



Université Mohamed  
Khider de Biskra Faculté  
des sciences et de la  
technologie Génie  
mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :

**Imad Eddine KABOUIA**

Le : 30 septembre 2020

## Titre

**Contribution à l'étude d'un nouveau système de rafraîchissement  
et de ventilation par une tour du vent couplée avec un échangeur  
géothermique et une cheminée solaire : cas d'un échangeur  
géothermique air/sol.**

---

### Jury :

Pr. Adel BENCHABANE	Pr	Université de Biskra	President
Dr. Faris AISSAOUI	MCB	Université de Ghardaia	Rapporteur
Dr. Hocine DJEMAI	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 – 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# DEDICACE

*J*e dédie ce modeste travail :

*A* mes très chères parents << **ma mère et mon père** >> qui m'ont bien élevés, aidés

Soutenus et encouragés durant toutes ces années d'étude.

*A* ma grand-mère pour sa tendresse, je lui souhaite une longue vie.

*A* mes très chers frères : "**rida, Amin**" pour

Leurs précieuses aides et leurs merveilleux conseils.

*A* toute la famille <<**KABOUIA**>> chacun par son nom.

*A* mes amis durant mes années d'étude qui m'ont beaucoup encouragés chacun par son nom "**Sohieb ,Achref ,Islem ,Yosef ,Sami,Abdou...**".

*A* tous mes professeurs que j'ai connus durant mes études.

*A* mes connaissances de poche ou de loin

*A* tous ceux que j'aime et que je leur souhaite la réussite pour toute la vie.

## REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout puissant qui ma donné la force et la patience pour accomplir ce travail.*

*En second lieu j'adresse mes remerciements à mon enseignant **Dr. Faris AISSAOUI** qui ma guidé dans mon travail et ma aidé pour trouver des solutions a des problèmes que j'ai rencontré dans ce mémoire*

*Je tiens très sincèrement à remercier Monsieur **Amar ROUAG**, Docteur à l'Université de Ouargla, Qui m'a donné un coup de main lors de la préparation de cette note.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions a l'occurrence.*

**Pr. Adel BENCHABANE.**

**Dr. Hocine DJEMAI.**

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements a tous les professeurs de **l'université MOHAMED KHIDER BISKRA** qui mon enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu pour mes études.*

*A mes amies qui par leurs prières et leurs encouragements j'ai pu surmonter tous obstacles.*

*Merci, enfin a tout personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce travail.*

**Sommaire**

Dédicace .....	I
Remerciements.....	II
Sommaire .....	III
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	XI
Nomenclature.....	XII
Résumé.....	XV
ملخص .....	XVI
Abstract.....	XVII

**Introduction générale**

1.Contexte de l'étude.....	1
2. Position du problème.....	1
3.Objectifs.....	2
4.Méthodologie de recherche.....	3

**Chapitre I : Etude Bibliographique**

I.1 Introduction.....	5
I.2 Synthèse bibliographique .....	5
I.2.1 Analyse des travaux effectués.....	5
I.3 Conclusion .....	22
I.4 Références bibliographiques.. ..	23

**CHAPITRE II: Généralités sur l'énergie géothermique et les échangeurs de chaleur  
air/sol**

II.1 Introduction.....	27
II.2 Énergie géothermique.....	27
II.2.1 Définition.....	27
II.2.2 Classification des ressources géothermiques.....	27

II.2.2.1 Géothermie à haute énergie.....	27
II.2.2.2 Géothermie moyenne énergie.....	28
II.2.2.3 Géothermie basse énergie.....	28
II.2.2.4 Géothermie très basse énergie.....	29
II.2.3 Distribution de température à la zone géothermie très basse.....	29
II.2.4 Importance de la géothermie.....	30
II.2.5 Avantages et les inconvénients de la géothermie.....	30
II.2.5.1 Avantages.....	30
II.2.5.2 Inconvénients.....	31
II.2.6 Utilisation de l'énergie géothermie.....	31
II.2.7 Procédés de la géothermie.....	31
II.2.7.1 Pompe à chaleur géothermique.....	31
a. Définition.....	31
b. Composant d'un PAC.....	32
c. Principe de fonctionnement.....	33
d. Principe de thermodynamique de PAC.....	33
II.2.7.2 Puits canadien (provençal).....	34
A. Définition.....	34
B. Principe de fonctionnement.....	34
C. Emplacement du puits canadien.....	35
D. Eléments pour la conception d'un puits canadien/provençal.....	36
II.3 Échangeur air-sol.....	36
II.3.1 Définition.....	36
II.3.2 Modes de fonctionnement d'un échangeur air-sol.....	37
a. Fonctionnement en hiver.....	37
b. Fonctionnement en été.....	37
c. Fonctionnement au printemps / automne.....	37
II.3.3 Différents types d'installation des échangeurs air/ sol.....	38
II.3.3.1 Échangeur horizontal.....	38

II.3.3.2 Échangeurs air sol spéciaux.....	38
II.3.3.3 Échangeurs air sol verticaux.....	39
II.3.4 Caractéristiques techniques d'un échangeur air/ sol.....	39
II.3.4.1 Longueur des tubes.....	39
II .3.4.2 Diamètre des tubes.....	39
II .3.4.3 Disposition des tubes.....	40
II.3.4.4 Nombre de tubes puits.....	40
II .3.4.5 Profondeur d'enfouissement d's tubes.....	41
II .3.4.6 Pente du conduit.....	41
II .3.4.7 Matériau constitutif des tubes.....	41
II .3.4.8 Espacement entre les tubes.....	41
II .3.5 Différents types de tuyaux.....	41
II .3.6 Avantages et les inconvénients d'un échangeur air/sol.....	42
A. Avantages.....	42
B. Inconvénients.....	42
II.4 Conclusion.....	43
II.5 Références bibliographiques.....	44

**Chapitre III : Modélisation mathématique du problème par logiciel de simulation**

III.1 Introduction.....	46
III.2 Position du problème .....	46
III.3 Mesures de l'échangeur.....'	47
III.4 Présentation de la formulation mathématique .....	48
III.4.1 Modèle thermique du sol.....	48

III.4.2 Description du modèle étudié.....	48
III.4.3 Exemple d'un schéma d'installation de "l'échangeur " puis canadien" .....	49
III.4.4 Établissement des modèles semi- analytiques.....	49
III.5 Hypothèses considérées.....	50
III.6 Méthode de calcul.....	51
III.6.1 Estimation de la température de l'air.....	51
III.6.2 Estimation de la résistance thermique du sol.....	52
III.7 Organigramme du modèle GRBM.....	56
III.8 Conclusion.....	59
III.9 Références bibliographiques.....	60

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

IV.1 Introduction.....	62
IV.2 Validation des résultats.....	62
IV.2.1 Propriétés physiques et thermiques (de l'air, des tuyaux et du sol )utilisé dans validation du tuyaux.....	62
IV.3 Etude paramétrique.....	65
IV .3.1 Effet de la durée de fonctionnement sur la température de l'air(3D).....	66
IV .3.2 Effet de la durée de fonctionnement sur la température du sol(3D).....	68
IV .3.3 Effet de la durée de fonctionnement sur le rayon du sol $r_s$ .....	71
IV .3.4 Effet de la température ambiante sur la Longueur de l'échangeur air-sol (40°C, 45 °C, 50 °C et 57 °C).....	72
IV.3.5 Effet du diamètre des tubes sur la Longueur de l'échangeur air-sol (0.055m, 0,1 m, 0,15 m et 0.3 m).....	73
IV .3.6 Effet de vitesses d'air sur la Longueur de l'échangeur air-sol ( $T=f(L)$ pour différents vitesses) $V_a =1\text{ m/s}$ $V_a =3.5\text{ m/s}$ et $V_a=5\text{ m/s}$ .....	74
IV .3.7 Effet de la conductivité thermique du sol sur la Longueur de l'échangeur (0.5 W/m.K , 1.5 W/m.K , 4 W/m.K ).....	76



IV.4 Conclusion.....77

IV.5 Références bibliographiques.....78

**Conclusion générale.....80**

**Annexes.....83**

## Liste des figures

<b>Chapitre I : Etude Bibliographique</b>	
<b>Figure. I.1</b>	Situation géographique de la région d'étude.....9
<b>Figure. I.2</b>	Variation du nombre de jour, $N$ , où le potentiel thermique $\Delta T$ pour le chauffage est obtenu, pour une profondeur adimensionnelle $z/d=2.0$ .....9
<b>Figure. I.3</b>	Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour différents débits d'air.....10
<b>Figure. I.4</b>	Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur.....10
<b>Figure. I.5</b>	Répartition de en 03 tubes (Source : l'auteur, langage Scilab).....11
<b>Figure. I.6</b>	Géométrie de l'échangeur Air-Sol étudié.....12
<b>Figure. I.7</b>	Échangeur de chaleur Terre-air (mode boucle ouverte).....13
<b>Figure. I.8</b>	Échangeur de chaleur Terre-air (mode boucle fermée).....13
<b>Figure. I.9</b>	Vue externe du banc des essais expérimentaux (Site Université Biskra).....15
<b>Figure I.10</b>	Comparaison avec N. Moummi et al.....15
<b>Figure I.11</b>	Diagramme schématique du système EAHE installé dans une centrale à turbine à gaz.....16
<b>Figure I.12</b>	Discretisation du domaine EAHE.....17
<b>Figure I.13</b>	Schème descriptif de l'EAHE: <b>a)</b> partie verticale I, <b>b)</b> partie horizontale II, <b>c)</b> partie verticale III.....17
<b>Figure I.14</b>	Géométrie simplifiée de l'échangeur air-sol étudié.....18
<b>Figure I.15</b>	Modèle de vérification avec les travaux de Barakat et al (2016).....19
<b>Figure I.16</b>	Schéma explicatif de l'implantation des thermocouples pour différent profondeur de l'échangeur air/sol.....20
<b>Figure I.17</b>	Photos de l'installation expérimentale d'EAHE à l'Université de Biskra, <b>a)</b> trou de forme serpentine; <b>(b)</b> PVC horizontal enterré tuyau avec thermocouples.....21
<b>Figure I.18</b>	Évolution de la température de l'air le long de l'échangeur air/sol.....22

**Chapitre II: Généralités sur l'énergie géothermique et les échangeurs  
de chaleur air/sol**

<b>Figure. II.1</b>	Géothermie à haute énergie.....	28
<b>Figure. II.2</b>	Géothermie à basse énergie.....	29
<b>Figure. II.3</b>	Variation de la température en fonction de profondeur et les saisons.....	30
<b>Figure. II.4</b>	Schéma descriptif d'une PAC.....	32
<b>Figure. II.5</b>	Principe de fonctionnement d'une PAC.....	33
<b>Figure. II.6</b>	Schéma de principe d'une machine thermodynamique.....	34
<b>Figure. II.7</b>	Description d'un puits canadien.....	34
<b>Figure. II.8</b>	Schéma de fonctionnement été-hiver.....	35
<b>Figure. II.9</b>	Emplacement du puits.....	35
<b>Figure. II.10</b>	Géométrie de l'échangeur air-sol modélisé.....	37
<b>Figure. II.11</b>	Echangeur air/sol horizontal (style européen) A). Connexion en série, B). Connexion en parallèle.....	38
<b>Figure. II.12</b>	Echangeur air sol spirale (Amérique du Nord).....	39
<b>Figure. II.13</b>	Echangeur air sol vertical.....	39
<b>Figure. II.14</b>	Echangeur géothermique a air avec Tube en méandre.....	40
<b>Figure. II.15</b>	Echangeur géothermique a air avec Tube en boucle.....	40
<b>Figure. II.16</b>	Echangeur géothermique a air constitué d'un faisceau de tubes.....	40

**Chapitre III: Modélisation mathématique du problème par logiciel de simulation**

<b>Figure. III.1</b>	Schéma descriptif de l'échangeur air/sol.....	47
<b>Figure. III.2</b>	Schéma simplifié d'un échangeur air/sol en forme serpentín.....	47
<b>Figure. III.3</b>	Schéma montre la subdivision du tuyau EAHE et du sol en plusieurs couches.....	48
<b>Figure. III.4</b>	Schéma d'installation de l'échangeur étudié.....	49
<b>Figure. III.5</b>	Schéma du cylindre creux semi-infini étudié.....	50
<b>Figure. III.6</b>	Transfert de chaleur entre l'échangeur et le tube coupe longitudinale et radiale.....	52

<b>Figure. III.7</b>	Schéma montre l'épaisseur du sol perturbé, $\delta$ , et le rayon du sol, $r_\delta$ .....	52
<b>Figure. III.8</b>	Organigramme détaillé du modèle GRBM.....	58

**Chapitre IV: Résultats et discussions**

<b>Figure. IV.1</b>	Validation du modèle GRBM avec des résultats expérimentaux de Mehdid et al.....	63
<b>Figure. IV.2</b>	Variations de température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur à partir des données de Mehdid pour 6 heures de fonctionnement.....	64
<b>Figure. IV.3</b>	Variation du température de l'air le long de l' échangeur pendant 24 heures de fonctionnement.....	67
<b>Figure. IV.4</b>	Variation du température de l'air le long de l' échangeur pendant 12 heures de fonctionnement.....	67
<b>Figure. IV.5</b>	Variation du température de l'air le long de l' échangeur pendant 6 heures de fonctionnement.....	68
<b>Figure. IV.6</b>	Variation du température de l'air le long de l' échangeur pendant 3 heures de fonctionnement.....	68
<b>Figure. IV.7</b>	Variation du température de sol le long de l' échangeur pendant 24 heures de fonctionnement.....	69
<b>Figure. IV.8</b>	Variation du température de sol le long de l' échangeur pendant 12 heures de fonctionnement.....	70
<b>Figure. IV.9</b>	Variation du température de sol le long de l' échangeur pendant 6 heures de fonctionnement.....	70
<b>Figure. IV.10</b>	Variation du température de sol le long de l' échangeur pendant 3 heures de fonctionnement.....	71
<b>Figure. IV.11</b>	Variation de $r_\sigma$ pour chaque heur pendent 24 h de fonctionnent....	72
<b>Figure. IV.12</b>	Effet des déferents température ambiante sur la longueur de l'échangeur.....	73
<b>Figure. IV.13</b>	Effet du diamètre des tubes pour 6h de fonctionnement.....	74
<b>Figure. IV.14</b>	Effet du diamètre des tubes pour 12h de fonctionnement.....	74
<b>Figure. IV.15</b>	Effet de vitesses d'air Pour 6h de fonctionnement.....	75
<b>Figure. IV.16</b>	Effet de vitesses d'air Pour 12h de fonctionnement.....	75
<b>Figure. IV.17</b>	Effet de la conductivité thermique du sol après 6h de fonctionnement...	76
<b>Figure. IV.18</b>	Effet de la conductivité thermique du sol après 12h de fonctionnement..	77

## Liste des tableaux

### Chapitre I: Etude Bibliographique

**Tableau. I.1** Résumé des travaux effectués rencontrés.....5

### Chapitre II: Généralités sur l'énergie géothermique et les échangeurs de chaleur air/sol

**Tableau. I.1** Comparaison entre différents types de tuyaux.....41

### Chapitre IV: Résultats et discussions

**Tableau. IV.1** Caractéristiques spécifiques de l'échangeur air-sol de Mehdid et al.....62

**Tableau. IV.2** Validation des températures de l'air du présent modèle et modèle GRBM de (MEHDID)[1] .pendent 6 h de fonctionnement.....64

**Tableau. IV.3** Températures de l'air ambiant injecter par chaque heure.....65

## Nomenclature

les différentes abréviations et notations utilisées tout au long de ce mémoire sont expliquées ci-dessous :

Symboles	Désignation	Unités
<b>T</b>	Température	[°C ]
<b>R</b>	Résistance thermique	[m <sup>2</sup> K / W]
<b>r</b>	Rayon	[m]
<b>L</b>	Longueur	[m]
<b>Q</b>	Flux thermique par unité de longueur	[W / m]
<b>J<sub>0</sub></b>	Fonction de Bessel de première espèce d'ordre zéro	-
<b>J<sub>1</sub></b>	Fonctions de Bessel de première espèce d'ordre un	-
<b>β<sub>n</sub></b>	Racine de la fonction J <sub>0</sub> (x)	-
<b>t</b>	Temps	[s]
<b>v</b>	Vitesse	[m/s]
<b>S</b>	Section de tuyau	[m <sup>2</sup> ]
<b>ṁ</b>	Débit massique	[kg/s]
<b>q<sub>v</sub></b>	Débit volumique	[m <sup>3</sup> /s]
<b>h</b>	Coefficient de transfert de chaleur par convection	[W/ m <sup>2</sup> K]
<b>d</b>	Diamètre du tube	[m]
<b>C<sub>p</sub></b>	Chaleur spécifique	[J / (kg. K)]
<b>ΔX</b>	Longueur de couche	[m]

lettres grecques	Définitions	Unité
<b>α</b>	Diffusivité thermique du sol, tel que : $a = \lambda / (\rho.C_p)$	[m <sup>2</sup> /s]
<b>λ</b>	Conductivité thermique du sol	[w/ (m.K)]
<b>δ</b>	Épaisseur du sol	[m]
<b>ρ</b>	Masse volumique	[ Kg/m <sup>3</sup> ]
<b>μ</b>	Viscosité dynamique	[ kg / (m. s)]
<b>ν</b>	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> / s]

Indices	Définitions
<b>0</b>	Initiale
<b>1</b>	Intérieur
<b>s</b>	Sol
<b>a</b>	Air
<b>amb</b>	Ambiant
<b>tub</b>	Tube
<b>f</b>	Fluide
<b>int</b>	Interne
<b>ext</b>	Externe
<b>th</b>	thermique
<b>H</b>	Hydraulique
<b>tot</b>	Total
<b>m</b>	Index du temps
<b>i</b>	Index du temps
<b>j</b>	Index de la couche
<b>k</b>	Index de rayon
<b>n</b>	Indice
$\infty$	Rayon loin de l'échangeur

Nombres adimensionnels	Définitions
<b>Nu</b>	Nombre de Nusselt
<b>Pr</b>	Nombre de Prandlt
<b>Re</b>	Nombre de Reynolds
<b>Gr</b>	Nombre de Grashof

Acronyme des termes utilisés	Définitions
<b>EAHE</b>	Échangeur géothermal air-sol (Earh-Air-Heat-Exchanger )
<b>EWHE</b>	Échangeur géothermal eau-sol(Earth-Water-Heat-Éxchangr)
<b>EATHE</b>	Échangeur de chaleur Earth Air Tunnel(Earth Air Tunnel Heat Exchanger)
<b>PAC</b>	Pompe à chaleur

<b>GAC</b>	Aéro-Refroidisseur Géothermal (Geothermal Aero-Cooler)
<b>COP</b>	Coefficient de performance (Coefficient of performance)
<b>DCT</b>	Tour de refroidissement à (Dry Cooling Tower)

---



## Contribution à l'étude d'un nouveau système de rafraîchissement et de ventilation par une tour du vent couplée avec un échangeur géothermique et une cheminée solaire : cas d'un échangeur géothermique air/sol.

### Résumé

La différence de degrés de température de l'atmosphère et celle des profondeurs du sol nous fait penser à l'utilisation de cette différence ou que ce soit pour le réchauffement en hiver ou bien le rafraichissement en été et cela par l'utilisation des échangeurs géothermique selon les besoins. *L'*étude que nous présentons dans cette mémoire concerne le refroidissement ou le réchauffement de l'air par l'exploitation d'un échangeur géothermique air/sol en forme de serpent. *L'*objectif principal réside en la détermination du profil de température unidirectionnel dans le sol, ensuite on a déterminé et évalué la température de l'air le long de l'échangeur horizontal enterré, en utilisant l'équation de la chaleur. *Un* modèle semi-analytique a été précédemment développé composé de deux sous-modèles. Le premier modèle s'appelle RBM et le second s'appelle GRBM Pour prédire les performances thermiques et évaluer la température de l'air le long d'un échangeur en fonctionnant dans des conditions transitoires en mode refroidissement. *Nous* avons utilisé le logiciel « MATLAB », pour simuler numériquement le comportement thermique de l'échangeur ainsi que pour montrer l'effet de certains paramètres sur les performances thermiques du système. *Les* résultats obtenus montrant que la variation de la température du surface extérieure, ainsi que les caractéristiques du sol ont une grande influence sur l'écart de température d'air à la sortie de l'échangeur et son état du fonctionnement.

**Mot clés** : échangeur de chaleur, tour de refroidissement, géothermie peu profonde, échangeur air/sol.

المساهمة في دراسة نظام تبريد وتهوية جديد باستخدام برج الرياح المقترن بمبادل حراري أرضي ومدخنة شمسية:  
حالة مبادل حراري أرضي / هوائي

## ملخص

إن الاختلاف في درجات حرارة الغلاف الجوي ودرجات أعماق الأرض يجعلنا نفكر في استخدام هذا الاختلاف إما للتدفئة في الشتاء أو التبريد في الصيف وذلك باستخدام المبادلات الحرارية الأرضية حسب الحاجة. تتعلق الدراسة التي نقدمها في هذه المذكرة بتبريد الهواء و تهوية المنازل عن طريق تشغيل مبادل جيوحراري تربة / هواء على شكل ملف. الهدف الرئيسي هو تحديد درجة الحرارة أحادية الاتجاه في التربة ، ثم تحديد وتقييم درجة حرارة الهواء على طول المبادل الأفقي المدفون ، باستخدام معادلة الحرارة ، نموذج شبه تحليل تم تطويره سابقاً يتكون من نموذجين فرعيين. النموذج الأول يسمى RBM والثاني يسمى GRBM للتنبؤ بالأداء الحراري وتقييم درجة حرارة الهواء على طول المبادل أثناء التشغيل في ظل ظروف عابرة في وضع التبريد. استخدمنا برنامج « MATLAB » لمحاكاة السلوك الحراري للمبادل رقمياً وكذلك لإظهار تأثير معاملات معينة على الأداء الحراري للنظام. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن التباين في درجة حرارة السطح الخارجي ، وكذلك خصائص التربة لهما تأثير كبير على الاختلاف في درجة حرارة الهواء عند مخرج المبادل و زمن التشغيل.

**الكلمات المفتاحية:** مبادل حراري ، برج تبريد ، طاقة حرارية أرضية ضحلة ، مبادل هوائي / أرضي

**Contribution to the study of a new cooling and ventilation system using a wind tower coupled with a geothermal exchanger and a solar chimney: case of a geothermal air / ground exchanger.**

**Abstract**

The difference in atmospheric temperature degrees and that of the soil depths makes us think of the use of this difference or whether it is for warming in winter or cooling in summer and this by using geothermal interchanges as needed. The study we present in this note concerns the cooling or warming of the air by operating a geothermal air/ground coil-shaped interchange. The main objective lies in determining the one-way temperature profile in the soil, then determining and assessing the air temperature along the buried horizontal exchanger, using the heat equation. A transient semi-analytic model was previously developed consisting of two sub-models. The first model is called **RBM** and the second is called **GRBM** To predict thermal performance and assess air temperature along an exchanger by operating in transient conditions in cooling mode. We used the "**MATLAB**" software to digitally simulate the thermal behavior of the interchange and to show the effect of certain parameters on the thermal performance of the system. The results obtained showing that the variation in the temperature of the outside surface, as well as the characteristics of the soil, have a great influence on the difference in air temperature at the exit of the interchange and its state of operation.

**Keywords:** heat exchanger, cooling tower, shallow geothermal energy, air / ground exchanger.

A decorative banner with a central white rounded rectangle containing the text. The banner has a grey shadow and a grey ribbon-like shape at the bottom. The text is in a bold, black, serif font.

**Introduction  
générale**

### Introduction générale

#### 1. Contexte de l'étude

L'homme a toujours cherché et il cherche encore des sources d'énergie de bas cout, Au cours des dernières décennies, la consommation d'énergie dans le monde a considérablement augmenté au détriment de l'environnement, en raison de l'exploitation irrationnelle des ressources naturelles.

L'exploitation négative des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) fait partie des facteurs qui ont provoqué une crise énergétique dans le monde. Ceci a pollué la couche d'azon en raison des émissions de CO<sub>2</sub> et de CO Etc. Là où ces derniers ont affecté la vie économique, sociale et industrielle, ce qui a obligé le monde à la nécessité de ressurgir et de penser à utiliser des méthodes respectueuses de l'environnement pour une exploitation rationnelle de ces ressources.

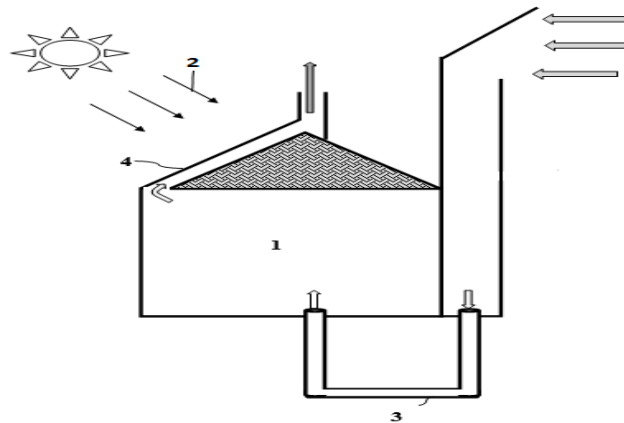
Le Transfert de chaleur dans les systèmes thermiques en général et dans les systèmes d'énergie géothermique en particulier est d'une grande importance. Connaissance approfondie de diverses propriétés thermiques sont présentées et ce qui explique la grande accumulation des études antérieures et actuelles sur le même sujet.

Plusieurs stratégies de refroidissement ont été abordées pour relever les défis énergétiques en utilisant des énergies alternatives peu coûteuses et respectueuses de l'environnement.

#### 2. Position du problème

Ce sujet a pour présenter et d'étudier un nouveau système de rafraîchissement et de ventilation naturelle des bâtiments par une tour du vent couplée avec un échangeur géothermique et une cheminée solaire. en utilisant 3 énergies renouvelables (voir figure 01). qui sont :

- énergie géothermique (nous utilisons un échangeur de chaleur sol / air).
- énergie solaire (nous utilisons une cheminée solaire).
- énergie éolienne( et le représentant dans la tour à vent).



**Figure 01** . Schéma d' un nouveau système de rafraîchissement et de ventilation naturelle des bâtiments par une tour du vent couplée avec un échangeur géothermique et une cheminée solaire.

Dans ce mémoire, on s'intéresse en évidence à l'énergie géothermique qui est considérée comme l'une des énergies propres qui utilise l'inertie thermique du sol pour chauffer ou refroidir une partie de l'air de régénération dans la maison en utilisant un échangeur de chaleur sol / air.

L'échangeur de chaleur air-sol est un système géothermique qui utilise l'inertie thermique du sol pour chauffer ou refroidir une partie de l'air de renouvellement d'un habitat. Le principe du système consiste à injecter dans un habitat, un flux d'air aspiré de l'extérieur transite par un tube enterré dans le sol à une profondeur bien déterminée.

### 3.objectifs

Cette note doit répondre aux objectifs suivants :

- présenter et d'étudier un nouveau système de rafraîchissement et de ventilation naturelle des bâtiments par une tour du vent couplée avec un échangeur géothermique et une cheminée solaire.
- Présenter une étude sur les tronçons horizontale (entrée et sortie) de l'échangeur air/sol.
- Proposer des modèles semi-analytique pour améliorer la conception de l'échangeur.
- Valider et Tester des modèles semi-analytiques et numériques développés par rapport aux travaux précédents.
- Développement d'un modèle de simulation pour une conception d'échangeur de chaleur plus précise.

Le travail que nous prévoyons de faire est basé sur l'étude de la distribution de température dans le sol à proximité de l'échangeur de chaleur géothermique horizontal, en plus de déterminer et d'évaluer la température de l'air le long de l'échangeur, nous utilisons le logiciel de simulation **MATLAB**. pour améliorer les performances de l'échangeur de chaleur air / sol et réduire le temps de calcul. Comme nouvelle étape, nous avons considéré que la température de l'air ambiant était variable.

### 4.Méthodologie de recherche

Dans ce manuscrit, est scindé en quatre chapitres précédés d'une introduction générale et suivis d'une conclusion générale :

**premier chapitre**, dresse un état de l'art des différents travaux réalisés dans le monde qui présente une recherche bibliographique détaillée sur l'énergie géothermique et les différents types des échangeurs de chaleur utilisés dans ce domaine, les principes de fonctionnement et leurs caractéristiques techniques.

**Deuxième chapitre**, présente quelques concepts généraux et définitions de la chaleur géothermique d'une part. D'autre part, nous avons présenté des généralités sur l'échangeur de chaleur air-sol, certains types d'échangeurs, leur principe de fonctionnement et leurs propriétés.

**Troisième chapitre**, est consacré à la formulation mathématique du problème de la conductivité thermique pour définir un modèle permettant d'étudier les changements de température de la terre entourant l'échangeur, en plus de cela il existe un autre modèle qui permet d'étudier la température de l'air le long du tube horizontal de l'échangeur à l'aide de la simulation MATLAB. Pour une conception plus précise de l'échangeur.

**Dans le dernier chapitre**, nous intéressons à l'interprétation des résultats obtenus numériquement et expérimentalement. Cette étude a pour objet de valider l'étude théorique et d'expertiser la capacité de refroidissement de l'air par l'échangeur. Le manuscrit s'achève par une conclusion générale résumant les différentes phases accomplies.

**Chapitre I :**  
***Etude Bibliographique***

---

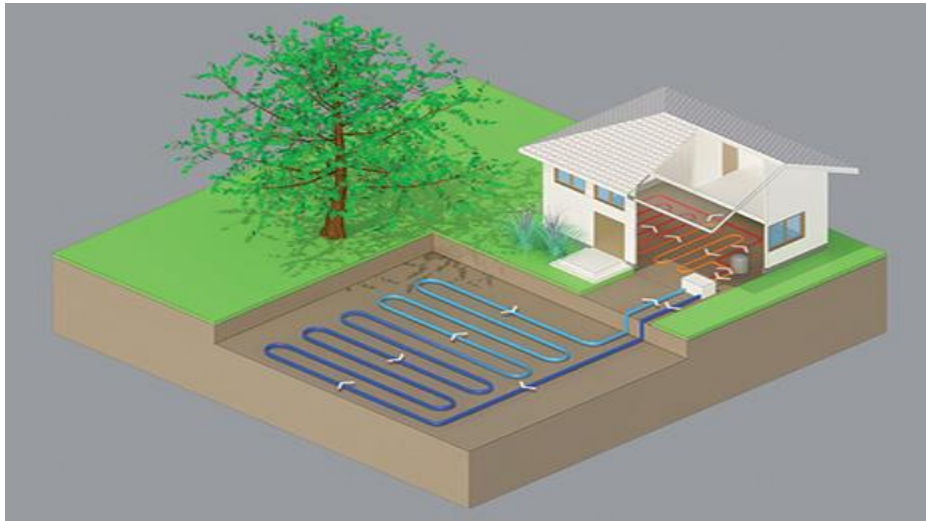
**Sommaire**

I.1 Introduction.....	5
I.2 synthèse bibliographique .....	5
I.2.1 Analyse des travaux effectués.....	5
I.3 Conclusion .....	22
I.4 References bibliographiques.....	23

---

**Résumé**

Nous avons présenté dans ce chapitre une revue bibliographique sur les divers travaux consacrés à améliorer les performances de l'échangeur géothermique. La littérature est très riche dans ce domaine et de nombreuses recherches, ils se consacrent à l'étude des différents paramètres affectant l'échangeur dans le but d'améliorer ses performances.





**I.1. Introduction**

Afin de déterminer la localisation de notre activité par rapport à la géothermie et aux différents types d'échangeurs de chaleur air / sol. Plusieurs types ont été produits et testés par de nombreux chercheurs dans le monde qui visent à restituer ou libérer l'énergie thermique maximale au moindre coût et évaluer les performances de l'échangeur de chaleur air / sol.

Dans ce chapitre, nous révélons quelques recherches bibliographiques, une revue combinée d'études théoriques, analytiques et numériques , en plus des expériences disponibles dans la littérature et les différents travaux antérieurs effectués au niveau de l'université de Biskra sur l'énergie géothermique et les échangeurs de chaleur air / sol [1, 2].

**I.2. Synthèse bibliographique**

**I.2.1. Analyse des travaux effectués**

Les travaux menés rencontrés dans la littérature en relation avec notre travail sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau. I.1 . Résumé des travaux effectués rencontrés.**

N	Année	Chercheurs	TITRES	Les paramètres étudiés
01	2006	S. Ouali et al	l'énergie géothermique du sud de l'Algérie	-Les Cartes de gradient géothermique et de flux de chaleur.
02	2009	N. Naili et al	une étude analytique de l'échangeur eau / sol	-le flux thermique fourni par l'échangeur enterré - Le débit optimal -Les pertes des charges
03	2010	N. Moummi et al	Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra	-la température de l'air le long de l'échangeur en fonction de $T_{air}, T_{sol}, q_v, q', R$
04	2011	R. Zermout	Utilisation de l'énergie géothermique de surface pour la climatisation dans le bâtiment	- Longueur du puits - Diamètre de la conduite - Débit de l'air - Profondeur du puits - Type du sol - Température du bâtiment

05	2011	Al-Khoury et al	Études sur Modélisation informatique des systèmes géothermiques peu profonds. CRC Presse.	- la conductivité thermique ,la convection et le flux de chaleur.
06	2012	B. Mebarki et al	un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar	- l'expression de la $T_{air}$ le long de l'échangeur en fonction des paramètres suivants: $T_{amb}$ , $T_{sol}$ et Le débit d'air, R
07	2012	Trilok Singh BISONIYA et al	Études expérimentales et analytiques de l'échangeur de chaleur terre-air (EAHE) en Inde: un examen	- modèle intelligent prédit $T_{air}$ de sortie de l'échangeur de chaleur terre-air -modèles pour simuler le comportement thermo-physiques de échangeurs de chaleur air - terre.
08	2014	Anuj MATHUR et al	Effet transitoire de la diffusivité thermique du sol sur les performances du système EATHE	- température, de taux de transfert de chaleur et COP du système EATHE - la conductivité thermique du sol - la diffusivité thermique
09	2015	Anuj MATHUR et al	- Analyse CFD du système EATHE dans des conditions transitoires pour un fonctionnement intermittent	-l'effet du fonctionnement intermittent sur les performances thermiques de l'EATHE. -la configuration géométrique de l'échangeur de chaleur tunnel air-terre
10	2015/ 2016	Abdel basset CHEBANA	Contribution à l'étude de la convection forcée à l'intérieur d'une changeur en «U» à usage géothermique	-la distribution de la température dans le sol -la convection à l'intérieur de tronçons de l'échangeur -l'efficacité
11	2016	Amar Rouag et al	Applicabilité d'une machine de refroidissement à adsorption solaire dans les régions semi-arides: proposition d'un refroidisseur	-la température de l'air ambiant -la température du sol -de transfert de chaleur

			supplémentaire utilisant un échangeur de chaleur Terre-Eau.	-un échangeur de chaleur terre-eau(EWHE)
12	2016	BARAKAT et al.	Amélioration de la puissance de sortie des turbines à gaz utilisant la chaleur de la terre à l'air échangeur (EAHE) système de refroidissement	-Conduction de chaleur à travers le sol souterrain - Le changement de température à l'intérieur du sol
13	2017	Y. Belloufi et al	'Étude numérique et expérimentale sur le comportement transitoire d'un échangeur de chaleur air / terre en mode de fonctionnement continu''	-la vitesse de l'écoulement de l'aire - Les températures de l'air Le long de l'échangeur
14	2017	B. Kabore et al	Echangeur de chaleur air-sol à Ouagadougou: Revue de la littérature, étude analytique et expérimentation''	- la température de l'air T [°C] le long de l'échangeur - température T [C] du sol -la diffusivité du sol
15	2018	A. Rouag et al	Conception thermique de l'échangeur de chaleur Terre-air. Partie I un nouveau transitoire modèle semi-analytique pour déterminer la température du sol	- le rayon du sol et la résistance thermique -le flux de chaleur transmis au sol -le gradient de température du sol
16	2019	A. Boumedjane, et A .Gheal	Etude des performances thermique d'un échangeur de chaleur(conduite enterrée) air/sol	- $T_{air}$ à l'intérieur du tube et $T_{sol}$ -La vitesse de l'écoulement de l'air.
17	2018	Charaf-Eddine Mehdid	Conception thermique de l'échangeur de chaleur Terre-air. Partie II un nouveau transitoire modèle semi-analytique et validation expérimentale pour l'estimation de l'air Température.	-Température du sol perturbée -Le rayon du sol - Température de l'air

18	2019	H. Tarcha	Etude numérique d'un échangeur géothermique'	- déterminer la distribution de la température à l'entrée et à la sortie de l'échangeur - le flux d'air chaud
----	------	-----------	--	--

### I.2.2. Travaux précédents

1. S. OUALI et al en(2006) [3]. Ont présenté une étude sur "l'énergie géothermique du sud de l'Algérie" .Qui se réfère à l'exploitation des sources chaudes en profondeur. Découvrez qu'il existe deux principaux types d'énergie géothermique dans le monde : L'énergie géothermique à haute énergie et L'énergie géothermique à basse énergie.

Afin d'identifier les zones d'importance géothermique, des cartes de températures terrestres ont été développées. Deux régions distinctes de l'énergie géothermique ont été mises en évidence par ces cartes, l'une dans la partie orientale et l'autre Dans la partie ouest du désert algérien. Il a également conclu que les conditions climatiques ont un impact majeur sur le travail des échangeurs de chaleur.

*Etude géothermique du Sud de l'Algérie*

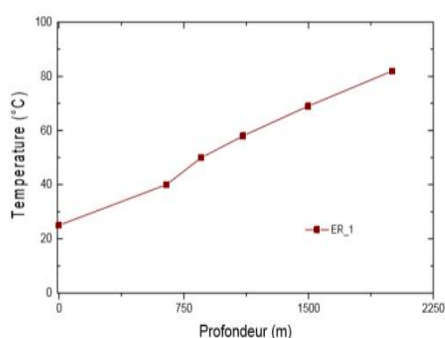


Fig. 4: Forage ER-1

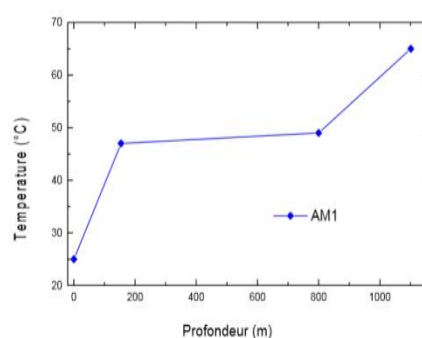
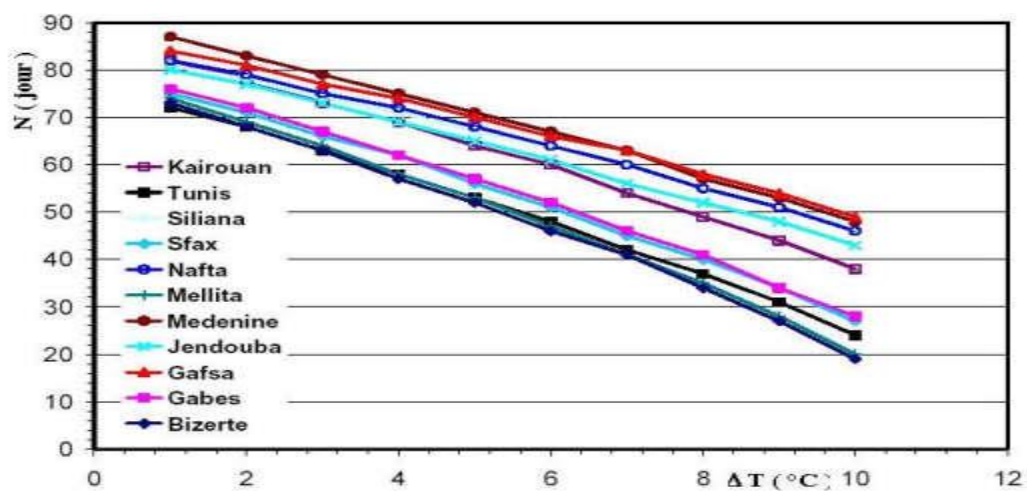


Fig. 5: Forage AM-1

**Figure. I.1.** Situation géographique de la région d'étude [3].

2.N. Naili et al , en (2009) [4]. Fait un travail porte sur "l'étude analytique de l'échangeur eau/sol". L'échangeur eau/sol est un système qui exploite l'inertie thermique du sol pour le

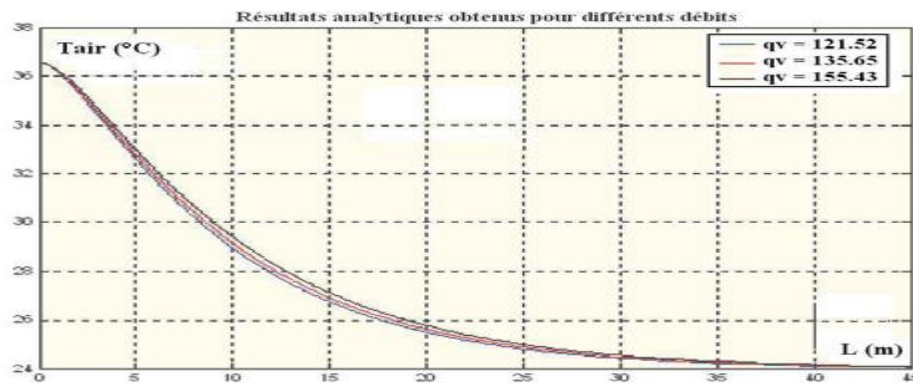
chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. il Fait Une étude analytique de l'échange thermique par convection forcée dans un tube enterré est réalisée pour mettre en évidence l'effet du diamètre, de la longueur de l'échangeur et du débit volumétrique sur le flux thermique fourni par l'échangeur enterré. Le but de ce travail est de dimensionner l'échangeur eau/sol de ce dernier. Les résultats obtenus grâce à l'étude analytique sont: **1).** Pour un débit constant on atteint une longueur optimale de l'échangeur inutile de la dépasser. **2).** Pour une unité de longueur de l'échangeur on trouve de même un débit optimal. **3).** La perte de charge est proportionnelle au débit et inversement proportionnelle au diamètre.



**Figure. I.2.** Variation du nombre de jour,  $N$ , où le potentiel thermique  $\Delta T$  pour le chauffage est obtenu, pour une profondeur adimensionnelle  $z/d=2.0$  [4].

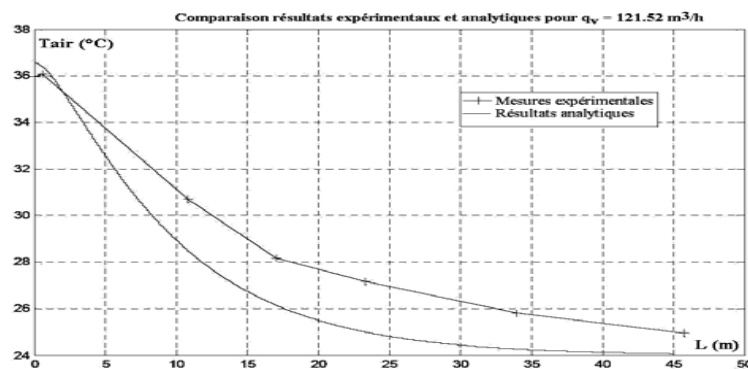
**3.** A travers une étude théorique et expérimentale **N. Moummi**, et al en (2010) [5]. Ont présente: "Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra". Cette étude vise à évaluer la performance de l'échangeur air/sol au moyen du modèle analytique par rapport aux résultats expérimentaux et l'effet des propriétés du sol, la nature des canaux et la localisation de la région sur l'évolution de la température de l'air. Le long de l'échangeur enterré Ceci est pour l'utilisation de la technologie de refroidissement thermique dans différents endroits en Algérie.

Le refroidissement géothermique dépend de la température de la terre profonde, qui est basse en été par rapport à la température de l'air ambiant, où celle-ci affecte les performances de l'échangeur. Sur la base de l'analyse des résultats du modèle analytique et expérimental où les courbes montrent une variation de la température de l'air de l'entrée à la sortie, où une diminution de  $12^{\circ}\text{C}$  a été enregistrée à une distance de 35m (figure. I.4).



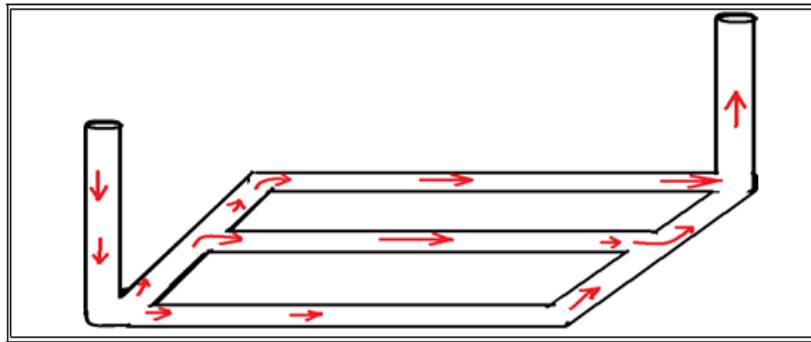
**Figure. I.3.** Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour différents débits d'air [5].

### 3.1. Comparaison des résultats expérimentaux et théorique



**Figure I.4.** Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur [5].

**4. R. Zermout** en (2011) [6]. Ont présenté "L'utilisation de l'énergie géothermique de surface pour la climatisation dans le bâtiment ". Cette étude vise à étudier le potentiel de refroidissement de chaque puits. Des ajustements ont été faits pour s'adapter à une maison individuelle située dans un quartier résidentiel au sud-ouest de Tizi-Ouzou. Les dimensions utilisées pour l'application en Provence étaient bien définies et représentées par un tube vertical de 3 pieds relié à trois sous-tubes de 40m (Figure .I.5). Ce type d'agencement n'est pas très important, donc le diamètre sera choisi par l'architecte qui le fera avec un grand diamètre et réduira la chute de pression à la fin, ce travail modeste vise à clarifier le processus d'intégration de l'élément de construction énergétique.



**Figure. I.5.** Répartition de en 03 tubes (Source : l'auteur, langage Scilab)[6].

**5. Al-Khoury** et al ,en 2011[7]. Ont présente une "Études sur Modélisation informatique des systèmes géothermiques peu profonds. CRC Presse"Les systèmes géothermiques peu profonds sont de plus en plus utilisés pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Cette étude vise principalement à modéliser des pompes à chaleur géothermiques qui sont basées sur des procédures de modélisation et de calcul mathématique de base. Représenté par. Transformateur de Fourier. Transformations de Laplace. Méthode par éléments spectraux. Méthode par éléments finis qui contribue grandement à résoudre les problèmes de flux de chaleur ,En fournissant des modèles alternatifs analytiques et semi-analytiques.

Certaines des techniques les plus couramment utilisées dans les mécanismes de transfert de chaleur ont été données à un système qui entre en contact avec son environnement et un système Il a été constaté que la conductivité thermique et la convection sont liées aux processus de flux de chaleur se produisant dans les systèmes géothermiques peu profonds.

Certains paramètres thermométriques importants ont été compris les propriétés des matériaux thermiques et les nombres de fluides liés à l'équation de chaleur inverse.

Afin d'assurer un refroidissement continu de l'air, il est nécessaire de connaître la distance optimale entre les tubes ainsi qu'entre les échangeurs. Pour cette raison, une solution à l'équation de la conductivité thermique a été trouvée à l'entrée de chacun d'eux dans le sol qui est un cylindre creux semi-infini avec un flux de chaleur continu d'air.

**6. B. Mebarki** et al , en (2012) [8]. à étudié les performances d'un échangeur air/sol a été réalisée par la voie de la modélisation analytique. Elle a d'abord validé un modèle de température du sol et de température de l'air dans l'échangeur puis analysé certains paramètres, à savoir la profondeur, le diamètre et la longueur du tube sur la température interne de l'échangeur. Parmi ses conclusions: le sol sablonneux est plus efficace que

l'échange de chaleur par rapport aux autres, Choisir des tuyaux d'un diamètre de 75 mm et moins (la surface d'échange double en multipliant le diamètre du tuyau), Utilisation de tubes rigides de 25 m de long et placés à une profondeur de 3 m et La vitesse de l'air dans la ville de BECHAR suffisamment de temps pour échanger avec la terre.

### 6.1.Présentation du système étudié

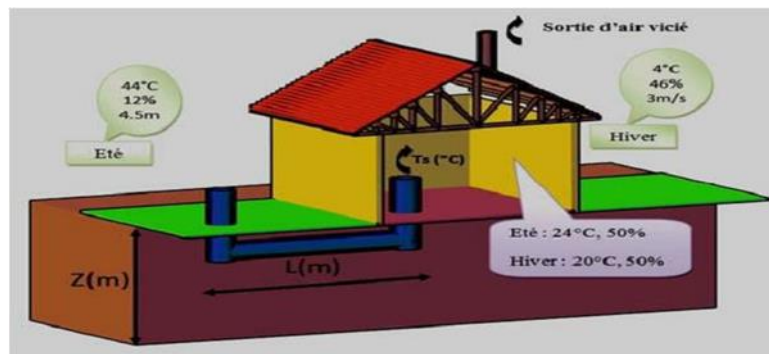


Figure. I.6. Géométrie de l'échangeur Air-Sol étudié [8].

7. A travers une étude expérimentale et analytiques par **Trilok Singh Bisoniya** et al en (2012) [9]. Ont présente une "Études expérimentales et analytiques de l'échangeur de chaleur terre-air (EAHE) en Inde: un examen ". Dans cette étude, des modèles bien conçus pour le comportement thermique des échangeurs de chaleur air/sol. Ont été trouvés qui peuvent réduire la consommation électrique du bâtiment de 30 % et des réductions des charges de chauffage et de refroidissement et des émissions de gaz à effet de serre. Ils ont constaté que les performances thermiques du système EAHE augmentent avec L'augmentation de la longueur et de la profondeur de l'enfouissement des tuyaux diminuera avec l'augmentation du diamètre des tuyaux et de la vitesse de l'air. La température de la Terre reste presque constante tout au long de l'année à une profondeur d'environ 2 m.



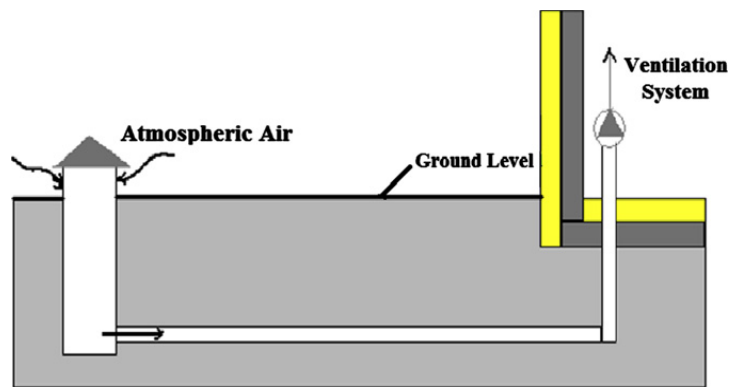


Figure. I.7. Échangeur de chaleur Terre-air (mode boucle ouverte) [9].

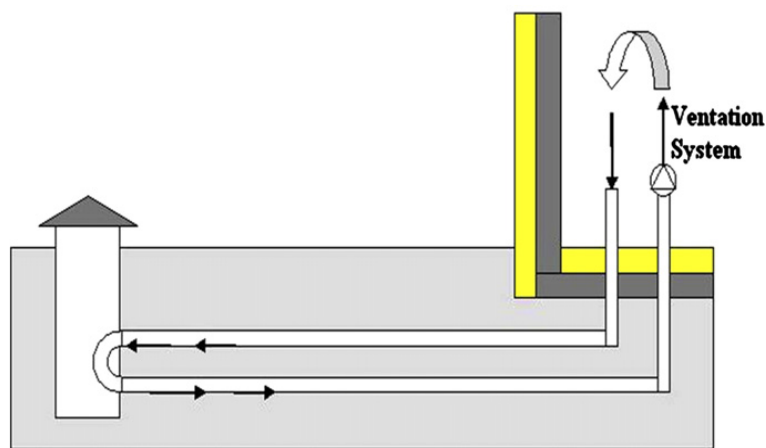


Figure. I.8. Échangeur de chaleur Terre-air (mode boucle fermée) [9].

8. Anuj Mathur et al ,en (2014) [10]. Présent une étude sur "l'Effet transitoire de la diffusivité thermique du sol sur les performances du système EATHE". Ce travail vise à étudier l'effet des propriétés physiques et thermiques du sol sur les performances d'un tunnel air / sol pour un échangeur de chaleur. L'analyse a été réalisée à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel et transitoire de trois types de sols différents.

L'équation énergétique a été utilisée pour décrire la turbulence et le transfert de chaleur afin de trouver une solution à la méthode de volume finie. -Les résultats ont été analysés pour le système EATHE et COP en le faisant fonctionner pendant 12 heures. Les résultats numériques ont montré un accord avec les résultats expérimentaux. il Découvrez que:1). la conductivité thermique du sol joue un rôle vital qui a influencé 2). les performances thermiques d'EATHE. Par conséquent, un maximum d'air 3). chute de température et transfert de chaleur obtenus avec conductivité thermique soi.

**9. Mathure** et al ,en 2015 [11]. Présenté une étude sur "Analyse CFD du système EATHE dans des conditions transitoires pour un fonctionnement intermittent" .La performance thermique d'un échangeur de chaleur en tunnel d'air est étudiée dans des conditions transitoires de trois conditions de poussière différentes en utilisant 3 modes de fonctionnement. **A)** dans le premier mode EAHEA fonctionne en continu pendant 12 heures . **B)**après quoi il tourne pendant 60 minutes puis s'arrête pendant 20 minutes .**C)** dans le dernier mode EAHE fonctionne pendant 60 minutes et est perdu Fermé 40 minutes. Il fonctionne par intermittence dans les deuxième et troisième positions pendant 12 heures.

Le modèle CFD a été développé à l'aide d'un modèle numérique transitoire tridimensionnel par simulation FLUENT (version 6.3). Une attention particulière a été portée à l'étude de la température de l'air plus basse et du transfert de chaleur entre l'air et le sol en tenant compte des différentes propriétés thermiques du sol. Numériquement afin de prédire la turbulence à l'intérieur du tube Parmi les hypothèses fiables:**1).**Maintenir les propriétés physiques des solides et des liquides constantes sur le sol et la température de l'air pendant le fonctionnement **2).**La vitesse de l'air entrant est constante tout au long du processus EATHE.

Les résultats obtenus sont les suivants: **1).** L'utilisation d'une conductivité thermique élevée de la terre pendant le mode continu pendant 12 heures améliore les performances de 5,04 % . **2).**Alors que la faible conductivité thermique montre une amélioration des performances de 1,81 % en fonctionnement intermittent par rapport au fonctionnement continu .

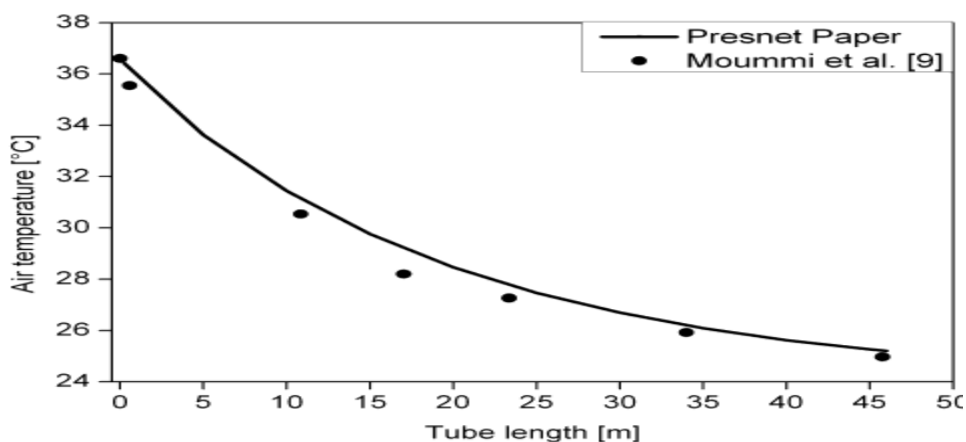
**10. A.Chebana** en (2016/2015) [12].On présente une Contribution à l'étude de la convection forcée à l'intérieur d'un échangeur en «u» à usage géothermique". Ils ont étudié numérique et théorique d'un échangeur de chaleur géothermique en U a été menée, en plus d'une étude expérimentale à l'Université de Biskra. Le programme fortran et MATLAB été utilisé pour étudier la distribution de la température du sol au cours de l'année et le champ de température dans l'échangeur géothermique. Des mesures ont été prises pour les vitesses de 3,5 m/s et 4,5 m/s. Parmi les résultats atteints on conclut que :

Pour éliminer l'augmentation de la température à l'intérieur de tronçon vertical sortie (acquérir une quantité de chaleur), il propose comme de solution d'ajouter une isolation thermique sur le tronçon vertical ou on pose le tronçon sous la structure.



**Figure. I.9.** Vue externe du banc des essais expérimentaux (Site Université Biskra)[12].

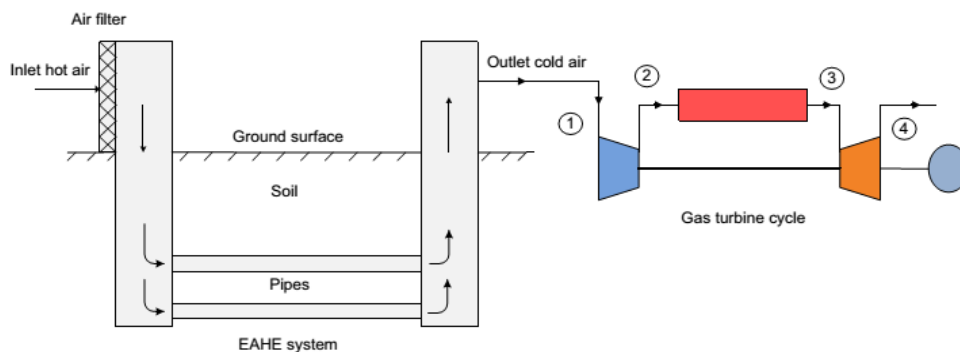
**11. A.Rouag** et al en (2016)[13].Ont présente: "Applicabilité d'une machine de refroidissement à adsorption solaire dans les régions semi-arides: proposition d'un refroidisseur supplémentaire utilisant un échangeur de chaleur Terre-Eau". Cette étude s'appuie sur le remplacement de la tour de refroidissement à sec (dct) utilisée dans le système principal par un système de refroidissement à eau supplémentaire basé sur une énergie thermique peu profonde utilisant un échangeur de chaleur géothermique (ewhe). Ce dernier fonctionne lorsque la température ambiante dépasse les limites de fonctionnement (dct) de 34°C. Pour cela, il a conçu un modèle pour EWHE en utilisant le logiciel Fortran. Où il a atteint: **1).** La possibilité de spécifier le nombre d'échanges à utiliser **2).** Déterminer la distance entre les tuyaux et également entre les échangeurs géothermiques en cas d'annulation du DCT.



**Figure. I.10.** Comparaison avec N. Moumami et al [13].

**12.** A travers une étude de **Barakat** et al en (2016)[14]. Sur "Amélioration de la puissance de sortie des turbines à gaz utilisant la chaleur de la terre à l'air échangeur (EAHE) système de refroidissement". Le système de refroidissement de l'air d'admission a été étudié sur les performances des turbines à gaz afin de développer un modèle transitoire unidimensionnel pour prédire les performances thermiques d'EAHE et son impact sur la capacité de production, l'efficacité et la consommation de carburant spécifiées pour les turbines à gaz et évalué avec l'application d'EAHE en étudiant les principaux impacts techniques et les paramètres dynamiques, y compris la chambre à air. La vitesse d'admission d'air sur les performances du système EAHE a été développée en développant un programme matlab pour résoudre des équations numériques discrètes. L'usine DIMAT a été choisie comme étude de cas.

Les résultats obtenus grâce à cette étude sont les suivants : **1.** Tube de terre plus long et profondément placé avec un diamètre plus petit et une vitesse d'air d'entrée plus faible conduit à réduire l'air de sortie Température. **2.** L'augmentation de la puissance de sortie de 9/100 en plus de l'efficacité thermique de 4,8 %. **3.** Pour la zone étudiée, la production nette d'électricité a atteint 12991 MW/h avec une expulsion payée de 1,2 an



**Figure. I.11.** Diagramme schématisé du système EAHE installé dans une centrale à turbine à gaz [14].

**13.** A travers une étude expérimentale et numérique, **Y. Belloufi** et al (2017)[1]. Présente un travail "sur le comportement transitoire d'un échangeur de chaleur air / terre en mode de fonctionnement continu", dans la région de Biskra". Ce travail vise à étudier les performances thermiques de l'échangeur de chaleur air/sol en mode refroidissement. Ils ont utilisé un tube PVC de 53,16 m de long et un diamètre de 110 mm à une profondeur de 3 m. Des tests ont été menés en mode de fonctionnement continu pendant 71 heures. De plus, un modèle

mathématique a été présenté à EAHE en utilisant la méthode des différences limitées pour déterminer la distribution de température le long du tube. Après avoir étudié les résultats, il a été conclu que le mode de fonctionnement continu n'avait aucun effet sur la température de l'air extérieur et donc sur les performances de l'échangeur EAHE. Les résultats sont satisfaisants avec une erreur relative de 7,46%.

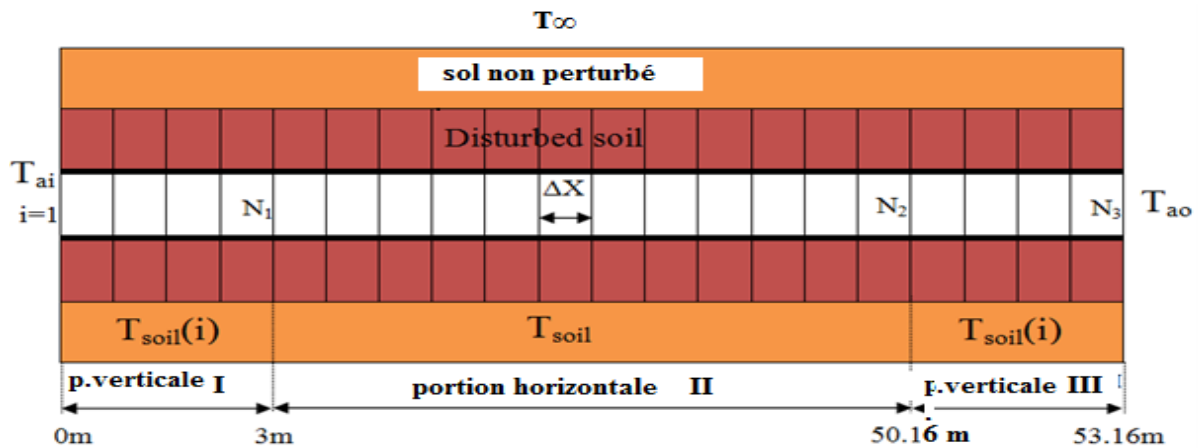


Figure. I.12. Discretisation du domaine EAHE [1].

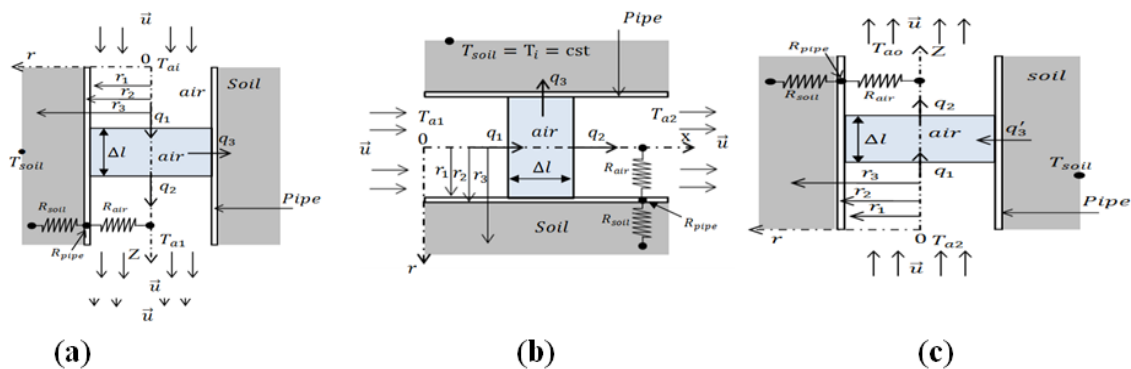


Figure. I.13. Schéma descriptif de l'EAHE: a) partie verticale I, b) partie horizontale II, c) partie verticale III [1].

14. B. Kabore, et al (2017) [15]. Ont réalisé une étude sur " l'Echangeur de chaleur air/sol à Ouagadougou: Revue de la littérature, étude analytique et expérimentation".il Ont mené une étude d'un modèle pilote a été mis en place à Ouagadougou, qui travaille pour adapter la maison à l'aide d'échangeurs de chaleur air-sol, qui vise à évaluer les performances de l'échangeur de chaleur air sol et à déterminer les paramètres importants pour l'utilisation de cet échangeur.

## 14.1. Présentation du système

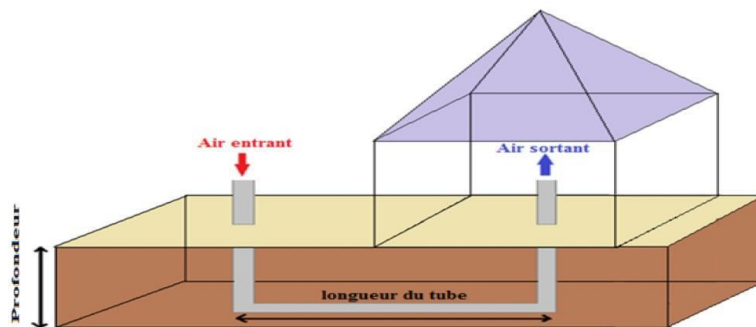


Figure. I.14. Géométrie simplifiée de l'échangeur air-sol étudié [15].

15. A. Rouag ,et al en (2018) [16].Ont présente une étude sur la "Conception thermique de l'échangeur de chaleur Terre/air. Partie I un nouveau transitoire modèle semi-analytique pour déterminer la température du sol". Il est considéré comme la première conception d'un échangeur géothermique utilisant une méthode semi-analytique pour étudier la distribution de la température dans le sol. Pour cette raison, le modèle semi-analytique a été développé pour faciliter la conception thermique qui permet de prédire la détérioration des performances thermiques qui peut être causée par la saturation thermique du sol. "Au niveau de l'air entrant, ce qui conduit à un transfert de chaleur minimum entre eux". La solution analytique a été combinée en utilisant la méthode Bissel pour un flux de chaleur constant à la surface du tube. La performance thermique a été mesurée dans un climat chaud et sec pendant 6 heures continues dans la région de Biskra. Ce modèle permet de donner Formule plus précis avec une diminution significative du temps pour calculer :1).Le rayon du sol perturbée.2).Le temps de fonctionnement.3). La propagation thermique du sol 4). La température de l'air.

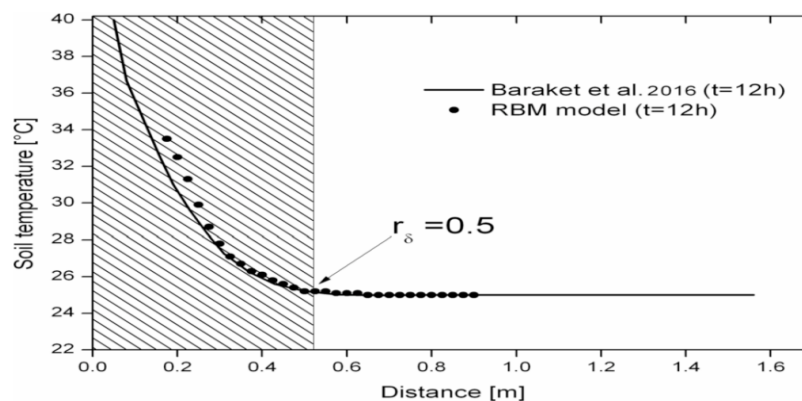


Figure I.15. Modèle de vérification avec les travaux de Barakat et al (2016) [16].

**16. A.Boumedjane, et A.Ghezal** en (2019) [17]. Ont présente "Etude des performances thermique d'un échangeur de chaleur (conduite enterrée) air/sol". Cette étude est basée sur le refroidissement des maisons par géothermie. Où deux modèles mathématiques ont été étudiés à l'aide du programme MATLAB, qui comprend deux sous-programmes : **1)** Le premier s'appuie sur le modèle mathématique pour évaluer la température du sol à n'importe quelle profondeur un jour donné. (Eq.I.1) **.2)** La seconde dépend du calcul de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur avec l'évolution des normes de conception thermique (Eq.I.2).

$$T(t, z) = T_i - A \cdot \exp\left(-Z \frac{\sqrt{\pi}}{365 \cdot \alpha}\right) \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\alpha \cdot \pi}}\right)\right) \quad (\text{Eq.I.1})$$

$$T(x) = T_{sol} + (T_e - T_{sol}) \cdot e^{-\frac{x}{m \cdot c_{p\text{air}} \cdot R \cdot t}} \quad (\text{Eq.I.2})$$

Avec

**A:** amplitude de température (k)

**T<sub>i</sub>:** La température du sol à une profondeur infinie (k)

**T<sub>e</sub> :** la température de l'air entrée (k)

**T<sub>sol</sub>:** la température du sol (k)

**t<sub>0</sub> :** jour de l'année de la température de surface minimale (jour)

**t:** temp (s)

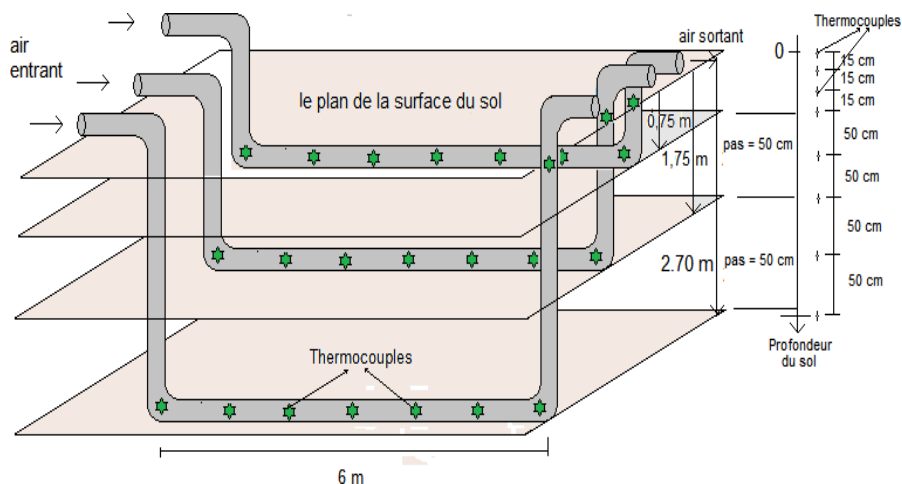
**Z:** Profondeur (m)

**R:** rayon extérieure du tube (m)

**α :** Diffusivité thermique du sol (m<sup>2</sup>/s)

**m:** débit massique d'air (kg/s)

Il ont constaté, à travers les résultats obtenus, que pour obtenir une meilleure performance thermique, les éléments suivants sont nécessaires : **1).** Profondeur d'enfouissement idéale 3m. **2).** Utiliser un matériau de construction en PVC haute pression « Il a une résistance élevée à la corrosion ». **3).** La longueur de l'échangeur doit être d'environ 50 m, et la distance entre les axes des tubes doit être supérieure à 40 cm. **4).** La vitesse de l'air doit être de 3 m/s. **5).** Pour assurer un bon échange thermique, l'épaisseur optimale ne doit pas dépasser 5 mm.



**Figure. I.16.** Schéma explicatif de l'implantation des thermocouples pour différents profondeurs de l'échangeur air/sol [17].

17. Afin d'améliorer les performances de l'échangeur géothermique dans la première partie du modèle RBM, un deuxième modèle nommé GRBM proposé par **Charaf-Eddine MEHDID** en 2018 [18]. De sous titre "Conception thermique de l'échangeur de chaleur Terre-air. Partie II un nouveau transitoire modèle semi-analytique et validation expérimentale pour l'estimation de l'air Température". Le modèle GRBM a été développé pour prédire les performances thermiques de l'échangeur EAHE. Fonctionnement dans des conditions transitoires pour le mode refroidissement. Ce développement dépend de la division du sol et du tube en plusieurs couches et de l'utilisation de la méthode de gestion basée sur les résultats présentée dans la première partie RBM. pour estimer la température du sol perturbé. entourant l'échangeur horizontal enterré.

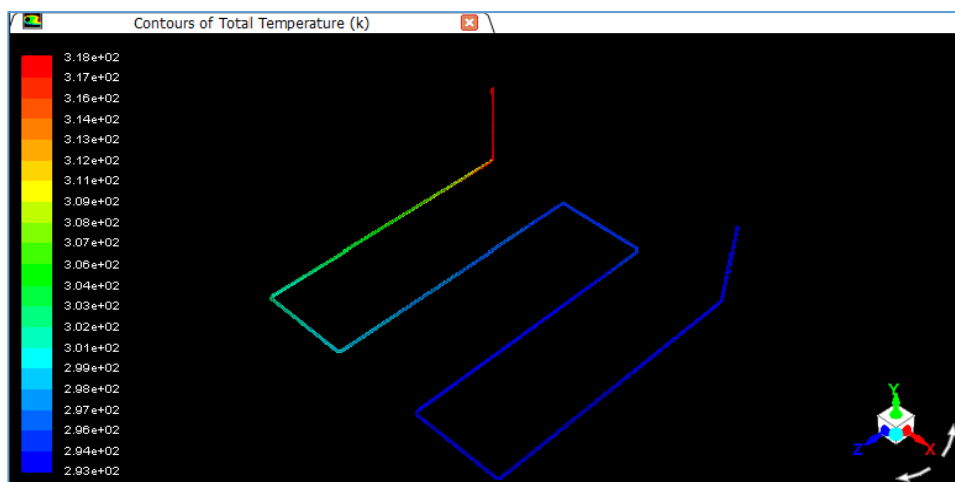
Le test a été réalisé pendant 6 heures de fonctionnement continu dans la région de Biskra. Les résultats expérimentaux et numériques obtenus donnent un bon accord avec la température mesurée avec une erreur relative moyenne de 2,8 %. Le modèle **GRBM** peut être considéré comme le premier modèle pour la conception d'EAHE horizontale d'une manière simple et précise avec moins de temps de calcul, ce qui rend la conception des échangeurs de chaleur géothermique plus fiable.





**Figure. I. 17.** Photos de l'installation expérimentale d'EAHE à l'Université de Biskra, a) trou de forme serpentine; (b) PVC horizontal enterré tuyau avec thermocouples [18].

**18.H. Tarcha** en (2019) [19]. Présente une "Etude numérique d'un échangeur géothermique "se concentre sur une étude thermique du phénomène de flux d'air chaud dans un échangeur de chaleur air/sol. Ils ont simulé l'échangeur de chaleur géothermique à l'aide d'un programme d'établi et calculé le changement de température le long de l'échangeur à l'aide de deux modèles thermiques, le premier étant une valeur intermédiaire et la seconde une fonction linéaire du changement de chaleur. Enfin, il a atteint des résultats numériques en ligne avec les précédents résultats des chercheurs de l'Université de Biskra, qui ont permis de visualiser le flux d'air chaud dans un échangeur de chaleur air/sol.



**Figure I.18.** Évolution de la température de l'air le long de l'échangeur air/sol [19].

**I.3.Conclusion**

Grâce à cette étude bibliographique, nous avons atteint une évaluation des performances thermiques d'un échangeur de chaleur air / sol, qui est principalement liée aux paramètres suivants: Conductivité thermique du sol, Vitesse du flux d'air, Temps de fonctionnement de l'échangeur (continu/intermittent) et ingénierie des tubes enterrés. Où certains modèles analytiques ont été extraits Simulation numérique de chaque système, qui permet de prédire la dégradation thermique d'un échangeur air/sol et d'évaluer ses performances.

**I.4. Références bibliographiques**

- [1] Y. Belloufi, A. Brima, S. Zerouali, R. Atmani, F. Aissaoui, A. Rouag and N. Moummi, Numerical and experimental investigation on the transient behavior of an earth air heat exchanger in continuous operation mode , International Journal of Heat and Technology, vol .35 2, pp. 279-288,2017.
- [2] A. Touil, M. L . Soualah, Étude Numérique d'un Échangeur géothermique Eau-Sol, Mmoire de mastre , Université Hamma Lakhdar, EL-OUED , 2018.
- [3] S. Ouali, A. Khellaf and K. Baddari, Etude géothermique du Sud de l'Algérie. Revue des énergies renouvelables, vol . 9 4, pp. 297-306 , 2006.
- [4] N. Naili, M. Hazami, M. Lazaar et A. H. Farhat ,etude Analytique d'un Échangeur Eau/Sol BP 95 Hammam Lif 2050, Tunisie. 2009.
- [5] N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi et S.Y. Ali , Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra. Revue des Energies Renouvelables , vol .13 3, pp. 399-406 , 2010.
- [6] R. Zermout, Utilisation de l'énergie géothermique de surface pour la climatisation dans le bâtiment, Mmoire de majister, Université Mouloud MAMMERI , TIZI OUZOU, 2011.
- [7] R . Al-Khoury, Computational Modeling of Shallow Geothermal Systems. CRC Press , 2011.
- [8] B. Mebarki, B. Draoui, S. Abdessemed, A. Keboucha, S. Drici and A. Sahli, Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar, Revue des énergies renouvelables, vol. 15 3, pp. 465-478 , 2012.
- [9] T.S. Bisioniya, A. Kumar, and P. Baredar, Experimental and analytical studies of earth–air heat exchanger (EAHE) systems in India, review. Renewable and Sustainable Energy Reviews ,vol. 19, pp. 238-246 , 2013.
- [10] A. Mathur, A. Srivastava, J. Mathur, S. Mathur and G. D. Agrawal, Transient effect of soil thermal diffusivity on performance of EATHE system, Energy Reports , vol. 1, pp.17-21, 2015.
- [11] A. Mathur ,A. Srivastava, G.D. Agrawal , S. Mathur and J. Mathur, CFD analysis of EATHE system under transient conditions for intermittent operation, Energy and Buildings , vol. 87, pp.37-44, 2015.

- [12] A. Chebana, Contribution à l'étude de la convection forcée à l'intérieur d'un Échangeur en « U » à usage géothermique , Mémorial de maîtrise, Université ELHAD LAKHDAR, BATNA, 2015.
- [13] A. Rouag, A. Benchabane, A. Labed, K. Belhadj and N. Boultif, Applicability of a solar adsorption cooling machine in semiarid regions: proposal of supplementary cooler using earth-water heat exchanger, International Journal of Heat and Technology, vol. 34 2, pp.281-286,2016.
- [14] S. Barakat, A. Ramzy, A.M. Hamed and S.H. El Emam, Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system , Energy conversion and management, vol. 111, pp.137-146, 2016.
- [15] B. Kaboré, W.P Ouedraogo ,S. Kam , M. Ousmane and D.J. Bathiébo, Echangeur de chaleur air-sol à Ouagadougou: Revue de la littérature, étude analytique et expérimentation, Revue des Energies Renouvelables, vol. 20 3, pp. 363-75, 2017.
- [16] A. Rouag, A. Benchabane, and C. E. Mehdid, Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I a new transient semi-analytical model for determining soil temperature, Journal of Cleaner Production, vol. 182, pp. 538-544,2018.
- [17] A. Boumedjane and A. Ghezal, Etude des performances thermique d'un échangeurs de chaleur (conduite enterrée) air/sol , Mémorial de Master. Université Saad DAHLAB, BLIDA 1 , 2019.
- [18] C.E. Mehdid, A. Benchabane, A. Rouag, N. Moumami, M.A. Melhegueg ,A. Moumami, M.L. Benabdi and A. Brima , 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, vol. 198, pp. 1536-1544,2018.
- [19] H. Tarcha, Etude Numérique d'un Échangeur géothermique, Mémorial de master. Université Mohamed Khider, Biskra, 2019.

**Chapitre II :**  
**Généralités sur l'énergie géothermique & les échangeurs de chaleur (air/sol)**

---

**Sommaire**

II.1 Introduction.....	27
II.2 Énergie géothermique.....	27
II.2.1 Définition.....	27
II.2.2 Classification des ressources géothermiques.....	27
II.2.2.1 Géothermie à haute énergie.....	27
II.2.2.2 Géothermie moyenne énergie.....	28
II.2.2.3 Géothermie basse énergie.....	28
II.2.2.4 Géothermie très basse énergie.....	29
II.2.3 Distribution de température à la zone géothermie très basse.....	29
II.2.4 Importance de la géothermie.....	30
II.2.5 Avantages et les inconvénients de la géothermie.....	30
II.2.5.1 Avantages.....	30
II.2.5.2 Inconvénients.....	31
II.2.6 Utilisation de l'énergie géothermie.....	31
II.2.7 Procédés de la géothermie.....	31
II.2.7 .1 Pompe à chaleur géothermique.....	31
A. Définition.....	31
B. Composant d'un PAC.....	32
C. Principe de fonctionnement.....	33
D. Principe de thermodynamique de PAC.....	33
II.2.7.2 Puits canadien (provençal).....	34
A. Définition.....	34
B. Principe de fonctionnement.....	34
C. Emplacement du puits canadien.....	35
D. Éléments pour la conception d'un puits canadien/provençal.....	36
II.3 Échangeur air-sol.....	36
II.3.1 Définition.....	36
II.3.2 Modes de fonctionnement d'un échangeurs air-sol.....	37

---

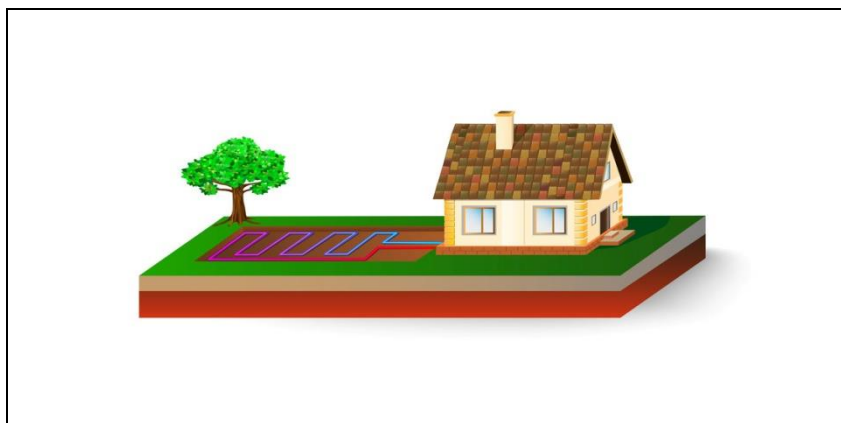
---

a. Fonctionnement en hiver.....	37
b. Fonctionnement en été.....	37
c. Fonctionnement au printemps / automne.....	37
II.3.3. Différents types d'installation des échangeurs air/ sol.....	38
II.3.3.1 Échangeur horizontal.....	38
II.3.3.2 Échangeurs air sol spéciaux.....	38
II.3.3.3 Échangeurs air sol verticaux.....	39
II.3.4 Caractéristiques techniques d'un Échangeur air/ sol.....	39
II.3.4.1 Longueur des tubes.....	39
II .3.4.2 Diamètre des tubes.....	39
II .3.4.3 Disposition des tubes.....	40
II.3.4.4 Nombre de tubes puits.....	40
II .3.4.5 Profondeur d'enfouissement des tubes.....	41
II .3.4.6 Pente du conduit.....	41
II .3.4.7 Matériau constitutif des tubes.....	41
II .3.4.8 Espacement entre les tubes.....	41
II .3.5 Différents types de tuyaux.....	41
II .3.6 Avantages et les inconvénients d'un échangeurs air/sol.....	42
A. Avantages.....	42
B. Inconvénients.....	42
II.4 Conclusion.....	43
II.5 Références bibliographiques .....	44

---

**Résumé**

Ce chapitre commence par une introduction dans le domaine lié à l'échangeur géothermique, en plus de certains paramètres physiques et propriétés du sol et du tube qui affectent les performances de l'échangeur de chaleur. A la fin de ce chapitre, nous concluons par une conclusion sur ce phénomène.



### II.1. Introduction

L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie augmente au détriment de l'environnement. Par conséquent, le recours à des énergies renouvelables respectueuses de l'environnement est devenu important.

Dans ce chapitre, nous intéressons à étudier certains concepts généraux et définitions de l'énergie géothermique d'une part et à étudier les généralités sur l'échangeur air/sol et le principe de son travail et ses caractéristiques d'autre part.

### II.2. Énergie de la Géothermie

#### II.2.1. Définition

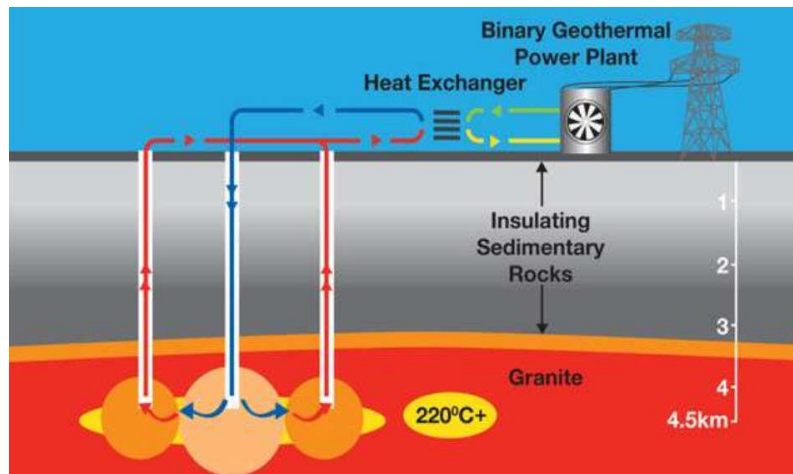
La Géothermie, du grec Géo (La terre) et thermie (la chaleur), est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité [1].

#### II.2.2. Classification des ressources géothermiques

On distingue 4 types différents de géothermie :

##### II.2.2.1. Géothermie à haute énergie : ( $T^{\circ}\text{C} < 150^{\circ}\text{C}$ ) (haute enthalpie, haute température, profonde)

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à  $150^{\circ}\text{C}$ . Les réservoirs, généralement localisés au-delà de 1500 m êtres de profondeur, essuient 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 d'électricité [2].



**Figure .II.1.** Géothermie à haute énergie [3].

### II.2.2.2. Géothermie moyenne énergie (T°C:90à150 °C)

La géothermie de moyenne température ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150 °C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1000 mètres. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs s'allant de 2000 à 4000 mètres. Pour produire de l'électricité, une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire est nécessaire [2].

### II.2.2.3. Géothermie basse énergie (T°C:30à90 °C)

Elle consiste en l'utilisation de la chaleur, par extraction d'eau chaude contenue dans les aquifères profonds (1500-2000 mètres) des bassins diamantaires et de l'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 160 000 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 [2].



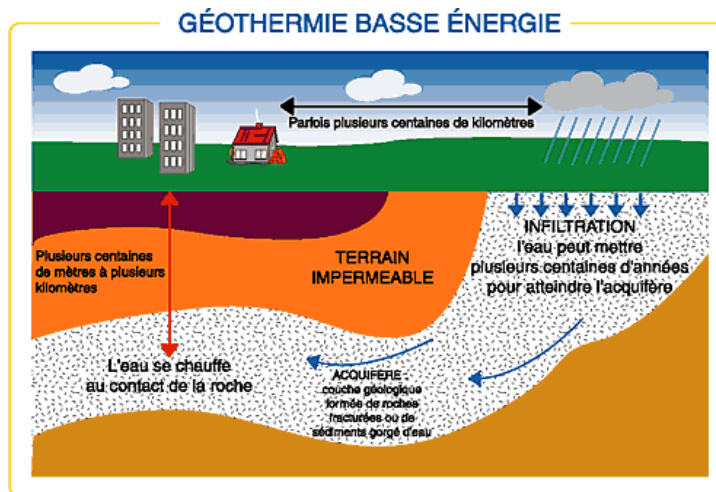


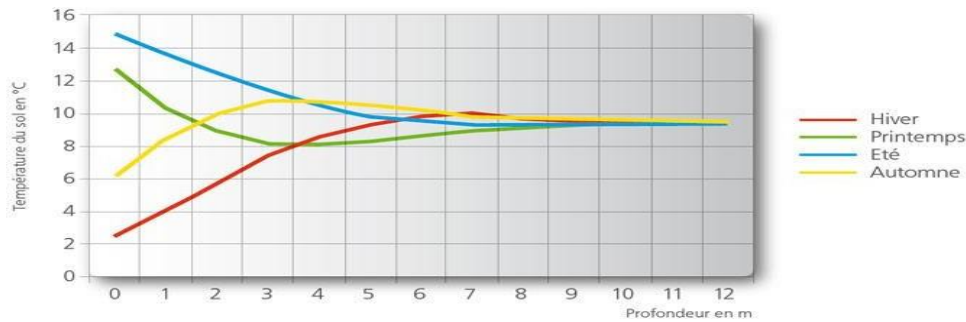
Figure. II.2. Géothermie à basse énergie [3].

### II.2.2.4. Géothermie très basse énergie ( $T^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C}$ )

Elle concerne la production de chaleur et/ou de froid on tenue dans les terrains ou les aquifères peu profonds (en générale 100 mètres). La température exploitée est inférieure à  $30^{\circ}\text{C}$  (généralement comprise entre  $9$  et  $15^{\circ}\text{C}$ ). Pour exploiter cette gamme de température, il est nécessaire de recourir à l'utilisation de pompe sa chaleurs (PAC). Les PAC peuvent fonctionner sur des dispositifs d'échange et extraction d'énergie avec le sol (capteur horizontal ,profondeur  $<$  à  $2.0\text{m}$ ), le sous-sol (capteur verticaux, profondeur généralement inférieure à  $100\text{m}$ ), l'eau souterraine des aquifères peu profonds (puits de pompage) ou l'air (intérieur ou extérieur de l'habitat) [2].

### II.2.3. Distribution de température à la zone géothermie très basse

La température de l'air extérieur dans la plupart des pays européens peut varier de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+40^{\circ}\text{C}$  tout au long de l'année, alors que la température du sol à quelques mètres de profondeur reste plus stable, entre  $5$  et  $15^{\circ}\text{C}$  en moyenne [4].



**Figure. II.3.** Variation de la température en fonction de profondeur et les saisons [4].

### II.2.4. 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 [1].

### II.2.5. Avantages et les inconvénients de la géothermie

#### II.2.5.1. 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 CO<sub>2</sub>).
- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport; Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement;
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables ;
- Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques[5].

### II.2.5.2. Inconvénients

- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés;
- L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques
- Risque de glissement de terrain.
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques[5].

### II.2.6. 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.

### II.2.7. Procédés de la géothermie

#### II.2.7.1. Pompe à chaleur géothermique

##### A. Définition

La pompe à chaleur est un appareil capable de transférer de l'énergie d'un milieu « Froid » vers un milieu « Chaud ». Concrètement, cela consiste à prélever des calories du milieu naturel (air, sol ou eau) pour les injecter à l'intérieur du bâtiment que l'on souhaite chauffer. Même « froids », l'air, le sol et l'eau renferment de la chaleur qu'il est possible d'extraire moyennant une dépense énergétique initiale[6].

Une **PAC** est constituée d'un circuit fermé et étanche dans lequel circule un fluide frigorigène qui transporte les calories captées dans la source extérieure. Un compresseur alimenté à l'électricité, élève la température du fluide pour qu'il transfère les calories au circuit de chauffage et /ou d'eau chaude. Un PAC est généralement composée de quatre organes technique (figure. II.4) [7].

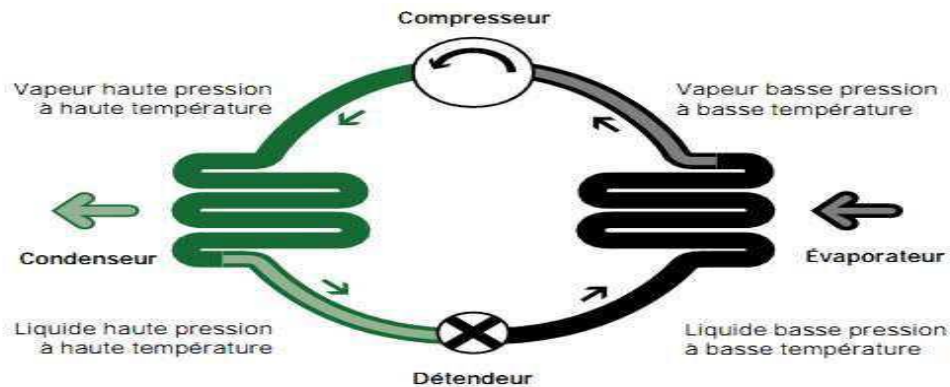
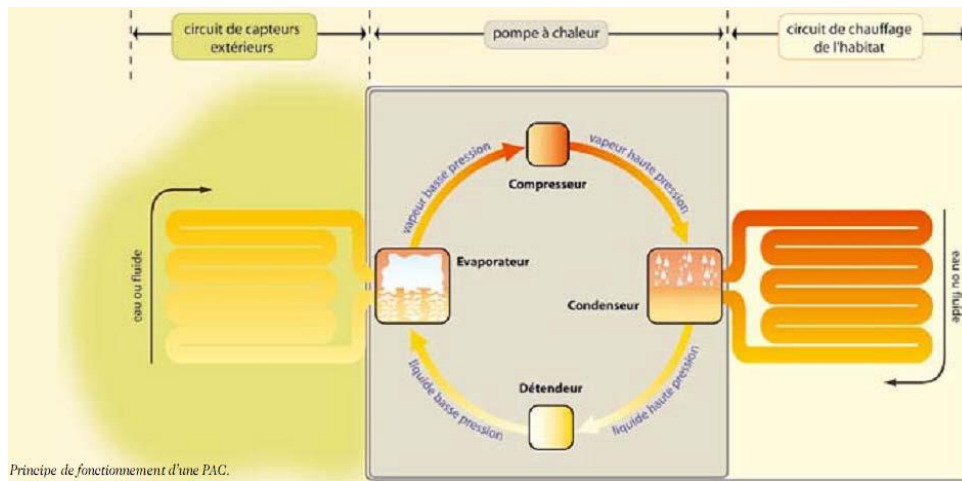


Figure. II.4. Schéma descriptif d'une PAC [7].

### B. Composants d'un PAC

- 1. Évaporateur:** la surface froide en perdant une partie de sa chaleur cède une certaine quantité d'énergie à un fluide frigorigène (généralement des fluides de la famille des hydrofluorocarbures) lequel par ce contact s'évapore car ce fluide a la propriété de s'évaporer à basse température dans certaines conditions de pression que le système arrive à réunir.
- 2. Compresseur:** par l'intermédiaire d'une canalisation, le fluide caloporteur est transporté sous forme de vapeur afin d'être comprimé par un compresseur ce dernier processus conduisant à remonter le niveau de pression du fluide de façon à le mettre en capacité de condenser à la température de la pièce (supposée élevée).
- 3. Condenseur:** un condenseur capte cette chaleur pour la transmettre à l'air ambiant (ou l'eau pour les PAC à émetteurs à eau ou pour la production d'eau chaude sanitaire).
- 4. Détendeur:** le fluide caloporteur condensé par cet échange et par conséquent liquéfié est détendu pour revenir à l'évaporateur le cycle se poursuit indéfiniment selon les besoins de chauffage [7].

### C. Principe de Fonctionnement d'une PAC



**Figure. II.5.** Principe de fonctionnement d'une PAC [6].

De gauche à droite sur le schéma :

- La chaleur prélevée dans le milieu naturel est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur.
- Le fluide change d'état et se transforme en vapeur.
- Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température.
- Au niveau du condenseur, la vapeur, en se condensant, transmet sa chaleur au milieu à chauffer. La température du fluide s'abaisse alors dans le détendeur, le rendant prêt pour un nouveau cycle.

Le principe est similaire à celui du réfrigérateur : la chaleur est extraite du compartiment interne du réfrigérateur, d'où l'apparition de froid. La chaleur produite est évacuée par la grille derrière l'appareil et chauffe... la cuisine [6].

### D. Principe thermodynamique de PAC

Une pompe à chaleur est un système thermodynamique qui fonctionne entre deux sources : une source froide et une source chaude. Le principe consiste à transférer des calories de la source froide vers la source chaude, donc à un niveau de température supérieur. Ce transfert se fait via un fluide caloporteur (fluide frigorigène) et ne peut se réaliser que s'il y a apport d'énergie sous forme de travail (dans le cas de **PAC** à compression) [6].

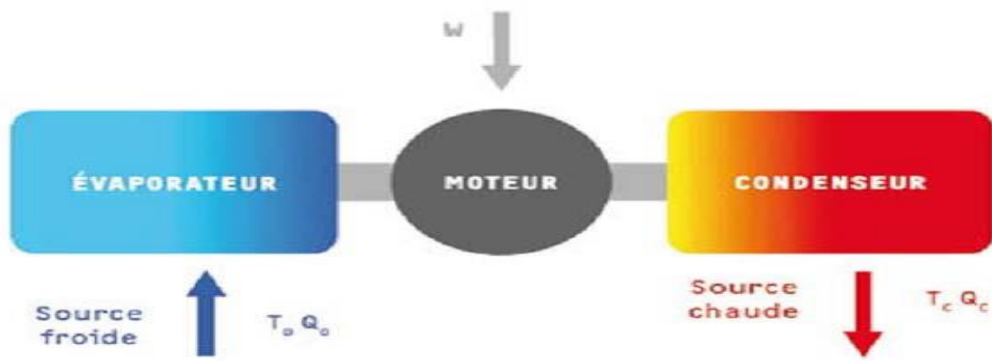


Figure. II.6. Schéma de principe d'une machine thermodynamique [6].

### II.2.7.2. Puits canadien (provençal)

#### A. Définition :

Le puits canadien, appelé aussi puits provençal, est un système géothermique qui utilise l'inertie thermique du sous-sol à une profondeur limitée de 2 à 3 m. Ce système sert pour le préchauffage de l'air en hiver et pour le rafraîchissement en été. Il est basé sur le simple constat que la température à 2 mètres de profondeur est à peu près constante, environ 12°C en été et 7°C en hiver [6].

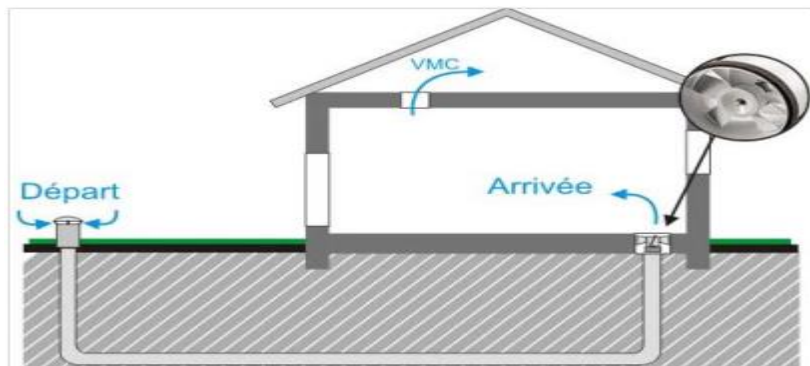


Figure. II.7. Description d'un puits canadien.

#### B. Principe de fonctionnement

Le principe est simple : l'air extérieur circule, grâce à un ventilateur, dans des canalisations enterrées avant d'être insufflé dans le bâtiment. En saison froide l'air extérieur se réchauffe au contact du sol pour atteindre une température de 2 à 5 °C limitant ainsi les besoins de chauffage du bâtiment, tandis qu'en été l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour baisser en température et arriver dans le bâtiment entre 15 et 20°C. Cette technique est notamment intéressante dans des régions où le climat présente des températures estivales supérieures à 30 °C. Consommant très peu d'énergie car seul le système de ventilation

consomme de l'électricité. Il demande très peu d'entretien. Son prix, peu élevé, dépend essentiellement du coût de terrassement, c'est pourquoi cette installation est peu conseillée en rénovation [8].

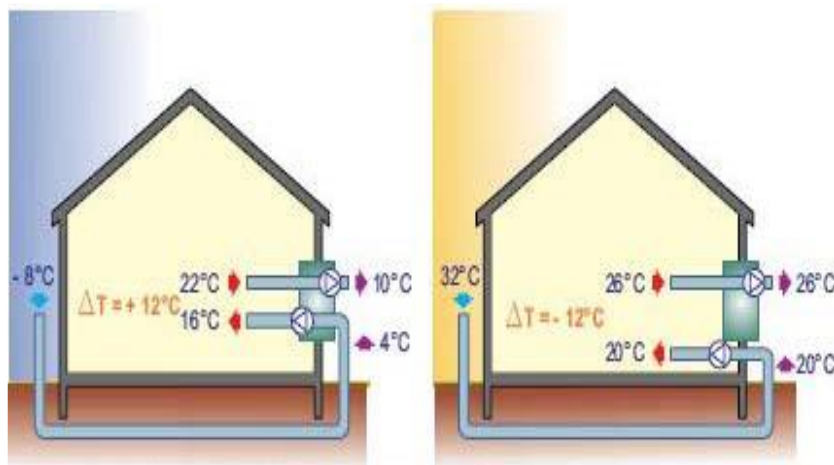


Figure. II.8. Schéma de fonctionnement été-hiver [6].

### C. Emplacement du puits canadien

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

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

Techniquement, ces variantes sont équivalentes, la différence se situe au niveau des coûts de terrassement, la deuxième variante étant la plus intéressante financièrement, aucun terrassement supplémentaire n'étant à réaliser. Lors de la mise en place des tuyaux, il faut éviter au maximum les coudes et angles créant des pertes de charge. De plus un écart entre les tuyaux parallèles d'au moins 0,8m doit être conservé [9].

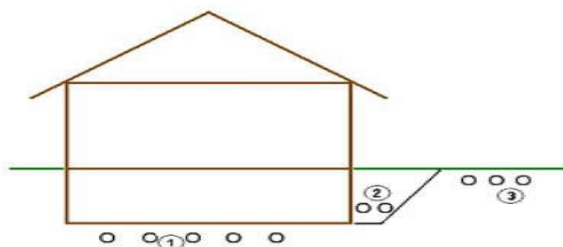


Figure. II.9. Emplacement du puits [9].

### D. Eléments pour la conception d'un puits canadien/provençal [10]

- **Nature du sol** : c'est un des principaux éléments à prendre en compte lors de la conception d'un puits canadien/provençal. Les performances du puits sont directement liées à la capacité calorifique et à la conductivité thermique du sol

- **Localisation géographique** : le recours à un puits canadien/provençal est particulièrement intéressant dans les régions ayant un différentiel de température important entre l'été et l'hiver (>20 °C). (Régions continentales par exemple).

- **Place disponible** pour l'enfouissement du conduit et coût : lors de la conception d'un puits canadien/provençal, il est préférable pour l'enfouissement du conduit de disposer d'une surface importante et dégagée. De plus, le coût d'installation d'un puits canadien/provençal dépend fortement du coût de terrassement. Ces deux éléments font qu'il est plus judicieux d'installer le puits pendant les travaux de fondation d'un bâtiment que pour équiper un bâtiment existant.

- **Type de bâtiment et ventilation hygiénique** : le puits canadien/provençal doit permettre au système de ventilation de l'habitation d'assurer un débit d'air respectant l'arrêté du 24 mars 1982 pour les bâtiments résidentiels et le règlement sanitaire départemental et/ou le code du travail pour les locaux tertiaires. Ce débit dépend de la configuration de chaque bâtiment.

- **Besoins en chauffage et refroidissement** : une étude thermique permet, en fonction des conditions climatiques et des besoins de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment, de déterminer les principales caractéristiques que doit avoir le puits. Certains logiciels de simulation tels que GAIA1 ou "PLEAIDE + COMFIE"2 permettent d'intégrer cette étude thermique dans le dimensionnement global d'un puits canadien/provençal. Certains industriels acteurs du marché disposent également d'outils de calculs intégrant ces données[10].

### II.3. Échangeur air-sol

#### II.3.1. Définition

L'échangeur air-sol est un système de rafraîchissement du bâtiment très peu consommateur d'énergie qui exploite d'inertie thermique du sol Un modèle a été développé, qui tient compte



## Chapitre II Généralités sur l'énergie géothermique & les échangeurs de chaleur (air/sol)

---

des principaux phénomènes intervenant durant l'échange air/sol. Il se compose de deux éléments : un modèle thermique de sol et un modèle d'échangeur.

Le premier calcule la température du sol « non perturbé » à partir du bilan énergétique à la surface du sol, de l'influence d'un bâtiment proche et de la puissance géothermique.

Le second utilise la température du sol calculée pour déterminer la température de l'air sortant d'échangeur. Ce modèle a été intégré à un outil de simulation thermique du bâtiment[13].

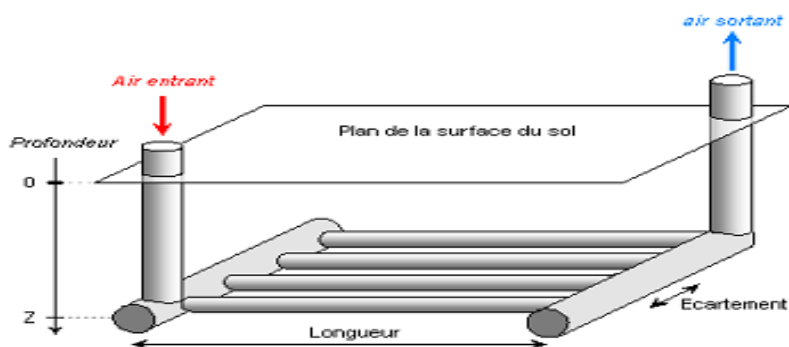


Figure. II.10. Géométrie de l'échangeur air-sol modélisé[13].

### II.3.2. Modes de fonctionnement d'un échangeur air/sol :

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

#### a. Fonctionnement en hiver :

En hiver, la température extérieure est inférieure à la température de sol, l'air est réchauffé en traversant l'échangeur géothermique. Grâce à la chaleur du sous-sol cet air chaud permet de réaliser des économies d'énergie [9].

#### b. Fonctionnement en été

En été, la température du sous-sol est basse. L'air extérieur est rafraîchi en traversant l'échangeur géothermique puis diffusé dans l'habitation, entraînant une réduction de la température ambiante pour un meilleur confort [9].

#### c. Fonctionnement au printemps/automne

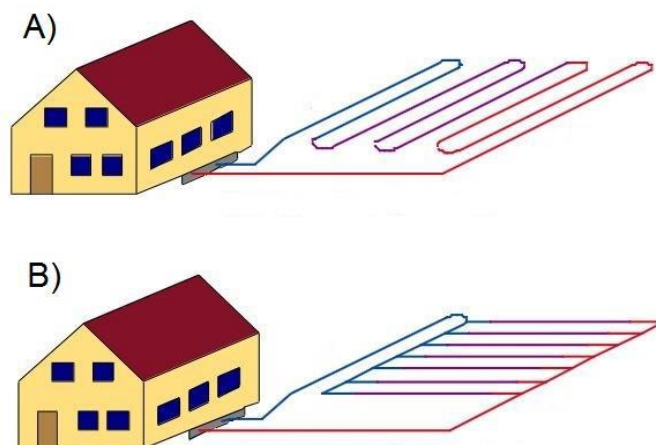
Pendant les intersaisons, la température extérieure subit des variations importantes(journées

ensoleillées – nuits froides), mais la température du sous-sol reste stable (fraîche au printemps – encore chaude en automne). Par une chaude journée de printemps, il n'est pas souhaitable d'amener de l'air neuf par l'intermédiaire de l'échangeur géothermique, cet air serait plus frais que l'air extérieur. Par contre, le préchauffage de l'air par l'échangeur géothermique pendant les nuits fraîches du printemps est souhaitable. L'exemple inverse (journées fraîches, nuits chaudes) est valable pour les journées d'automne[9].

### II.3.3. Différents types d'installation des échangeurs air/sol

#### II.3.3.1. Échangeur horizontal

Un échangeur air sol horizontal qui comporte un certain nombre de tubes raccordés entre eux soit en série ou en parallèle [11] .



**Figure. II.11.** Echangeur air/sol horizontal (style européen) **A.** Connexion en série, **B.**

Connexion en parallèle [11] .

#### II.3.3.2. Echangeurs air sol spéciaux

Ont été développés pour les systèmes pompes à chaleur, dans lesquels les tubes sont courbés en une forme spirale (figure .II.12).

Ces types des échangeurs sont mieux adaptés pour le chauffage et le refroidissement des locaux construits dans un sol à faible accumulation de l'énergie[11] .

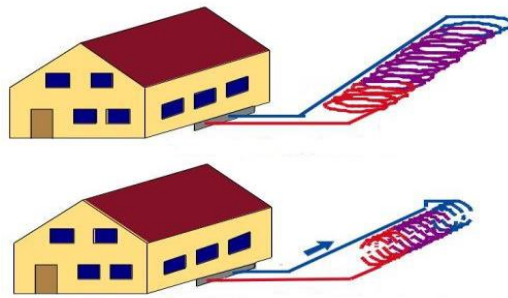


Figure. II.12. Echangeur air sol spirale (Amérique du Nord) [11] .

### II.3.3.3. Échangeurs air sol verticaux

Ce type des échangeurs est généralement plus cher à installer, par contre il est moins coûteux de côté tuyauterie que les échangeurs horizontaux [11] .

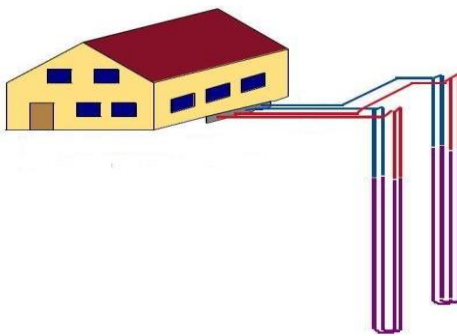


Figure .II.13. Échangeur air sol vertical [11] .

### II.3.4. Caractéristiques techniques d'un échangeur air/sol

#### II.3.4.1. Longueur des tubes

La longueur totale du conduit est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique (température extérieure tout au long de l'année) et du type d'installation choisie [11] .

#### II .3.4.2. Diamètre des tubes

La vitesse de l'air au sein du puits doit être comprise entre 1 et 3 m/s. En fonction des débits d'air requis, le diamètre du conduit du puits est alors calculé pour respecter ces conditions de vitesse d'air [11].

### II .3.4.3. 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 [9].

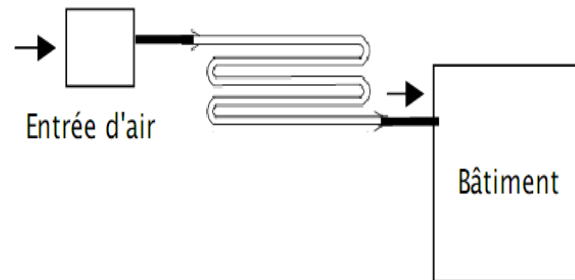


Figure. II.14. Echangeur géothermique a air avec Tube en méandre [7].

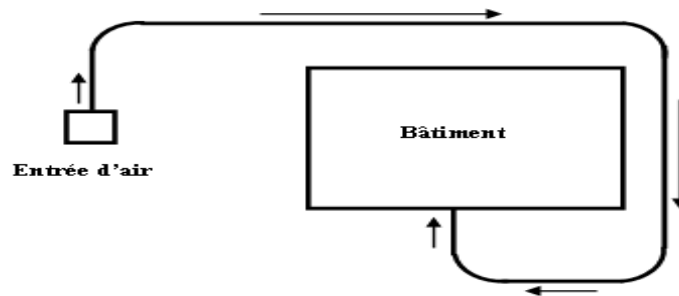


Figure. II.15. Echangeur géothermique a air avec Tube en boucle [7].

La disposition souvent utilisée lorsque le puits est constitué d'un Faisceau de tubes est la suivante :

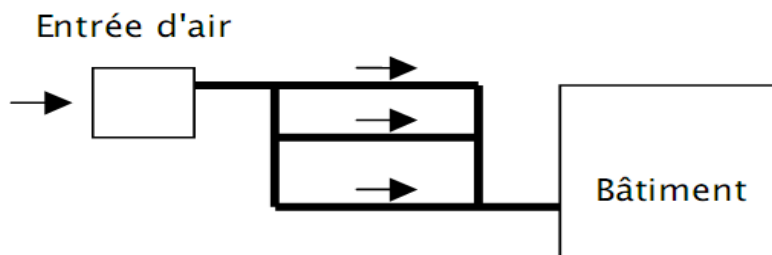


Figure. II.16. Echangeur géothermique a air constitué d'un faisceau de tubes[7].

### II.3.4.4. Nombre de tubes puits

Le conduit du puits peut être constitué d'un seul tube posé en méandre ou en boucle autour du bâtiment ou être organisé sous la forme d'un réseau de tubes parallèles installés entre des collecteurs afin d'augmenter le débit d'air circulant dans le puits [11].

## Chapitre II Généralités sur l'énergie géothermique & les échangeurs de chaleur (air/sol)

---

### II .3.4.5. Profondeur d'enfouissement des tubes

La profondeur préconisée est souvent comprise entre 1 et 4 m. A ces profondeurs, la température du sol varie moins que la température de l'air extérieur entre l'été et l'hiver [11].

### II .3.4.6. Pente du conduit

Elle doit être comprise entre 1 et 3% pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud est en contact avec les parois froides du puits [11].

### II .3.4.7. Matériau constitutif des tubes

Les tubes sont généralement en **PVC**, en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide. Le choix du matériau du tube n'est pas important car la performance thermique de l'échangeur est non affectée par le matériau du tube [11].

### II .3.4.8. Espacement entre les tubes

La majorité des études effectuées disent qu'il est préférable qu'il soit supérieur à 3 fois le diamètre des tubes afin de garantir un bon échange thermique de chaque tube avec le sol [11].

### II .3.5. Différents types de tuyaux

**Tableau. II.1.** Comparaison entre différents types de tuyaux [12].

Types de tuyaux	Remarque
Polyéthylène	Ecologique mais assez chère
PVC	Moins chère, mais pas très écologique (dégage de vapeur nocive)
Tuyaux annelés de protection de câbles électriques	Utiliser pour des petits diamètres
Tuyaux de béton	Utiliser pour des diamètres plus de 300mm, mais difficile à étanchéifier

---

### II .3.6. Avantages et les inconvénients d'un échangeur air/sol [1,5].

#### a. Avantages

- 1- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport .
- 2- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement .
- 3- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables.
- 4- Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques.
- 5- Le coût de la consommation d'énergie est fortement réduit.
- 6- Facile d'utilisation- L'énergie géothermique n'est pas liée à la politique pétrolière.
- 7- Durabilité: inépuisable à l'échelle humaine, sa gestion est de type renouvelable.
- 8- C'est un système confortable et écologique -Pas de combustion.
- 9- Elles n'utilisent pas de combustion pour chauffer, -Pas de fumée.
- 10- Utiliser de l'énergie 100% naturelle.
- 11- Le fait qu'elle ne dépend pas des conditions atmosphériques (froid, vent, pluie et soleil) [1].

#### b. Inconvénients

- 1- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés .
- 2- L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques.
- 3- Risque de glissement de terrain.
- 4- C'est une énergie qui se transporte difficilement, elle doit donc être utilisée sur place.

### **II.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fourni une définition des énergies renouvelables, notamment l'énergie de la géothermie et les différents types d'échangeurs de chaleur air/sol, que nous utilisons dans le domaine de la ventilation et du refroidissement des habitations. Nous avons consacré notre étude à ses types, sa classification et son mode d'utilisation.

## Chapitre II Généralités sur l'énergie géothermique & les échangeurs de chaleur (air/sol)

---

### II.5. Références bibliographiques

- [1] H. Benfateh, Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat, Mémoire de Magistère. Université Mohamed Khider, BISKRA, 2009.
- [2] M. Ghyselinc- Bardeau, and A. Wulleumier, Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse à basse énergie (nappe salluviales et thermalisme) dans la région Midi-Pyrénées. BRGMR eport BRGM/RP-55888-FR, 2007.
- [3] Julien HEINTZ (CETIAT), Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d informations) "janvier 2008.
- [4] <https://www.sodielec-berger.fr/fr/content/255/88/vmc/puit-canadien-puits-canadien>.
- [5] I. Benchemsa, L'utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique , Mémoire de master. Université BADJI MOKHTAR ,ANNABA.2016/2017.
- [6] Y. Belloufi, Modélisation d'un échangeurs air/sol dont le but de rafraichissement des locaux, mémoire de mastre. Université Mohamed Khider ,Biskra, 2012.
- [7] M. Benhammou, analyse et caractérisation d'un système géothermique de rafraichissement approprie aux logements batis au sud algérien, Mémoire de Doctorate, . Université de BECHAR.
- [8] M. A. Kethiri, Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation des palmiers dattiers dans la région de Biskra. (Mémoire de master ,Université Mohamed Khider de Biskra) 2019.
- [9] S. Elbouti, A. Mabrouki, Etude d'un échangeurs de chaleur air/sol, Mémoire de master, Université KASDI MERBAH .OUARGLA, 2016.
- [10] Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques, " Les puits canadiens/provençaux ", Guide d'information Villeurbanne France 2008.
- [11] 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, Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [12] M. Saadeeddine, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un Échangeur air/sol enterré, Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.
- [13] Y. Ahmouda, Etude Numérique des phénomènes d'écoulement et d'échanges thermiques dans un échangeurs air/sol enterré de forme U, Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.

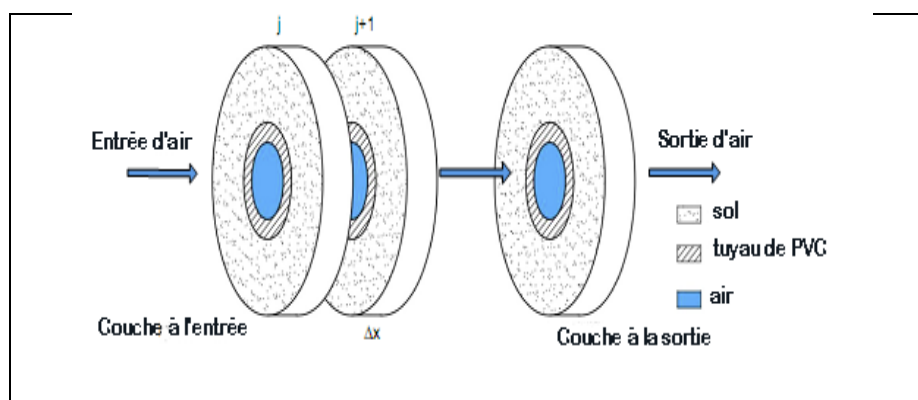


**Chapitre III :****Modélisation mathématique du problème par logiciel de simulation****Sommaire**

III.1 Introduction.....	46
III.2 Position du problème .....	46
III.3 Mesures de l'échangeur.....	47
III.4 Présentation de la formulation mathématique .....	48
III.4.1 Modèle thermique du sol.....	48
III.4.2 Description du modèle étudié.....	48
III.4.3 Exemple d'un schéma d'installation de l'échangeur " puits canadien.....	49
III.4.4 Établissement des modèles semi- analytiques.....	49
III.5 Hypothèses considérées.....	50
III.6 Method de calcul.....	51
III.6.1 Estimation de la température de l'air.....	51
III.6.2 Estimation de la résistance thermique du sol.....	52
III.7 Organigramme du modèle GRBM.....	56
III.8 Conclusion.....	59
III.9 Références bibliographiques.....	60

**Résumé**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle mathématique semi- analytique pour étudier la distribution thermique du sol et de l'air et évaluer les performances de l'échangeur géothermique à l'aide d'un programme en MATLAB.



### III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons un modèle mathématique semi-analytique permettant d'étudier la distribution de température autour de l'échangeur horizontal enterré et déterminer le rayon de diffusion  $r_{sol}$ , en plus d'évaluer la température de l'air (comme fluide de travail) à l'intérieur du tube avec une forme serpentin. Le modèle se compose de deux parties:

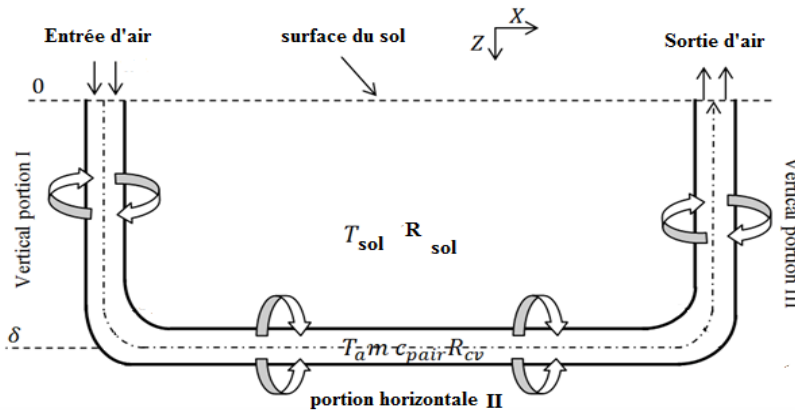
la première partie permet d'étudier le sol perturbé entourant le tube horizontal et s'appelle le modèle **RBM** développé par A. Rouag [1] .

Le second a été développé par C. Mehdid [2]. à l'aide du premier modèle appelé **GRBM**, qui travaille à déterminer et évaluer la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur horizontal. En créant des équations décrivant ce phénomène, afin de trouver le dimensionnement approprié de l'échangeur de chaleur.

Dans ce chapitre nous avons présenté les équations du modèle mathématique de l'air (comme un fluide de travail) et de sol, ainsi que les diverses propriétés thermiques et physiques de l'ensemble air-sol.

### III.2. Position du problème

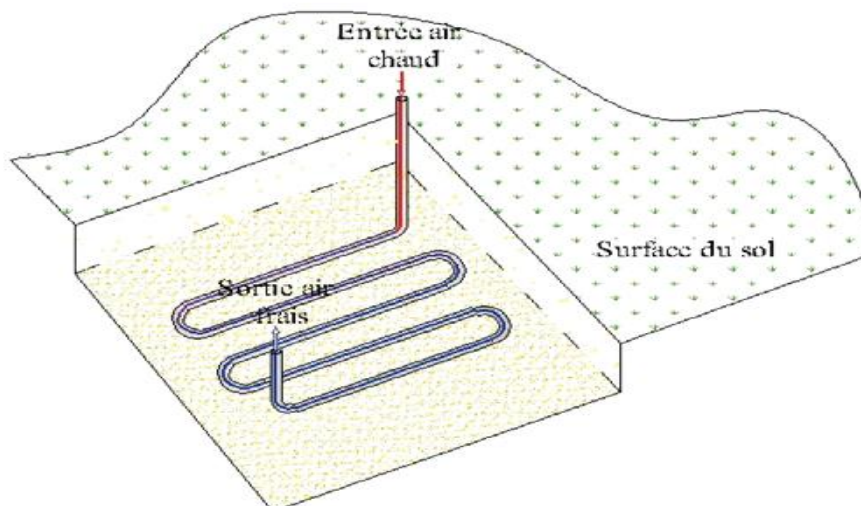
- Le modèle de l'échangeur proposé à étudier en forme « U », se compose de cinq tronçons comme le montre la figure (III-2)
- L'échangeur étudié est enfouis sous sol.
- L'utilisation d'échangeurs géothermiques pour refroidir et ventilations les habitations dans les zones désertiques.
- Le sol supposé comme un mur semi infini.



**Figure III.1.** Schéma descriptif de l'échangeur air/sol [3].

### III.3. Mesures de l'échangeur

L'échangeur se compose de cinq traçons d'une longueur totale d'environ 47 m. Le diamètre interne du tube est de 110 mm. l'épaisseur de tube égale 0.0025 m . L'ensemble est placé à une profondeur de 3 m sous une pente de 2 %. Pour le site de Biskra, cette profondeur (3 m a été déterminée préalablement grâce à une étude effectuée en fonction des données locales du site) . Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 2 m[4].



**Figure. III.2.** Schéma simplifié d'un échangeur air/sol en forme serpent [4].

On pose comme objectif dans cette étude, de simuler un champ de température dans des sols perturbés Et dans l'échangeur géothermique. Pour évaluer la température de l'air pour la ventilation du bâtiment.

## III .4. Présentation de la formulation mathématique

### III. 4.1. Modèle thermique du sol

L'échangeur air-sol est un système de rafraîchissement du bâtiment très peu consommateur d'énergie qui exploite d'inertie thermique du sol[5]. Pour Extraire l'énergie du froid extrême présente dans les premiers mètres de profondeur de la terre Avec un coût financier fiable, il faut étudier l'effet de la température perturbée du sol sur le fonctionnement de l'échangeur enterré en dessous d'une profondeur étudiée.

Par conséquent, afin d'assurer un refroidissement par air continu, il est nécessaire de connaître la distance optimale entre les tubes Ainsi qu'entre les échanges lors de l'utilisation de plusieurs d'EAHE [6].

### III. 4.2. Description du modèle étudié

Ce modèle vise à étudier les changements radiaux de température du sol transitoire et son effet sur le fonctionnement de l'échangeur horizontal en plus d'évaluer et de déterminer la température de l'air le long de tube en fonction des conditions aux limites variable de l'air et du sol au cours du temps afin d'obtenir une conception idéale.

L'idée de ce modèle est illustrée dans la (figure.III.3) qui construit les étapes suivantes :

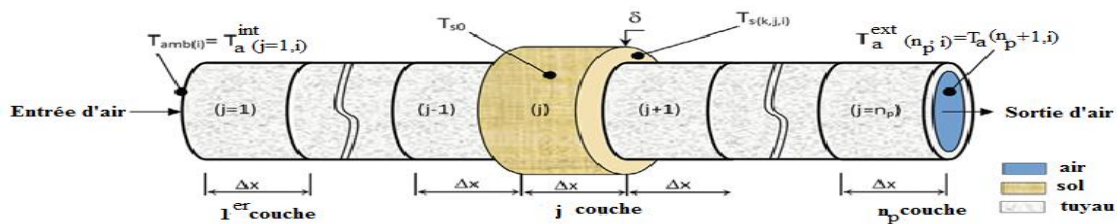


Figure III.3. Schéma montre la subdivision du tuyau EAHE et du sol en plusieurs couches [2].

## Chapitre III Modélisation mathématique du problème par logiciel de simulation

Tout d'abord, le sol et le tuyau EAHE sont divisés en plusieurs sections Couches. Chaque couche a l'épaisseur du sol perturbé et La température radiale du sol près du tube a été déterminée Selon le modèle **RBM**, précédemment développé par A.Rouag et al[1].

Ensuite, la résistance thermique totale est calculée Enfin, les paramètres spécifiés, Les quelles qui sont des constantes pour le pas de temps courant complet, sont utilisées Température de sortie d'air nominale de la couche actuelle ( J).

Pour déterminer la température de l'air, un modèle généralisée appelé **GRBM** développé par C.E Mehdid [2].A été utilisé , qui est lié au modèle précédent , où la température de l'air sortant de la couche (J) est celle entrant dans la couche suivante ( J + 1 ) . Ce processus est répété jusqu'à la fin du tube ( j = n<sub>p</sub>).

De plus , afin de rendre le modèle plus précis , la température ambiante et le flux de chaleur de chaque couche ont été rendus variables, ce qui signifie que le rayon du sol Cela varie d'une couche à l'autre.

### III.4.3. Exemple d'un schéma d'installation de l'échangeur " puits canadien "

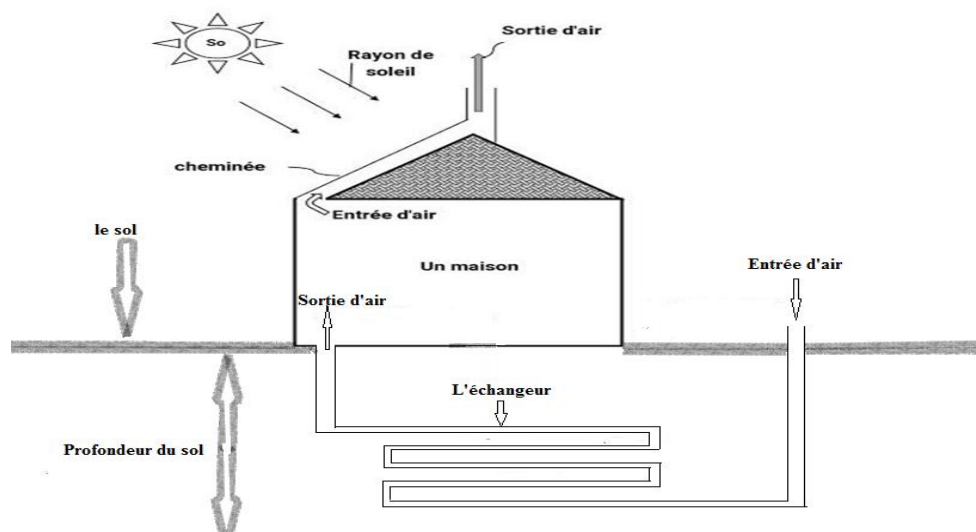


Figure. III.4. Schéma d'installation de l'échangeur étudié.

### III.4.4. Établissement des modèles semi- analytiques

Dans cette étude , nous essayons de trouver des expressions semi-analytiques reliant les changements de température du sol entourant l'échangeur en termes de rayon de sol  $r_{sol}$  et la durée de l'opération afin de prédire les performances de l'échangeur de chaleur et de trouver la conception appropriée pour l'échangeur.

## Chapitre III Modélisation mathématique du problème par logiciel de simulation

---

Pour cela, nous recherchons la relation qui explique ce phénomène ,et qui se rapporte aux données suivantes :

- la température du sol.
- rayon de sol(  $r_s$ ).
- Le flux thermique (Q).
- La résistance du sol ( $R_s$ ).

Ceci est fait pour Afin de déterminer :

- la température de l'air à la sortie de l'échangeur utilisé pour le refroidissement
- déterminer la distance optimale entre les tube ou entre les échangeurs , si plusieurs échangeurs sont utilisés.

Tout cela afin de trouver un dimensionnement idéal utilisé pour le refroidissement et ventilation des bâtiments, en particulier dans les zones à forte augmentation de température.

### III. 5.Hypothèses considérées

Pour formuler mathématique le problème ,on doit avant tout poser les hypothèses suivantes :

- 1) Sol autour de la chaleur l'échangeur est homogène.
- 2) Les propriétés du sol sont isotropes et il y a un contact parfait entre le sol et le tuyau.
- 3) Air l'écoulement est uniforme sur toute la longueur des tuyaux enterrés.
- 4) Thermo physique les propriétés de l'air sont des constantes.
- 5) Nous supposons que le tuyau et le sol sont subdivisés en plusieurs couches ( $\Delta x = 1m$ ).
- 6) Le débit d'air est considéré comme unidimensionnel.
- 7) Dans chaque couche, le flux de chaleur entre l'air et le sol est supposé constant pour le pas de temps courant complet.
- 8) La température ambiante varie avec le temps.

On pose comme objectif dans cette étude de simuler le champ de température dans le sol et dans l'échangeur à usage géothermique.

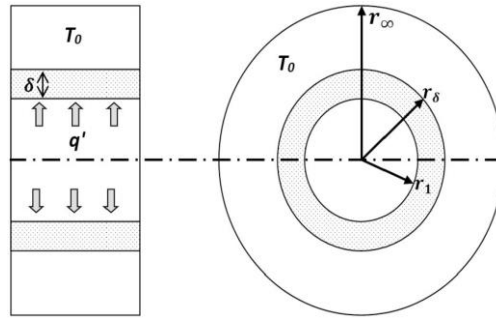


Figure.III.5. Schéma du cylindre creux semi-infini étudié[1].

### III.6.Méthode de calcul

#### III.6.1. Estimation de la température de l'air

D'après le bilan énergétique développé par **Y.Belloufi** et al[6]. Pour une couche  $j^{\text{th}}$ , le bilan énergétique d'un échangeur horizontal à la surface du sol s'écrit comme suit:

$$\dot{m}_a C p_a \frac{dT_a}{dx} = - \frac{(T_a - T_s)}{R_{tot}} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Avec } \dot{m}_a = \rho \pi r_1^2 v_a \quad (\text{III.1.a})$$

Où

$T_a$  : la température de l'air

$C p_a$  : la capacité thermique de l'air

$\dot{m}_a$ : le débit massique de l'air

$R_{tot}$ : Résistance thermique totale

$R_{tot}$ , est la somme des résistances thermiques de l'air,  $R_{air}$ , tuyau  $R_{tub}$  et  $R_s$  du sol perturbé entourant la  $j^{\text{th}}$  couche

En résolvant analytiquement l'Eq différentiel (III.1), la sortie d'air la température de la  $j^{\text{th}}$  couche est donnée comme suit:

$$T_a^{ext} = (T_a^{int} - T_{0s}) \exp\left(-\frac{\Delta x}{R_{tot} \dot{m}_a C p_a}\right) + T_{0s} \quad (\text{III.2})$$

Pour un temps donné  $t_i$ , en prenant la longueur de la couche  $\Delta x = 1\text{m}$ . et en considérant la température de l'air d'entrée de la ( j ) couche actuelle comme la température de l'air de sortie de la (j-1) couche précédente, l'Eq. (III.2) peut s'écrire:

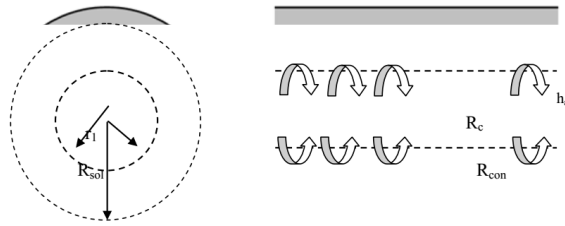
$$T_{a(j+1,i)} = (T_{a(j,i)} - T_{0s}) \exp\left(-\frac{1}{R_{tot(j,i)} \dot{m}_a c_{p_a}}\right) + T_{0s} \quad (\text{III.3})$$

Comme mentionné ci-dessus, (Eq.III.2) s'exprime à l'état stationnaire par en supposant des propriétés thermiques du sol constantes pendant toute la durée du courant étape. Le calcul de la température de l'air est répété pour l'étape suivante de temps avec neuf ( température du sol, résistance thermique du sol) en utilisant le modèle **RBM**[1].

### III.6.2. Estimation de la résistance thermique du sol

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

$$R_{tot} = R_s + R_{tub} + R_{air} \quad (\text{III.4})$$



**Figure.III.6.** Transfert de chaleur entre l'échangeur et le tube coupe longitudinale et radiale [12].

Où la résistance du tube ( $R_{tub}$ ), s'écrit comme suit :

$$R_{tub} = \frac{1}{\lambda_{tub} 2\pi \cdot \Delta x} \log\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) \quad (\text{III.4.1})$$

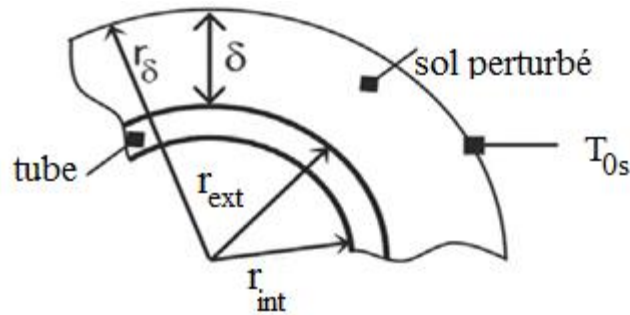
La résistance du sol ( $R_s$ ) est donnée par la relation:

$$R_s = \frac{1}{2\pi \lambda_s L} \ln\left(\frac{r_\delta}{r_{ext}}\right) \quad (\text{III.4.2})$$

$$\text{avec } r_\delta = r_{ext} + \delta \quad (\text{III.4.2.1})$$

où  $r_\delta$  et  $\delta$  sont respectivement le rayon du sol et l'épaisseur du sol perturbé (voir Figure.III.7)





**Figure.III.7.** Schéma montre l'épaisseur du sol perturbé,  $\delta$ , et le rayon du sol,  $r_\delta$ [2].

Généralement, la résistance thermique du tuyau, ( $R_{tub}$ ), et la résistance de la convection de l'air dans le tuyau, ( $R_{air}$ ) sont constantes.

où

la résistance thermique de la transfert de chaleur par convection entre l'air et la surface intérieure du tuyau, ( $R_{air}$ ), sont calculés comme suit:

$$R_{air} = \frac{1}{(h_a 2\pi r_{int})} \quad (\text{III.4.3})$$

Le coefficient d'échange convectif ( $h_a$ ) a été déterminé en utilisant la corrélation suivante :

$$h_a = Nu \cdot \lambda_a / d_{int} \quad (\text{III.4.3.1})$$

Où

$d_{int}$  : le diamètre intérieur du tuyau.

**Nu** : Le nombre Nusselt pour le débit d'air à l'intérieur du tuyau est donné par l'Eq suivant :

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (\text{III.4.3.2})$$

où (**Re**) et (**Pr**) sont respectivement des nombres de Reynolds et de Prandtl sont défini comme:

$$Re = V_a \cdot d_H / \nu \quad (\text{III.4.3.3})$$

$$Pr = \mu_a \cdot Cp_a / \lambda_a \quad (\text{III.4.3.4})$$

Cependant, il n'y a pas d'accord dans la littérature pour calculer la résistance thermique du sol ( $R_s$ ) car certains auteurs suggéraient que le rayon de sol ( $r_s$ ) est égal à trois fois le rayon du tuyau **V.Bansal** et al 2013[7]. Ou égal au diamètre du tuyau **F.El-Ajmi**[8].

Dans ce travail nous avons considéré que la distance ( $r_{sol}$ ) n'est pas constante mais est variable pour chaque couche selon le modèle RBM développé à partir de **A.Rouag** [1].

## Chapitre III Modélisation mathématique du problème par logiciel de simulation

---

Avec assistance du modèle GRBM développé par **C.E.Mehdid** [2]. Qui calcule et évalue la température de l'air dans l'échangeur, nous avons considéré dans ce cas que la température ambiante n'est pas constante pendant le temps de fonctionnement. Elle est variable, car nous avons introduit une température par heure pour 24 heures de fonctionnement .afin d'obtenir une conception plus précise.

Pour cela, le Solution analytique de l'équation de conductivité thermique (III.5) dans Le sol est illustré ci-dessous. Cette équation est exprimée sous forme cylindrique. Il coordonne dans la couche( **j** ) de tube et le sol environnant. Il est considéré comme un cylindre creux semi-infini comme indiqué précédemment à la figure (III.5) .

$$\frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \text{ pour } r > r_{ext} \quad (III.5)$$

Où

$u_{(k,j,i)} = T_{s(k,j,i)} - T_{0s}$  . avec  $i$  ,  $j$  et  $k$  sont les indices du temps, couche et rayon respectivement.  $T_{0s}$  C'est la Température initiale du sol.

Pour résoudre l'équation de la conduction dans le sol éq(III.5), on doit poser les conditions aux limites suivantes : (13.a), (13.b) et (13.c) . Nous obtenons l'équation (III.6) ci-dessous :

$$\bullet \quad t=0 \Rightarrow u(r, 0) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad T(r, 0) = T_{0s} \quad (III.5.a)$$

$$\bullet \quad r=\infty \Rightarrow u(r \rightarrow \infty, t) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad T(\infty, t) = T_{0s} \quad (III.5.b)$$

$$\bullet \quad r=r_{ext} \Rightarrow \left[ -\lambda \frac{\partial u}{\partial r} \cdot 2\pi r \right] = Q \quad (III.5.c)$$

**Q** ,est le flux thermique par unité de longueur de la couche( **j** ) pour l'étape de temps (  $i$  )(Al-Khoury, 2011)[9].

$$u_{(k,j,i)} = \frac{1}{\pi r_{\infty}^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_i} \frac{j_0(\beta_n r_k) j_0(\beta_n r_{ext})}{j_1^2(\beta_n r_{\infty})} \int_0^{t_i} e^{-\alpha_s \beta_n^2 T} Q(T) dT \quad (III.6)$$

où,  $\beta_n$ , sont définis par les racines positives de  $j_0(\beta_n r_{\infty}) = 0$ , avec  $\beta_n = z_n / r_{\infty}$  et  $z_n$  sont les racines positives des fonctions de Bessel  $j_0(z) = 0$ . (voir annexe).

Dans cet note , Seules quarante racines ( $z_n$ ) ont été récupérées ( **Ozisik, 1993** ) [10].

Il y a deux façons de calculer le flux thermique par unité de longueur,  $Q(t)$ , dans l'équation. (III.6):

a) Nous considérons que le flux de chaleur est constant  $Q$  pendant tout le pas de temps  $dt$ . Dans ce cas, Le flux de chaleur, ( $Q$ ) peut être pris directement à partir de l'intégrale de l'équation (III.6) et ainsi la température du sol à la couche ( $j$ ) peut s'écrire comme suit :

$$T_{s(k,j,i)} - T_{0s} = \frac{Q_{(j,i)}}{\pi \lambda_s r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_i}}{\beta_n^2} \frac{j_0(\beta_n r_k) j_0(\beta_n r_{ext})}{j_1^2(\beta_n r_\infty)} \quad (III.7)$$

où

- Le flux thermique ( $Q$ ), à travers la paroi du tube est proportionnel à la différence entre la température du fluide dans le tube ( $T_a$ ), et la température initiale du sol  $T_{0s}$ , et à l'inverse de la résistance thermique total séparant les deux domaines.

Pour le ( $i$ ) pas de temps actuel, le flux de chaleur par unité de longueur,  $Q_{(j,i)}$  est calculé par la résistance thermique totale,  $R_{tot(j,i-1)}$  comme suit:

$$Q_{(j,i)} = \frac{(T_{a(j,i)} - T_{0s})}{R_{tot(j,i-1)}} \quad (III.7.1)$$

Ou

$T_a$ : Température du fluide en *degré* [°C].

$T_{0s}$  : Température initiale du sol en *degré* [°C].

$R_{tot}$ : Résistance thermique totale en [m<sup>2</sup> K / W].

avec

$$T_{a(j,i)} = T_{a(j-1,i)}^{ext}$$

$$R_{s(j,i-1)} = \frac{1}{2\pi \lambda_s L} \log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_{ext}}\right) \quad (III.7.2)$$

Afin de faire l'Eq. (III.7) plus applicable, les auteurs proposent la substitution des Eq (III.7.1) et (III.7.2) dans l'éq (III.7). Ainsi, le distribution de température transitoire dans le sol entourant la EAHE peut s'écrire:

$$T_{s(k,j,i)} = \frac{2(T_{a(j,i)} - T_{0s})}{r_\infty^2 \log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_{ext}}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_i}}{\beta_n^2} \frac{j_0(\beta_n r_k) j_0(\beta_n r_{ext})}{j_1^2(\beta_n r_\infty)} + T_{0s} \quad (III.8)$$

b) Les propriétés intégrales habituelles de la relation de Chasles (Fiche et al ,en 2010)[11] .ont été employés dans le développement. Dans ce cas, l'Eq. (III.6) devient pour la couche  $j$ :

$$u_{(k,j,m)} = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m} \frac{j_0(\beta_n r_k) j_0(\beta_n r_{ext})}{j_1^2(\beta_n r_\infty)} \left( \int_0^{t_1} e^{\alpha_s \beta_n^2 T} Q_{(j)}(T) dT + \int_{t_1}^{t_2} e^{\alpha_s \beta_n^2 T} Q_{(j)}(T) dT + \dots + \int_{t_{m-1}}^{t_m} e^{\alpha_s \beta_n^2 T} Q_{(j)}(T) dT \right) \right) \quad (III.9)$$

Où

$u_{(k,j,i)} = T_{s(k,j,i)} - T_{0s}$  avec **i, j** et **k** sont les indices du temps, couche et rayon respectivement

ou bien

$$u_{(k,j,m)} = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m} \frac{j_0(\beta_n r_k) j_0(\beta_n r_{ext})}{j_1^2(\beta_n r_\infty)} \sum_{i=1}^m \left( Q_{(j,i)} \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\alpha_s \beta_n^2 T} (T) dT \right) \right) \quad (III.10)$$

où  $(Q_{(j,i)}, i = 0, 1 \dots m)$  est le flux thermique constant par unité de longueur de chaque (i) intervalle de temps  $[t_{i-1} - t_i]$  (hypothèse 7), qui est calculé par la résistance thermique du sol,  $R_{s(j,i-1)}$  comme:

$$Q_{(j,i)} \Big|_{t_{i-1}}^{t_i} = \frac{(T_{a(j,i)} - T_{0s})}{R_{tot(j,i-1)}} \quad (III.11)$$

$$R_{s(j,i-1)} = \frac{1}{2\pi \lambda_s L} \log \left( \frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_{ext}} \right) \quad (III.12)$$

Avec

$$T_{a(j,i)} = T_{a(j-1,i)}^{ext}$$

En conséquence, la température du sol de la couche (j) étudiée avec la température de l'air d'admission variable peut être exprimée en Eq. (III.13) et (III.14):

$$u_{(k,j,m)} = \frac{1}{\pi r_\infty^2 \lambda_s} \sum_{n=1}^{\infty} \left( e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m} \frac{j_0(\beta_n r_k) j_0(\beta_n r_{ext})}{j_1^2(\beta_n r_\infty)} \sum_{i=1}^m \left( \frac{Q_{(j,i)}}{\beta_n^2} \Big|_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\alpha_s \beta_n^2 T} \right) \right) \quad (III.13)$$

$$T_{s(k,j,m)} = \frac{2}{r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{\beta_n^2} \frac{j_0(\beta_n r_k) j_0(\beta_n r_{ext})}{j_1^2(\beta_n r_\infty)} \sum_{i=1}^m \left( \frac{(T_{a(j,i)} - T_{0s})}{\log \left( \frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_{ext}} \right)} \Big|_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\alpha_s \beta_n^2 T} \right) \right) + T_{0s} \quad (III.14)$$

Afin d'évaluer la température transitoire du sol entourant le tube et estimez le rayon en fonction de la température de l'air entrant L'équation (III.16) est constante pendant le fonctionnement, et dans le cas où la température de l'air entrant est variable, nous utilisons la relation. (III.13).

### III.7. Organigramme du modèle GRBM

### Chapitre III Modélisation mathématique du problème par logiciel de simulation

---

Pour mieux comprendre la méthode de calcul basée sur Modèle GRBM.[2], l'organigramme présenté à la Figure.(III.8) résume les différentes étapes décrites ci-dessus. Il faut noter que la résistance thermique du sol et la température du sol ont été estimées, pour chaque couche, en utilisant le modèle RBM de sous-programme A. **Rouag** et al en 2018 [1]. De plus, ce sous-programme dépend de l'entrée condition aux limites (température du fluide d'entrée) qui implique l'utilisation de: (i) l'Eq. (III.16) dans le cas d'un flux de chaleur constant, (ii) ou l'Eq. (III.13) en cas de flux thermique variable.

Pour le côté air, le modèle GRBM [2]. sera utilisé pour donner le profil de température de l'air À l'intérieur de l'échangeur prenant en compte la variation du température du sol ,rayon de sol, Température ambiante. et la résistance thermique.

Toutes les étapes suivies lors de la simulation pour étudier ce phénomène sont illustrées dans organigrammes suivant :

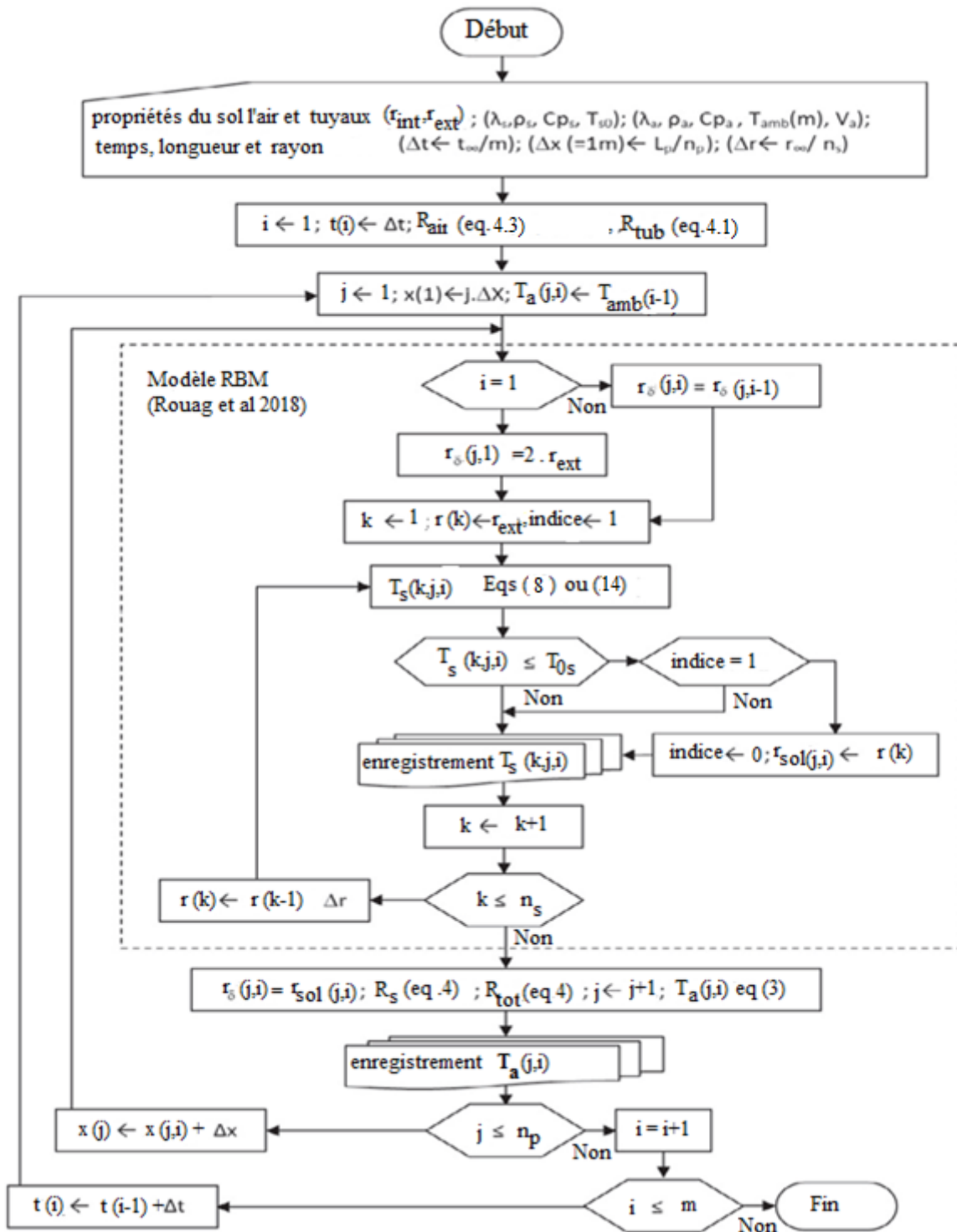


Figure .III.8. Organigramme détaillé du modèle GRBM [2] .

### **III.8.conclusion**

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle semi-analytique pour calculer le transfert de chaleur dans le sol près de l'EAHE horizontal et déterminer le rayon du sol, en plus d'estimer la température de l'air pour assurer un refroidissement continu de l'air, il est nécessaire de connaître la distance optimale entre les tubes, ainsi qu'entre les échangeurs lors de l'utilisation de plusieurs EAHE.

Dans notre étude, nous avons utilisé un logiciel MATLAB basé sur des équations de distribution de la chaleur du sol et l'air. Les procédures et étapes impliquées sont expliquées dans le chapitre suivant avec tous les détails de la simulation.

**III.9 Références bibliographiques**

- [1] A. Rouag, A. Benchabane, and C. E. Mehdid, Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I a new transient semi-analytical model for determining soil temperature, *Journal of Cleaner Production*, vol. 182, p p. 538-544, 2018.
- [2] C.E. Mehdid, A. Benchabane, A. Rouag, N. Moummi, M.A. Melhegueg, A. Moummi, M.L. Benabdi and A. Brima, 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*, vol. 198, pp. 1536-1544, 2018.
- [3] Y. Belloufi, A. Brima, S. Zerouali, R. Atmani, F. Aissaoui, A. Rouag and N. Moummi, Numerical and experimental investigation on the transient behavior of an earth air heat exchanger in continuous operation mode, *International Journal of Heat and Technology*, vol. 35 2, pp. 279-288, 2017.
- [4] N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi et S.Y. Ali, Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra. *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 13 3, pp. 399-406, 2010.
- [5] H. Benfateh. Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat, Mémoire de Magistère. Université Mohamed Khider, BISKRA, 2009.
- [6] 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, Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [7] V. Bansal, R. Misra, G.D. Agarwal, J. Mathur, Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy*, vol. 103, pp. 1-11, 2013.
- [8] F. Al-Ajmi, D.L. Loveday and V.I. Hanby, The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, *Building and Environment*, vol. 41 3, pp. 235-244, 2006.
- [9] R. Al-Khoury, *Computational Modeling of Shallow Geothermal Systems*. CRC Press, 2011.
- [10] M.N. Ozisik. *Heat Conduction*. John Wiley & Sons. 1993.
- [11] A. Fiche, A. Martin, J.C. Cexus, A. Khenchaf, Continuous belief functions and  $\alpha$ -stable distributions. *International Conference on Information Fusion*, pp. 1-7. IEEE. 2010.
- [12] Y. Belloufi, Modélisation D'un Echangeur Air/Sol Dont Le But De Rafraichissement Des Locaux. Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.



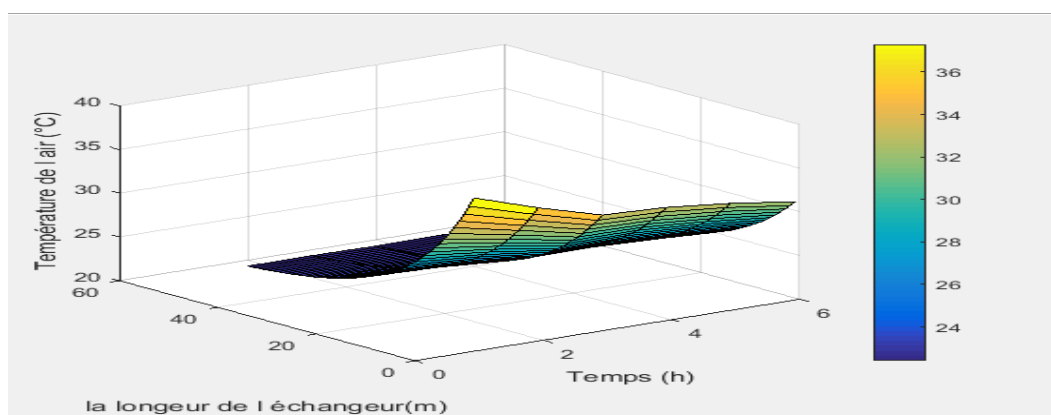
## Chapitre IV : Résultats et discussion

### Sommaire

IV.1 Introduction.....	62
IV.2 Validation des résultats.....	62
IV.2.1 Propriétés physiques et thermiques (de l'air, des tuyaux et du sol )utilisé dans validation du tuyaux.....	62
IV.3 Etude paramétrique.....	65
IV .3.1 Effet de la durée de fonctionnement sur la température de l'air (3D).....	66
IV .3.2 Effet de la durée de fonctionnement sur la température du sol (3D).....	68
IV .3.3 Effet de la durée de fonctionnement sur le rayon du sol $r_\delta$ .....	71
IV .3.4 Effet de la température ambiante sur la Longueur de l'échangeur air-sol (40°C, 45 °C, 50 °C et 57 °C).....	72
IV.3.5 Effet du diamètre des tubes sur la Longueur de l'échangeur air-sol (0.055m, 0,1 m, 0,15 m et 0.3 m).....	73
IV .3.6 Effet de vitesses d'air sur la Longueur de l'échangeur air-sol ( $T=f(L)$ pour différents vitesses) $V_a=1\text{m/s}$ $V_a=3.5\text{ m/s}$ et $V_a=5\text{ m/s}$ .....	74
IV .3.7 Effet de la conductivité thermique du sol sur la Longueur de l'échangeur (0.5 W/m.K , 1.5 W/m.K , 4 W/m.K ).....	76
IV.2 Conclusion.....	77
IV.5. Références bibliographiques.....	78

### Résumé

Dans ce chapitre, nous avons présenté et validé les résultats de modèles mathématiques semi-analytique avec des études antérieures de la littérature liées à l'amélioration des performances de l'échangeur géothermique.



### IV.1. Introduction

Comme mentionné dans le chapitre précédent, un nouveau model semi-analytique a été développé et un programme en langage Matlab est élaboré pour dimensionner un échangeur de chaleur air-sol en appliquant des conditions climatiques extrêmes de la région de BISKRA. Après la validation du model, les résultats sont donnés sous forme des courbes. Puis, nous tacherons de faire ici une étude paramétrique qui montre l'influence de la durée de fonctionnement, le débit d'air, la température ambiante, la géométrie et la conductivité thermique du sol sur la température de sortie de l'air et la température du sol pour voir l'influence de ces paramètres sur les performances thermique de l'échangeur.

### IV.2 Validation des résultats

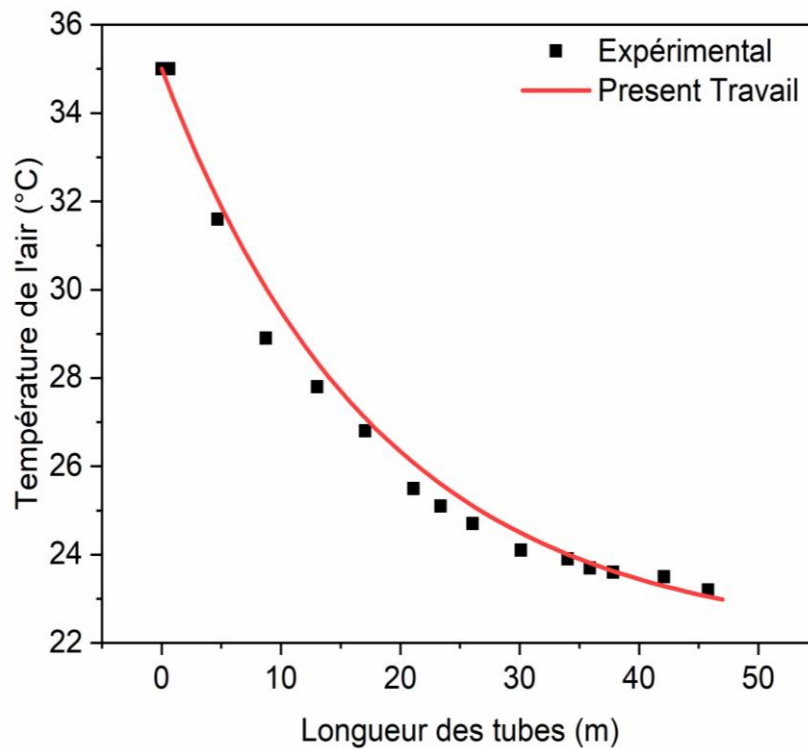
Pour valider notre model semi-analytique, nous avons comparé les résultats obtenus par notre code avec ceux de Mehdid et al. 2018 [1]. En utilisant les mêmes paramètres géométriques et thermo-physiques pour une durée de fonctionnement continu de six heures. Les paramètres et les caractéristiques spécifiques de l'échangeur air-sol testé par Mehdid et al [1]. Sont regroupés dans le tableau IV.1.

#### IV.2.1 Propriétés physiques et thermiques (de l'air, des tuyaux et du sol ) utilisées dans validation du tuyaux

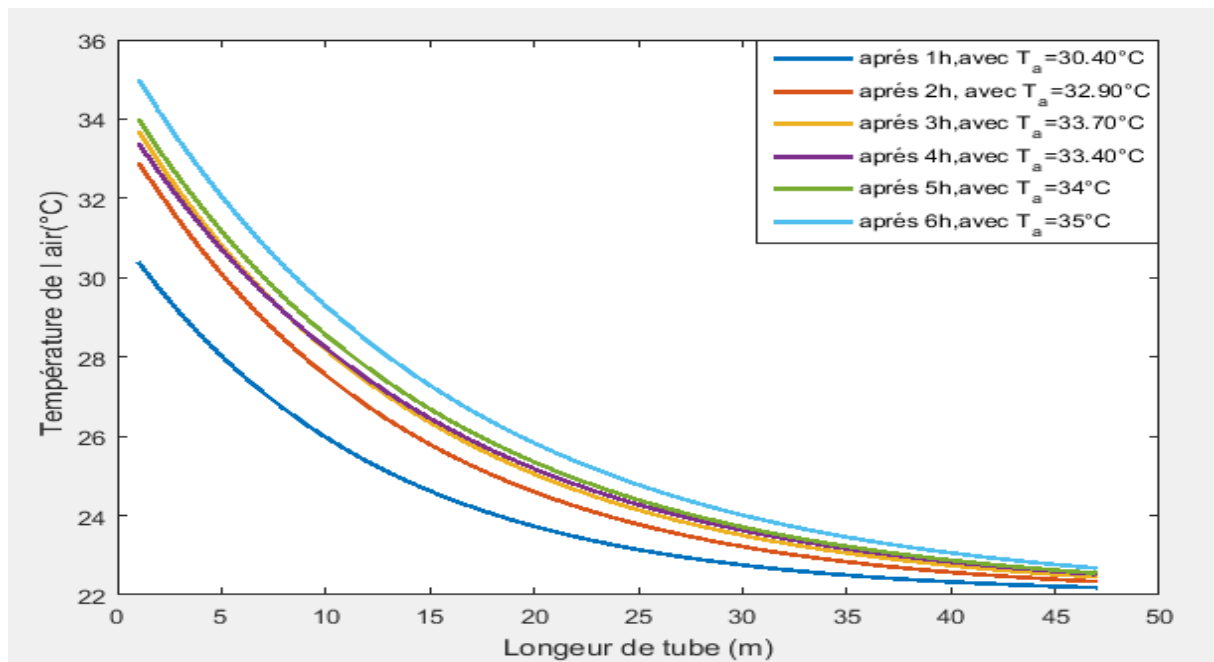
**Tableau IV.1.** Caractéristiques spécifiques de l'échangeur air-sol de Mehdid et al [1].

Paramètres	Valeurs
Longueur de PVC horizontal	47 m
Diamètre intérieur de PVC	0.11m
Epaisseur de PVC	0.005m
Profondeur de PVC	3m
Vitesse de l'air	3.5m/s
La masse volumique de l'air	1.225kg/m <sup>3</sup>
La masse volumique de sol	1800kg/m <sup>3</sup>
La masse volumique de PVC	1380kg/m <sup>3</sup>
La capacité thermique de l'air	1005J/kg. K
La capacité thermique de sol	1340J/kg. K
La capacité thermique de PVC	900J/kg. K
Conductivité thermique de l'air	0.0242W/m. K
Conductivité thermique de sol	1.5W/m. K
Conductivité thermique de PVC	0.16W/m. K

La figure IV.1 montre la comparaison entre notre modèle et l'étude expérimentale de l'échangeur air-sol réalisée par Mehdid et al[1]. Les températures de l'air calculées à l'intérieur de l'échangeur air-sol montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux. Par conséquent, notre code de dimensionnement des échangeurs air-sol reflète le phénomène de transfert de chaleur réel avec une erreur maximale de 3%.



**Figure IV.1.** Validation du modèle GRBM avec des résultats expérimentaux de Mehdid et al [1].



**Figure IV.2 .** Variations de température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur à partir des données de Mehdid pour 6 heures de fonctionnement.

Pour garantir l'exactitude du modèle, nous avons introduit les mêmes caractéristiques que Mehdid [1]. (Tableau. IV.1), utilisées pour la comparaison et rendre les résultats plus fiables. Pendant 6 heures de fonctionnement continu, nous avons introduit une température ambiante comme indiqué dans le tableau toutes les heures. Comme on remarque a partir de la figure IV.2 l'augmentation de la température de l'air à la sortie de tube lorsque la température de l'air ambiant augmente. Là où pendant la première heure il a diminué de 8.22°C ,tandis qu'à la sixième heure, il a diminué de 12.33°C .Par rapport aux résultats, on remarque la température élevée de l'air à la sortie avec l'augmentation du temps de fonctionnement et cela est dû à la saturation du sol environnant et donc l'échange entre eux diminue.

Les résultats obtenus montré dans le tableau (IV.2) sont très satisfaisants par rapport aux résultats de Mehdidi (GRBM) [1]. Avec une erreur relative de 2.74% .

**Tableau IV.2 .**Validation des températures de l'air du présent modèle et modèle GRBM de (MEHDID)[1] pendant 6 h de fonctionnement.

Le temps (h)	Température de l'entrer( °C)	Température de sortie (Mehdid) GRBM(°C)	Température de sortie (present travail) (°C)	Erreur relative (%)
1	30.4	23.05	22.18	3.77
2	32.9	23.11	22.34	3.33

3	33.7	23.17	22.45	3.10
4	33.4	23.21	22.52	2.97
5	34	23.24	22.55	2.97
6	35	22.75	22.67	0.35
			<b>Erreur total</b>	<b>= 2.74</b>

### IV.3. Etude paramétrique

Cette étude paramétrique a pour objet d'évaluer l'influence des paramètres thermophysiques et géométriques de l'échangeur air/sol sur sa performance thermique. Les différentes caractéristiques utilisées dans cette étude sont illustrées dans le tableau (IV.3).

La température de l'air ambiant est imposée variable à l'entrée du tube comme un nouvel ajout par rapport aux travaux précédents pour mieux illustrer l'impact des différents paramètres sur les performances thermiques et rendre le modèle plus logique que ses prédécesseurs.

**Tableau IV.3.** Caractéristiques utilisées dans l'étude paramétrique de l'échangeur air/ sol.

Paramètres	Valeurs
Matériau du tube	PVC
Longueur des tubes horizontal	47 (m)
Profondeur	3 (m)
Rayon intérieur du tube $r_1$	0,055 (m)
Epaisseur du tube	0.0025 (m)
Vitesse de l'air	3.5 (m/s)
Température d'entrée	Variable (°C)
Température de sol	25 (°C)
Conductivité thermique du tube $\lambda_{tub}$	0.16 (W /m K)
Conductivité thermique du sol $\lambda_{soil}$	1.5 (W/m K)
Diffusivité thermique du sol	$0.62 \times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> /s)
Masse volumique de l'air $\rho_{air}$	1.225 (kg/m <sup>3</sup> )
Chaleur spécifique de l'air $C_{p\ air}$	1005 (j/kg °C)
Chaleur spécifique du sol $C_{p\ sol}$	1340 (j/kg °C)
Masse volumique du sol $\rho_{sol}$	1800 (kg/m <sup>3</sup> )

La Températures ambiantes injectées dans ce code dans chaque heure de fonctionnement

A partir des données météorologiques de la température [2].Sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.4 .**Températures de l'air ambiant injecter par chaque heure [2].

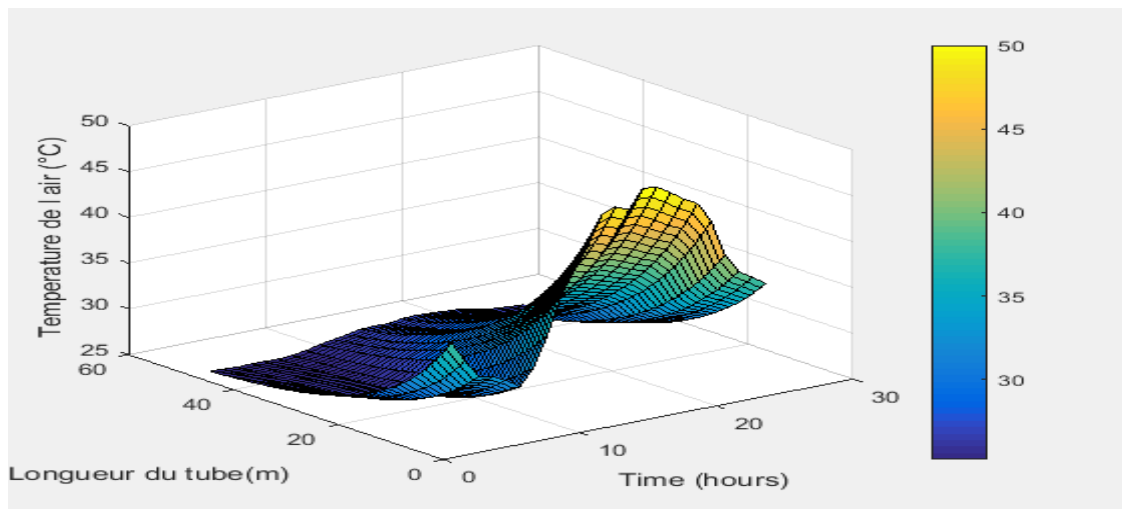
<b>Le temps (h)</b>	<b>La température ambient (°C)</b>
1	37.3
2	35
3	33
4	32.7
5	32
6	31
7	32.8
8	36
9	40
10	42.6
11	45
12	48
13	48.6
14	48
15	50
16	49.9
17	49
18	48
19	47.2
20	45
21	41
22	38.9
23	38
24	37

#### **IV .3.1. Effet de la durée de fonctionnement sur la température de l'air (3D)**

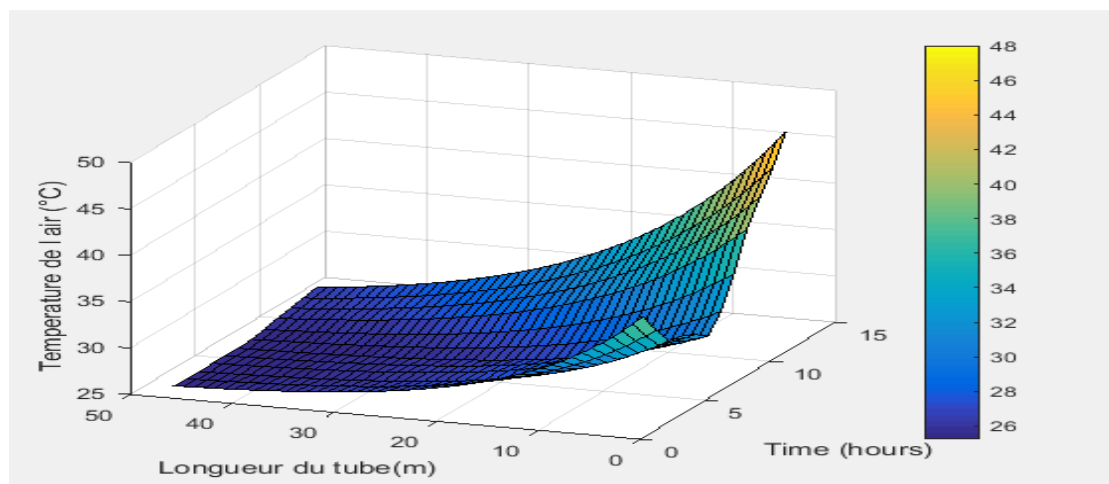
Les résultats obtenus représentent l'effet de différentes durées de fonctionnement(24h, 12h ,6h ,3h) sur la température de l'air le long de l'échangeur (**Figures 3,4,5,6**). Où l'on constate que la température de l'air est liée au temps de fonctionnement et à la température de l'air ambiant. On constate une dégradation de la température qui augmente avec l'augmentation du temps de fonctionnement, et ceci est dû à la saturation du sol entourant l'échangeur horizontal. Ainsi l'échange devient faible entre eux. Lorsque la température de l'air ambiant est très élevée, il faut plus de temps et de longueur pour devenir égale à la température initiale du sol environ  $T_{0s} = 25^{\circ}\text{C}$ . Là où on remarque pendant la première heure du temps de fonctionnement, la

température de l'air ambiant à l'entrée était égale à  $37.3^{\circ}\text{C}$  après 1 m de la longueur du tube, pour être abaissée à  $25.38^{\circ}\text{C}$  à la sortie du tube 47 m.

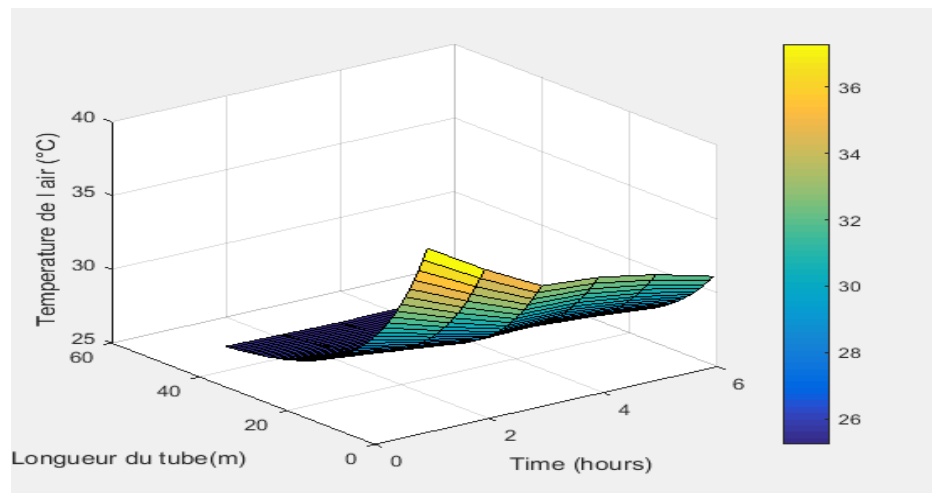
Après 24 heures de fonctionnement (**Figure .3**), la température de l'air à l'entrée passe à  $37^{\circ}\text{C}$  après 1 m de la longueur du tube, pour commencer à baisser à  $25.91^{\circ}\text{C}$  à la sortie de l'échangeur. Par rapport aux résultats, on constate qu'à 24 heures la température de l'air augmente à la sortie de  $0.53^{\circ}\text{C}$  par rapport à 1 heure de fonctionnement. Ceci est dû à la saturation du sol entourant l'échangeur et donc la température de l'air à la sortie augmente.



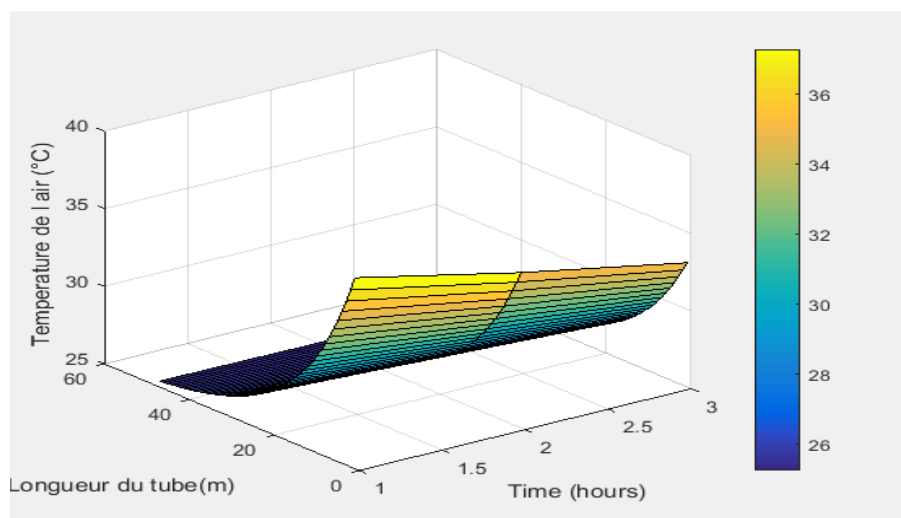
**Figure IV.3.** variation du température de l'air le long de l' échangeur pendant 24 heures de fonctionnement.



**Figure IV.4.** variation du température de l'air le long de l' échangeur pendant 12 heures de fonctionnement.



**Figure IV.5.** variation du température de l'air le long de l'échangeur pendant 6 heures de fonctionnement.



**Figure IV.6.** variation du température de l'air le long de l'échangeur pendant 3 heures de fonctionnement.

### IV .3.2. Effet de la durée de fonctionnement sur la température du sol (3D)

Les résultats obtenus représentent les changements de température du sol autour de l'échangeur en termes de rayon du sol et de différents temps de fonctionnement. (24h,12h,6h,3h) chaque mètre de longueur de tube étant mesuré. Où l'on constate que la température du sol entourant l'échangeur est liée à la fois à la température de l'air ambiant et à la durée de fonctionnement, il y a une dégradation de la température du sol, c'est-à-dire qu'elle monte et descend en fonction de la température de l'air injecté.



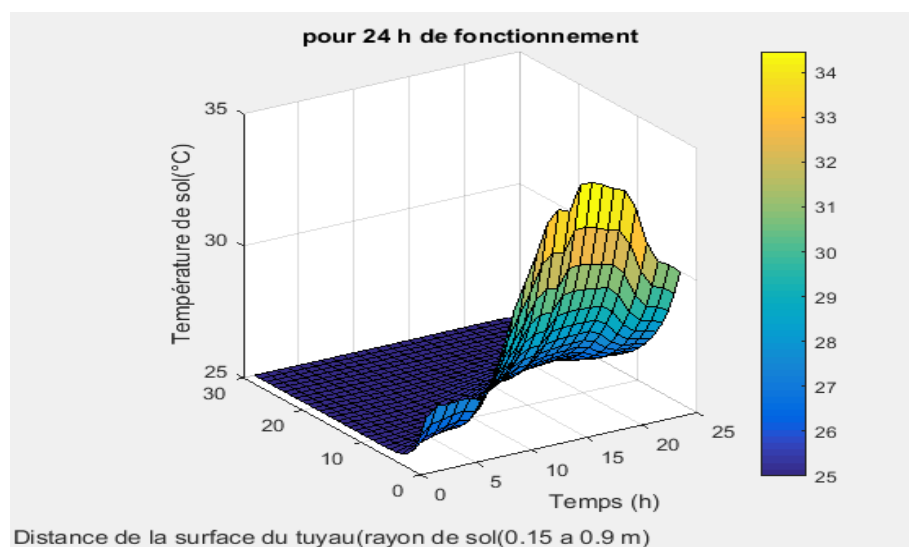
De plus, la période de fonctionnement est longue, plus le sol est saturé de chaleur, ce qui signifie que l'échange thermique diminue, et par conséquent, pour que la température du sol atteigne sa température initiale  $T_{0s}=25^{\circ}\text{C}$ , il a besoin d'un rayon de sol plus grand, ce qui signifie qu'il faut une distance plus longue.

Dans les 6 heures de fonctionnement continu (**figure 9**), la température de l'air d'admission était de  $31^{\circ}\text{C}$ . À ce stade, la température du sol entourant l'échangeur était égale à  $27.12^{\circ}\text{C}$  degrés. Ensuite, elle a progressivement commencé à diminuer pour devenir égale à la température initiale lorsque le rayon du sol à partir de la surface du tube est égal à  $0.505\text{ m}$  ( $r_{1+i*dr}$ ).

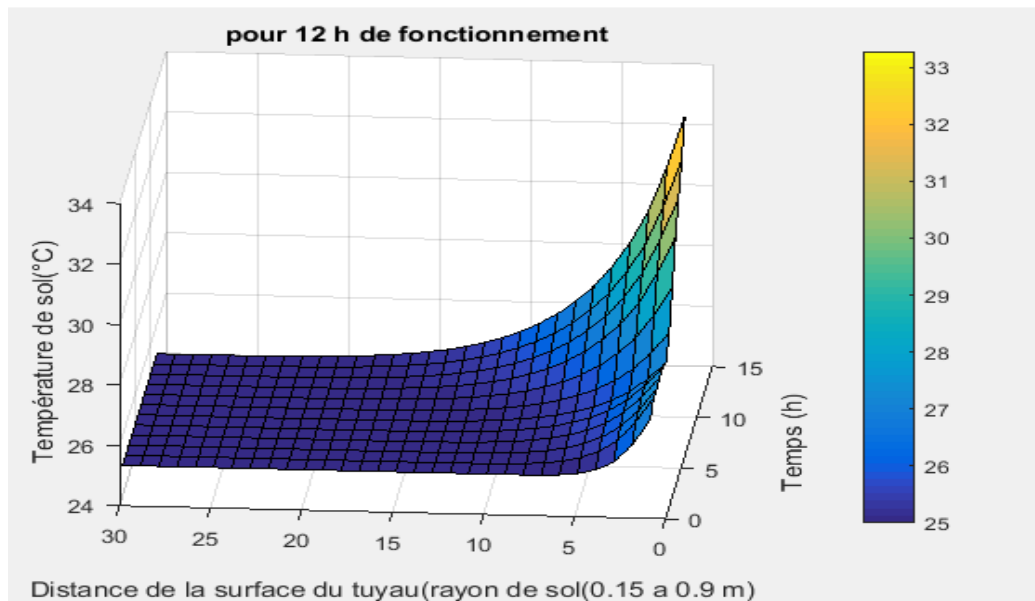
Dans les 12 heures suivant le temps de fonctionnement (**figure 8**), la température de l'air injecté est de  $48^{\circ}\text{C}$  et la température du sol en contact avec la surface du tube est de  $33.22^{\circ}\text{C}$ . Il diminue progressivement pour égaler la température initiale du sol à  $T_{0s} = 25^{\circ}\text{C}$  lorsque le rayon du sol est de  $0,755\text{ m}$  ( $r_{1+28*0.025}=r_{\text{sol}}$ ).

Pendant 24 heures de fonctionnement continu (**figure 7**), la température du sol était égale à  $30.26^{\circ}\text{C}$ , revenant à son état initial approximativement  $T_{0s} = 25.09$  après un rayon de sol égal à  $0.655\text{ m}$  ( $r_{1+24*0.025}=r_s$ ).

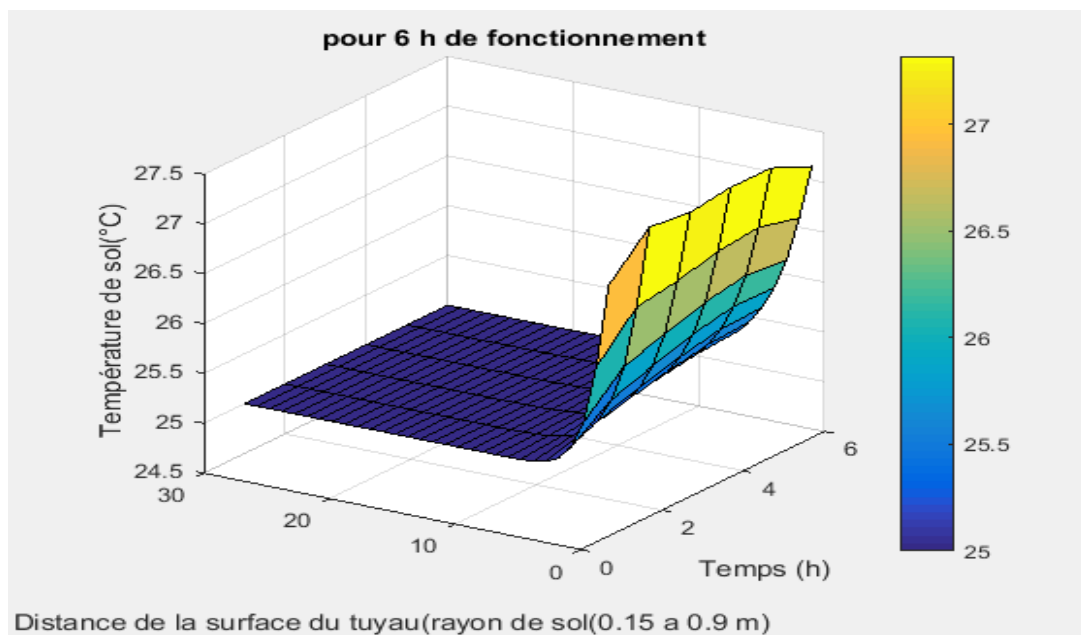
Par rapport aux résultats obtenus, nous concluons que la température de l'air ambiant et le temps de fonctionnement, Ils affectent le rayon du sol et donc les performances de l'échangeur.



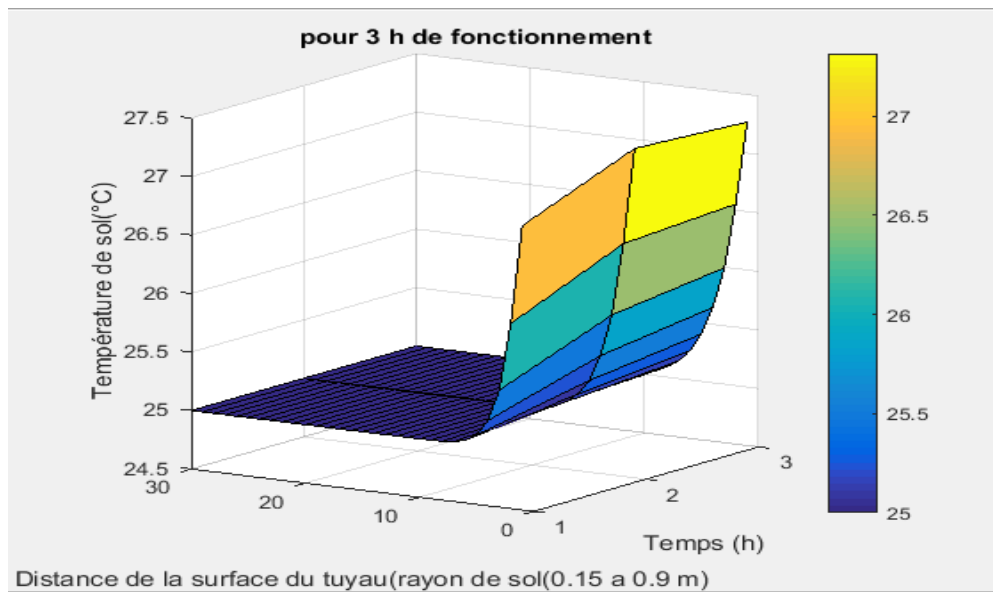
**Figure IV.7.** variation du température de sol le long de l'échangeur pendant 24 heures de fonctionnement.



**Figure. IV.8.** variation du température de sol le long de l'échangeur pendant 12 heures de fonctionnement.



**Figure. IV.9.** Variation du température de sol le long de l'échangeur pendant 6 heures de fonctionnement.

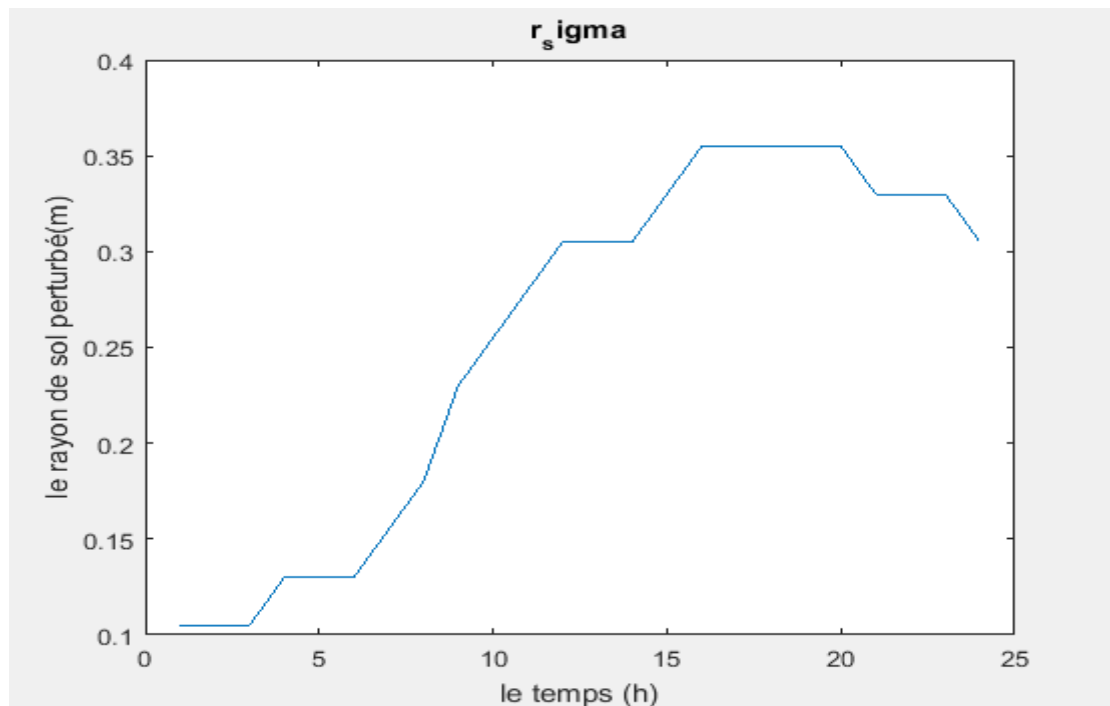


**Figure. IV.10.** Variation du température de sol le long de l'échangeur pendant 3 heures de fonctionnement.

#### IV .3.3. Effet de la durée de fonctionnement sur le rayon du sol $r_\delta$

Le résultat obtenu représente l'effet du temps de fonctionnement sur le rayon du sol. Comme on remarque une élévation du rayon du sol. Lorsque le temps de fonctionnement augmente, cela est dû à la saturation du sol environnant, donc le rayon change en fonction de la température de l'air entrant et de la durée de fonctionnement.

Au cours de la première heure (**Figure.11**), le rayon du sol est de 0.105 m, et il augmente progressivement jusqu'à atteindre 0.355 m à la fois à 16 heures, puis se stabilise, puis revient à 0.305 m à 24 heures. Ce changement est dû au changement de la température de l'air ambiant, où plus il est élevé, plus le rayon du sol est grand.



**Figure. IV.11.** Variation de  $r_{\sigma}$  pour chaque heure pendant 24 h de fonctionnement.

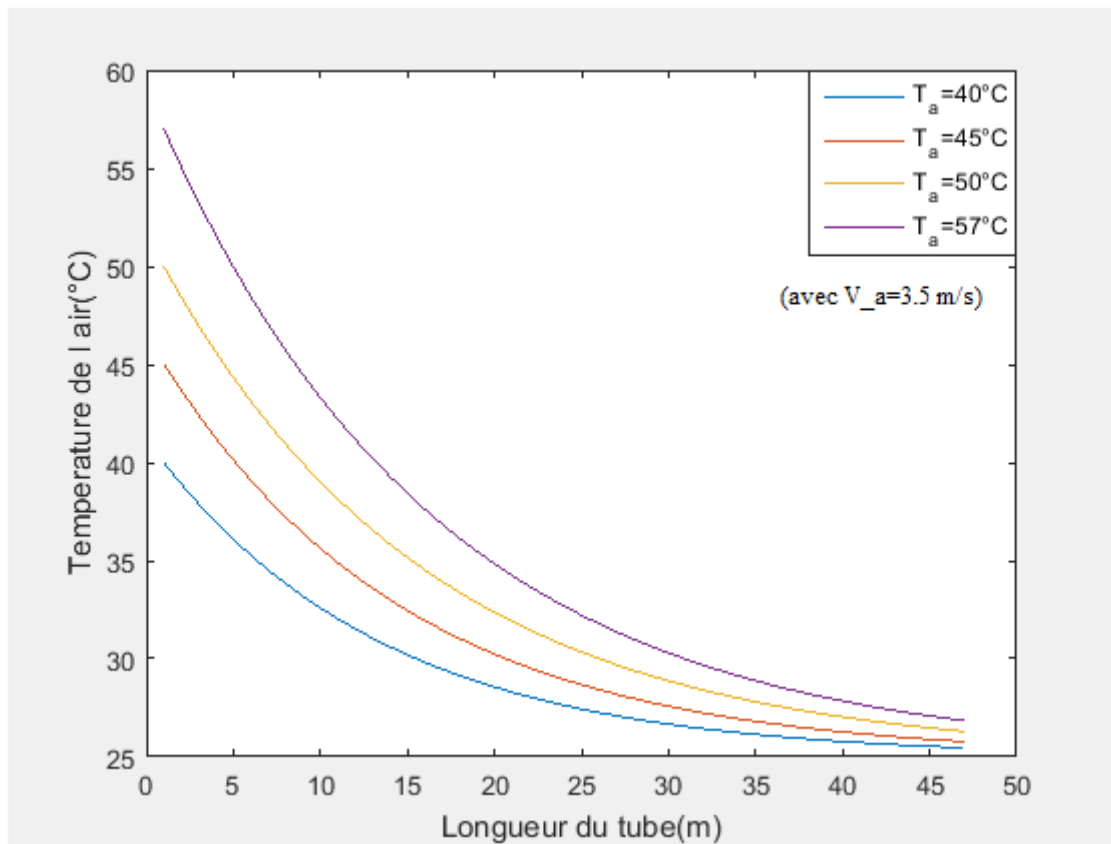
#### IV .3.4. Effet de la température ambiante sur la longueur de l'échangeur air-sol (40°C, 45 °C, 50 °C et 57 °C)

Les résultats représentent l'effet de la température de l'air injecté (40°C,45°C,50°C,57°C) sur la longueur de l'échangeur, où chaque heure nous injectons une température et la mesure a été faite tous les 1 m de la longueur du tube. Où l'on constate que la température de l'air injecté est petite, le refroidissement est rapide, car on atteint la température initiale à une distance inférieure à la longueur du tube et en moins de temps. Comme le montre la **figure.12** suivante.

Là où on remarque pendant la première heure la température de l'air était de 40°C pour commencer à diminuer progressivement jusqu'à ce que la température initiale se rapproche de  $T_{0s} = 25.91^{\circ}\text{C}$  après une longueur de 38 m jusqu'à ce qu'elle atteigne au bout du tube à  $T_{0s} = 25.46^{\circ}\text{C}$ . Au cours de la deuxième heure, la température de l'air était de 45°C pour commencer à diminuer progressivement jusqu'à approcher la température initiale  $T_{0s} = 25.963^{\circ}\text{C}$  Après une longueur de 44 m, il atteint l'extrémité du tube à  $T_{0s} = 25.77^{\circ}\text{C}$ .

Au final, la température de l'air passe de 57°C jusqu'à ce qu'elle s'approche de la température initiale de  $T_{0s}=26.84^{\circ}\text{C}$  pendant la quatrième heure. Par rapport aux résultats, on constate que la température de l'air à la sortie de l'échangeur augmente avec l'augmentation de la

température de l'air injecté à l'entrée de l'échangeur, elle a augmenté d'environ 1.38 °C par rapport aux première et quatrième heures.



**Figure. IV.12.** Effet des différents température ambiante sur la longueur de l'échangeur.

#### IV.3.5. Effet du diamètre des tubes sur la longueur de l'échangeur air-sol (0,055m, 0,1 m, 0,15 m et 0,3 m)

quatre différents rayons du tube (0,055 m, 0,1 m, 0,15m et 0,3m) sont pris en compte pour examiner la performance thermique. Une vitesse de l'air de 3,5 m/s a été maintenue constante Pour les quatre rayons du tube.

L'influence du diamètre du tube sur la température de l'air pour différentes durées de fonctionnement (6h,12h) est représentée sur les figures (13 et 14). On observe à travers les figures pour différents temps de fonctionnement (6h, 12h) et différence de température ambiante (31°C,48°C) dans cet ordre, La température de l'air augmente progressivement à la sortie de tube. Quand on augmente le rayon du tube. Donc, il est à noter que la performance thermique se détériore avec la diminution du rayon du tube.

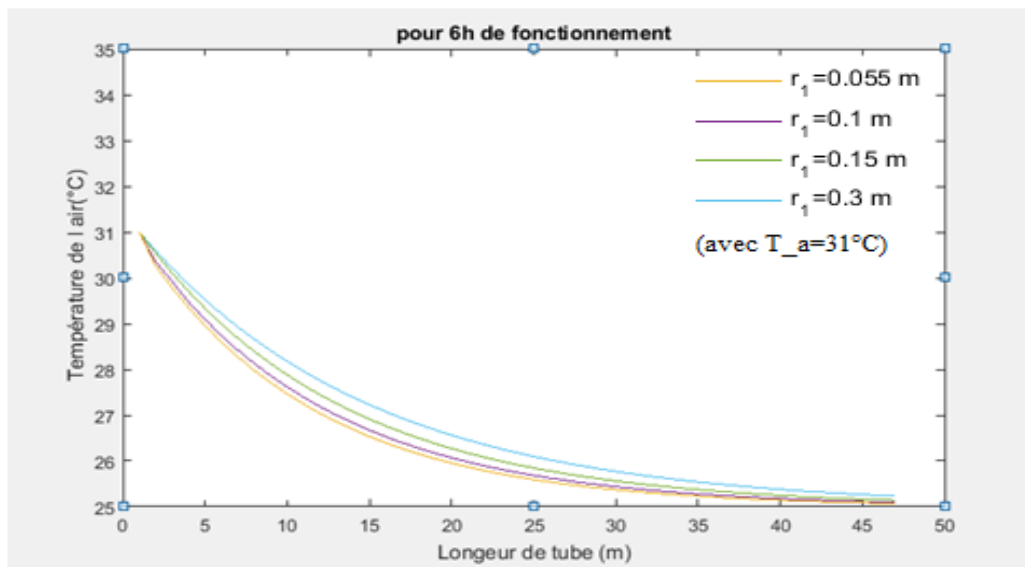


Figure. IV.13. Effet du diamètre des tubes pour 6h de fonctionnement .

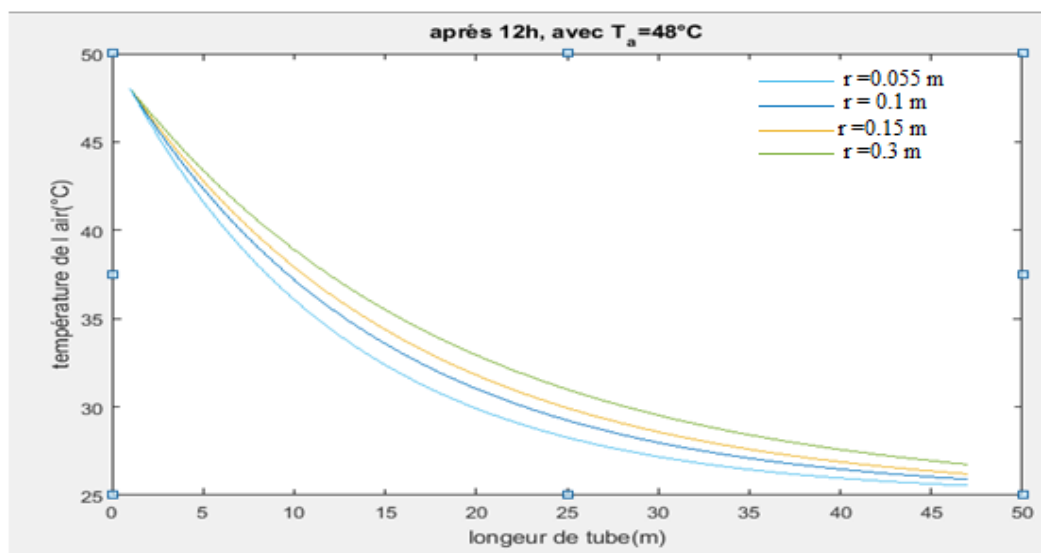


Figure. IV.14. Effet du diamètre des tubes Pour 12h de fonctionnement.

#### IV .3.6.Effet de vitesses d'air sur la longueur de l'échangeur air-sol ( $T=f(L)$ pour différents vitesses) $V_a = 1\text{m/s}$ , $V_a = 3.5 \text{ m/s}$ et $V_a = 5 \text{ m/s}$ .

Trois vitesses d'écoulement de l'air (1 m/s ,3.5 m/s et 4.5 m/s ) sont considérées pour l'analyse de l'effet de la vitesse d'air sur la longueur de l'échangeur air/sol pour mode de fonctionnement continu(6h et 12h) sur la performance thermique.

Les figures (15 et 16) illustre la variation horaire de la température de l'air le long de l'échangeur pour différentes vitesse d'écoulement de l'air. Les températures de l'air s'élèvent avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air, et la température de l'air ambiant injecté. Où, dans les 6 heures de fonctionnement,( Figure 15), la température de l'air était de

31°C. À mesure que la vitesse augmente, la température de l'air augmente à la sortie de (25.02 °C , 26.1 °C et 26.85 °C) à des vitesses de 1( m / s), 3.5( m / s) et 5( m / s) respectivement . Alors que pendant les 12 heures de fonctionnement(**figure 16**), la température de l'air ambiant était de 48°C, car nous avons remarqué une augmentation de la température de l'air à la sortie de (25.14°C, 30.4°C et 33.34 °C ) pour les vitesses précédentes.

Par rapport aux résultats obtenus, nous concluons que plus la vitesse de l'air est petite, plus l'échange thermique entre l'air et le sol est parfait, et vice versa Comme les vitesses sont élevées, le temps est insuffisant pour que l'échange se produise.

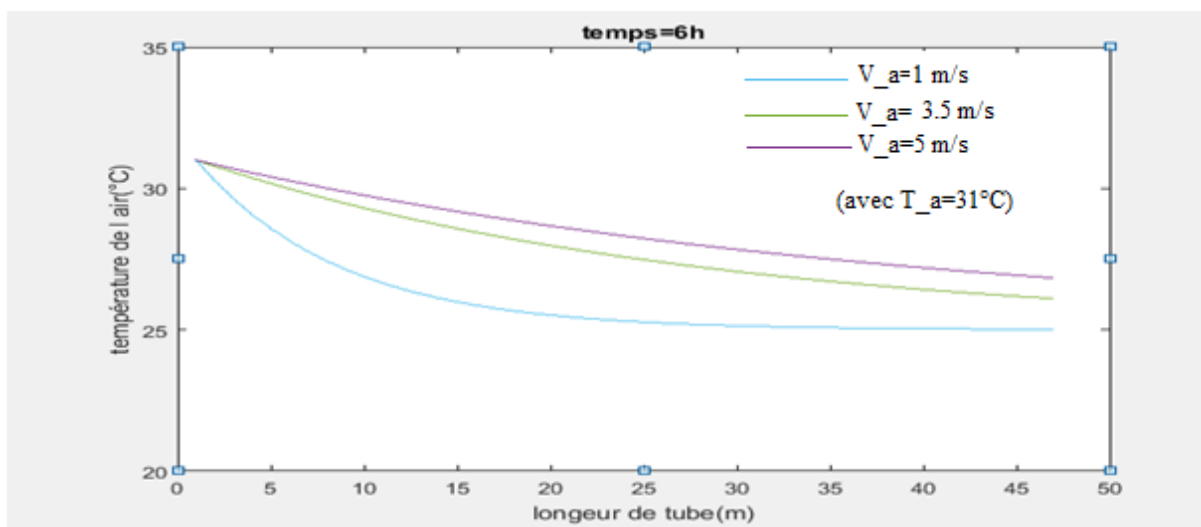


Figure. IV.15. Effet de vitesses d'air Pour 6h de fonctionnement.

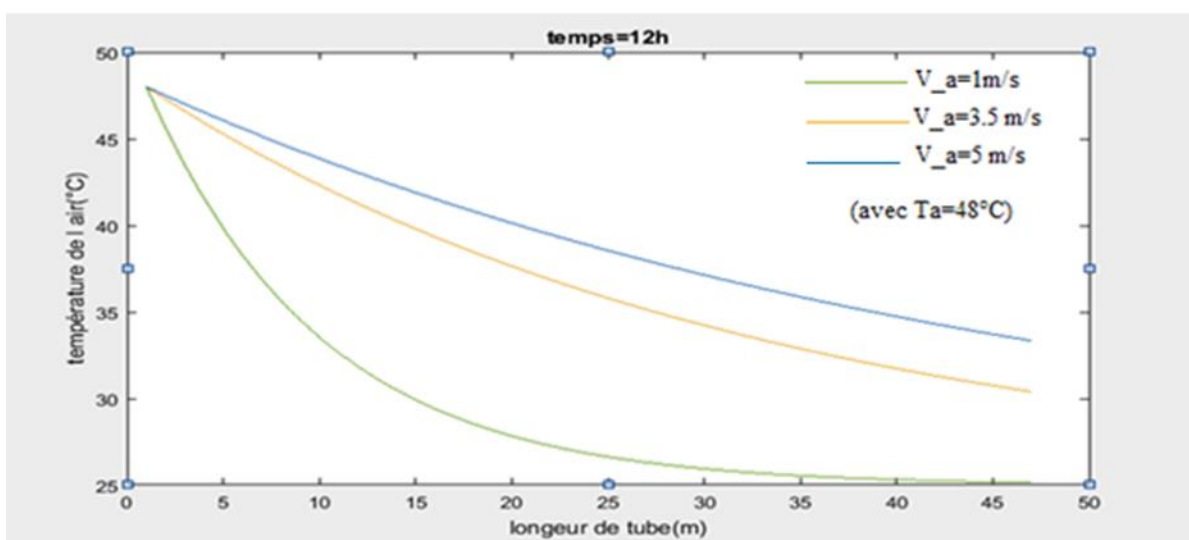


Figure. IV.16. Effet de vitesses d'air Pour 12h de fonctionnement.

### IV .3.7. Effet de la conductivité thermique du sol sur la longueur de l'échangeur (0.5 W/m.K , 1.5 W/m.K , 4 W/m.K )

Trois différentes conductivités thermiques (0.5 W/m.K, 1.5 W/m.K et 4 W/m.K) sont prises en compte pour évaluer la performance thermique de l'échangeur et déterminer la conductivité optimale du sol pour l'enfouissement de l'échangeur. De la figure (17 et 18) et pour une durée de 6h jusqu'à 12h, on constate un accroissement de 0.58°C, 0.13°C et 0.08 °C dans la température à la sortie de tube dans les 6 heures de fonctionnement. pour des conductivités thermiques de(0.5 W/m.K, 1.5 W/m.K et 4 W/m.K) respectivement.et dans les 12 heures fonctionnement La température de sortie est de 4.62°C, 1.19°C et 0.53°C avec Le même ordre de conductivité thermique.

Donc la performance thermique est fortement affectée par le sol ayant une faible conductivité thermique. Une forte conductivité thermique du sol facilite l'évacuation de la chaleur accumulée vers les couches du sol loin de l'échangeur.

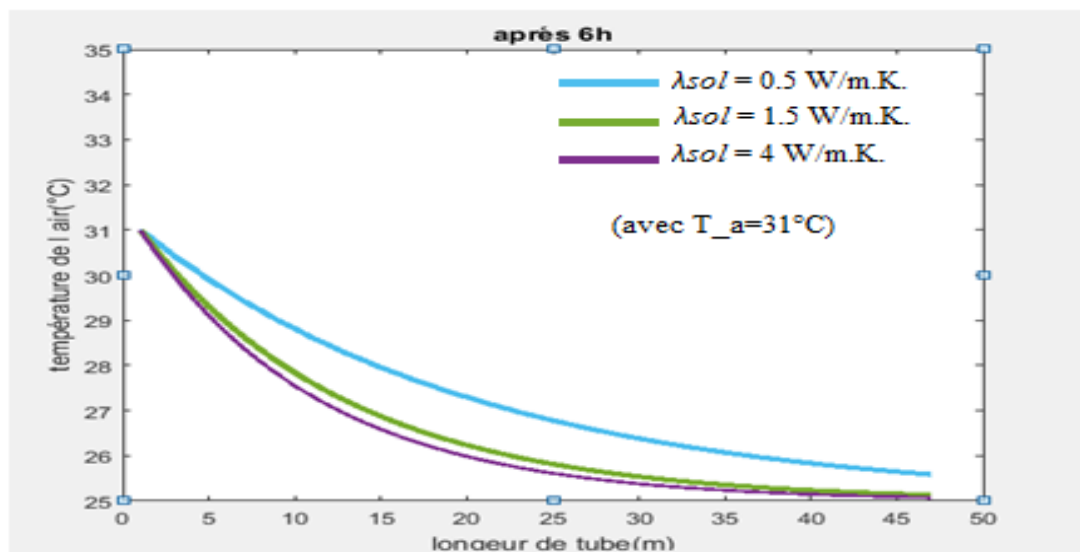
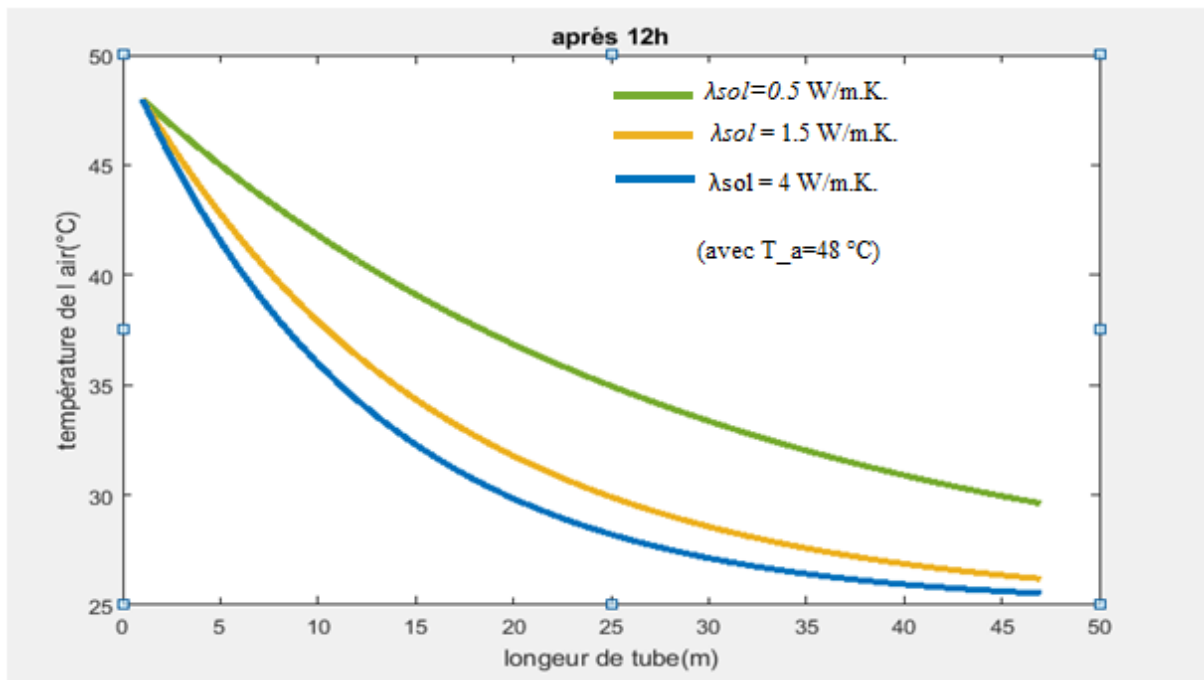


Figure. IV.17. Effet de la conductivité thermique du sol après 6h de fonctionnement.





**Figure. IV.18.** Effet de la conductivité thermique du sol après 12h de fonctionnement.

#### IV.4. Conclusion

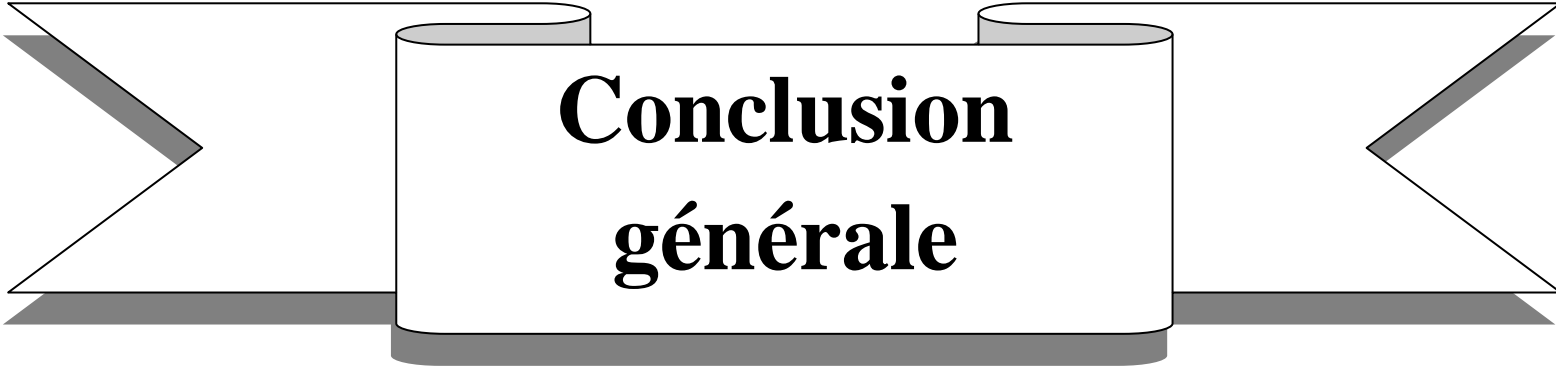
Dans ce chapitre nous avons présenté et interprété les différents résultats numériques obtenus. En premier lieu, nous avons validé notre modèle par rapport aux résultats des travaux antérieurs présents dans la littérature.

En conclusion, sur la base des résultats obtenus en termes d'erreur relative, les modèles ont une vue haute performance compatible avec les Littérature, qui se rapporte à l'amélioration des performances des échanges géothermiques air/sol où les changements de température ambiante et les caractéristiques physiques affectent la température de l'air à la sortie de l'échangeur.

À partir de cette étude de simulation, nous concluons que plus précis que ses prédécesseurs en termes de température ambiante variable où ce changement affecte la température de l'air à la sortie en plus du rayon du sol perturbé n'est pas fixé le long de l'échange comme prévu dans les études précédentes et cela est dû au fait que le flux thermique de l'air n'est pas constant, mais se rapporte à l'air injecté.

**IV.5. Références bibliographiques**

- [1] C.E. Mehdid, A. Benchabane, A. Rouag, N. Moummi, M.A. Melhegueg, A. Moummi, M.L. Benabdi and A. Brima, 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*, vol. 198, pp. 1536-1544, 2018.
- [2] <https://www.infoclimat.fr/climatologie/normales-records/1991-2020/ouargla/valeurs/60580.html>.



**Conclusion  
générale**

### Conclusion générale

L'étude de ce mémoire s'est effectuée par l'étude numérique et théorique d'un modèle semi-analytique transitoire d'un échangeur géothermique air/sol, en forme « serpentín » dans le but de contribuer à l'amélioration des performances des échangeurs géothermiques. pour le réchauffement ou le refroidissement d'un fluide caloporteur (air) utilisé pour le confort thermique de l'habitat.

Ceci afin de contribuer à l'étude des phénomènes et le mécanisme de transfert de chaleur dans les échangeurs géothermiques « air/sol ».

L'échangeur étudié enfouie sous sol à profondeur de 3m avec des différents température ambiante et la résistance thermique du sol variable en fonction de la durée de fonctionnement

Dans ce travail nous avons présenté :

**Tout d'abord**, une brève revue bibliographique des travaux disponibles dans la littérature relative aux échangeurs géothermiques air/sol .Suivi d'une connaissance générale des différentes technologies de refroidissement ou de chauffage des bâtiments. Dans cette étude nous avons donné plus d'intérêt aux contributions théoriques ,qui ont été produites au niveau du l'Université de Biskra. Ces dernières ont ouvert des Perspectives pour définir certains paramètres physiques et thermiques d'une conception d'échangeur idéale .**Ensuite**, nous avons donné un aperçu, nous intéressons à l'étude de quelques notions générales et définitions de la géothermie d'une part, et à l'étude des généralités sur l'échangeur air / sol et son principe de fonctionnement et ses caractéristiques d'autre part.

**Puis**, un processus de ventilation de l'air est présenté dans ce chapitre afin d'améliorer la performance thermique de l'échangeur fonctionnant dans des conditions sévères. Vu la nature saharienne de la ville de Biskra, nous sommes intéressés beaucoup plus à l'extraction du froid. **En** se basant sur les équations de conductivité thermique et de résistance thermique des sols perturbée. De plus, un modèle semi-analytique pour estimer la température de l'air le long de l'échangeur EAHE, en utilisant le logiciel « Matlab ». Qui se compose essentiellement de deux sous-formulaires :

Le premier a été développé par « A. Rouag » appelé le modèle RBM, qui travaille à étudier la conductivité thermique des sols perturbée et à déterminer son rayon. Ce dernier a

été développé par « Mehdid » pour devenir un modèle GRBM généralisé, basé sur trois étapes:

- la subdivision du tuyau en plusieurs couches ;
- l'estimation de la température du sol perturbé entourant la couche utilisant le modèle RBM présenté dans la première partie ;
- la prise en compte des propriétés du sol comme constante pour le courant complet pas de temps (température et rayon du sol) estimé précédemment à calculer la température de l'air de sortie pour la couche actuelle.

Notre apport principal dans ce travail de mémoire sur le plan théorique est le développement d'un code de calcul numérique pour améliorer la prédiction de la performance thermique de l'échangeur air/sol. Pour cela, nous avons considéré la troisième étape mentionnée précédemment dans un code GRBM variable. C'est-à-dire que la température et le rayon du sol changent d'une couche à l'autre pendant le temps de fonctionnement.

De plus, la température de l'air ambiant à l'entrée de l'échangeur est variable pendant le temps de fonctionnement continu et cela est logique car en réalité on ne peut pas la considérer constante. Cela rend la conception plus précise que ses prédécesseurs.

**Enfin**, le dernier chapitre était consacré pour la présentation et l'interprétation des résultats obtenus. Avant d'entamer la simulation numérique, une validation des résultats numériques, avec ces autres résultats des expériences sur l'expérience trouvée dans la littérature. Il a été démontré qu'il y a un bon accord avec la validation du modèle développé GRBM est les autres.

À la suite de cette approche numérique, il nous semble utile de rappeler quelque conclusion importante obtenue au cours de ce travail :

- 1- Le matériau du tube n'affecte pas la performance thermique de l'échangeur et n'influe pas sur les températures à la sortie du tube.
- 2- Les températures de l'air à l'intérieur du tube affectés par les faibles conductivités des sols et les grandes vitesses d'écoulement de l'air

- 3- Coupler l'échangeur air sol avec d'autres systèmes de ventilation telle que la cheminée solaire et la tour du vent pour aspirer l'air de l'ambiance.
- 4- L'augmentation du diamètre du tube affecte les températures de l'air à la sortie de l'échangeur. Par contre, la diminution du diamètre du tube affecte la détérioration rapide de l'échangeur air sol.
- 5- Le sol de sable est moins coûteux pour l'enfouissement de l'échangeur dans le sol en raison de la stabilisation rapide des températures en profondeur du sol au cours de l'année. Ceci est dû à sa faible diffusivité thermique.
- 6- Pendant les simulations, nous utilisons différentes températures ambiantes toutes les heures pour rendre les résultats plus précis
- 7- Le rayon du sol et la température de sol autour de tube change avec changements de la température de l'air ambiant entrée.
- 8- À haute température de l'air, nous utilisons de petites vitesses de retrait d'air pour avoir assez de temps pour l'échange entre l'air et le sol environnant.



**Annexes**

## Annexes

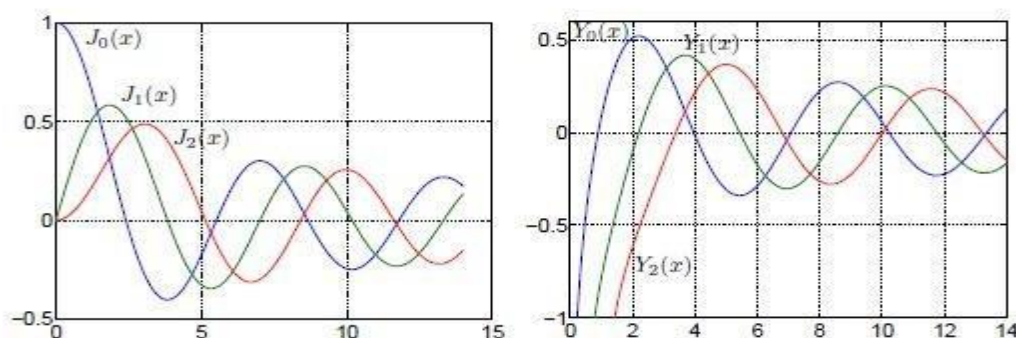
## A Fonctions de Bessel

## A.1 Equation de Bessel

C'est une EDO du second ordre :

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - n^2)y = 0$$

où  $n$  est généralement un entier mais pas forcément. Sa solution est engendrée par les deux fonctions  $J_n(x)$  qui est finie en 0 (et  $y$  est nulle pour  $n > 0$ ) et  $Y_n(x)$  qui diverge en 0. Les premières fonctions  $J_n$  et  $Y_n$  sont représentées Fig. 2.



Fonctions de Bessel

Elles ont de nombreuses propriétés intéressantes. Tout d'abord, on voit que ces fonctions oscillent et se comportent visuellement comme du sinus amorti pour  $x$  grand. On montre en effet que pour  $x \gg 1$  :

$$J_n(x) \simeq \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{n\pi}{2} - \pi/4\right) \quad Y_n(x) \simeq \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin\left(x - \frac{n\pi}{2} - \pi/4\right)$$

Ces approximations sont bien pratiques pour initialiser la recherche des zéros numériquement (par exemple avec MATLAB). On peut voir les fonctions de Bessel comme des analogues des fonctions trigonométriques en cylindriques.

Dans le tableau A.1 nous présentons les 10 premières racines de  $J_n(Z) = 0$  pour  $n=0, \dots, 5$

	$J_0$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$
1	2.4048	3.8317	5.1356	6.3802	7.5883	8.7715
2	5.5201	7.0156	8.4172	9.7610	11.0647	12.3386
3	8.6537	10.1735	11.6198	13.0152	14.3725	15.7002
4	11.7915	13.3237	14.7960	16.2235	17.6160	18.9801
5	14.9309	16.4706	17.9598	19.4094	20.8269	22.2178
6	18.0711	19.6159	21.1170	22.5827	24.0190	25.4303
7	21.2116	22.7601	24.2701	25.7482	27.1991	28.6266
8	24.3525	25.9037	27.4206	28.9084	30.3710	31.8117
9	27.4935	29.0468	30.5692	32.0649	33.5371	34.9888
10	30.6346	32.1897	33.7165	35.2187	36.6990	38.1599

Tableau A.1. les 10 premières racines de  $J_n(Z) = 0$ ,  $n=0, 1, 2, 3, 4, 5$ .