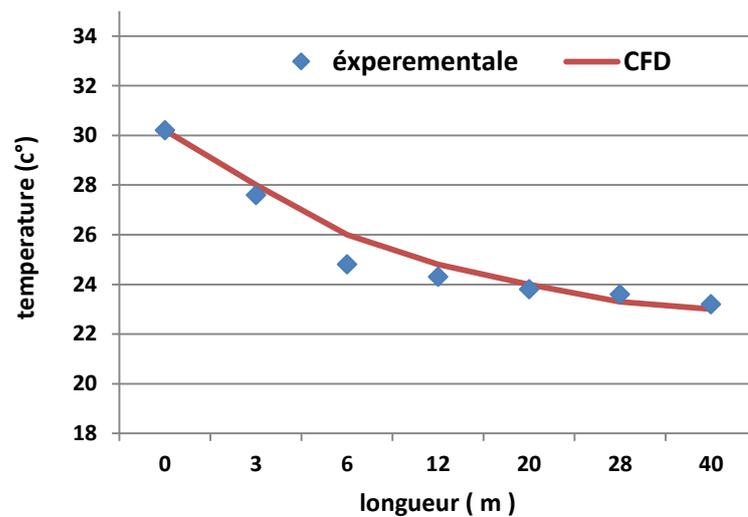
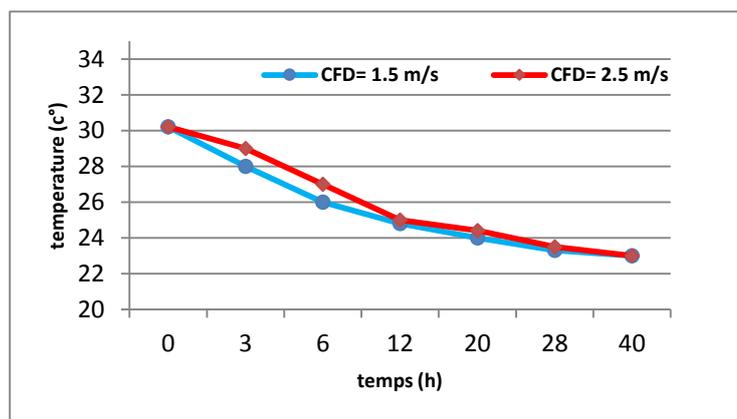


Figure.III. 10. Comparaison de la distribution de température entre l'expérimentale et simulation

La figure III.13 représente une comparaison de la répartition de la chaleur pour chacune des simulations expérimentales, où l'on note :

Les deux courbes de la simulation sont identiques pour une vitesse de 1.5 m/s, où la température a diminué de (30 C° à 25 C°) pour le mot simulation et dans la longueur de 6 mètres puis la continuité de la



l'expérimental et en grande partie vitesse de **V= 1.5** m/s, où la température a diminué de (30 C° à 25 C°) pour le mot simulation et dans la longueur de 6 mètres puis la continuité de la

jusqu'à la stabilité pour les deux à partir de 25 C° à 23 C° sur la longueur allant de (6 à 40 mètres).

Figure.III. 11. Comparaison de simulation de la distribution de température pour deux vitesses différentes $V1= 1.5 \text{ m/s}$ et $V2= 2.5 \text{ m/s}$

La courbe III .14 représente une comparaison de la distribution de température pour la simulation à deux vitesses différentes $\text{cfd} = 1.5 \text{ m/s}$ Baisse significative de la température sur la longueur de l'échangeur de 30 à 25 dans les deux profondeurs $\text{cfd} = 1.5 / \text{cfd} = 2.5$ et poursuite de la baisse de température jusqu'à ce que les deux soient stables à 23 pour les deux le long de l'échangeur .

CONCLUSION GENERALE

La géothermie est une énergie renouvelable par comparaison à d'autres technologies conventionnelles qui exploitent des systèmes de refroidissement en été et de chauffage en hiver en consommant peu d'énergie. Les échangeurs de chaleur air /sol, est aujourd'hui l'undes plus conçus pour le refroidissement de l'air en été et pour le chauffage en hiver, Il a également été démontré que cette technique n'avait pas encore été adoptée dans notre pays.

Vue de la nature climatique de notre ville, nous nous intéressons dans ce travail à l'extraction du froid par l'énergie géothermique en utilisant des échangeurs air sol.

Après l'étude de terrain dans laquelle nous avons installé l'échangeur d'air au sol, long de 40 mètres et immergé à une profondeur de 2.5m, nous avons travaillé sur la modification des données standard (longueur de l'échangeur, vitesse de l'air, profondeur ...) afin d'améliorer l'efficacité de l'échangeur de chaleur et comparer le travail expérimental avec des simulations avec le code de calcul (AnsysFluent) Nous avons atteint les résultats suivants :

Les résultats de nos simulations numériques montrent que :

- La température constante du sol a été confirmée à 3 mètres de profondeur est d'environ 24 C° dans les records de tous les temps.
- On en déduit que la température atteint son maximum à une heure de l'après-midi, alors le rendement de l'échangeur est idéal.
- Nous concluons que la longueur de l'échangeur de chaleur n'a pas d'effet significatif sur le rendement de l'échangeur de chaleur
- Une température d'air de sortie constante est obtenue à partir du système EAHE, en particulier lorsque le débit devient faible jusqu'à la valeur critique.
- Nous concluons que la distribution de température est liée à la profondeur Les résultats montrent que la température de sol diminue lorsque l'on s'éloigne de la surface du sol.
- Un bon accord avec de nombreux chercheurs a été trouvé dans tout ce qui précède ;
- Tous les résultats ci-dessus confirment que le système EAHE était capable d'atteindre le refroidissement en été ;
- Les résultats obtenus donnent un bon encouragement à utiliser l'EAHE proposé comme outil de rafraîchissement de l'air dans la région de Ouargla et même dans tout le Sahara algérien.

Ainsi, montrer un grand potentiel de développement EAHE en tant que solution au système de refroidissement passif du bâtiment dans la région de Ouargla.

Cette technique nécessite encore plus d'études et de développement par les chercheurs, ce qui sera l'accent mis sur la valeur de l'énergie qu'elle peut fournir dans le prochain travail-étude pour les résultats énergétiques donnés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. E. BENHAMZA, "Intitulé Contribution à l'étude du confort thermo-aéraulique par différents Typologies de constructions," Thesse doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.
- [2] Y. AHMOUDA, "Etude numérique des phénomènes d'écoulement et d'échanges thermiques dans un échangeur air/sol enterré de forme U," Université Mohamed Khider-Biskra, 2014.
- [3] 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, 2017.
- [4] S. Boughali, D. Bechki, D. Mennouche, H. Mahcene, H. Bouguettaia, and B. Bouchekima, "Opportunités et Challenges de la Promotion des Energies Renouvelables en Algérie," *J Hawliyat al-'Ulum wa-al-Tiknūlūjiyā*, vol. 281, pp. 1-23, 2013.
- [5] A. Hadjadj, "Etude de la faisabilité technique et économique de l'installation d'un échangeur de chaleur géothermique dans la région d'El Oued-Algérie," University of Eloued 2021, *جامعة الوادي*.
- [6] C. M. Brunet, "L'énergie solaire à l'épreuve du développement durable," Polytechnique Montréal, 2021.
- [7] D. Moya, C. Aldás, and P. Kaparaju, "Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 889-901, 2018.
- [8] O. HAMDI, "Contribution à l'étude de l'efficacité d'un système géothermique (air-sol) placé dans une zone aride «cas de la région de Biskra»,» Université Mohamed Khider–Biskra, 2020.
- [9] A. Atia, A. Hadjadj, B. Benhaoua, N. Lebbihiat, and A. Brima, "A Review of Studies on Geothermal Energy System Applied on Sub-Saharan Climate Regions," *Water Energy International*, vol. 60, pp. 63-68, 2017.
- [10] H. DJALAB, "CHAUFFAGE DE SERRE PAR ENERGIE GEOTHERMIQUE," Univ M'sila, 2020.
- [11] F. Fadila, "Potentiels et perspectives des énergies renouvelables en Algérie) Expériences de certains pays."
- [12] S. ROUIDJA and I. DEHMOUS, "Analyse de comportement des modeles ALADIN et AROME durant la vague de chaleur qui a touche la wilaya de Ouargla en juillet 2018," *JAMA*, vol. 3, pp. 23-25, 2019.
- [13] N. SAIFI and N. SETTOU, "Contribution A La Conception Des Bâtiments A Faible Consommation D'énergie Dans Les Zones Arides," 2015.

- [14] M. Benhammou and B. Draoui, "Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar-Effet de la nature du sol," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 14, pp. 219-228, 2011.
- [15] R. Jobert, "Le puits canadien ou puits provençal," *Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon* ,.
- [16] N. Moumami, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moumami, and S. Y. Ali, "Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 13, pp. 399-406, 2010.
- [17] M. Nouredine and S. Mohamed, "Theoretical and experimental study of earth heat exchanger Air/Soil: Application in the site of Biskra."
- [18] S. Nasreddine, D. Belkacem, and M. Younes, "Experimental Study of Earth to Air Heat Exchanger Performance in arid regions. First step: in-situ Measurement of Ground Vertical Temperature Profile for Different Depths," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 56, pp. 183-194, 2019.
- [19] M. Benhammou, B. Draoui, M. Zerrouki, and Y. Marif, "Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate," *Energy conversion management*, vol. 91, pp. 1-11, 2015.
- [20] A. Sehli, A. Hasni, and M. Tamali, "The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 496-506, 2012.
- [21] P. Hollmuller, "Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments," University of Geneva, 2002.
- [22] S. Thiers, "Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive," École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.
- [23] K. K. Agrawal, R. Misra, G. D. Agrawal, M. Bhardwaj, and D. K. Jamuwa, "Effect of different design aspects of pipe for earth air tunnel heat exchanger system: A state of art," *International Journal of Green Energy*, vol. 16, pp. 598-614, 2019.
- [24] N. Sakhri, Y. Menni, A. Chamkha, M. Salmi, and H. Ameer, "Earth to Air Heat Exchanger and Its Applications in Arid Regions - An Updated Review," *TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science*, vol. 64, pp. 83-90, 2020.
- [25] K. K. Agrawal, G. D. Agrawal, R. Misra, M. Bhardwaj, and D. K. Jamuwa, "A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of Earth air tunnel heat exchanger," *Energy and Buildings*, vol. 176, pp. 120-138, 2018.
- [26] K. K. Agrawal, G. D. Agrawal, R. Misra, M. Bhardwaj, and D. K. Jamuwa, "A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of earth air tunnel heat exchanger," *Energy Buildings*, vol. 176, pp. 120-138, 2018.

- [27] A. Hadjadj, B. Benhaoua, A. Atia, A. Khechekhouche, N. Lebbihiat, and A. Rouag, "Air Velocity Effect on Geothermal Helicoidally Water-Air Heat Exchanger under El Oued Climate -Algeria," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 20, p. 100548, 2020/04/15/ 2020.
- [28] 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 Technology*, vol. 35, pp. 279-288, 2017.
- [29] N. Hatraf, F. Chabane, A. Brima, N. Moummi, and A. Moummi, "Parametric study of to design an earth to air heat exchanger with experimental validation," *Engineering Journal*, vol. 18, pp. 41-54, 2014.
- [30] S. Nasreddine, D. Belkacem, and M. Younes, "Experimental Study of Earth to Air Heat Exchanger Performance in arid regions. First step: in-situ Measurement of Ground Vertical Temperature Profile for Different Depths," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* vol. 56, pp. 183-194, 2019.
- [31] B. Mohammed, D. Balkacem, and M. Saharien, "Determination of the Temperature in Depth of Soil for the Region of Adrar Effect of the Soil Nature," *ISESCO JOURNAL of Science and Technology*, vol. 8, pp. 61-66, May 2012.
- [32] J. Han, B. Xu, P. Li, A. Kumar, and Y. Yang, "Experimental study of a novel thermal storage system using sands with high-conductive fluids occupying the pores," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2014, p. V06BT07A053.
- [33] A. Atia, A. Hadjadj, B. Benhaoua, N. Lebbihiat, and A. Brima, "A Review of Studies on Geothermal Energy System Applied on Sub-Saharan Climate Regions," *Water and Energy International*, vol. 60, pp. 63-68, 2017.
- [34] N. Sakhri, Y. Menni, and H. Ameur, "Experimental investigation of the performance of earth-to-air heat exchangers in arid environments," *Journal of Arid Environments*, vol. 180, p. 104215, 2020/09/01/ 2020.
- [35] N. Rosa, N. Soares, J. Costa, P. Santos, H. J. S. E. T. Gervásio, and Assessments, "Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate," vol. 38, p. 100649, 2020.
- [36] M. Khabbaz, B. Benhamou, K. Limam, P. Hollmuller, H. Hamdi, and A. Bennouna, "Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate," *Energy Buildings*, vol. 125, pp. 109-121, 2016.
- [37] M. E. G. Benhamza, A. Brima, S. Houda, and N. Moummi, "An experimental and a numerical study of horizontal earth-air heat exchanger in a hot climate," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 10, pp. 82-89, 2017.

- [38] M. Dabaieh and A. A. Serageldin, "Earth air heat exchanger, Trombe wall and green wall for passive heating and cooling in premium passive refugee house in Sweden," *Energy Conversion Management*, vol. 209, p. 112555, 2020.
- [39] A. A. Serageldin, A. K. Abdelrahman, and S. J. E. c. Ookawara, "Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation," *Energy conversion management*, vol. 122, pp. 25-38, 2016.