



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

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
ABDESSELAM Haythem

Le :

Simulation numérique des échanges thermiques en régime transitoire entre un échangeur enterré et le sol; Etude de la saturation du sol.

Jury :

Mr. MOUMMI Nouredine	Pr	Université de Biskra	Président
Mr. LABED Adnane	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Mr. BENCHABANE Adel	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2020 - 2021

Dédicace

*Je dédie ce travail
A ma chère mère.
A mon cher père.*

*Qui n'ont jamais cessé, de prier pour moi, de me soutenir et
de m'épauler à tout instant et grâce à Dieu puis à leurs
efforts j'ai pu atteindre mes objectifs.*

*A mes frères et mes sœurs pour leur soutien moral et leurs
conseils très précieux tout au long de mes études.*

*A mes amis (Mahmoud Kalfali, Djamel Eddine Ghuettiani,
Sif Elislam Hani, Amine achoura, Guerbazi Mohamed El-
amine, Bouzidi Sif Eldinne et Haïthem Elbah) sans oublier
mes camarades de Génie mécanique pour leurs aides et
supports opportuns.*

Haythem

Remerciements

Je remercie Dieu, par qui les bonnes actions sont accomplies, qui m'a aidé à terminer ce travail.

*Puis mes remerciements vont tout particulièrement à mon encadreur Monsieur le professeur **LABED Adnane** pour avoir si bien assuré la direction de ce mémoire en me guidant, me corrigeant et m'encourageant à le réaliser de la meilleure manière possible; Merci du fond du coeur.*

*Je remercie également tous les membres du jury Monsieur le professeur **Moummi Noureddine** et Monsieur le professeur **Benchabane Adel** pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire.*

Egalement l'équipe pédagogique du département de "Génie mécanique" qui m'a été d'une aide tellement utile et inestimable.

Mes derniers remerciements vont à toutes celles et ceux qui ont pu contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Résumé

Quelle que soit la température de l'atmosphère à la surface de la terre, l'inertie du sol lui permet de maintenir une température constante à certaines profondeurs. Cette caractéristique peut être exploitée dans la climatisation et le chauffage à l'aide d'un échangeur géothermique disposé en serpentif et enterré à des profondeurs déterminées.

Dans notre étude, nous avons étudié l'interaction thermique entre l'échangeur et le sol entourant, à savoir la saturation du sol. Pour cela, nous avons proposé un modèle d'analyse pour simuler ce phénomène. Le modèle étudié nous a permis d'étudier l'effet des différents facteurs (diamètre du tube, longueur du tube, type de sol, temps de fonctionnement) sur la quantité de dissipation thermique dans le sol.

Mots clés: Géothermie, échangeur enterré, eau/sol, saturation de sol.

Abstract

Whatever the temperature of the atmosphere at the earth's surface, the inertia of the ground allows it to maintain a constant temperature at certain depths. This characteristic can be exploited in air conditioning and heating using a geothermal exchanger arranged in curvy shape and buried at determined depths.

In our study, we investigated the thermal interaction between the exchanger and the surrounding ground, namely ground saturation. For this, we have proposed an analysis model to simulate this phenomenon. The model studied allowed us to study the effect of different factors (tube diameter, tube length, type of ground, operating time) on the amount of heat dissipation in the ground.

Keywords: Geothermal energy, underground heat exchanger, water / soil, soil saturation.

ملخص

مهما كانت درجة حراره الجو على سطح الارض فان عطالة التربة تسمح لها بالمحافظة على درجة حرارة ثابتة في اعماق معينه. هذه الخاصية يمكن استغلالها في مجالات عدة مثل التكييف والتدفئة باستخدام مبادل حراري أرضي مرتب بشكل معين ومدفون في أعماق محددة.

في دراستنا، ركزنا على التفاعل الحراري بين المبادل والتربة المحيطة به، خاصة فيما يتعلق بتشبع التربة. ولهذا الغرض اقترحنا نمودجا تحليليا لمحاكاة هذه الظاهرة، إذ سمح لنا هذا النمودج بدراسة مدى تأثير عوامل معينة (كقطر أنبوب المبادل، طول الأنبوب، نوعية التربة المحيطة و وقت التشغيل) على كمية تبديد الحرارة في التربة المحيطة بالمبادل.

كلمات مفتاحية: الطاقة الحرارية الجوفية، المبادل الحراري الجوفي، الماء / التربة، تشبع التربة.

Table de matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table de matières	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Nomenclature	xi
Introduction générale	1

Chapitre I : La Géothermie

I.1. Introduction :	4
I.2. La géothermie :	4
I.2.1. Histoire de la géothermie :	5
I.3. Les ressources géothermiques en Algérie :	6
I.3.1. La géothermie en Algérie :	6
I.3.2. Les zones géothermiques En Algérie :	6
I.4. Généralités sur la géothermie :	7
I.4.1. Flux géothermique :	7
I.4.2. Principe de la géothermie :	8
I.5. Différents types de géothermie et potentiels d'utilisation :	9
I.5.1. Géothermie haute énergie ($T^{\circ}C < 150$) :	9
I.5.2. Géothermie moyenne énergie ($T^{\circ}C : 90 \text{ à } 150$) :	9
I.5.3. Géothermie basse énergie ($T^{\circ}C : 30 \text{ à } 90$) :	9
I.6. Analyse des paramètres :	10
I.6.1. Capacité calorifique du sol :	10
I.6.2. La conductivité thermique du sol :	11
I.6.3. Longueur des tubes :	11

I.6.4. Température de sortie :.....	11
I.6.5. Débit :	11
I.6.6. La qualité du sol et le taux d'humidité :	12
I.6.7. Diamètres des tubes :.....	12
I.6.8. Distance entre tubes :	12
I.6.9. La profondeur d'enfouissement :.....	12
I.6.10. Autres paramètres	13
I.7. Importance de la géothermie	13
I.8. L'utilisation de l'énergie géothermie :.....	13
I.9. Les avantages et les inconvénients de la géothermie	13

Chapitre II : Synthèse bibliographique

II.1. Introduction :.....	16
II.2. Synthèse bibliographique :.....	16

Chapitre III : Simulation, Résultats et discussion

III.1. Introduction :	27
III.2. Paramètres de dimensionnement :	27
III.3. Logiciel CFD :	27
III.3.1. Définition du CFD :.....	27
III.3.2. Comment fonctionne le CFD :	27
III.3.3. Présentation du logiciel de simulation «ANSYS Fluent» :.....	29
III.3.4. Equations générales de l'outil Fluent (ANSYS) :	30
III.3.4.1. Equation de continuité :	30
III.3.4.2. Equation de quantité de mouvement :	30
III.3.4.3. Equation de conservation d'énergie :	30
III.4. Equations de problème :	31
III.5. Caractéristiques :	32
III.6. Géométrie et conditions initiales et aux limites :.....	32

III.7. Maillage :	33
III.8. Etude 3D :	34
III.8.1. Choix du régime d'étude (stationnaire/transitoire) :	34
III.9. Variation de la température en régime transitoire (coupe longitudinale 2D) :	36
III.9.1. Température de l'eau en fonction de la longueur de tube :	36
III.9.2. Distribution de la température dans le sol:	37
III.10. Variation de la température en coupe transversale 2D :	39
III.10.1. Diamètre 1.6 cm :	39
III.10.2. Diamètre 04 cm :	42
III.10.3. Diamètre 11 cm :	45
III.11. Conclusion :	48
Conclusion générale	51
Références	

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques de quelques sources thermiques du Nord de l'Algérie.	6
Tableau III.1 : Caractéristiques du sol.	32
Tableau III.2 : Caractéristiques du tube.	32

Liste des figures

Figure I.1 : Chaleur interne de la terre	4
Figure I.2 : Carte de gradient géothermique du Sud algérien.....	8
Figure I.3 : Principe de la géothermie	8
Figure I.4 : Géothermie haute et moyenne énergie	9
Figure I.5 : La conductivité thermique de quelque sol en fonction de la teneur en eau.....	11
Figure I.6 : Différentes utilisations de la géothermie.....	14
Figure II.1 : Schéma représentatif d'un échangeur de chaleur air-sol intégré à un bâtiment ..	17
Figure II.2 : Effet de la longueur du tuyau sur la température de sortie d'air.....	18
Figure II.3 : Evolution du rendement moyen et du coefficient de performance en fonction de la longueur du tuyau	18
Figure II.4 : Effet du diamètre du tuyau sur le rendement moyen journalier et le coefficient de performance	18
Figure II.5 : Variation de la température de sortie d'air en fonction de la vitesse de l'air.....	18
Figure II.6 : Variation du facteur de déclassement en fonction du diamètre du tuyau pour différentes heures de fonctionnement.....	19
Figure II.7 : Evolution du rendement moyen et du coefficient de performance en fonction de la vitesse de l'air	19
Figure II.8 : Evolution du facteur de déclassement en fonction de la vitesse de l'air pour différentes heures de fonctionnement.....	19
Figure II.9 : Evolution du facteur de déclassement en fonction de la durée de fonctionnement.	19
Figure II.10 : Vu de l'échangeur.....	20
Figure II.11 : Schéma d'enfouissement de l'échangeur air / sol enterré.....	21
Figure II.12 : Validation des résultats analytiques par ceux de l'expérimentale.....	21
Figure II.13 : Schéma du cylindre creux semi-infini étudié.....	22
Figure II.14 : Température radiale du sol à l'entrée de l'EAHE pour différentes durées de fonctionnement continu.	23
Figure II.15 : Le schéma montre la subdivision du tuyau EAHE et du sol en plusieurs couches selon le modèle GRBM, où i, j et k sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon.....	24
Figure II.16 : Résultats de la simulation avec CFD.....	25
Figure III.1 : Processus du fonctionnement d'un code CFD.....	28
Figure III.2 : Les étapes du prétraitement d'un code CFD.	28

Figure III.3 : ANSYS FLUENT.	29
Figure III.4 : L'interface ANSYS Design Modeler pour le dessin de la géométrie.	32
Figure III.5 : Position de tube dans le sol.	33
Figure III.6 : Maillage : interface d'ANSYS Meshing.	33
Figure III.7 : Variation de la température de l'eau après 8h pour deux cas ; stationnaire et transitoire (D= 11cm, sol en argile, tube en PVC et Qm=1Kg/s).	34
Figure III.8 : Distribution des températures de l'eau et du sol après 8h pour deux cas ; stationnaire et transitoire (D= 11cm, sol en argile, tube en PVC et Qm=1Kg/s).....	35
Figure III.9 : Coupe transversale représentant la distribution de la température dans un échangeur géothermique, sol en argile, tube en PVC de diamètre 11 cm et un débit de 1Kg/s (après 2 heures, 4 heures, 6 heures et 8 heures).	36
Figure III.10 : Variation de la température de l'eau en fonction de la longueur d'un tube en PVC (de 11cm de diamètre) enterré dans un sol en argile avec un débit de 1Kg/s (pendant 2 heures, 4 heures, 6 heures et 8 heures).	37
Figure III.11 : Coupe verticale de la distribution de la température du sol à une distance de deux fois le rayon de l'échangeur après 8 heures.....	38
Figure III.12 : La variation de la température du sol à une distance de deux fois le rayon du tube en fonction de la longueur du tube en PVC, (D=11cm, sol argileux et Qm=1Kg/s, après 2 heures, 4 heures, 6 heures et 8 heures.).	38
Figure III.13 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (diamètre du tube 1.6 cm, type de sol (sable humide). ...	39
Figure III.14 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (diamètre du tube 1.6 cm, sol Argileux).	40
Figure III.15 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (diamètre du tube 1.6 cm, type de sol :limon argilo-Sableux).	40
Figure III.16 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol après 8 heures (D=1.6 cm, types de sol : sable humide, argile, limon argilo-sableux).....	41
Figure III.17 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=4 cm, type de sol (sable humide)).....	42
Figure III.18 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=4 cm, sol Argileux).	43

Figure III.19 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=4 cm, sol : limon argilo-sableux).....	44
Figure III.20 : Distribution de la température du sol après 8h de fonctionnement à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D= 04 cm, pour 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux)	44
Figure III.21 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=11 cm, type de sol (sable humide)).....	45
Figure III.22 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=11 cm, Sol=Argileux)	46
Figure III.23 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=11 cm, Sol (limon argilo-sableux).	46
Figure III.24 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol après 8 heures de fonctionnement pour différents types de sol (D=11 cm).	47
Figure III.25 : Distribution de la température dans le sol pendant 24h de fonctionnement (D= 11 cm, Sol Argileux).	48

Nomenclatures

➤ *Symboles latins :*

- Cs** capacité thermique du sol [J/k].
- c_i** capacité thermique [j/k.m³].
- Cp** La chaleur spécifique à pression constante [J/ (kg • K)].
- Dh** Diamètre hydraulique [m].
- D** Diamètre du tube [m].
- F** force par unité de volume [N/m³]
- g** l'accélération de pesanteur [m. s⁻²].
- K** Conductivité thermique [W/m.K].
- L** Longueur du conduit [m].
- p** Pression du fluide [Pa].
- Ti** Température [°C].
- u, v, w** Composantes de la Vitesse [m/s].
- q** Puissance volumique dissipée.
- x, y ,z** Coordonnées cartésiennes [m].

➤ *Symboles grecs :*

- α** Diffusivité thermique du fluide [m² /s].
- β** Coefficient d'expansion thermique [1/K].
- μ** Viscosité dynamique du fluide [kg/m.s].
- ν** Viscosité cinématique du fluide [m² /s].
- ρ** Masse volumique [kg/m³].
- ∅** Fraction volumique solide.

Introduction générale

Introduction générale

Le dernier centenaire a vu un grand développement dans la maîtrise et l'exploitation des ressources d'énergie tel le charbon, le pétrole, le gaz ainsi que le nucléaire ce qui a permis une hausse considérable dans le niveau de vie des populations, spécialement dans les pays développés.

D'ici 2025, la population mondiale passera de 6,7 à 8 milliards voir plus d'êtres humains, et inéluctablement la consommation d'énergie va tout aussi augmenter.

Les stocks d'énergie dite fossile ne sont pas éternels, estimés à 50 ans pour le pétrole, 60 ans pour le gaz et l'uranium et tout au plus à 150 ans pour le charbon, et leur exploitation actuelle est responsable d'une grande émission de gaz à effet de serre.

Le monde est donc confronté à une double menace liée à l'exploitation de ces énergies: d'une part ne pas disposer d'approvisionnements suffisants et durables à des prix acceptables (épuisement des ressources), d'autres parts nuire à l'environnement par l'augmentation de l'effet de serre liée à leur sur consommation [1].

Les énergies dites renouvelables sont la solution idéale contre ces menaces, les énergies renouvelables désignent toutes les sources d'énergies inépuisables telle que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique ainsi que l'énergie géothermique, cette dernière est l'une des plus propres, des plus accessibles et des moins chères du monde entier.

Parmi les systèmes techniques utilisés dans l'exploitation de l'énergie géothermique se distingue l'Echangeur de chaleur géothermique Eau-Sol, il s'agit d'un système placé à une profondeur suffisante exploitant la chaleur du sous- sol dont les températures sont presque toujours constantes tout le long de l'année.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier, analyser évaluer l'effet combiné de la température du l'échangeur et de celle de la surface du sol sur la distribution de température dans le sol, voir le temps de saturation du sol.

Le manuscrit est réparti en trois 03 chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré a donné des généralités sur la géothermie, la présentation des différentes ressources géothermiques en Algérie, ainsi que des notions techniques sur l'échangeur de chaleur eau-sol et sur d'autres types d'échangeurs, leur principe de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients...
- ✓ Le deuxième chapitre comporte une étude bibliographique concernant les principaux travaux de recherches scientifiques dans ce domaine.

- ✓ Enfin, le troisième chapitre sera consacré à la présentation et la discussion des résultats de la simulation effectuée pour illustrer les effets de certains paramètres sur les échanges thermiques entre un échangeur enterré et le sol.

Chapitre I : La Géothermie

I.1. Introduction :

L'énergie géothermique n'est pas nouvelle; Cependant, la mise en œuvre sérieuse et généralisée de cette technologie verte a augmenté ces dernières années. Le principe est très simple ;le globe terrestre a une très grande réserve d'énergie thermique, mais pas nécessairement infinie, qui provient du noyau. Cette énergie thermique peut être extraite et utilisée dans diverses applications. Ces applications comprennent la production d'électricité, le chauffage et le refroidissement des locaux et de l'eau d'irrigation. L'application dépend entièrement de la gamme de température du sol, qui définit les différentes utilisations possibles de cette source d'énergie.

I.2. La géothermie :

La géothermie est principalement la science qui étudie les phénomènes thermiques internes de la terre. Par extension, ce terme désigne également toutes les applications techniques qui permettent l'exploitation des sources d'énergie géothermique. Il ne dépend pas non plus des conditions météorologiques (contrairement à l'énergie éolienne ou solaire par exemple), ce qui permet de l'utiliser d'une manière continue et durable lorsqu'elle est bien exploitée. [2]

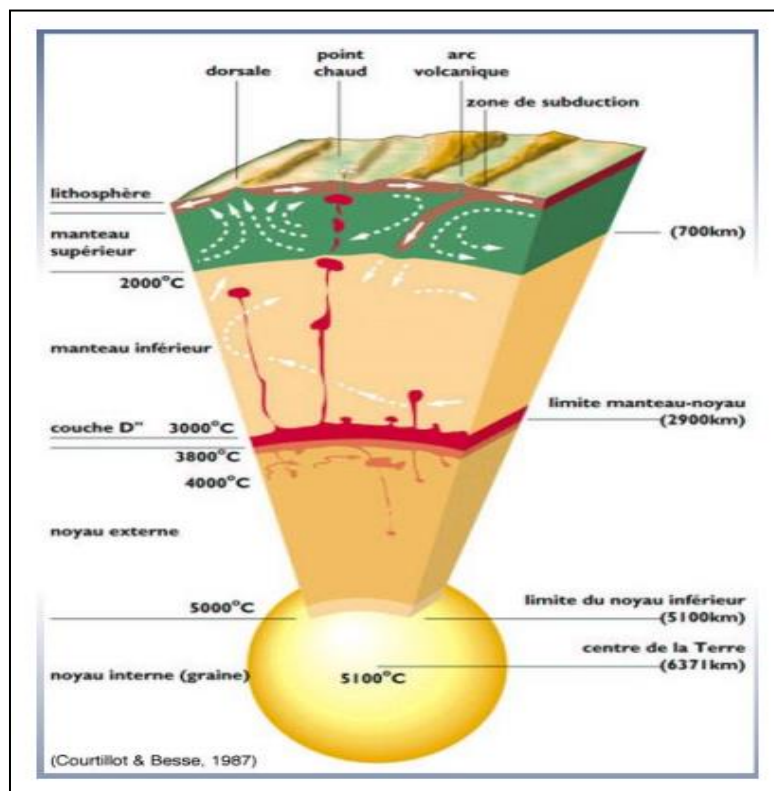


Figure I.1 : Chaleur interne de la terre. [3]

I.2.1. Histoire de la géothermie :

L'énergie géothermique a toujours été une source d'énergie utilisée par les humains. Mais ce n'est qu'à la fin du XIXe siècle que cette énergie a été «redécouverte» et appliquée à l'échelle industrielle. Le XIXe siècle a marqué l'origine industrielle de la géothermie. Deux facteurs expliquent cette évolution: d'une part, les progrès scientifiques permettent de mieux connaître le sous-sol, d'autre part, les progrès technologiques permettent le développement à la fois, des techniques de forage et des nouveaux systèmes d'exploitation de l'énergie. Auparavant, avant 1800, on se contentait d'exploiter la chaleur telle qu'elle arrivait en surface, Surtout dans les sources chaudes; la véritable révolution industrielle après 1800 comprendra la recherche, l'exploration et l'excavation pour le chauffage en profondeur, ainsi que la modification des équipements en Italie pour mieux utiliser ou transformer cette énergie, qui est importante pour l'approvisionnement urbain utilisant l'énergie géothermique. Le réseau thermique sera développé ultérieurement en France, en Italie, en Roumanie, en Union soviétique, en Turquie, en Géorgie, Chine Amérique,

Dix ans plus tard, travaux de forage permirent d'augmenter la quantité de vapeur qui plus tard conduira à fabriquer de l'électricité. Parmi les premiers usages industriels de la géothermie, on peut citer aussi l'extraction du sel durant le dix-huitième siècle En France, le premier forage géothermique. A 1900 En France possède la source thermo minérale la plus chaude d'Europe (82°C) les archives font mention d'un réseau qui distribuait l'eau géothermale à quelques maisons Cette période correspond à une émergence des applications industrielles de la géothermie. De grands progrès ont été réalisés depuis le début du siècle dans la connaissance des structures du sous-sol grâce au perfectionnement des méthodes d'exploration, notamment géophysiques et géochimiques. Du début du siècle à 1960, on aura exploré 23 pays et identifié une cinquantaine de champs Haute énergie, ce qui correspondra à un total de près de 400 MW installés.

En France, avec le développement de la technologie dite du «double pic», la première grande expérience a débuté en 1969, qui a permis de développer l'un des aquifères profonds du bassin parisien. Entre 1980 et 1986, des opérations seront menées en France, ce qui donnera naissance à des zones spécifiques du réseau de chaleur assuré par la géothermie en France. Aujourd'hui, la baisse des coûts énergétiques traditionnels a fortement ralenti le développement de la géothermie basse énergie. Néanmoins, certains pays ont adopté une politique volontariste de développement de ce type d'énergie, notamment pour des raisons environnementales. En réalité, la production mondiale d'électricité géothermique va

commencer à croître rapidement pendant les vingt années suivantes. L'augmentation annuelle moyenne est alors de 17,5 % . [4]

I.3. Les ressources géothermiques en Algérie :

I.3.1. La géothermie 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 Ouelmenet 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. [5]

I.3.2. Les zones géothermiques En Algérie :

Sources thermiques	Région	Facièschimiques	Résidus secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H.chellala	Guelma	Sulfatémagnésien	1600	98	100
H.Bouhadjar	Ain-Temouchent	Chlorurésodique	3210	66.5	-
H.Bouhanifia	Mascara	Bicarbonatésodique	1400	66	-
H.Boutaleb	Setif	Chlorurésodique	3416	52	-
H.Essalihine	Khenchela	Chlorurésodique	2082	70	-
H.Salhine	Skikda	Sulfatémagnésien	2046	55	-
H.SudiBouAbdelah	Relizane	Chlorurésodique	1194	51	-
H.Della	M'sila	Sulfatésodique	1980	42	-
H.Rabi	Saida	Chlorurésodique	1524	47	-
H.Sillal	Bejaia	Chlorurésodique	2221	46	-
H.Ben Haroun	Constantine	Chlorurésodique	3762	42	10

Tableau I.1 : Caractéristiques de quelques sources thermique du Nord de l'Algérie. [6]

En Algérie, la recherche géothermique est principalement menée dans le nord. Algériens, «carte géothermique préliminaire du nord de l'Algérie. Ces études montrent Il y a beaucoup de sources chaudes dans le nord de l'Algérie. Il y a près de 200 sources L'inventaire a été réalisé, réparti dans toute la partie nord de l'Algérie, dont la plupart étaient répartis dans le nord-est (tableau 1). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Omanie, de la Kabylie et du Constantinois. [6]

I.4. Généralités sur la géothermie :

I.4.1. Flux géothermique :

Grace à l'étude des dégagements thermiques à la surface de notre planète, le flux de chaleur, appelé aussi flux géothermique à travers la croûte terrestre (continentale et marine), est provoqué par la chaleur transférée du manteau à la base de la croûte terrestre ainsi que par la désintégration des matériaux radioactifs contenus dans la croûte

Pour chaque continent, le flux géothermique moyen dans le craton stable est compris entre 40 MW/m² et varie entre 70 MW/m² dans la troisième province structurale. Une partie de la chaleur de la croûte terrestre provient de l'intérieur de la terre. Une grande quantité de chaleur est stockée dans le noyau et le manteau de la terre. Une petite partie de cette chaleur est dissipée à la surface, en particulier dans les zones volcaniques et sismiques. D'autre part, la majeure partie de la chaleur de la croûte terrestre provient de la radioactivité de certaines des roches qui la composent. La désintégration des éléments radioactifs représente à elle seule plus de 90% du flux de chaleur terrestre. Les 10% restants du flux de chaleur semblent être dus à:

- La chaleur dégagée par réaction chimique exothermique à l'intérieur de la croûte
- La friction au niveau des failles causées par les tensions tectoniques.
- La chaleur dégagée par cristallisation ou solidification des roches en fusion au cours du refroidissement.

La chaleur se déplace du corps le plus chaud au corps le plus froid jusqu'à ce que la température se stabilise. Tous les corps (solide, liquide ou gazeux) subissent ce phénomène d'échange de chaleur. La chaleur se transmet par conduction, convection et rayonnement. Ces modes d'échange sont bien souvent "cumulés" [7]

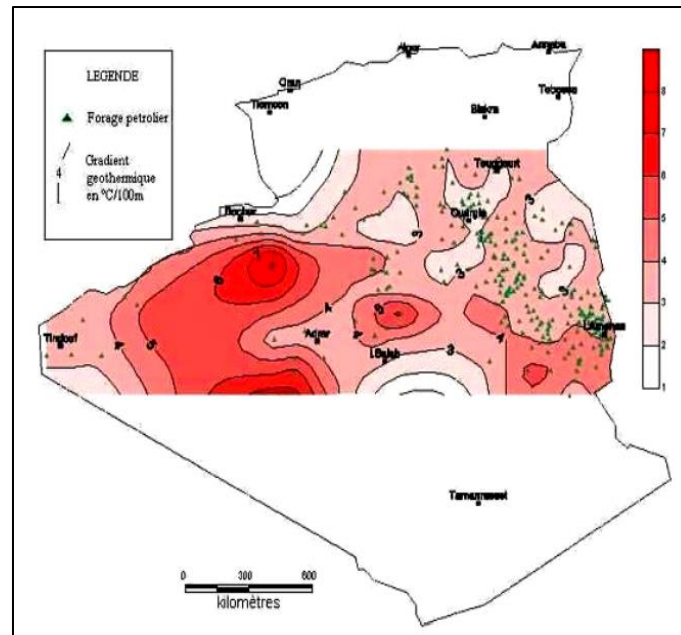


Figure I.2 : Carte de gradient géothermique du Sud algérien [7]

I.4.2. Principe de la géothermie :

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous sol (nappes d'eau). L'énergie géothermique est fournie par la chaleur interne de la terre, produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre, pour une faible part, par les échanges thermique avec les zones interne de la terre. [8]

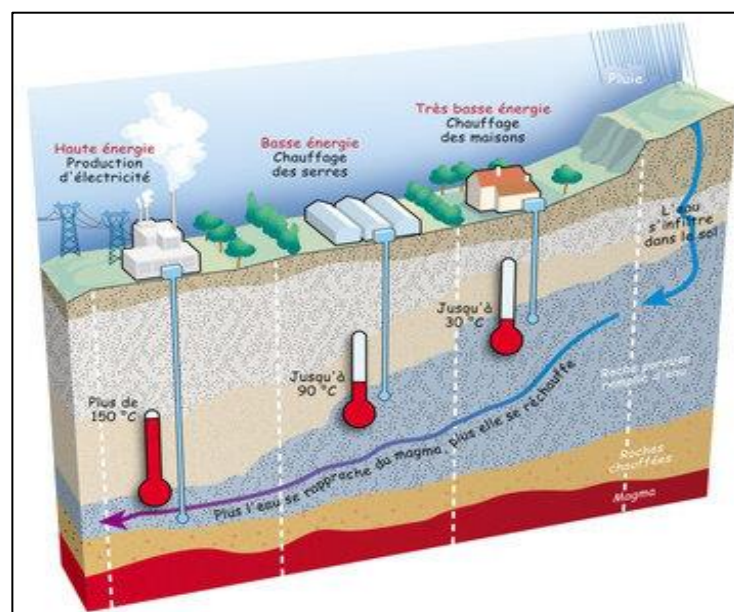


Figure I.3 : Principe de la géothermie. [9]

I.5. Différents types de géothermie et potentiels d'utilisation :

I.5.1. Géothermie haute énergie ($T^{\circ}\text{C} < 150$) :

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150°C . Les réservoirs, généralement localisés au-delà de 1500 mètres de profondeur, se situent dans des zones de gradient géothermique anormalement élevé. Lorsqu'il existe un réservoir, le fluide peut être capté sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production. [10]

I.5.2. Géothermie moyenne énergie ($T^{\circ}\text{C}: 90\text{à}150$) :

L'énergie géothermique de température moyenne ou d'enthalpie moyenne existe sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide, et la température est comprise entre 90 et 150°C . On le trouve dans des zones propices à la géothermie à haute énergie, mais la profondeur est inférieure à 1000 mètres. Il est également situé dans un bassin sédimentaire, avec une profondeur allant de 2000 à 4000 mètres. Afin de produire de l'électricité, une technologie utilisant des fluides intermédiaires est nécessaire. [10]

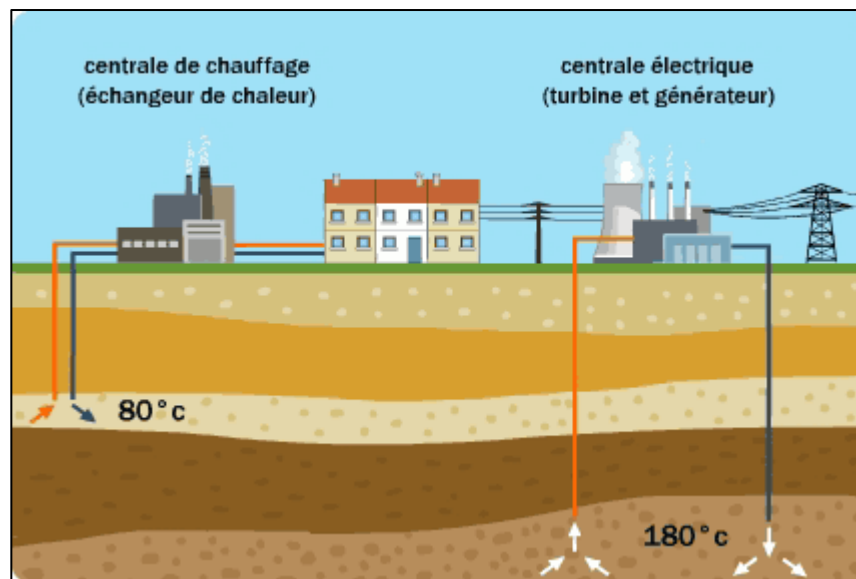


Figure I.4 : Géothermie haute et moyenne énergie. [11]

I.5.3. Géothermie basse énergie ($T^{\circ}\text{C}: 30\text{à}90$) :

Elle consiste en l'utilisation de la chaleur, par extraction d'eau chaude contenue dans les sa qui ferres profonds (1500-2000mètres) des bassinasse diment aire set d'utiliser cette eau directement (via un échangeur de chaleur) pour le chauffage. En France métropolitaine, plus de 30 réseaux de chaleur urbains sont alimentés par ce type de géothermie. Ils permettent d'économiser plus de 160000 TEP/an de combustibles fossiles. En région parisienne, l'eau de

l'aquifère profond du Dogger est captée entre 1500 et 1800 mètres de profondeur, à des températures comprises entre 55 et 85°C. [10]

I.6. Analyse des paramètres :

Le but majeur des différentes études sur la géothermie, est de comprendre le comportement soit de l'échangeur ou de la température du sol où l'on envisage de placer l'échangeur de chaleur. L'analyse approfondie de certains matériaux de référence permet de déterminer les paramètres physiques qui affectent le comportement thermique des puits canadiens.[12]

- En hiver:

L'objectif est de réchauffer l'air avant qu'il n'entre dans la maison. Pour obtenir le maximum d'échange thermique l'air devra circuler à une vitesse de 1m.s⁻¹ environ.

- En été :

L'objectif est de rafraîchir au maximum la maison en cas de forte chaleur. La maison bioclimatique a été conçue pour gérer au maximum l'apport passif du soleil par les baies vitrées et donc de créer des zones ombragées pour éviter un apport calorifique important en journée (store extérieur, plantation au sud,).

Le puits canadien ne vient qu'en complément à toutes ces mesures. Pour obtenir le maximum d'efficacité, le débit de l'air devra être plus important pour renouveler l'ensemble de l'air de la maison toutes les 2 heures. La vitesse est le plus souvent maintenue en deçà de 3 à 4 ms⁻¹.

- En intersaison :

La température de confort est comprise entre 18 et 22° et le système sera déconnecté en cas de besoin par une dérivation pour ne pas rafraichir la maison alors que la température extérieure est proche de la température de confort.

I.6.1. Capacité calorifique du sol :

La capacité thermique du sol est la moyenne pondérée de capacités respectives de ses constituants [13] :

$$C_s = \sum i X_i \rho_i c_i \quad (I.1)$$

X_i : La teneur de sol en constituant (m³/m³) ;

ρ_i : Sa masse volumique (kg/m³) ;

c_i : Sa capacité thermique (j/k.m³).

I.6.2. La conductivité thermique du sol :

La conductivité thermique du sol λ dépend de sa nature et de son teneur en eau. La courbe suivante présente la variation de la conductivité thermique (λ) des différents gros de sol en fonction de la teneur en eau. [13]

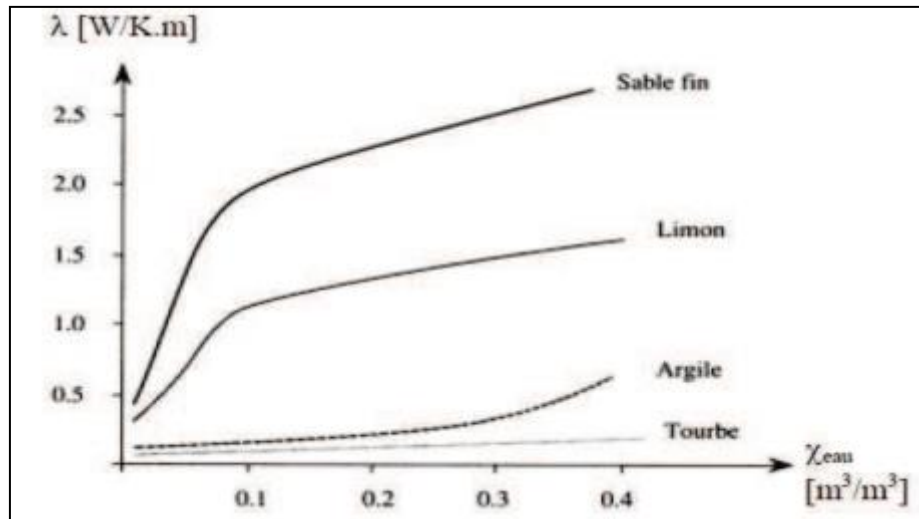


Figure I.5 : La conductivité thermique de quelque sol en fonction de la teneur en eau. [14]

I.6.3. Longueur des tubes :

La longueur des tubes du puits canadien détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'eau ou de l'air dans les tubes. Il a été démontré par plusieurs études qu'en dessous de 25 mètres de longueur (pour l'air), le puits canadien ne permet pas d'obtenir une température de sortie proche de celle du sol, car le rendement de l'échange est moyen. En revanche au-delà de 40 mètres le rendement n'augmente plus de manière significative. Il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un tube de longueur importante. [15]

I.6.4. Température de sortie :

La température de sortie d'un tube enterré est directement liée à la température du sol. Son amplitude diminue fortement avec la profondeur. Le tube doit donc être enterré assez profondément de manière à profiter au mieux de l'inertie du sol. Le type de sol n'influe pas de manière importante sur la température de sortie dans le cas d'un échangeur air-sol constitué d'un seul tube, à condition que, le débit ne soit pas trop élevé. [15]

I.6.5. Débit :

Le débit du fluide dans les tubes intervient simultanément sur l'échange convectif entre le fluide et la canalisation. Un optimum est à déterminer, le débit global devant surtout correspondre aux besoins de renouvellement d'air de la pièce ou de la zone à ventiler, dans le cas où le fluide est l'air. Lors du rafraîchissement d'été, ou les besoins en eau lors de

l'utilisation des échangeurs eau-sol pour le chauffage d'eau dans les maisons, le débit doit être plus élevé que lors du préchauffage d'hiver où seul le débit hygiénique est nécessaire. [16]

I.6.6. La qualité du sol et le taux d'humidité :

Les capacités calorifiques et conductivité du sol ont un impact important sur l'efficacité du système. Ces caractéristiques 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 possédant une capacité et une conductivité thermique supérieures à celles des autres constituants du sol. Un sol humide est plus inertielle qu'un sol sec et transmettra plus facilement sa chaleur ou sa fraîcheur à l'air dans les canalisations du puits. Cet effet peut être mis à profit pour augmenter la performance des échangeurs thermiques air. [13]

I.6.7. Diamètres des tubes :

Une augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais d'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement, le coefficient d'échange convectif chute. Ceci est dû au fait que l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite, où va être échangée la chaleur. La circulation au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol. Cet optimum est indépendant de la longueur de la canalisation. On obtiendra donc une relation directe entre le débit et le diamètre optimal. En général, pour les débits utilisés, cet optimum se situe autour des 20 cm de diamètre. [17]

I.6.8. Distance entre tubes :

La distance entre les tubes est aussi très importante, parce qu'elle influe sur la température de la portion du sol située entre ces tubes, ce qui réduit localement la capacité de stockage du sol. D'après Hollmuller(2002), 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. En tout cas, si plusieurs tubes sont placés à proximité il faut les espacer suffisamment pour que le sol puisse se régénérer. [15]

I.6.9. La profondeur d'enfouissement :

La profondeur d'enfouissement influe sur la qualité de l'isolation entre l'atmosphère et les tubes enterrés. Le calcul de la profondeur d'enfouissement dépend de la nature du sol

(conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité thermique) et de l'échange thermique entre la surface du sol et l'entourage : par radiation avec le soleil et le ciel et par convection avec l'air ambiant. Hollmullera montré en 2002, que les variations de température de l'air extérieur sont d'autant plus amorties et déphasées par le sol que la profondeur est grande. [15]

I.6.10. Autres paramètres

Certains paramètres sont peu ou pas cités par les articles qui ont été consultés. Il s'agit par exemple de la rugosité intérieure des canalisations, les propriétés physiques des canalisations, la géométrie globale du puits canadien, l'impact du rayonnement solaire sur la température du sol, le régime de fonctionnement du puits canadien.

- La rugosité intérieure des canalisations.
- Les propriétés physiques des canalisations.
- La géométrie de l'échangeur.
- Le rayonnement solaire et la surface du sol.
- Le régime de fonctionnement du puits canadien.

Le dimensionnement d'un échangeur est assez délicat du fait du nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de tubes, profondeur d'enfouissement, nature du sol, distance entre les tubes, débit de ventilation et la température d'entrée. [18]

I.7. Importance de la géothermie

Son importance est issue de l'augmentation des prix de l'énergie et le besoin d'émettre moins de gaz à effet de serre. Tout Ceci la rend plus attrayante, une énergie d'avenir, renouvelable, constante et non-polluante. [19]

I.8. L'utilisation de l'énergie géothermie :

- Rafraîchir par géocooling.
- Produire du chauffage.
- Produire de l'eau chaude sanitaire (ECS).
- Produire du chaud et du froid.
- Produire de l'électricité.
- Stocker de la chaleur.

I.9. Les avantages et les inconvénients de la géothermie

❖ Les avantages :

- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- C'est une source d'énergie quasi-continue.

- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne) et disponible dans tous les sous-sols de la planète.
- La géothermie est une énergie renouvelable et propre (pas de déchets à stocker, très peu d'émissions de CO₂).

❖ *Les inconvénients :*

- Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.
- Risque de réchauffement du site de forage.
- Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental.

[20]

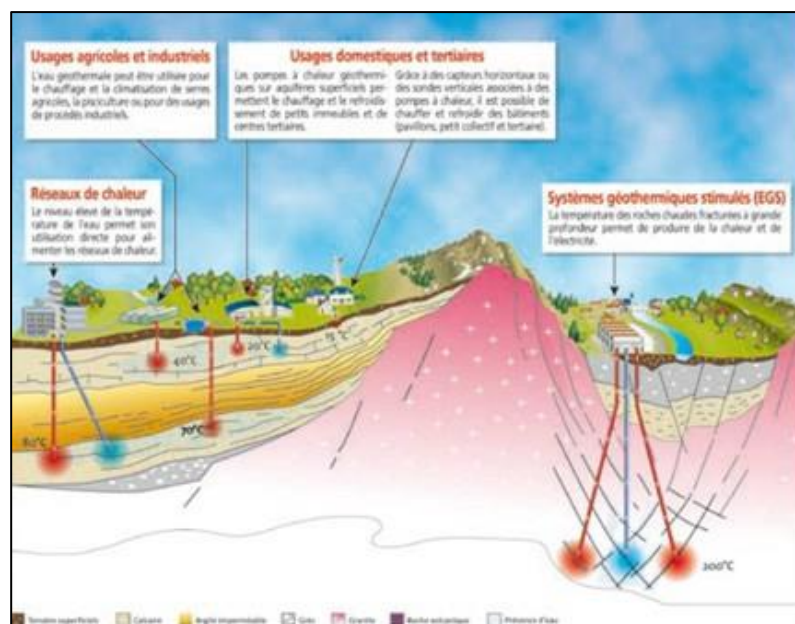


Figure I.6 : Différentes utilisations de la géothermie. [21]

Chapitre II : Synthèse bibliographique

II.1. Introduction :

La géothermie a fait l'objet de plusieurs études dans le Maghreb ces dernières années. Ce choix est justifié par la diversité des climats dans les pays du Maghreb ; des régions chaudes, d'autres plus ou moins froides ...etc. Dans ce deuxième chapitre nous allons présenter une synthèse bibliographique sur les différents travaux menés dans le domaine de l'échangeur de chaleur Air-sol, nous allons nous concentrer sur les travaux réalisés en Algérie et surtout ceux élaborés à l'université de Biskra.

II.2. Synthèse bibliographique :

❖ *Mohammed Benhammou, Belkacem Draoui en (2014) [22]:*

Cette étude a porté sur les paramètres de performance thermique de l'échangeur de chaleur air-sol (EAHE) pour le refroidissement de bâtiments, dans cette étude un modèle unidimensionnel transitoire a été développé pour le refroidissement de bâtiments sous la chaleur de l'été du Sahara algérien.

Les résultats de l'étude de ce modèle étaient en accord avec les données théoriques et expérimentales d'autres études de chercheurs dans le même domaine.

Une autre étude plus sensible et plus détaillée a été également réalisée pour étudier l'influence des paramètres géométriques et dynamiques sur les performances thermiques de l'EAHE.

✓ **Description et principe de fonctionnement :**

L'échangeur de chaleur est constitué d'un tuyau en PVC (polychlorure de vinyle) enterré dans le sol. Le tuyau enterré a une longueur de L , un diamètre intérieur de D_i et une épaisseur de 5 mm.

Le principe de fonctionnement est très simple : l'air chaud extérieur est pompé à travers le tuyau enterré à l'aide d'un ventilateur adéquat, lors de son passage dans le tuyau, l'air perd une certaine quantité de sa chaleur en l'échangeant avec celle du tuyau, ainsi l'air se refroidit au fur et à mesure de sa progression jusqu'à ce qu'il soit bien froid dans le bâtiment (Fig. II.1).

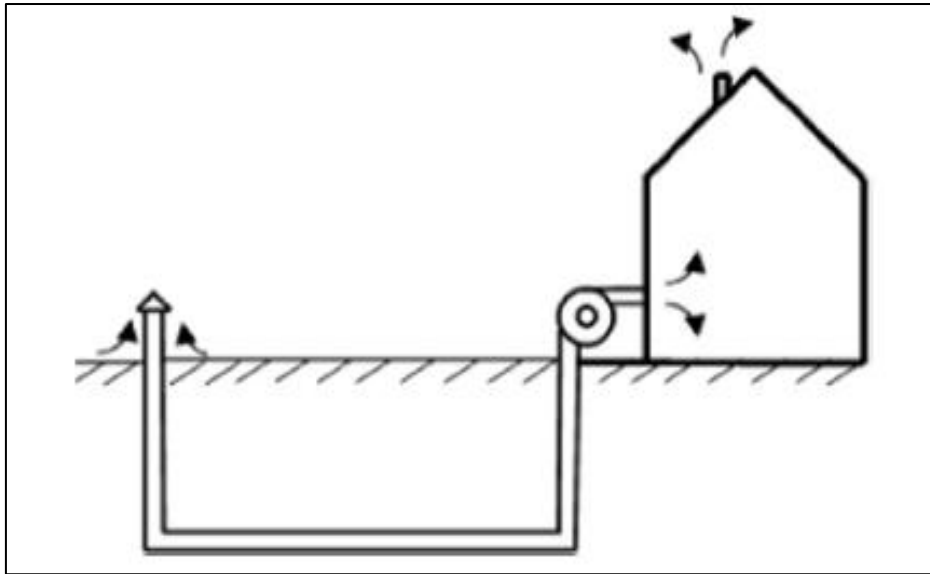


Figure II.1 : Schéma représentatif d'un échangeur de chaleur air-sol intégré à un bâtiment.

[22]

Après simulation du système étudiée et analyse des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont été tirées [22]:

- La baisse de température de l'air est plus importante lorsque la température d'entrée d'air est plus élevée.
- La température de sortie d'air est plus petite pour une plus grande longueur de tuyau d'EAHE, tandis qu'elle s'élève avec l'augmentation de la section transversale du tuyau et de la vitesse de l'air.
- L'efficacité moyenne quotidienne augmente avec l'augmentation de la longueur du tuyau, mais elle diminue lorsque la section transversale du tuyau ou la vitesse de l'air augmente.
- Le coefficient de performance baisse lorsque les dimensions géométriques du tuyau ou la vitesse de l'air augmentent et dans ce dernier cas, il baisse très rapidement. Par conséquent, il est préférable d'utiliser un réseau de canalisations parallèles suffisamment éloigné pour éviter leur interaction afin de réduire l'augmentation de la perte de charge dans le système due à l'effort de ventilation.
- La performance thermique de l'EAHE dans des conditions transitoires est plus influencée par l'augmentation de la durée de fonctionnement, du diamètre du tuyau et de la vitesse de l'air par rapport à la performance de l'EAHE en régime permanent. Pour un EAHE ayant une plus grande longueur de tuyau, les performances thermiques en conditions

transitoires sont proches de celles en conditions permanentes lorsqu'il fonctionne pendant une courte période.

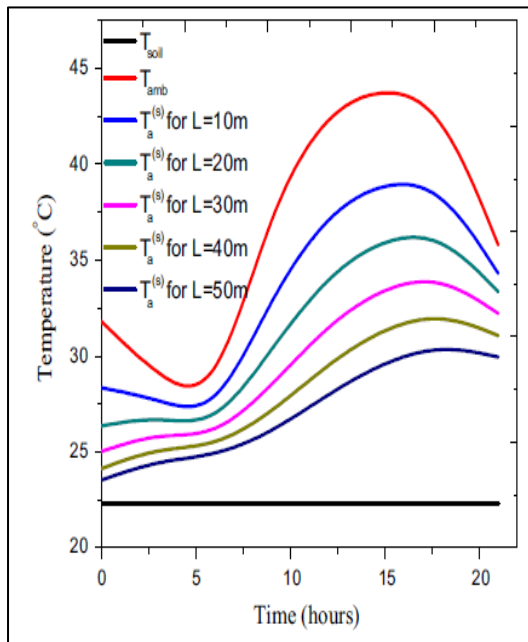


Figure II.2 : Effet de la longueur du tuyau sur la température de sortie d'air. [22]

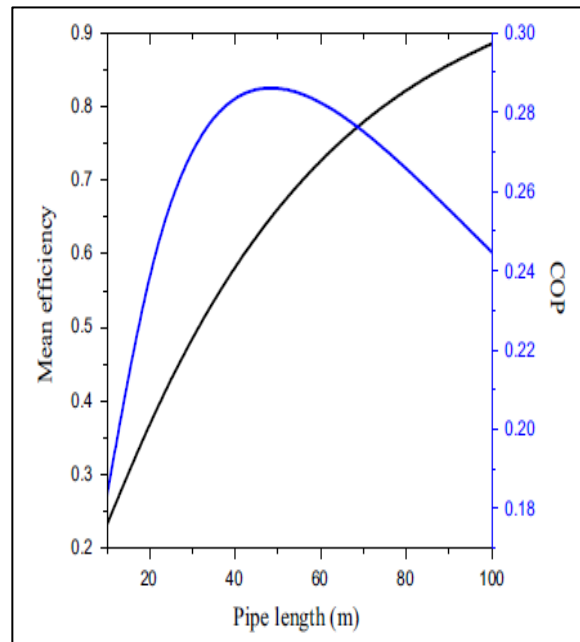


Figure II.3: Evolution du rendement moyen et du coefficient de performance en fonction de la longueur du tuyau. [22]

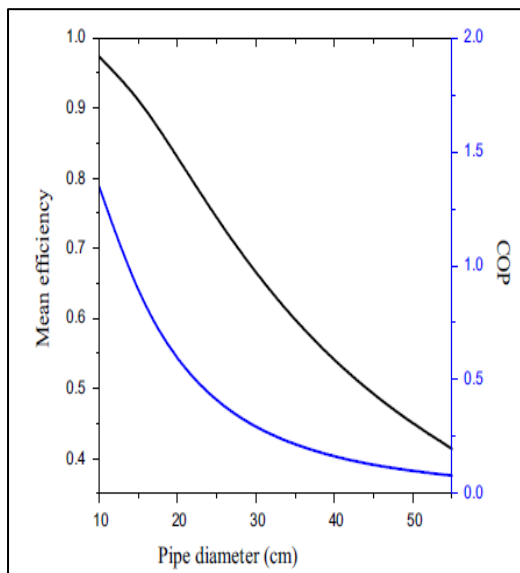


Figure II.4 : Effet du diamètre du tuyau sur le rendement moyen journalier et le coefficient de performance. [22]

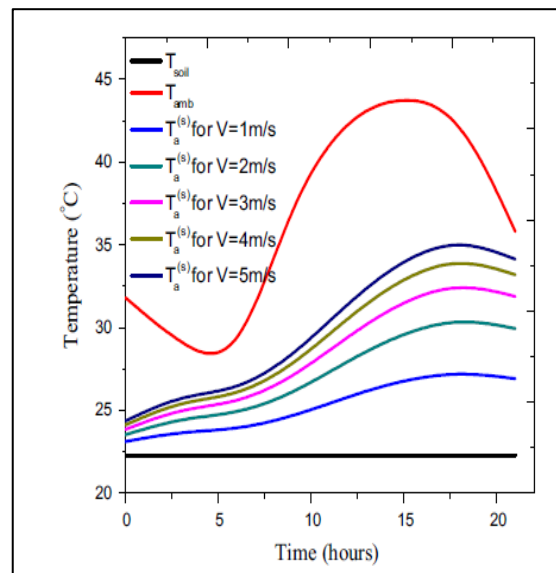


Figure II.5 : Variation de la température de sortie d'air en fonction de la vitesse de l'air. [22]

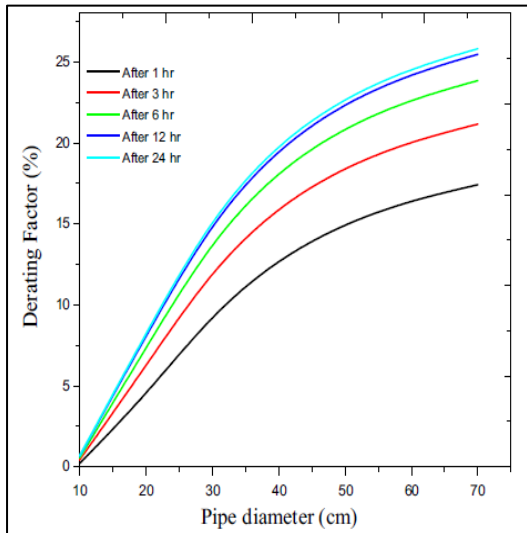


Figure II.6 : Variation du facteur de déclassement en fonction du diamètre du tuyau pour différentes heures de fonctionnement. [22]

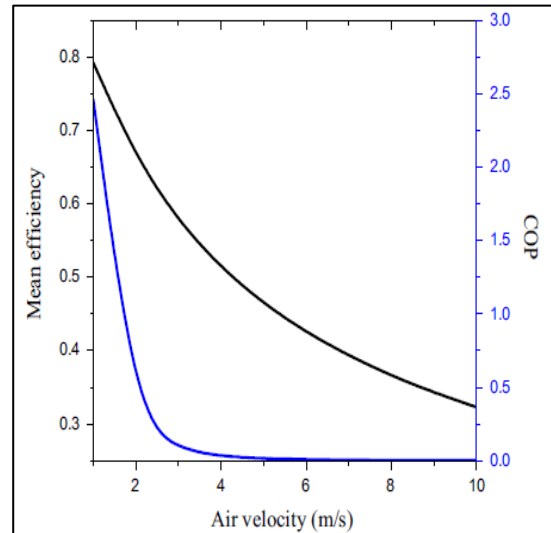


Figure II.7 : Evolution du rendement moyen et du coefficient de performance en fonction de la vitesse de l'air. [22]

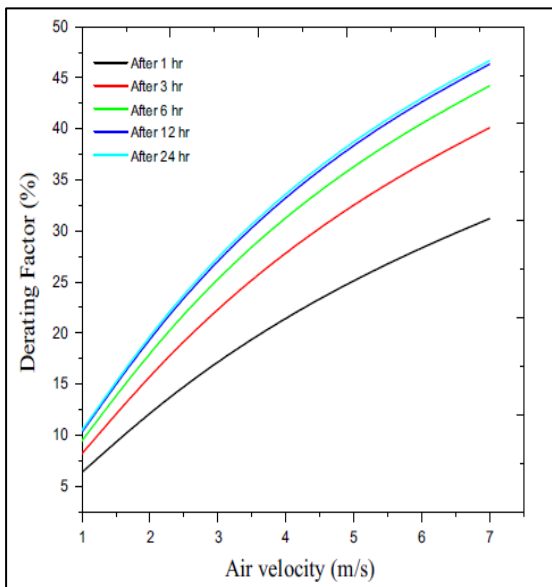


Figure II.8 : Evolution du facteur de déclassement en fonction de la vitesse de l'air pour différentes heures de fonctionnement. [22]

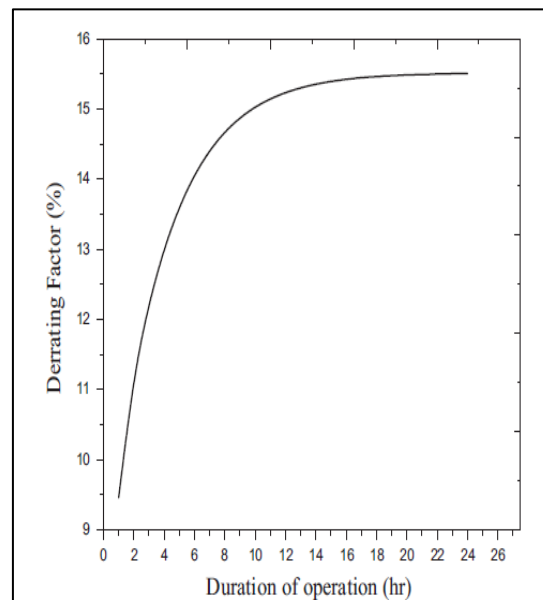


Figure II.9 : Evolution du facteur de déclassement en fonction de la durée de fonctionnement. [22]

❖ . *Naili et al. (2009) [23]:*

Ce travail avait comme objectif, la valorisation de la géothermie en Tunisie par utilisation d'un échangeur eau/sol en polyéthylène, d'une longueur de 10 m et d'un diamètre interne de 0.02 m, est disposé en serpentin, La distance entre les tubes est de 0.3 m.



Figure II.10 : Vu de l'échangeur. [23]

Cette étude est une contribution à l'exploitation de la géothermie de surface en Tunisie au moyen d'un échangeur enterré et disposé horizontalement.

L'étude expérimentale a permis de montrer les point suivants :

- La Tunisie comme l'Algérie présente un potentiel géothermique important, en effet, la température du sol est égale à 21 °C pour une température extérieure moyenne de 16 °C.
- La quantité de chaleur récupérée du sol est de l'ordre de 270 W (pour une longueur de 10 m).
- Des longueurs de l'ordre de 100 m permettent une élévation plus importante de température et de la quantité de chaleur récupérée du sol.

❖ *BELLOUFI Y et all (2016) [24] :*

Dans cette étude, le phénomène de refroidissement de l'air par un échangeur air/sol enterré a été présentée d'une manière très détaillée, proposant un modèle analytique unidimensionnel afin de déterminer l'évolution de la température le long de l'échangeur.

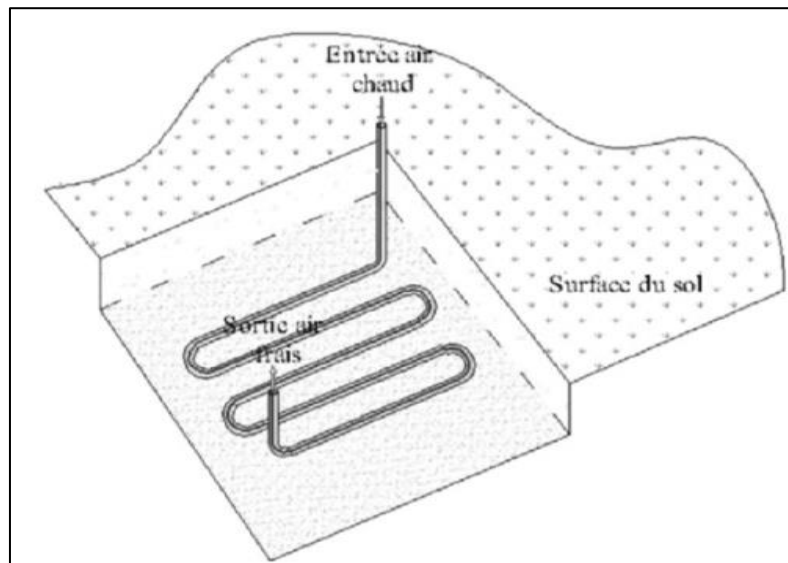


Figure II.11 : Schéma d'enfouissement de l'échangeur air / sol enterré. [24]

Les résultats analytiques et expérimentaux ont révélé les points suivants :

- Pour atteindre la température du sol T_i la profondeur d'enfouissement de l'échangeur doit être bien suffisante.
- L'échangeur air/sol peut à lui seul atteindre le confort thermique de refroidissement, permettant de réduire significativement la consommation d'énergie électrique comme celle utilisée par les appareils de climatisation.

Pour que l'air puisse préserver le plus possible sa fraîcheur à la sortie de l'échangeur vertical, il faut assurer suffisamment de conditions d'isolation thermique dans ses tronçons, ou encore installer des moyens d'accélération active ou passive du fluide.

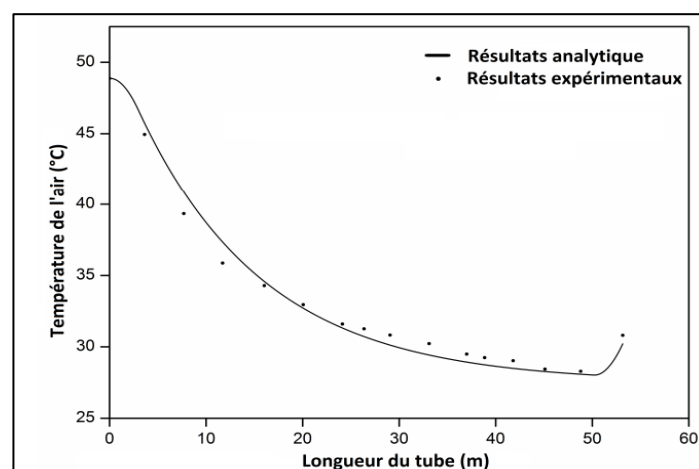


Figure II.12 : Validation des résultats analytiques par ceux de l'expérimentale. [24]

❖ *Amar Rouage et al (2018) [25] :*

Les auteurs ont présenté une étude sur la conception thermique de l'échangeur de chaleur Air-sol (EAHE), en utilisant une nouvelle méthode semi-analytique. La répartition de la température dans le sol entourant l'EAHE est étudiée dans le but de déterminer le rayon du sol en fonction de la durée de l'opération. Un nouveau modèle semi-analytique transitoire a été développé pour faciliter la conception thermique des EAHE. Le but principal du modèle développé est de permettre de prédire la dégradation des performances thermiques d'EAHE en fonction de la durée de l'opération.

Cette dégradation peut être causée par la saturation thermique du sol où la température du sous-sol à proximité devient à la limite égale à la température de l'air d'entrée, ce qui entraîne un transfert de chaleur minimum entre l'air et le sol.

La solution analytique du modèle proposé a été intégrée en utilisant la fonction de Bessel pour un flux de chaleur constant par unité de longueur à la surface du tuyau dont la dimension radiale et la température d'air d'admission sont constantes.

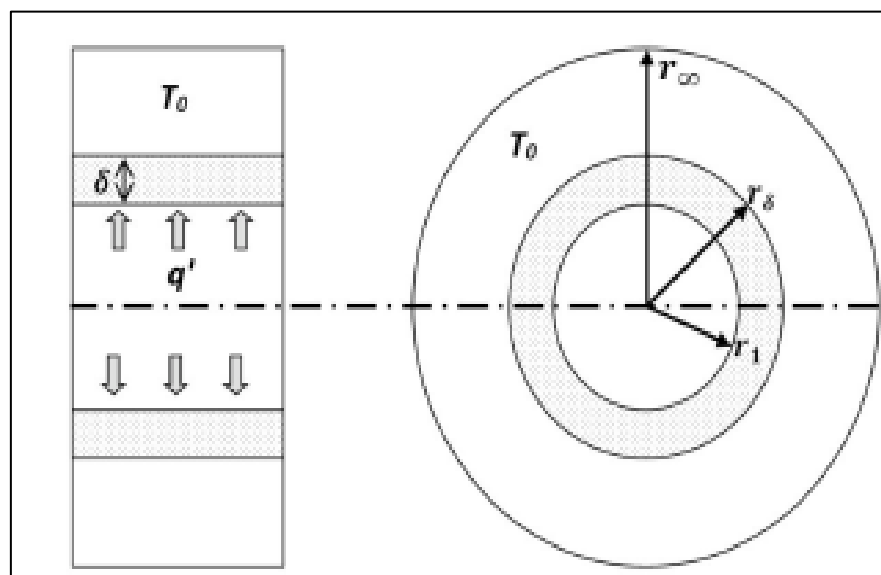


Figure II.13 : Schéma du cylindre creux semi-infini étudié. [25]

Exemple d'application dans le sol de la région de Biskra(Algérie) :

Une enquête menée dans le cadre de l'opération en continu d'un EAHE sur les performances thermiques de l'EAHE a été faite dans le sol de la région de Biskra (Sud algérien) (34 470N - 005 430E) en appliquant une température ambiante extrême de l'air (57° C). On en déduit que le modèle RBM peut être utilisé pour estimer le rayon du sol requis pour concevoir l'EAHE selon : i) durée de l'opération, ii) diffusivité thermique du sol, iii) diamètre du tuyau et iv) la température de l'air.

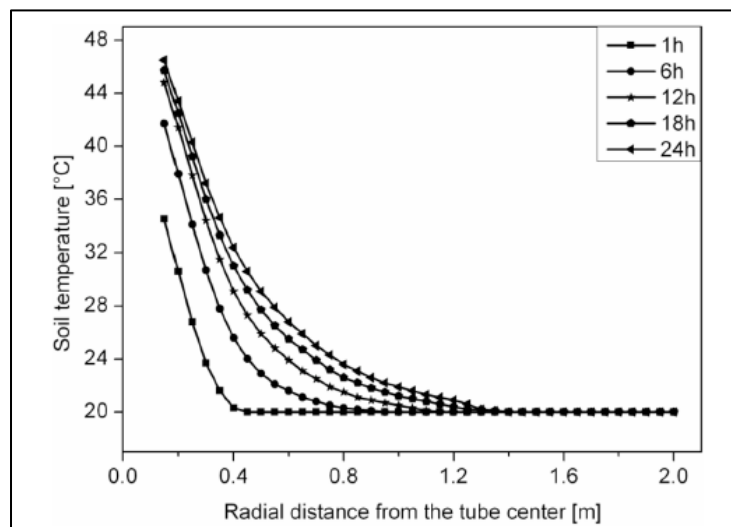


Figure II.14 : Température radiale du sol à l'entrée de l'EAHE pour différentes durées de fonctionnement continu. [25]

Les résultats montrent que la dégradation des performances thermiques de l'EAHE est observée sur une longue durée en climat chaud et sec. Dans le cas de 6 heures d'opération continue, le rayon du sol peut atteindre 0,55 m à partir de la surface de la conduite.

Ils ont également observé que le rayon du sol (épaisseur de terre autour du tuyau EAHE) ne dépend pas seulement de la durée de fonctionnement, mais aussi de la diffusivité thermique du sol, du diamètre du tuyau et de la température de l'air d'admission.

❖ *Charaf-Eddine Mehdid et al en (2018) [26] :*

Ce travail est le deuxième d'une série de conceptions thermiques d'échangeurs de chaleur sol-Air (EAHE). Dans cette étude, un nouveau modèle semi-analytique, appelé modèle RBM généralisé (modèle GRBM), est développé pour prédire les performances thermiques de l'EAHE fonctionnant dans des conditions transitoires pour le mode de refroidissement. Une

enquête expérimentale a été menée dans la région de Biskra (Algérie) pour valider le modèle développé.

Le développement du modèle GRBM est basé sur la subdivision du sol et de la canalisation en plusieurs couches et l'utilisation du modèle RBM, pour estimer la température perturbée du sol entourant la couche inspectée.

De plus, l'installation expérimentale horizontale EAHE, installée à l'Université de Biskra, est décrite. Les tests expérimentaux ont été réalisés en mai 2013 pour 6 h de fonctionnement continu du dispositif EAHE. Pour valider le modèle GRBM, une comparaison entre le calcul et les résultats expérimentaux à diverses sections le long du tuyau est menée.

Les résultats du modèle GRBM sont en bon accord avec les températures mesurées avec une erreur relative moyenne de 2,8%.

L'aspect analytique et la simplicité du modèle GRBM ont permis une conception thermique d'EAHE plus précise avec un temps de calcul considérablement réduit.

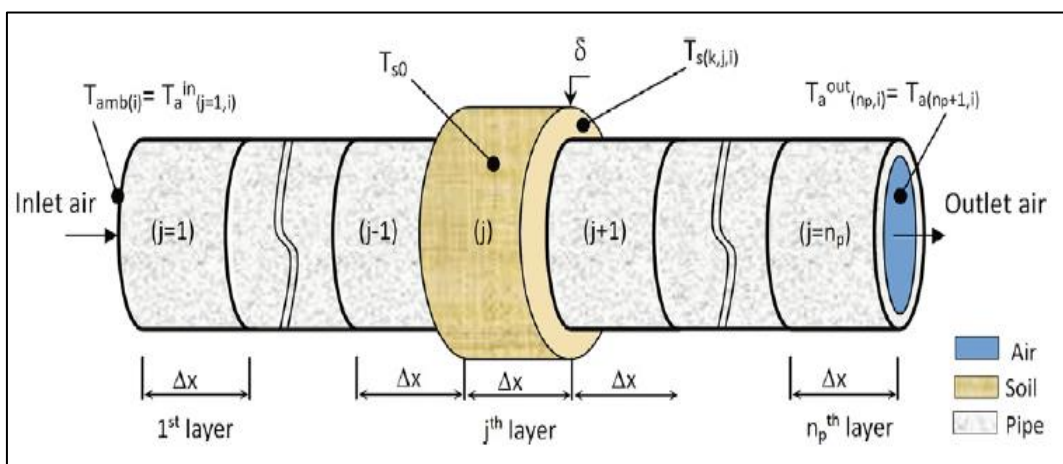


Figure II.15 : Le schéma montre la subdivision du tuyau EAHE et du sol en plusieurs couches selon le modèle GRBM, où i , j et k sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon. [26]

❖ *Nebbali (2013) [27] :*

Ce travail concerne l'étude thermique des échangeurs eau/sol. A la différence de l'échangeur air/sol, cet échangeur est plus efficace de point de vue thermique et nécessite un encombrement réduit pour un coût d'exploitation moindre.

Afin d'assurer un bon fonctionnement continu de cette installation, Il a fallu utiliser deux échangeurs eau/sol placés de préférence à la même profondeur. Cette installation proposée est assez simple à réaliser, elle permet d'extraire à l'air chaud une puissance assez importante, de l'ordre de 14kW,

moyennant en contre partie une faible consommation énergétique utilisée pour le fonctionnement des pompes à eau et au soufflage de l'air.

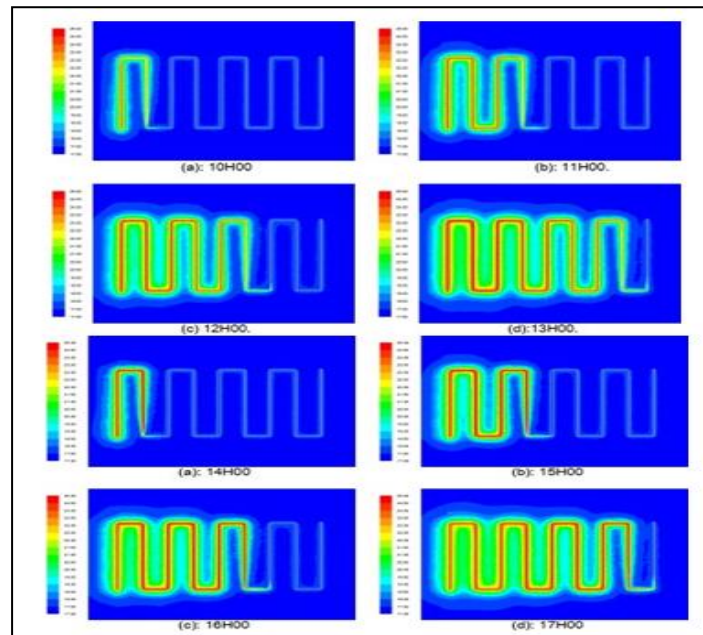


Figure II.16 : Résultats de la simulation avec CFD. [27]

Chapitre III : Simulation, Résultats et discussion

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats issus de la simulation numérique des échanges thermiques autour d'un échangeur enterré. L'objectif principal est d'étudier le phénomène de saturation du sol en fonction du temps ainsi que la distance où la température peut se propager.

Nous allons présenter, en premier lieu, la formulation mathématique du problème et les équations qui gouvernent le phénomène traité, et en deuxième lieu, nous exposons la méthode (CFD) choisie pour résoudre le problème et le logiciel de calcul (ANSYS "Fluent"). [28]

III.2. Paramètres de dimensionnement :

L'étude des différents paramètres de dimensionnement des puits canadiens permet d'évaluer l'influence de ces paramètres sur les performances et le comportement thermique de l'échangeur eau/sol et de préciser les plus influant. Ces paramètres qu'il faut prendre en considération pour étudier le dimensionnement de l'échangeur eau/sol ainsi que leur modélisation sont : la longueur de l'échangeur, la température du fluide caloporteur, la température et la nature du sol... [29]

III.3. Logiciel CFD :

III.3.1. Définition du CFD :

La dynamique des fluides computationnelle (ou computational fluid dynamics), communément abrégée en CFD, est une branche de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes numériques et des algorithmes pour résoudre et analyser des problèmes impliquant des écoulements de fluides, des transferts de chaleur ainsi que tous les phénomènes associés tels que des réactions chimiques par exemple. Les ordinateurs sont utilisés pour effectuer tous les calculs nécessaires pour simuler l'interaction des liquides et des gaz avec des surfaces définies dans des conditions complexes. La technique est très puissante et couvre un large champ d'applications industrielles et non industrielles telles que : Aérodynamique, hydrodynamique, centrales électriques, turbomachines, génie des procédés chimiques, génie maritime, génie de l'environnement, métrologie, génie biomédical, hydrologie et océanographie ainsi que l'environnement extérieur et intérieur des bâtiments. [30]

III.3.2. Comment fonctionne le CFD :

Selon Versteeg et Malalasekera, les codes CFD sont structurés autour d'algorithmes numériques très complexes qui résolvent différents problèmes d'écoulement de fluide. Sur le marché, il existe des logiciels CFD très sophistiqués qui sont assez simples d'utilisation et permettent de masquer cette complexité algorithmique et d'afficher une interface utilisateur

très simple proposant la manipulation des différents paramètres d'entrée (les entrées) afin d'examiner les résultats.

Ces codes comme le montre la figure III.1 passent par trois étapes essentielles : le prétraitement, le calcul et enfin le post-traitement et la visualisation des résultats.

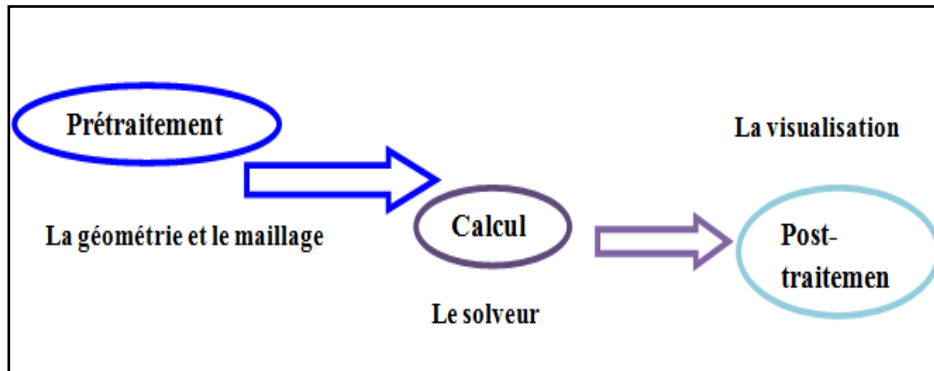


Figure III.1 : Processus du fonctionnement d'un code CFD.

➤ **Prétraitement :**

Le prétraitement permet la transformation des entrées sous une forme adaptée à une utilisation ultérieure par le Solveur, cette transformation s'effectuant en plusieurs étapes, comme le montre le schéma suivant :

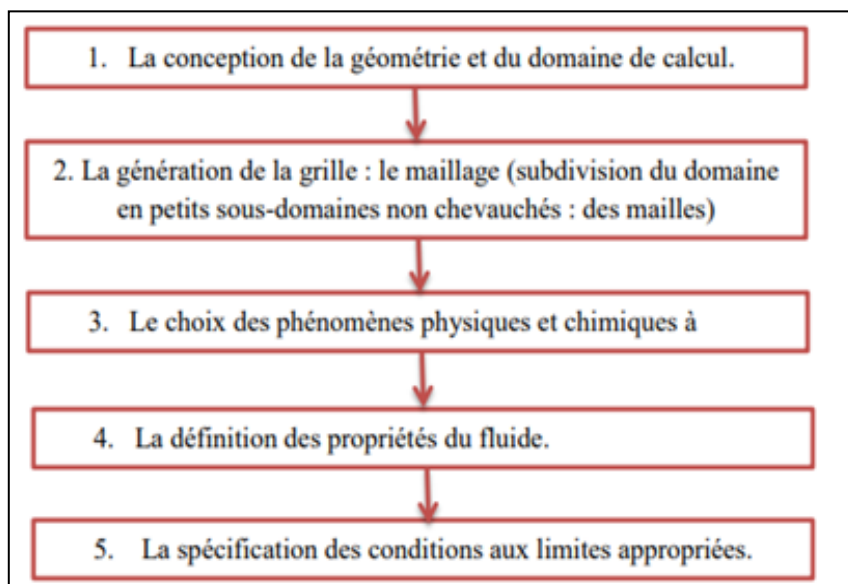


Figure III.2 : Les étapes du prétraitement d'un code CFD.

➤ *Calcul :*

Le Solver utilise trois techniques numériques distinctes : les différences finies, les éléments finis et les méthodes spectrales. Habituellement, les méthodes numériques qui constituent la base de Solver effectuent les étapes suivantes :

- Approximation de variables de débit inconnues grâce à des fonctions simples.
- Discrétisation par substitution d'approximations dans les équations d'écoulement par des manipulations mathématiques.
- Résolution d'équations algébriques

➤ *Après traitement :*

Le post-traitement est l'étape de visualisation des données à l'aide d'outils et d'extensions intégrés au logiciel de simulation CFD. Ceux-ci inclus:

- L'affichage de la géométrie du domaine et du maillage.
- Les traces de vecteurs.
- Lignes et lignes de contours ombrés.
- Chemin des particules.

III.3.3. Présentation du logiciel de simulation «ANSYS Fluent» :

ANSYS FLUENT est un logiciel de simulation CFD qui permet de modéliser l'écoulement du fluide, le transfert de chaleur, et les réactions chimiques dans des géométries complexes. Ce programme est écrit dans le langage de programmation C et permet d'utiliser pleinement la flexibilité et la puissance de l'offre de langue. ANSYS FLUENT utilise une architecture client-serveur, ce qui lui permet d'exécuter des processus simultanés distincts sur plusieurs postes de travail client et serveurs de calcul puissants. Cette architecture est essentielle pour une exécution efficace, un contrôle interactif, et une flexibilité totale entre les différents types de machines ou de systèmes d'exploitation. [31]



Figure III.3 : ANSYS FLUENT.

III.3.4. Equations générales de l'outil Fluent (ANSYS) :

La modélisation mathématique d'un écoulement de fluide est fondée sur les lois de la conservation de masse, de la quantité de mouvement et d'énergie. Dans les coordonnées 3Dcartésiennes et dans un écoulement incompressible et transitoire ; les équations de transfert de la chaleur et de la masse sont données comme suit:

III.3.4.1. Equation de continuité :

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot V) = 0 \quad (\text{III. 1})$$

Où ρ est la masse volumique et V est le vecteur vitesse.

III.3.4.2. Equation de quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D(\rho \cdot V)}{Dt} = \rho F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(V)) = 0 \quad (\text{III. 2})$$

Où F est une force par unité de volume et μ est la viscosité dynamique.

III.3.4.3. Equation de conservation d'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{D(\rho c_p T)}{Dt} = \Delta(KT) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \phi = 0 \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

$\frac{D(\rho c_p T)}{Dt}$: La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(KT)$: La variation d'énergie par conduction.

q : Puissance volumique dissipée.

$\beta T \frac{Dp}{DT}$: La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu\phi$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

Les coefficients c_p , K et β sont respectivement, la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide.

III.4. Equations de problème :

➤ Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II. 4})$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{dw}{dz} = 0 \quad (\text{III. 5})$$

➤ Equations de quantité de mouvement

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho\beta(T - T_c)g \right] \quad (\text{III. 6})$$

Suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho\beta(T - T_c)g \right] \quad (\text{III. 7})$$

Suivant z :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho\beta(T - T_c)g \right] \quad (\text{III. 8})$$

➤ Equation de l'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III. 9})$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

III.5. Caractéristiques :

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

Tableau III.1 : Caractéristiques du sol.

Nature des matériaux	Conductivité thermique λ_{sol} (W/m.K)	Chaleur Spécifique C_p (J/kg.K)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
PVC	0,17	900	1380

Tableau III.2 : Caractéristiques du tube.

III.6. Géométrie et conditions initiales et aux limites :

Cette étape consiste à dessiner la géométrie du tube (échangeur de chaleur eau/sol) ainsi que le sol, en utilisant le logiciel ANSYS Design Modeler. Nous commençons avec l'introduction des dimensions suivantes : Longueur du tube (L=15m), diamètre extérieur du tube (D_{ext}=110mm) avec une épaisseur (e=2mm), enterré à une profondeur de 1.5m, la température initiale du sol est de (295 K), la température de surface du sol est de (310 K), la température d'entrée d'eau est de (315 K), l'écoulement de l'eau se fait en régime laminaire.

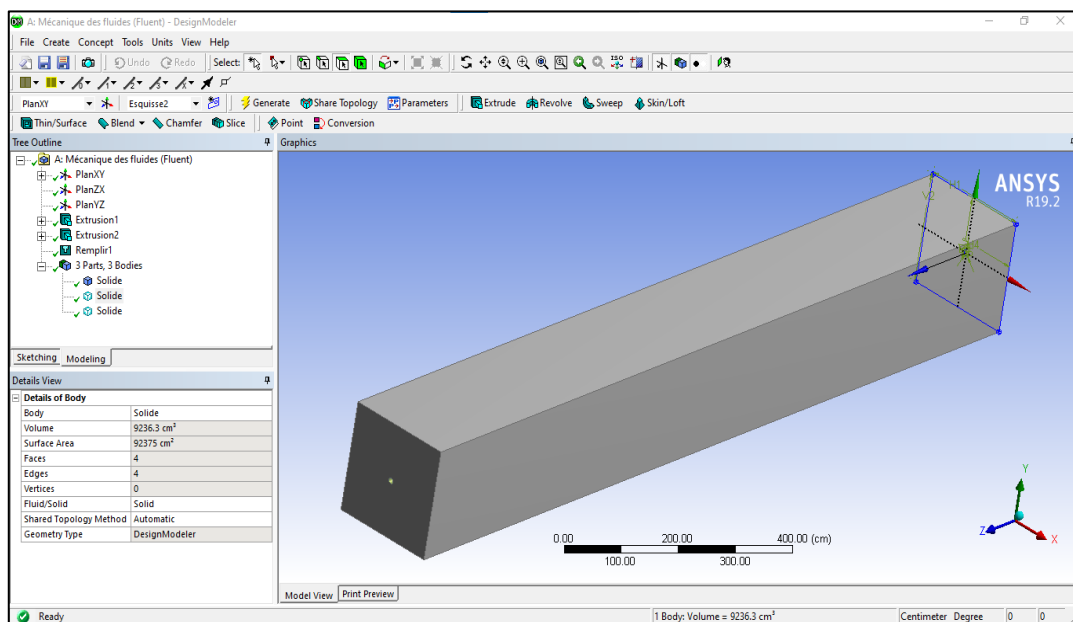


Figure III.4 : L'interface ANSYS Design Modeler pour le dessin de la géométrie.

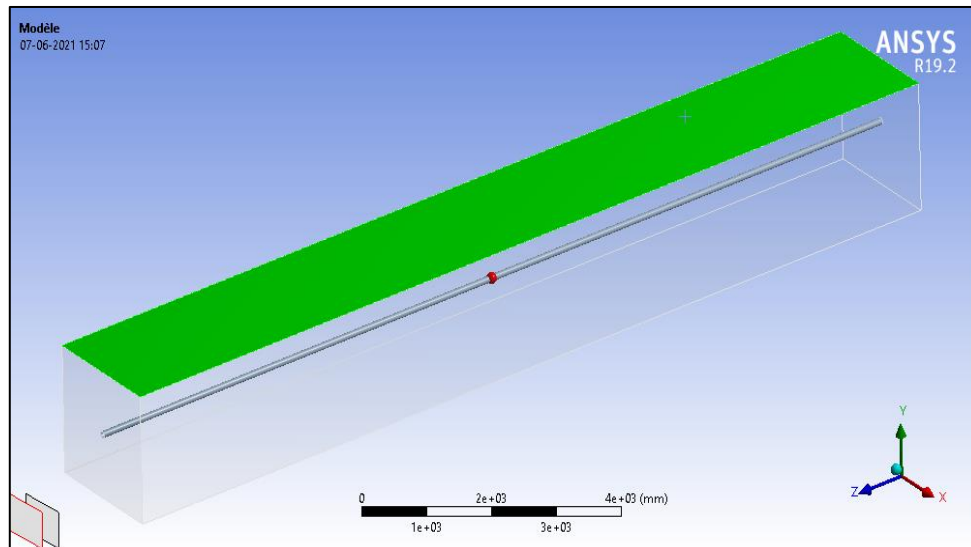


Figure III.5 : Position de tube dans le sol.

III.7. Maillage :

C'est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinale et transversale. Donc, la discrétisation du domaine est obtenue par un maillage, constitué d'un réseau de points (nœuds). Nous avons choisis d'utiliser un maillage régulier dans la section longitudinale et non régulier dans la section transversale.

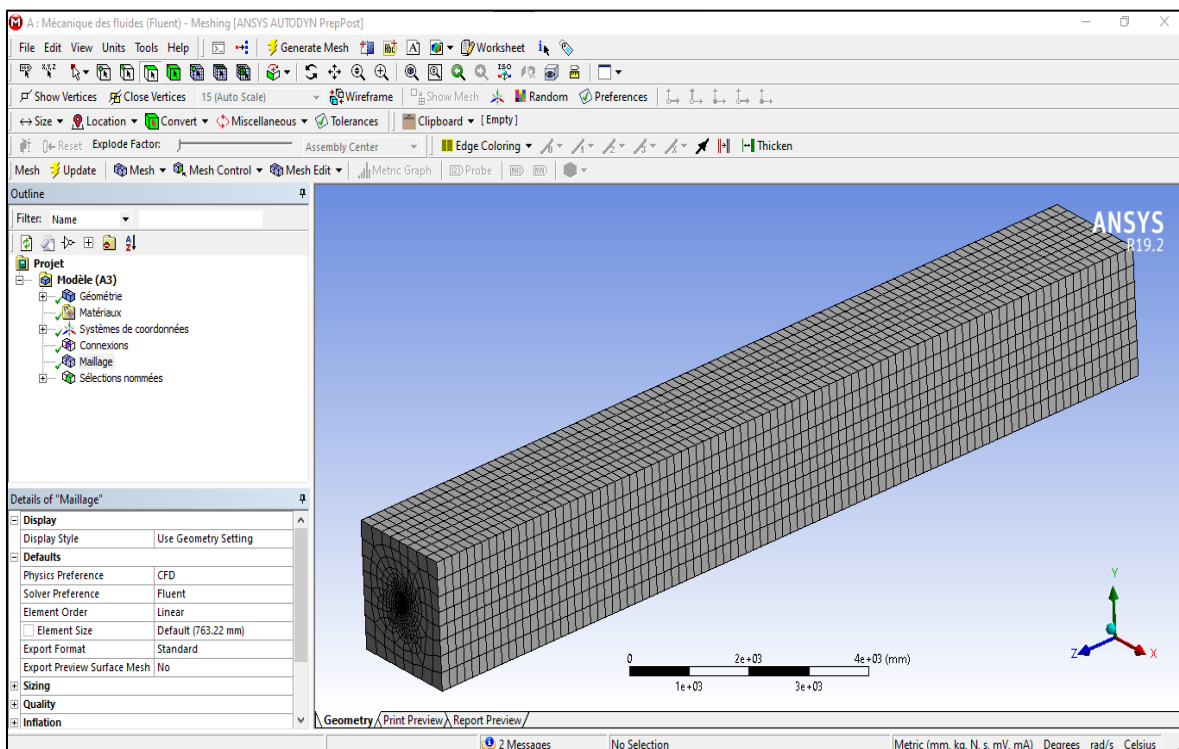


Figure III.6 : Maillage : interface d'ANSYS Meshing.

III.8. Etude 3D :

III.8.1. Choix du régime d'étude (stationnaire/transitoire) :

Afin de vérifier l'influence du régime choisis sur la précision des résultats, nous avons simulé le phénomène en deux régimes différents ; stationnaire et non stationnaire, afin de les comparer et de voir la précision des résultats en chaque régime.

La figure 7, présente la variation de la température de l'eau en fonction de la longueur du tube après 8h pour deux régimes différents. Nous avons remarqué la courbe du régime stationnaire est la même quelque soit durée, tandis que celle du régime transitoire varie en fonction du temps. Ceci nous amène a choisir le régime transitoire afin d'extraire des résultats plus précis.

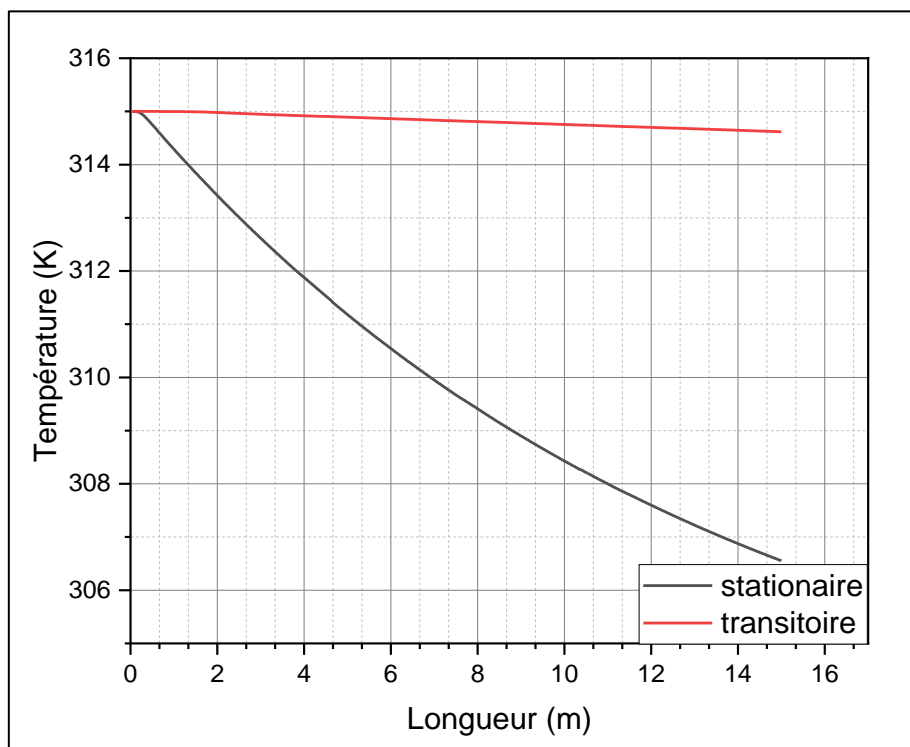


Figure III.7 : Variation de la température de l'eau après 8h pour deux cas ; stationnaire et transitoire (D= 11cm, sol en argile, tube en PVC et $Q_m=1\text{Kg/s}$).

De même, la figure 8 présente la variation de la température de l'eau ainsi que celle du sol dans les deux cas stationnaire et transitoire après 8 heures, pour un sol en argile, un tube en PVC et un débit 1 Kg/s, nous remarquons que :

- Pour le cas stationnaire, la température de l'eau à la sortie a atteint 306.5 K
- Pour le cas transitoire, la température de l'eau à la sortie a atteint 314.3K

Les résultats montrent clairement que le changement de température dans l'étude

stationnaire est loin de la réalité, ce qui nous oblige à adopter uniquement l'étude transitoire étalée sur 8 heures.

Remarque: Pour réduire le temps de simulation, nous avons choisis d'étudier le phénomène physique en 2D car l'étude en 3D nécessite plusieurs semaines pour être compilée.

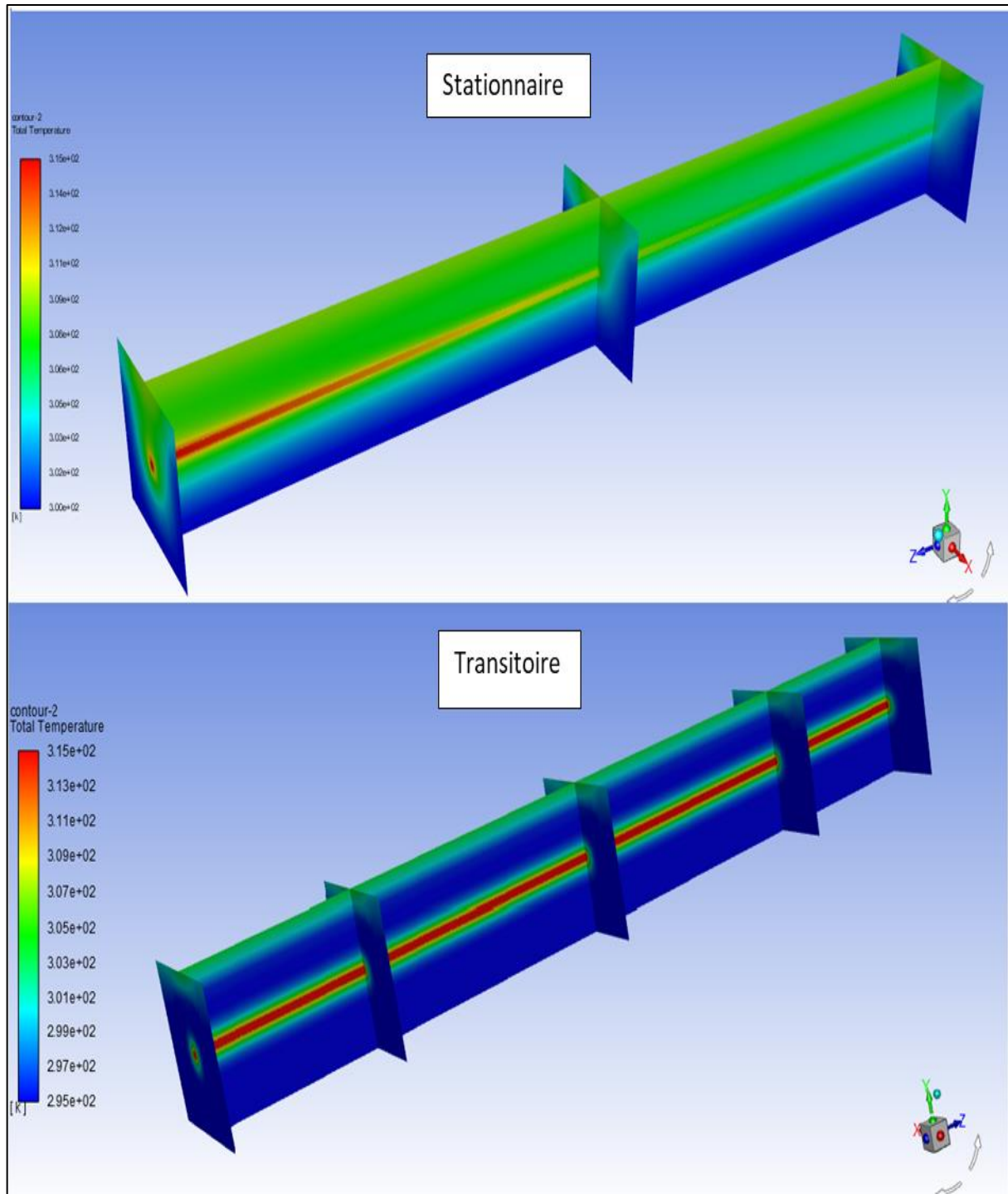


Figure III.8 : Distribution des températures de l'eau et du sol après 8h pour deux cas ; stationnaire et transitoire ($D= 11\text{ cm}$, sol en argile, tube en PVC et $Q_m=1\text{ Kg/s}$).

III.9. Variation de la température en régime transitoire (coupe longitudinale 2D) :

III.9.1. Température de l'eau en fonction de la longueur de tube :

Les figures 9 et 10 présentent la variation de la température de l'eau en fonction de la longueur d'un tube en PVC avec un diamètre de 11 cm enterré dans un sol en argile avec un débit de 1 Kg/s .

On remarque que :

- La température de l'eau diminue en fonction de la longueur du tube.
- Après une durée de deux (02) heures la température de l'eau à la sortie est devenue 295 K après 40 m de l'entrée de l'eau.
- Après 4 heures la température de l'eau à la sortie est devenue 297 K .
- Après 6 heures la température de l'eau à la sortie est devenue 305.2 K .
- Après 8 heures la température de l'eau à la sortie est augmentée à 306.5 K .

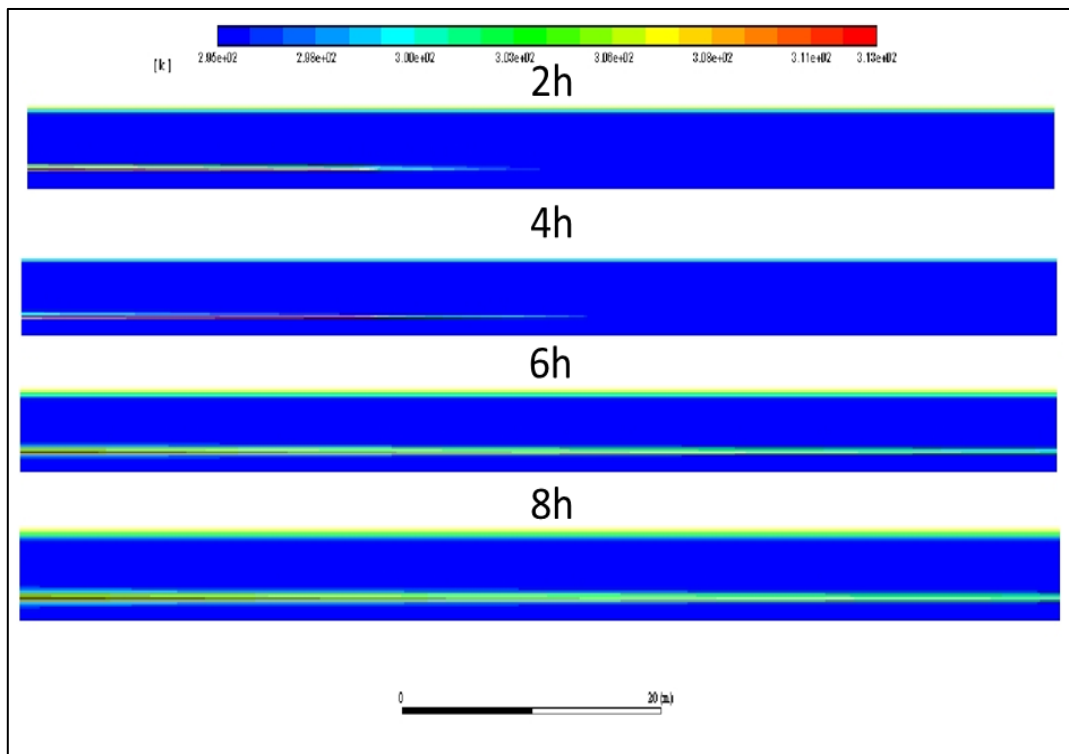


Figure III.9 : Coupe transversale représentant la distribution de la température dans un échangeur géothermique, sol en argile, tube en PVC de diamètre 11 cm et un débit de 1 Kg/s (après 2 heures, 4 heures, 6 heures et 8 heures).

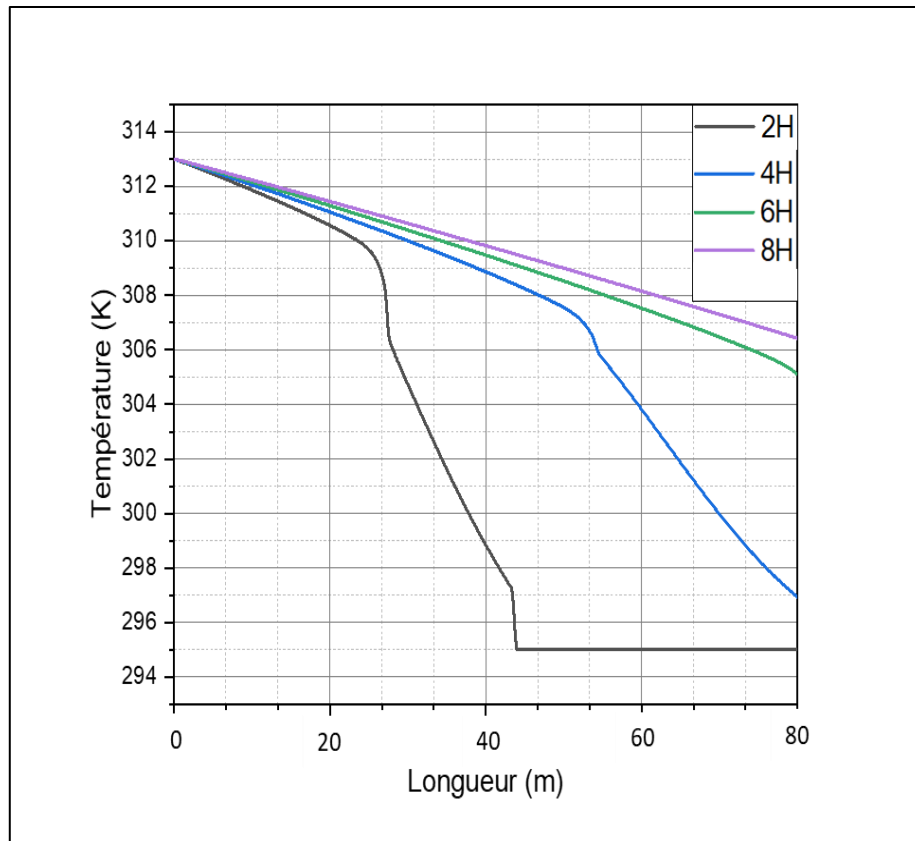


Figure III.10 : Variation de la température de l'eau en fonction de la longueur d'un tube en PVC (de 11cm de diamètre) enterré dans un sol en argile avec un débit de 1Kg/s (pendant 2 heures, 4 heures, 6 heures et 8 heures).

III.9.2. Distribution de la température dans le sol:

La figure 11 représente la distribution de température dans le sol après 8heures sous l'effet double de la température de l'eau (313°C) et la température de la surface du sol.

La figure 12 s'agit d'une coupe verticale qui traduit la variation de la température du sol à une distance deux fois le rayon du tube (après 2 heures, 4 heures, 6 heures et 8 heures). Nous avons remarqué que la propagation de température dans le sol à pris une forme conique, dont les températures les plus élevées sont aux alentours de l'entrées de l'échangeur est diminuent en se rapprochant de la sortie.

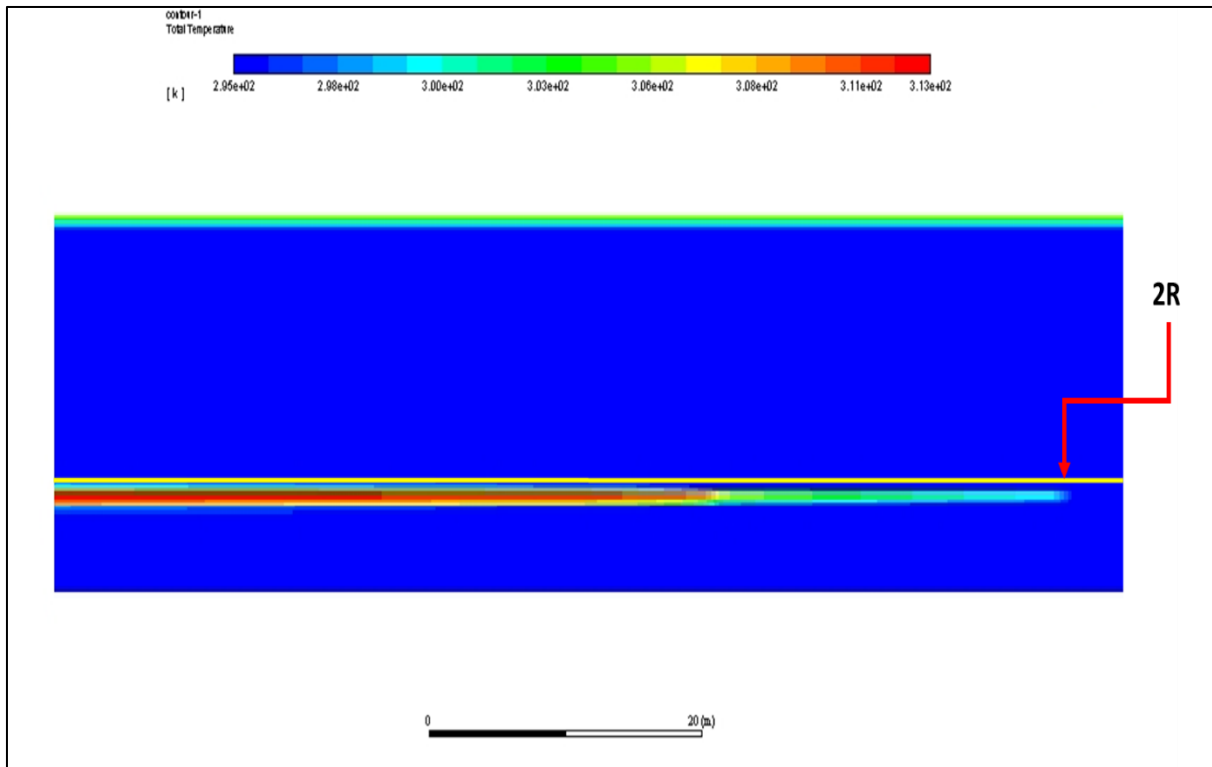


Figure III.11 : Coupe verticale de la distribution de la température du sol à une distance de deux fois le rayon de l'échangeur après 8 heures.

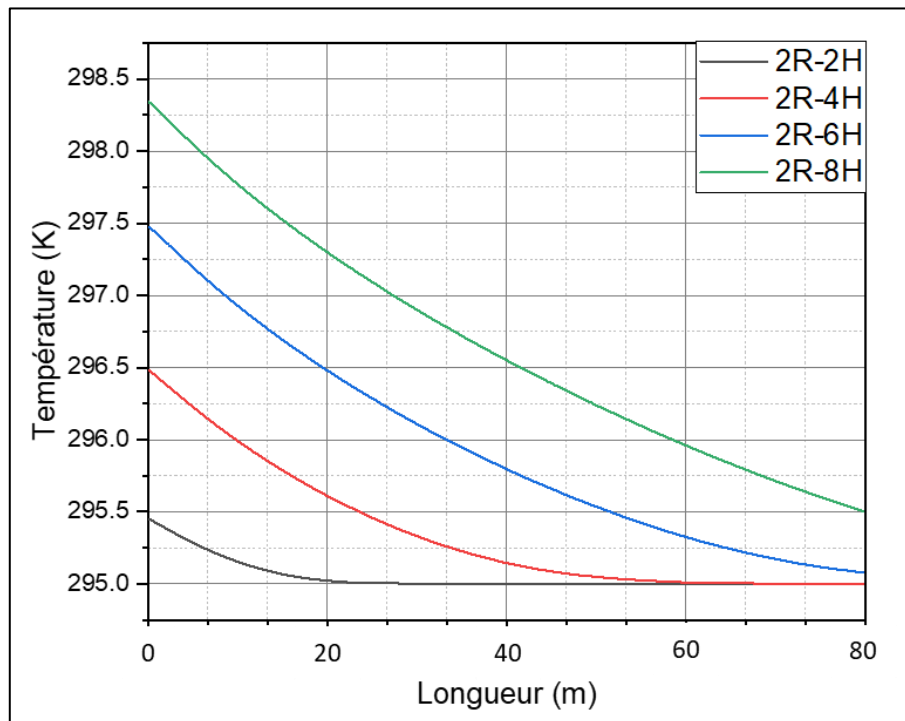


Figure III.12 : La variation de la température du sol à une distance de deux fois le rayon du tube en fonction de la longueur du tube en PVC, ($D=11\text{ cm}$, sol argileux et $Q_m=1\text{ Kg/s}$, après 2 heures, 4 heures, 6 heures et 8 heures.).

III.10. Variation de la température en coupe transversale 2D :

III.10.1. Diamètre 1.6 cm :

Les courbes de la figure. (III.13) représente la distribution de la température du sol à partir de la face extérieure du tube jusqu'à la surface du sol en fonction du temps ($D=1.6$ cm, Sol de type: sable humide), nous constatons que :

- Après 8 heures, la diffusion de la température dans le sol prend la forme d'un anneau et a propager d'un rayon de 0.008 m jusqu'à 0.378 m.
- Après 8 heures de travail, la chaleur de la surface du sol n'a pas d'effet sur la température du fluide caloporteur dans l'échangeur.

Les courbes de la figure (III.14) représentent la distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction de temps, pour un diamètre du tube de 1.6 cm immergé dans un sol Argileux, nous constatons que :

- La température du sol se diffuse d'un rayon de 0.008 m jusqu'à 0.633 m sous forme d'un anneau après 8 heures.
- Il n'y a pas d'effet de la chaleur de la surface du sol sur le tube.

La température dimine de 311 K à 296 K pour des rayons allant de 0.008 m jusqu'à 0.299 m.

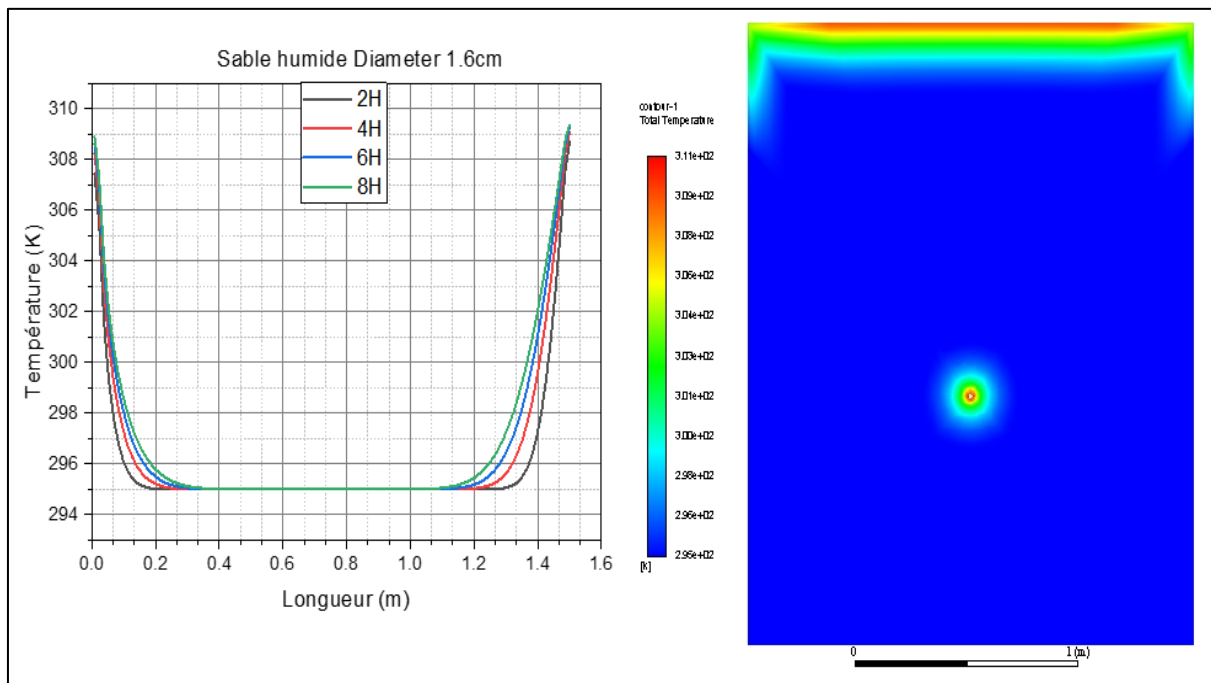


Figure III.13 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (diamètre du tube 1.6 cm, type de sol (sable humide).

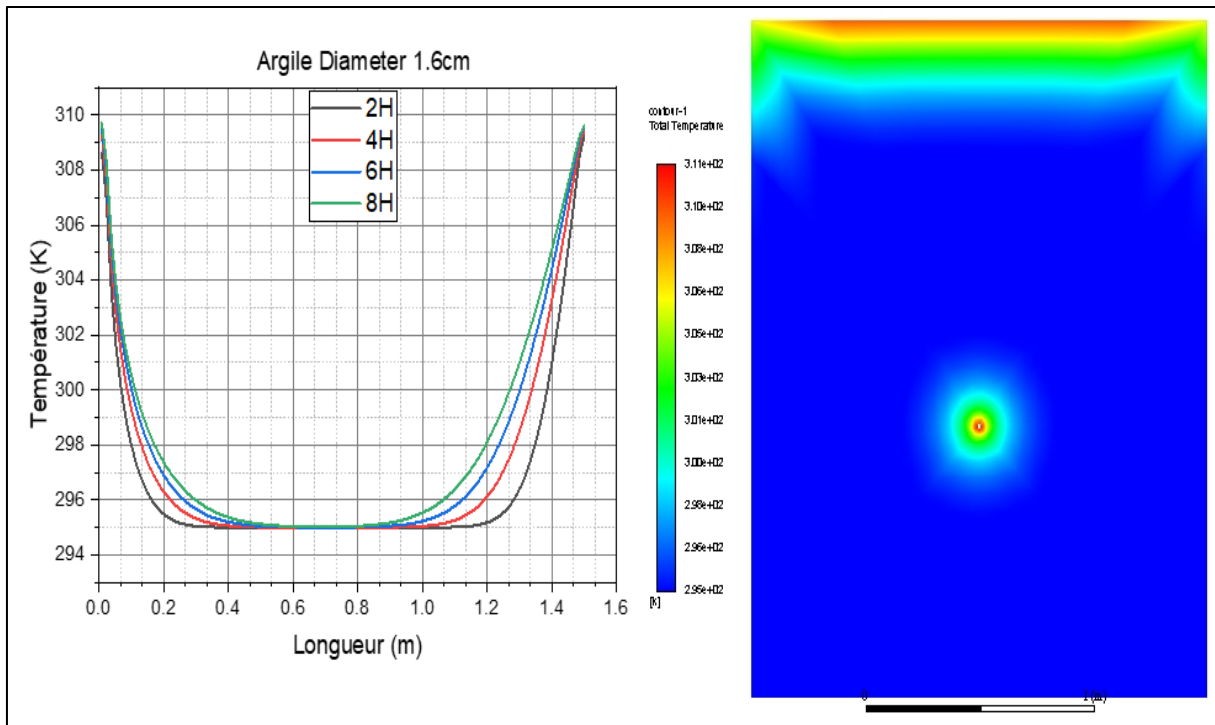


Figure III.14 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (diamètre du tube 1.6 cm, sol Argileux).

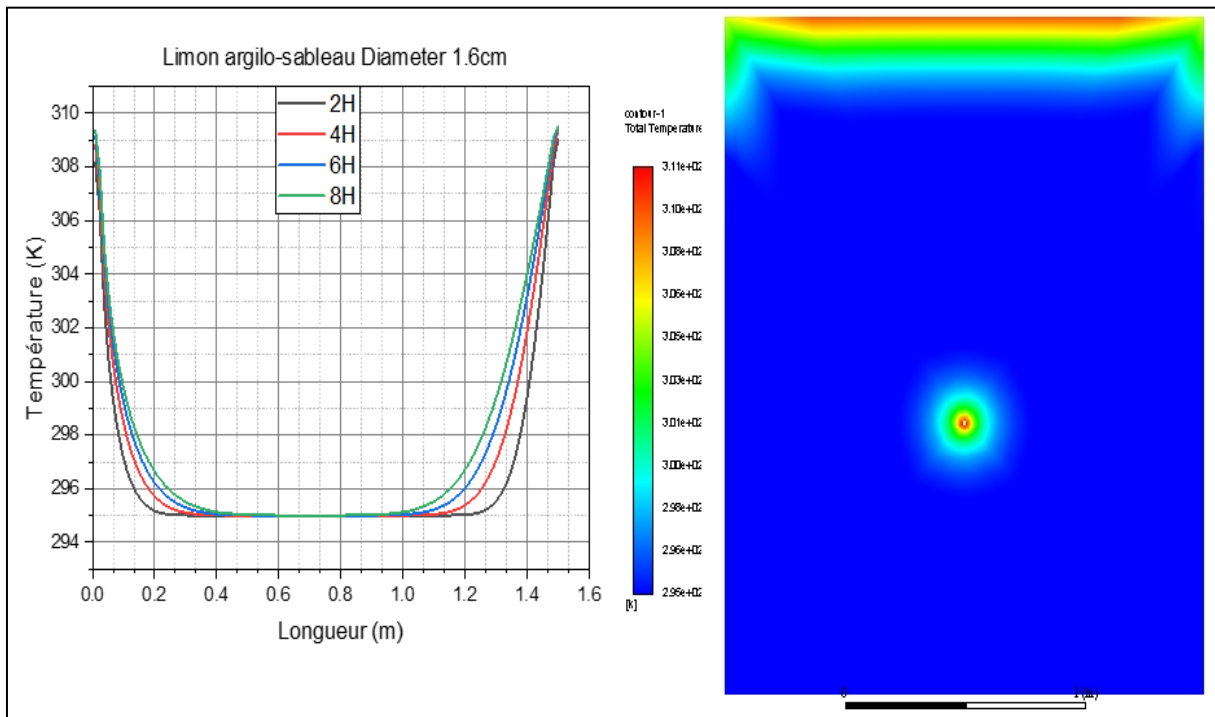


Figure III.15 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (diamètre du tube 1.6 cm, type de sol :limon argilo-Sableux).

La figure III-15 présente la distribution de la température du sol en fonction de temps, à partir de l'extrémité du tube vers la surface du sol, pour un diamètre du tube de 1.6 cm et un type de sol (limon argilo-sableux), nous remarquons que:

- Une propagation de la température du sol d'un rayon de 0.008 m jusqu'à 0.535 m sous forme d'un anneau est remarquée après 8 heures.
- Il n'y a pas d'effet de la température de la surface du sol sur le tube.
- La température diminue de 311 K jusqu'à 296 K pour des rayons allant de 0.008 m jusqu'à 0.244 m.

La figure III-16 représente la distribution de la température du sol depuis la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps, pour un diamètre du tube de 1.6 cm, pour trois types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux), après 8 heures de fonctionnement. Nous constatons que, le rayon de propagation de température a atteint sa plus grande valeur dans le sol de type argileux ensuite dans le limon argilo sableux et enfin sa plus faible étendue dans le sol de type sable humide.

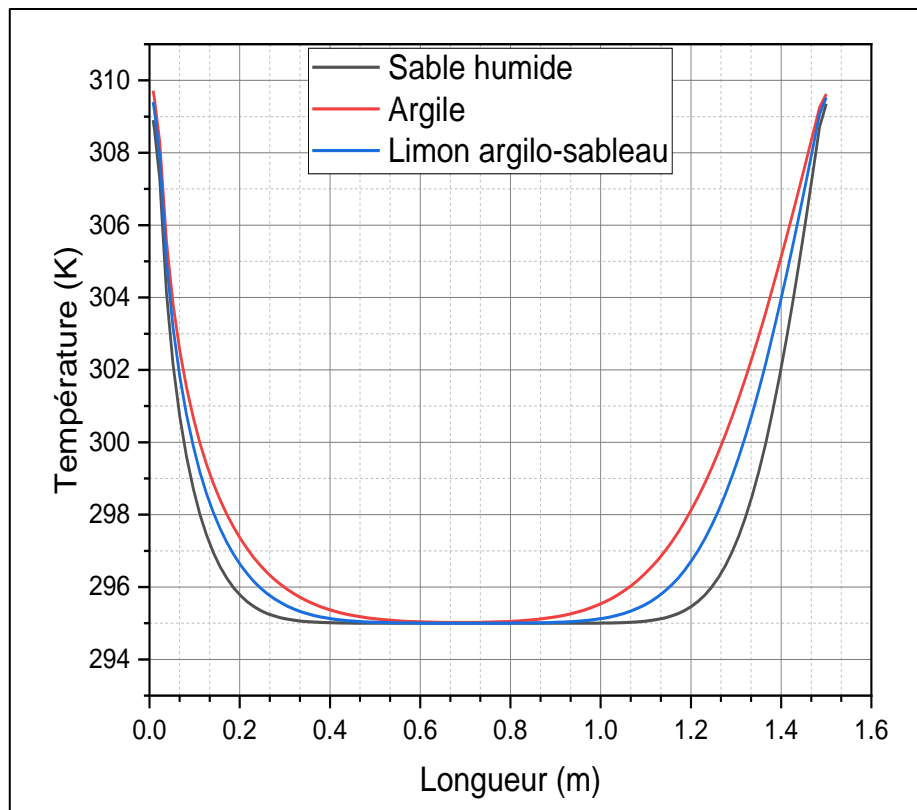


Figure III.16 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol après 8 heures (D=1.6 cm, types de sol : sable humide, argile, limon argilo-sableux).

III.10.2. Diamètre 04 cm :

Les courbes de la figure III-17 présentent la distribution de la température du sol sous l'effet combiné des gradients de température causés par la température élevée de l'échangeur et de la surface du sol. Les valeurs de la température en fonction du temps, pour un diamètre du tube de 4 cm et un sol de type sable humide indiquent que :

- Après 8 heures de fonctionnement, la température se diffuse dans le sol à partir du rayon 0.02 m jusqu'à 0.447 m sous forme d'un anneau.
- L'effet de la température de la surface du sol sur le tube est négligeable.
- La température diminue de 311 K à 296 K pour les rayons 0.02 m et 0.220 m, successivement.

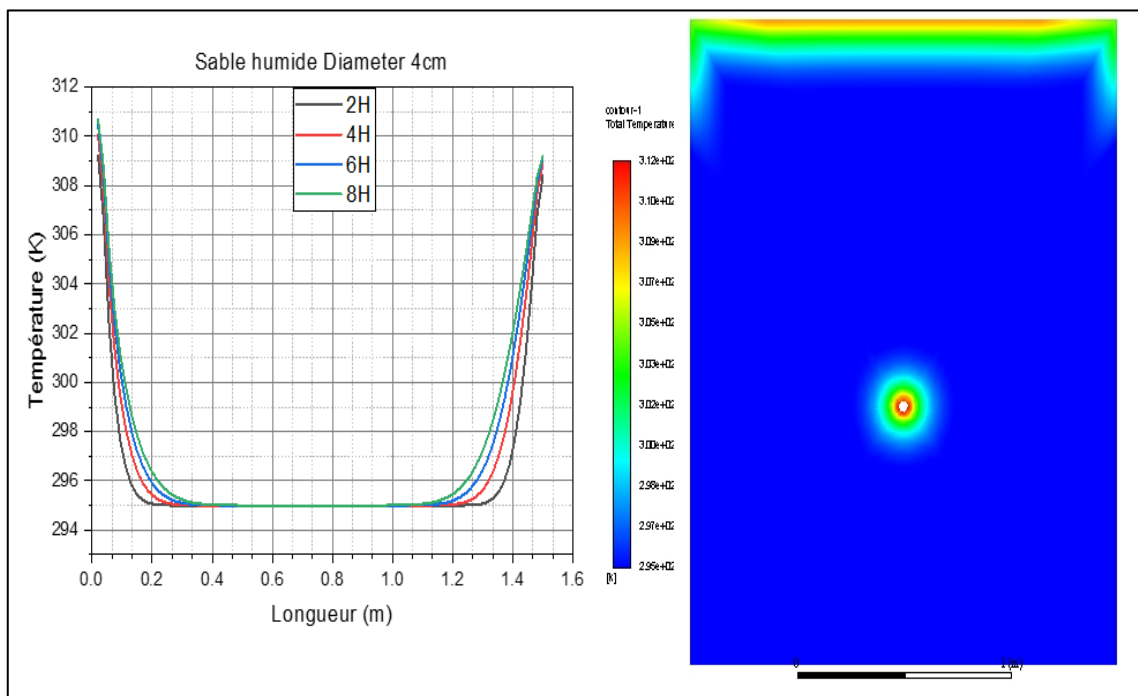


Figure III.17 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=4 cm, type de sol (sable humide)).

La figure III-18 présente la distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps, pour un diamètre du tube de 4 cm et un sol de type argileux, nous remarquons que :

- La température du sol se diffuse du rayon 0.02 m jusqu'à 0.720 m sous forme d'un anneau après 8 heures de fonctionnement.
- Il n'y a pas d'effet de la température de la surface du sol sur le tube après une durée de fonctionnement de 8 heures.
- La température diminue de 311 K à 296 K pour des rayons de 0.02 m jusqu'à 0.345 m.

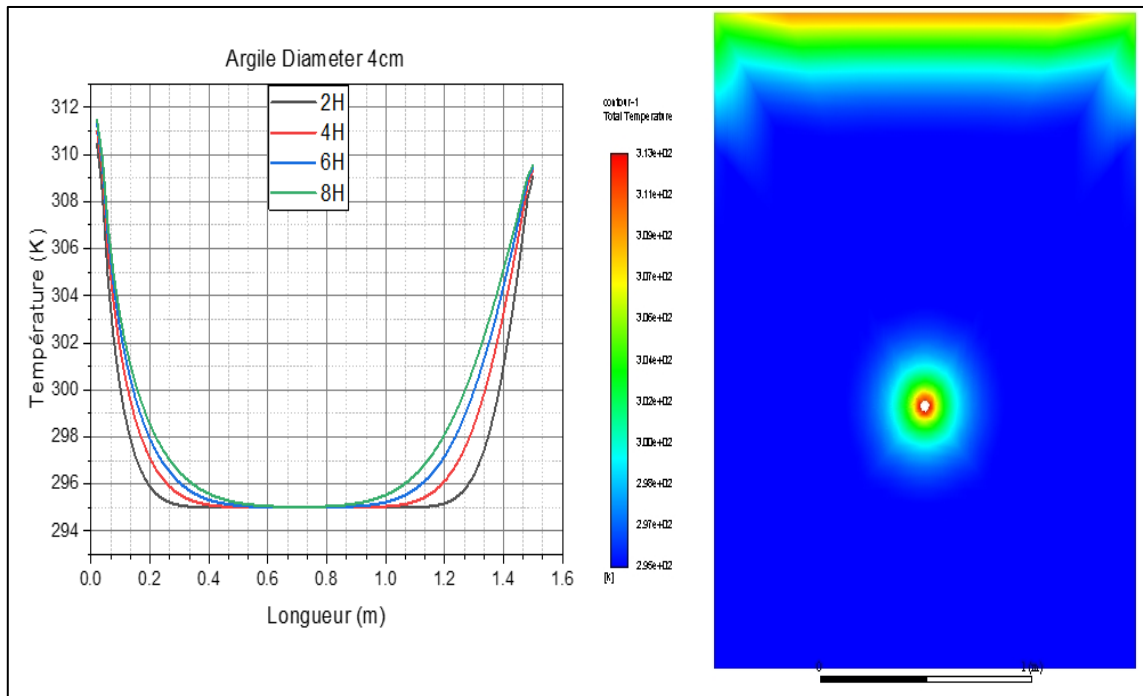


Figure III.18 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=4 cm, sol Argileux).

La figure III-19 présente la distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps, et pour un diamètre du tube de 4 cm et un type de sol (limon argilo-sableux), nous pouvons remarquer que :

- Après 8 heures de fonctionnement, la température du sol se diffuse du rayon de 0.02 m jusqu'à un rayon de 0.635 m, sous forme d'un anneau après 8 heures.
- Il n'y a pas d'effet de la température de la surface du sol sur le tube.
- La température diminue de 311 K à 296 K pour des rayons allant de 0.02 m jusqu'à 0.282m.

La figure III-20 présente la distribution de la température du sol des bords du tube à la surface de sol en fonction du temps pour un diamètre du tube de 04 cm, effectuée pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo sableux), après 8 heures de diffusion, on remarque que le rayon de propagation de la température a atteint la plus grande étendue dans l'argile ensuite dans le limon argilo sableux et enfin pour la moindre dans le sol de type sable humide.

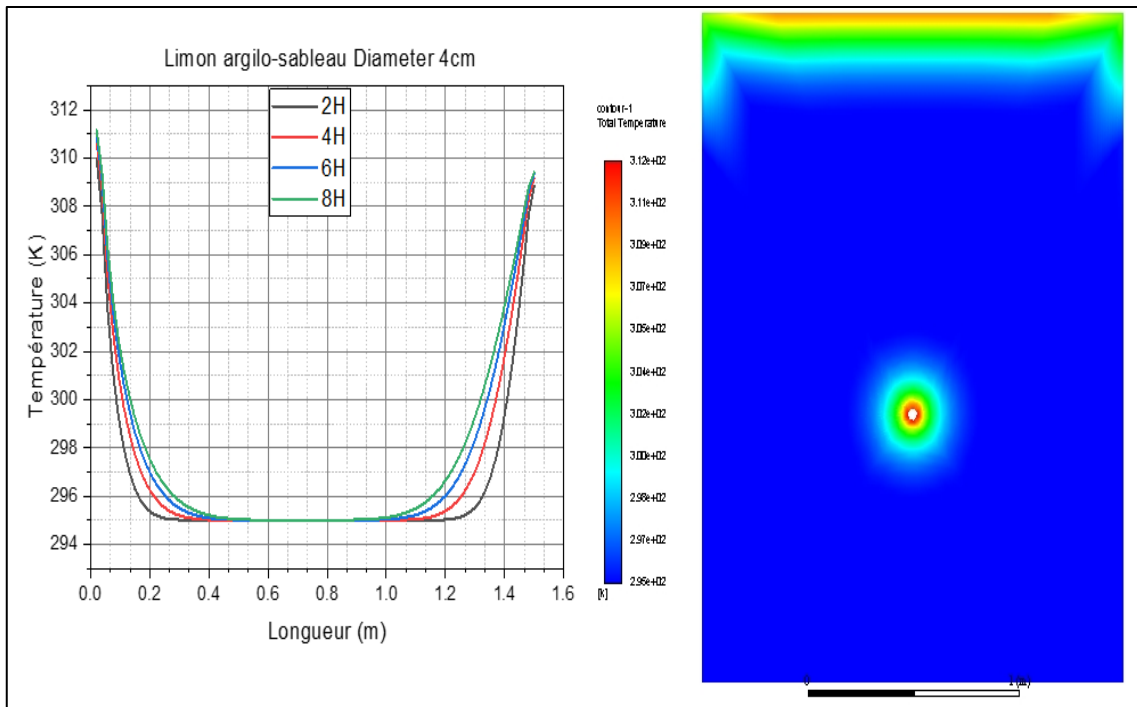


Figure III.19 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=4 cm, sol : limon argilo-sableux).

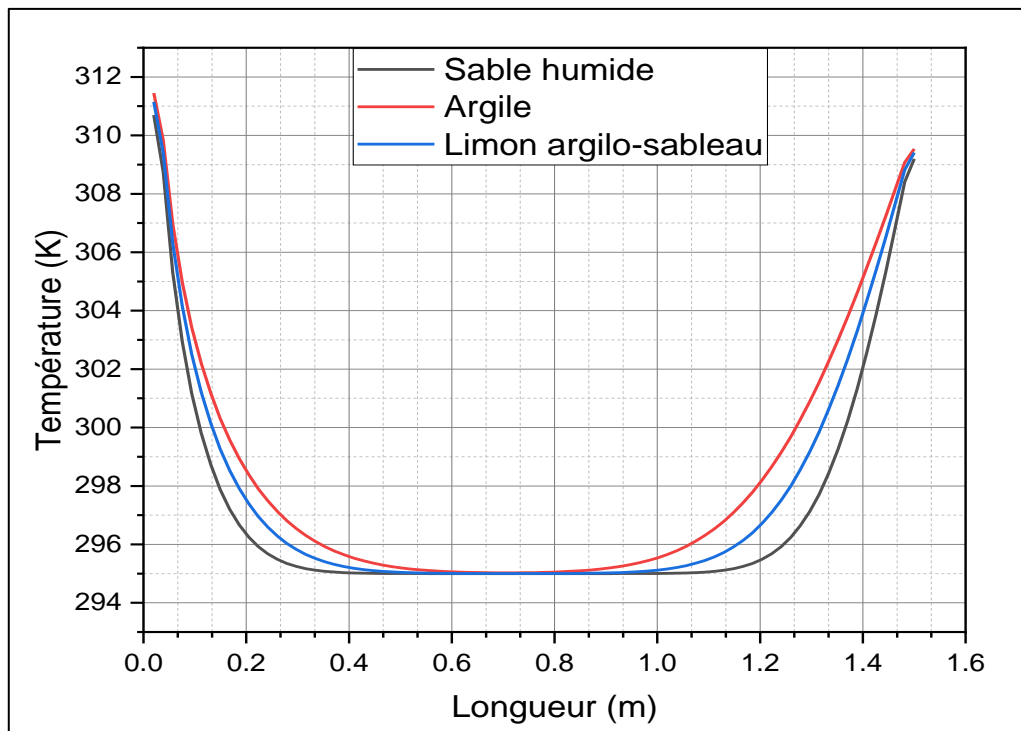


Figure III.20 : Distribution de la température du sol après 8h de fonctionnement à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D= 04 cm, pour 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux))

III.10.3. Diamètre 11 cm :

Ce graphe représente La distribution de la température du sol des bords du tube vers la surface du sol en fonction du temps (diamètre du tube 11 cm, type de sol (sable humide)), on remarque :

- La chaleur du sol se diffuse du rayon 0.055 m jusqu'à 0.507 m sous forme d'un anneau après 8 heures.
- Il n'y a pas d'effet de la chaleur de la surface du sol sur le tube.
- La température diminue de 311 K à 296 K pour les rayons de 0.055 m jusqu'à 0.276 m.

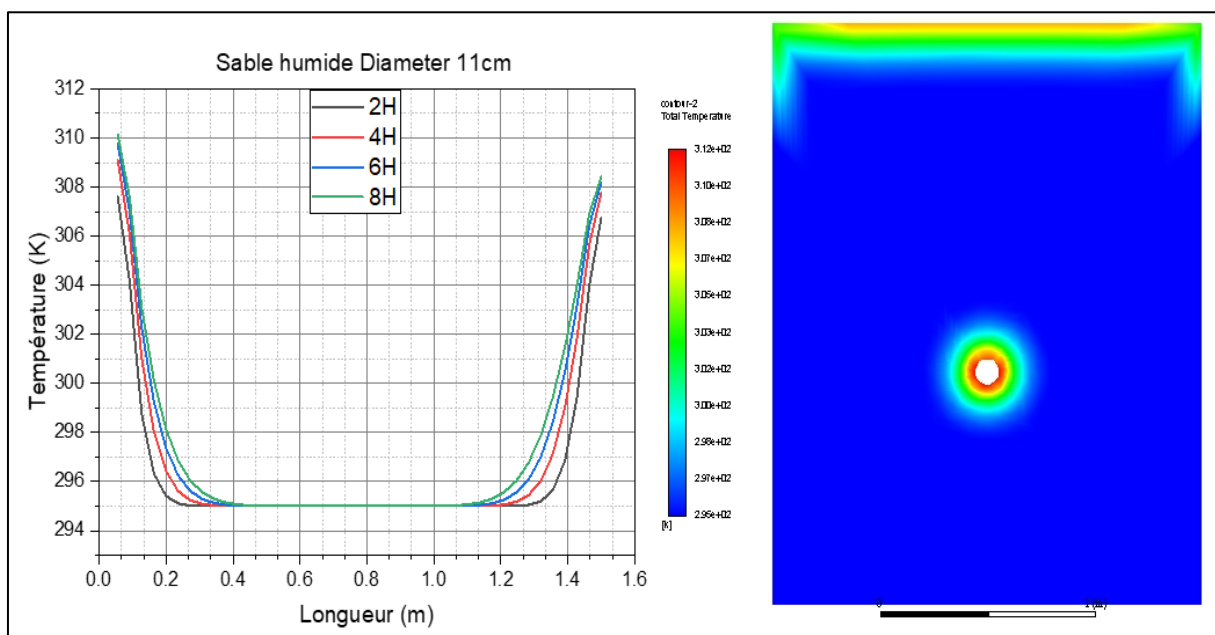


Figure III.21 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=11 cm, type de sol (sable humide)).

La figure (III.22) traduit la distribution de la température en fonction du temps, depuis la surface extérieure du tube et allant vers la surface du sol (D=11 cm, sol Argileux), nous remarquons que :

- La chaleur du sol se diffuse d'un rayon 0.055 m jusqu'à 0.734 m sous forme d'un anneau après 8 heures de fonctionnement.
- la température de la surface du sol n'a pas propager dans tous le sol et elle n'a aucun effet sur le tube.

La température diminue de 311 K à 296 K pour des rayons allons de 0.055 m jusqu'à 0.414 m

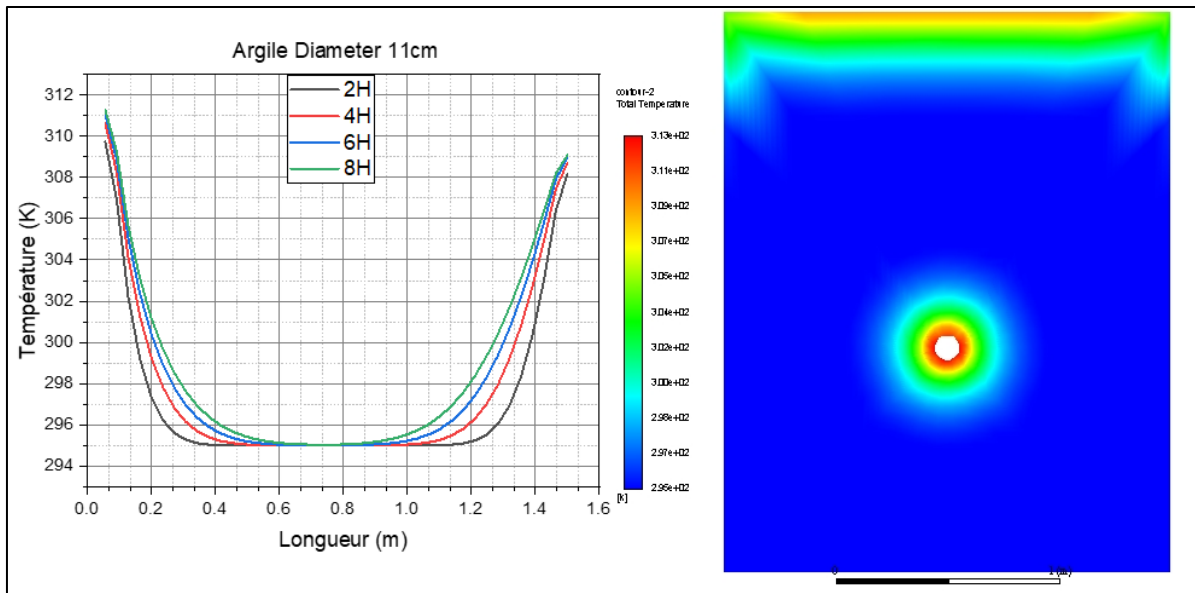


Figure III.22 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=11 cm, Sol=Argileux)

La figure III-23 présente la distribution de la température du sol en fonction du temps, depuis la surface extérieure du tube vers la surface du sol (D= 11 cm, type de sol (limon argilo-sableux)), nous remarquons que :

- La température du sol se diffuse du rayon 0.055 m jusqu'à 0.648 m sous forme d'un anneau après 8 heures.
- Après 8 heures de fonctionnement, il n'y a pas d'effet de la température de la surface du sol sur le tube.
- La température diminue de 311 K à 296 K pour des rayons de 0.055m jusqu'à 0.349m.

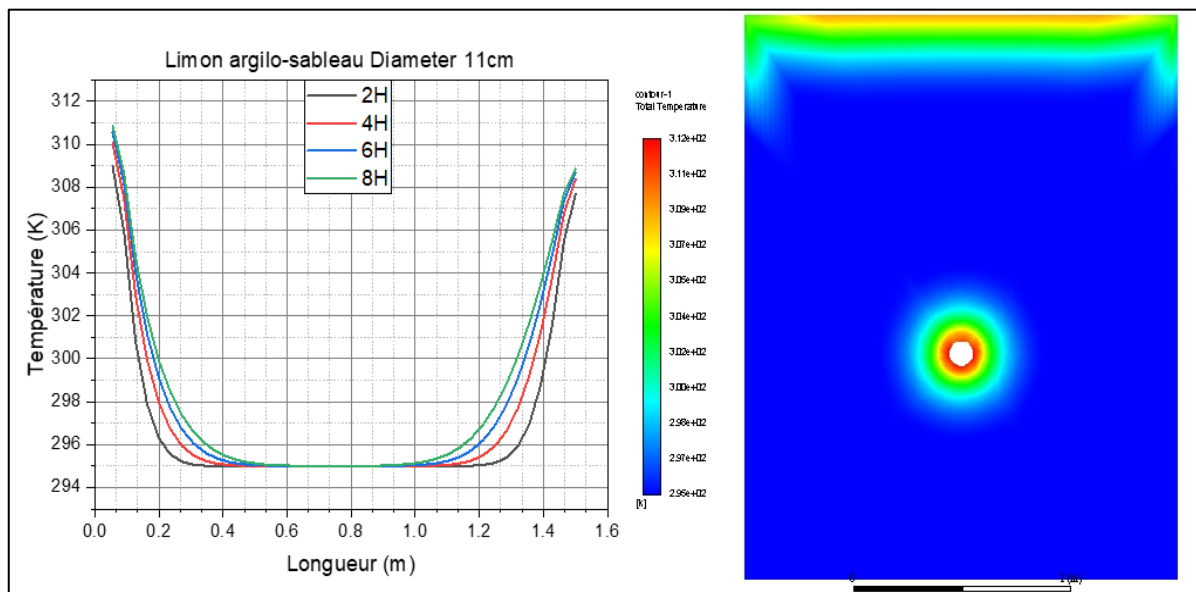


Figure III.23 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol en fonction du temps (D=11 cm, Sol (limon argilo-sableux)).

La figure III-24 présente la distribution de la température dans le sol en fonction après 8 heures de fonctionnement, à partir de la surface du tube jusqu'à la surface du sol, pour un diamètre du tube de 11cm et pour trois types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux). Nous remarquons que le rayon de propagation de la chaleur a atteint sa plus grande étendue dans l'argile puis dans le limon argilo sableux et enfin, la plus petite des diffusions dans le sol de type sable humide.

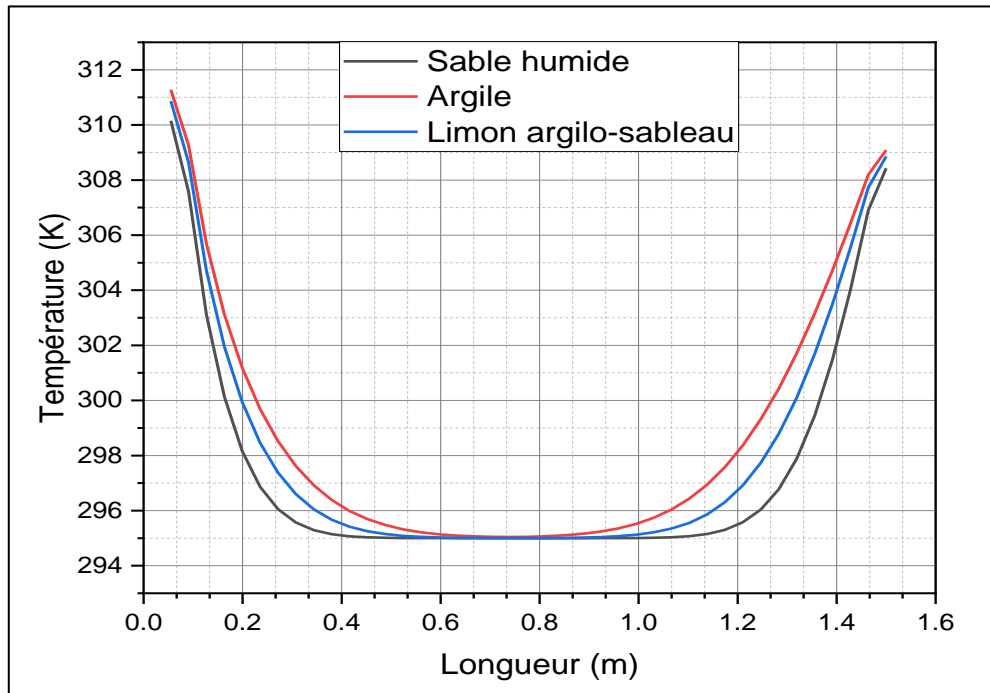


Figure III.24 : Distribution de la température du sol à partir de la surface du tube vers la surface du sol après 8 heures de fonctionnement pour différents types de sol (D=11 cm).

. Distribution de la température en fonction du temps pendant 24 heures de fonctionnement :

La figure III-25 présente la distribution température dans le sol sous l'effet combiné des températures du tube et celle de la surface du sol, pendant 24h de fonctionnement dans un sol argileux (D= 11 cm)

Nous constatons qu'après 10 heures, une variation de la température a été remarquée sur toute la distance entre le tube et la surface du sol. Cette variation est faible au milieu de cette distance et augmente en allant vers le tube et vers la surface du sol. La température du sol augmente continuellement en fonction du temps. Vu le temps de calcul important, nous avons limité le calcul à 24heures de fonctionnement.

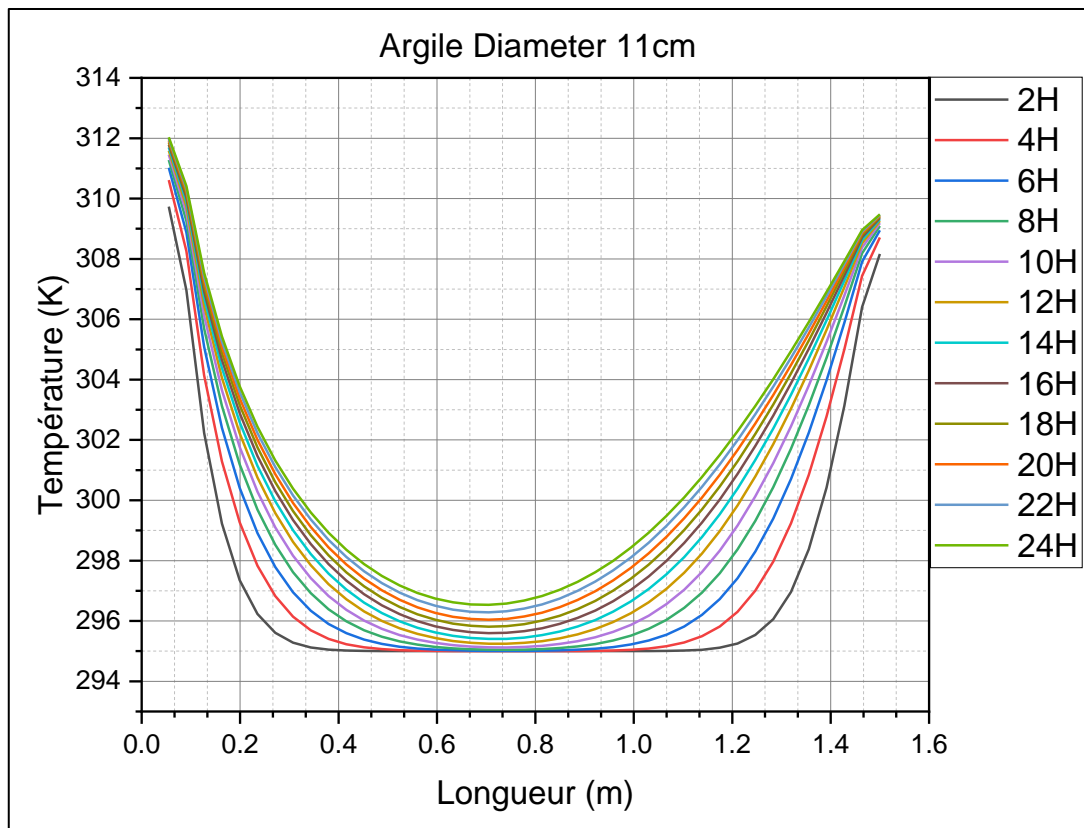


Figure III.25 : Distribution de la température dans le sol pendant 24h de fonctionnement (D= 11 cm, Sol Argileux).

III.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de en utilisant le logiciel Workbench ANSYS pour simuler numériquement la distribution de température dans le sol sous l'effet combiné de la température de la surface du sol et celle d'un échangeur eau-sol enterré à une profondeur de 1.6 m.

En comparant les résultats de l'étude stationnaire et l'étude transitoire et vu l'éloignement très flagrant entre les résultats de l'étude stationnaire et la réalité nous avons choisis d'exécuter le calcul en régime transitoire.

La simulation du système étudié et l'analyse des résultats obtenus ont permis d'apporter les conclusions suivantes:

- ✓ Plus la longueur du tube est grande plus la température de l'eau diminue
- ✓ La diffusion de la chaleur dans le sol prend la forme d'un anneau.
- ✓ Aucun effet de la température de la surface du sol n'a été observé sur l'échangeur avant 8 heures.
- ✓ Ce n'est qu'après 8 heures que l'effet de la température de la surface du sol commence à affecter la température de tube.

- ✓ Il y a une relation proportionnelle entre l'augmentation du diamètre du tube et l'ampleur de la propagation de la chaleur dans le sol.
- ✓ Le rayon de propagation de la chaleur atteint sa plus grande valeur d'abord dans l'argile ensuite dans le limon argilo sableux et enfin dans le sable humide et ce malgré que la conductivité thermique de l'argile est moins importante que celle du limon argilo sableux, ceci étant expliqué par la chaleur spécifique et la masse volumique des différents types de sol.

La vitesse de propagation de la chaleur (taux de variation) diminue avec le temps.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude est une simulation numérique d'un phénomène physique très important qui est devenu un obstacle devant le bon usage des échangeurs de chaleur enterrés. Ce phénomène physique a porté l'appellation « saturation du sol ».

L'objectif principal est de tracer la distribution de température dans le sol en fonction du temps, la longueur du tube et le type du sol afin de déterminer la distance nécessaire entre deux tubes et la distance optimale entre l'échangeur et la surface du sol.

L'échangeur est constitué d'un tube en PVC (polychlorure de vinyle ou polychlorure de vinyle) disposé en serpentin et enterré dans le sol à une profondeur fixe de 1.5 m Di.

Le principe de fonctionnement en est très simple : l'eau chaude est pompée à travers le tube enterré, lors de son passage dans le tube cette eau va perdre une certaine quantité de sa chaleur en l'échangeant avec celle du sol plus froid, Ain l'eau va se rafraichir au fur et à mesure de sa progression jusqu'à ce qu'il soit traité bien plus froidement dans le bâtiment.

La simulation numérique effectuée avec le logiciel industriel Workbench ANSYS pour un régime transitoire 2D a permis de calculer l'évolution de la température entre l'échangeur enterré et le sol. 'eau est d'autant plus basque la longueur du tube est grande, tandis qu 'elle s'élève avec l'augmentation de la section transversale du tube, le sol argileux humide assurerait le meilleur transfert de chaleur, en fin le taux de diffusion de la chaleur diminue avec le temps.

L'analyse des résultats de cette étude a permis de dire que la meilleure distance entre les tubes du serpentin de l'échangeur géothermique eau-sol doit être supérieure à 80 cm.

Référence

- [1] <https://media.nti.org/pdfs/140-Fr.pdf>."
- [2] ZIERENBERG, Robert A, et al. Preliminary description of rocks and alteration in IDDP-2 drill core samples recovered from the Reykjanes Geothermal System, Iceland. In: Geothermal Resources Council 41st Annual Meeting-Geothermal Energy: Power To Do More, GRC 2017. Geothermal Resources Council, 2017. p. 1599-1615.
- [3] docplayer.fr/174473288-Theme-1b-la-dynamique-de-la-terre-tp3-les-proprietes-geothermiques-de-la-terre.
- [4] Stober, I, & Bucher, K. (2013). History of geothermal energy use. In Geothermal Energy (pp. 15-24). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [5] Sung Lok Do, Jeff S. Haberl, 2010 A review of ground coupled heat pump models used in wholebuilding computersimulation programs.
- [6] S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en géophysique, Université Boumerdès, Mars 2006.
- [7] Ouali, S, Khellaf, A, & Baddari, K. (2006). Etude géothermique du Sud de l'Algérie. Revue des énergies renouvelables, 9(4), 297-306.
- [8] Benfateh, H. (2009). Etude du Rafrâchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- [9] www.quelleenergie.fr/magazine/pompes-chaleur/pompe-chaleur-geothermique-5-idees-recues-4227/
- [10] Ghyselinck-Bardeau, M., and Wuilleumier, A, "Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse à basse énergie (nappes alluviales et thermisme) dans la région Midi-Pyrénées." BRGM Report BRGM/RP-55888-FR. 2007.
- [11] MESBAHI TEDJANI (2015) Amélioration de la Qualité de l'Énergie Électrique Produite par un Système de Conversion Éolien (Doctoral dissertation, BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY)
- [12] Khabbaz, M. (2016). Contribution à l'étude d'un échangeur de chaleur airsol (puits canadien) pour le rafraîchissement de l'air sous le climat chaud et semi-aride de Marrakech (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- [13] B. Mebarki et Al '' Etude d'un système de climatisation intégrant un puits Canadien dans les zones arides, cas de Béchar', article- revue des énergies renouvelable ' vol15 N°3(2012) P (465-478)

-
- [14] Julien HEINTZ (CETIAT). Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d'informations) "janvier 2008
- [15] Pierre Hollmuller, Utilisation des échangeurs air/sol pour le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Thèse de doctorat présentée à la faculté des sciences de l'université de Genève 2002
- [16] Salomon, Thierry, et al. "Dimensionnement du puits climatique." Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits canadiens ou provençaux, Rapport Adème, Région Languedoc Roissillon (2003)
- [17] Belloufi Yousef (2012). Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement du local sol (Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra).
- [18] KETHIRI Mohamed Aymen (2019). Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation des palmiers dattiers dans la région de Biskra. Sol (Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra).
- [19] ARROUSSI Aicha. (2020). Etude d'un échangeur géothermique eau/sol (Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra).
- [20] Benchemsa, I. (2017). L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique. (Mémoire de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA).
- [21] Benfateh, H. (2009). Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra)
- [22] Benhammou, Mohammed, and Belkacem Draoui. "Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015): 348-355.
- [23] Naili, Nabiha, et al. "Energy and exergy analysis of horizontal ground heat exchanger for hot climatic condition of northern Tunisia." *Geothermics* 53 (2015): 270-280.
- [24] Belloufi, Y, Brima, A, Zerouali, S, Atmani, R., Aissaoui, F, Rouag, A, & Moumami, N. Numerical and experimental investigation on the transient behavior of an earth air heat exchanger in continuous operation mode Numerical and experimental investigation on the transient behavior of an earth air heat exchanger in continuous operation mode.
- [25] Rouag, Amar, Adel Benchabane, and Charaf-Eddine Mehdid. "Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I a new transient semi-analytical model for determining soil temperature." *Journal of cleaner production* 182 (2018): 538-544.

-
- [26] Mehdid, C. E, Benchabane, A, Rouag, A, Moummi, N, Melhegueg, M. A, Moummi, A, & Brima, A. (2018). Thermal design of Earth-to-air heat exchanger. Part II a new transient semi-analytical model and experimental validation for estimating air temperature. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1536-1544.
- [27] Khali, S, et al. "Numerical investigation of non-Newtonian fluids in annular ducts with finite aspect ratio using lattice Boltzmann method." *Physical Review E* 87.5 (2013): 053002.
- [28] VERSTEEG.H et WEERATUNGE.M, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson éducation. (2007).
- [29] Arfaoui Omrani A. *Etude de la convection aux petites échelles : application au refroidissement des composants électroniques*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne et l'Université de Tunis el Manar; 2009.
- [30] <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [31] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, 'An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method', Addison Wesley Longman Limited, England, 1995