

République algérienne démocratique et populaire  
الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Université Mohamed Khider-Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de Génie Mécanique

Ref :...../2021

## **Mémoire**

Présenté pour l'obtention du

## **Master**

En génie mécanique

**Option:** énergétiques

**Par**

**Kais ABSI**

---

**Contribution au dimensionnement des échangeurs de chaleur  
Sol-Air en utilisant un modèle semi-analytique.**

---

Devant le jury composé de:

Mr. Adel Benchabane	Professor, Univ-Biskra, Alegria	superviseur
Mr. Kamel Aoues	MCA, Univ-Biskra, Alegria	président
Mr. Chawki Mahboub	MCB, Univ-Biskra, Algeria	Examinateur

**Université de Biskra 2021**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciement

En premier, je remercie le Tout Puissant ALLAH, notre créateur qui m'a donné la force d'accomplir ce travail. Je tiens à remercier vivement, l'encadrant Prof Adel Benchabane pour ses encouragements, ses conseils précieux et sa disponibilité. Je présente mes chaleureux remerciements aux enseignants du département de génie mécanique pour leurs aides et orientations durant toute ma formation. Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Dédicace

Je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

À ma très chère grand-mère. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être, je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance.

À mes très chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières, que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

À mes chères sœurs, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mon cher frère, pour leur appui et leur encouragement,

A mes tantes, oncles, cousins, cousines et tous les membres de ma grande et aimable famille qui m'ont toujours soutenu et poussé à donner le meilleur de moi-même,

A tous mes amis, qu'ils m'excusent de ne pas pouvoir les citer, au risque d'oublier quelqu'un, je vous dis MERCI pour tous les moments inoubliables qu'on a passé ensemble durant ces cinq ans.

Kaiss

# Sommaire

Remerciement.....	ii
Dédicace .....	iii
Sommaire.....	iv
Nomenclature.....	vii
Listes des figures .....	ix
Liste des tableaux .....	xi
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique .....	4
I.1 Introduction .....	5
I.2 Quelques installations expérimentales géothermales air/sol.....	5
I.3 Quelques études théoriques sur les échangeurs air/sol.....	8
I.4 Conclusion.....	9
Chapitre II : Généralités sur l'énergie géothermique et les échangeurs de chaleur sol-air.....	11
II.1. Introduction.....	12
II.2. Énergie de la Géothermie .....	12
II.2.1. Définition .....	12
II.2.2. Classification des ressources géothermiques .....	12
II.2.2.1. Géothermie à haute énergie .....	12
II.2.2.2. Géothermie moyenne énergie .....	13
II.2.2.3. Géothermie de basse énergie .....	13
II.2.2.4. Géothermie très basse énergie .....	14
II.2.3. La géothermie dans l'Algérie.....	15

II. 2.3.1. La géothermie en Algérie.....	15
II.2.3.2 Les zones géothermiques en Algérie .....	15
II.3. Échangeur air-sol .....	16
II.3.1. Définition .....	16
II.3.2. Fonctionnement .....	17
II.3.3. Composants d'échangeur air/sol.....	18
II.3.4. Les type les échangeurs air/ sol .....	20
II.3.5. La forme d'échangeur air/ sol.....	21
II.3.5.1. Échangeur horizontal .....	21
II.3.5.2. Échangeurs air sol verticaux.....	21
II.3.6. Efficacité des échangeurs de chaleur air-sol.....	22
II.4 Paramètres importants et performances thermiques des échangeurs air-sol.....	23
II.4.1 La longueur de tube .....	23
II.4.2 Le diamètre de tube.....	23
II.4.3 Débit d'air total .....	24
II.4.4 Vitesse d'écoulement de l'air.....	24
II.4.5 Profondeur d'enfouissement .....	24
II.4.6 Nombre et espace entre les tubes .....	24
II.4.7 D'autres paramètres influant les performances de l'installation.....	25
II.4.8 Pente de conduite .....	25
II.5. Avantages et inconvénients de l'échangeur air/sol.....	25
II.6 Conclusion .....	26
Chapitre III : Modélisation de l'échangeur sol-air .....	27
III.1 Introduction .....	28
III.2 Description du modèle GRBM.....	28

III.2.1 Estimation de la température de l'air .....	29
III.2.2 Estimation de la résistance thermique du sol.....	30
III.3. Conclusion .....	34
Chapitre IV : Résultats et discussion.....	35
IV.1 Introduction .....	33
IV.2 Validation .....	33
IV.3 Etude paramétrique.....	35
IV.3.1 Effet de la durée de fonctionnement sur le rayon du sol $r\delta$ .....	35
IV.3.2 Effet de la température ambiante sur la longueur de l'échangeur air-sol.....	37
IV.3.3 Effet du diamètre des tubes sur la longueur de l'échangeur air-sol .....	37
IV.3.4 Effet de débit l'air sur la longueur de l'échangeur air-sol.....	38
Conclusion générale .....	39
Références bibliographiques.....	42
Résumé .....	45
ملخص.....	45

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
T	Température	°C
T <sub>f</sub>	température du fluide	°C
T <sub>0</sub>	Température initiale du sol	°C
R <sub>s</sub>	Résistance thermique du sol	m <sup>2</sup> .K / W
r <sub>l</sub>	Rayon du tube	M
r <sub>δ</sub>	Rayon du sol	M
L	Longueur	M
ρ	Densité	Kg / m <sup>3</sup>
λ	Conductivité thermique	W / (m. K)
α	Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> / s
δ	épaisseur du sol	M
C <sub>p</sub>	Chaleur spécifique	J / (kg. K)
d	diamètre intérieur du tube	M
h	coefficient de transfert de chaleur par convection	W / (m <sup>2</sup> . K)
J <sub>0</sub>	fonction de Bessel du premier type d'ordre zéro	/
J <sub>1</sub>	fonction de Bessel du premier type d'ordre un	/
ṁ	débit massique d'air à travers le tube enterré	kg / s
Nu	numéro Nusselt	/
Pr	numéro Prandtl	/
q'	flux de chaleur par longueur	W / m
Re	nombre de Reynolds	/
R	résistance thermique	K. m / W
r	Rayon	M
μ	viscosité dynamique	kg / (m. s)
N	viscosité cinématique	m <sup>2</sup> / s

### Indices

i	indice de temps
int	interne
in	Inlet
j	index de la couche

# Nomenclature



# Listes des figures

Figure .I.1. Dispositif expérimentale de Moumami et al.

Figure .I.2. Emplacement des capteurs de température dans le tube enterré

Figure .I.3. Banc d'essai expérimental de Bansal et al.

Figure .I.4. Température de l'air et du sol à une section de 10 m de l'entrée du tube après 12 h de fonctionnement pour trois sols (a) 0,52, (b) 2,00 et (c) 4,00 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>.

Figure .I.5. Schéma d'installation de l'échangeur

Figure .I.6. Validation du model analytique de la température du sol durant toute l'année

Figure I.7. Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour la 200ième journée de l'année

Figure .II.1. Géothermie à haute énergie

Figure .II.2. Géothermie à basse énergie

Figure .II.3. Géothermie à très basse énergie

Figure .II.9. Géométrie de l'échangeur de chaleur sol-air modélisé

Figure .II.10. Schéma d'un puits canadien, tiré de (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), 2012)

Figure .II.11. Quelques modèles des Prises d'air

Figure .II.12. Echangeur géothermique

Figure .II.13. Echangeur air sol (système à boucle ouverte)

Figure .II.14. Echangeur air sol (système à boucle fermée)

Figure .II.15. Echangeur air/sol horizontal (style européen) A. Connexion en série, B

Figure .II.16. Échangeur air sol vertical

Figure .III.1. Le schéma montre la subdivision du tube d'échangeur air-sol et du sol en plusieurs couches selon le modèle GRBM, où  $i$ ,  $j$  et  $k$  sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon

Figure .III.2. Le schéma montre l'épaisseur du sol perturbé,  $\delta$ , et le rayon du sol,  $r\delta$

Figure .III.3 Vues axiales et radiales du tube et du sol environnant à la  $j$ thcouche où le sol est considéré comme un cylindre creux semi-infini, où  $i$ ,  $j$  et  $k$  sont respectivement les indices du temps, de la couche et du rayon

Figure .IV.1. Validation du modèle GRBM avec des résultats expérimentaux de Mehdid et al (0heure)

Figure .IV.2 Validation du modèle GRM avec des résultats expérimentaux de Mehdid et al

Figure IV.3 validation pour (3h)

Figure IV.4 validation pour (4h)

Figure IV.5 validation pour (4h)

Figure IV.6 validation pour (5h)

Figure IV.7 validation pour (6h)

Figure IV.8 Effet de la durée de fonctionnement sur le rayon du sol  $r\delta$

Figure IV.9 Effet de la température ambiante sur la longueur de l'échangeur air-sol (40°C, 50 °C et 57 °C).

Figure IV.10 Effet du diamètre des tubes sur la longueur de l'échangeur air-sol (0,1 0,2 m, 0,3 m, 0, 6 m)

Figure IV.11 Effet de débit l'air sur la longueur de l'échangeur air-sol ( $T=f(L)$  pour différents débits)

# Liste des tableaux

Tableau II.1: Caractéristiques de quelques sources thermiques du Nord de l'Algérie

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

# **Introduction générale**

Les études démographiques indiquent que la population des pays en développement va croître très vite et leurs besoins d'énergie seront très importants. Le recours à des énergies propres pour les besoins énergétiques et le développement économique et social devient incontournable. Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique et énergie géothermique). L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et parmi les moins chères [1]. C'est de l'énergie stockée sous la surface de terre. Elle consiste à extraire les calories stockées dans le sol pour la production de l'électricité (géothermie à haute température) ou du chauffage (géothermie à basse température) [2]. En effet, les profondeurs de la terre recèlent d'énormes quantités de chaleur naturelle, dont l'origine réside essentiellement dans la désintégration d'éléments radioactifs. Selon les connaissances actuelles, les températures culminent à 6000 °C dans le noyau et atteignent jusqu'à 1300 °C environ dans le manteau supérieur du globe terrestre. La température augmente à partir de la surface du sol de 3 °C environ par 100 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient géothermique normal.

Nous intéressons dans cette étude à l'échangeur de chaleur air/sol qui est l'une des techniques efficaces d'énergie verte pour le chauffage et le refroidissement des locaux. Ce type d'échangeur utilise la température du sous-sol non perturbée à une profondeur de trois à quatre mètres [3]. Lorsque l'air circule à travers le tube enterré, la chaleur est échangée entre le sol et l'air et peut être directement utilisée pour le chauffage ou le refroidissement d'un espace donné. Par conséquent, l'échangeur air/sol permet d'améliorer le confort thermique dans les bâtiments. Récemment, de nombreux chercheurs ont effectué un certain nombre d'analyses (expérimentales et/ou numériques) de performance des systèmes échangeur air sol pour améliorer leur performance thermique [4, 5].

Nous nous intéresserons ici à la technique de rafraîchissement utilisant l'échangeur air-sol (appelé puits canadien ou encore puits provençal), son principe est simple, on fait passer l'air de renouvellement, avant qu'il n'entre dans la maison, dans un tube enterré. En hiver, l'air est ainsi préchauffé car le sol est plus chaud que l'air extérieur. En été, l'air est rafraîchi car c'est le phénomène inverse qui se produit.

L'objectif de ce travail est de modéliser le comportement thermique transitoire d'un échangeur géothermal air-sol en utilisant un modèle semi-analytique développé auparavant au laboratoire LGEM à l'université de Biskra. L'exemple d'application traité est un échangeur géothermique de forme serpentine installé à une profondeur horizontale de 3m. L'environnement Matlab est utilisé pour implémenter un modèle semi-analytique décrivant numériquement le comportement thermique de l'échangeur avant son validation avec des résultats expérimentaux. Ainsi, une étude paramétrique a été conduite pour étudier l'influence de quelques paramètres, comme le diamètre, la longueur du tube et le débit d'air) sur les performances thermiques de l'échangeur.

Ce travail se compose quatre chapitres :

Chapitre 1 : L'objectif de ce premier chapitre est de présenter quelques travaux disponibles sur la phénomène thermique d'échangeur air/sol.

Chapitre 2 : Généralités sur l'énergie géothermique et les échangeurs de chaleur sol-air

Chapitre 3 : L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle semi-analytique utilisé et le logiciel Matlab choisi afin de calculer la température de l'air parcourant l'échangeur air-sol.

Chapitre 4 : Les résultats obtenus sont présentés avec des commentaires faisant intervenir l'effet de quelques paramètres sur l'évolution de température de sol, ambiante et de l'air à la sortie du système étudié.

# **Chapitre I : Etude bibliographique**

## I.1 Introduction

Les recherches sur les échangeurs air/sol ont démarré après le pic pétrolier de 1979 et arrêtée temporairement après le contre-choc de 1985. Vu que plusieurs échangeurs air/sol ont été réalisés et testés par plusieurs chercheurs autour du monde, sachant que l'objectif de ces études est de libérer et /ou récupérer le maximum de chaleur à un coût réduit et expertiser la performance thermique de l'échangeur air sol. Pour atteindre ces objectifs, de grands travaux sont récemment explorés.

Dans ce chapitre nous exposons quelques travaux théoriques, analytiques, numériques et expérimentaux disponibles dans la littérature qui traitent les phénomènes thermiques des échangeurs air/sol.

## I.2 Quelques installations expérimentales géothermales air/sol

En 2010, Moumni et al [3] ont réalisé une étude théorique et expérimentale sur le procédé de rafraîchissement de l'air par la géothermie dans le site de Biskra (figure I.1 & I.2). Le banc des essais expérimentaux est monté sur site à l'université de Biskra. Il s'agit d'un réseau de quatre traçons d'une longueur totale d'environ 60 m. Le diamètre interne du tube est de 110 mm. L'ensemble est placé à une profondeur de 3 m sous une pente de 2 %. Pour le site de Biskra, cette profondeur (3 m) a été déterminée préalablement grâce à une étude effectuée en fonction des données locales du site) [3, 14]. Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 2 m. Une fosse de réception en béton est construite à la sortie de l'échangeur. Un extracteur d'air de débit variable est placé à l'entrée de l'échangeur. Une série de sondes thermiques, reliées à une centrale d'acquisition, ont été placées le long de l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie [3].



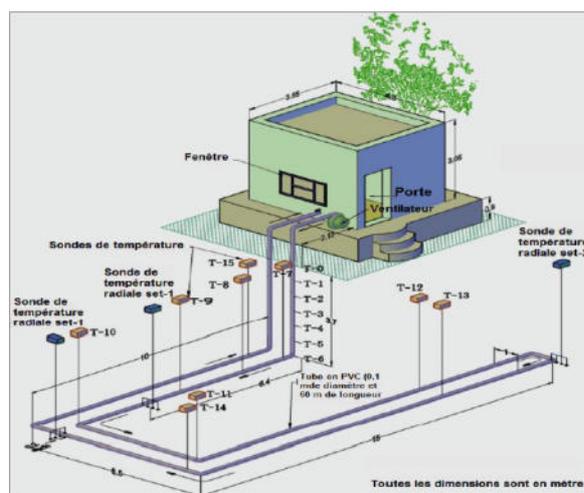
Figure I.1. Dispositif expérimental de Moumni et al. [3].



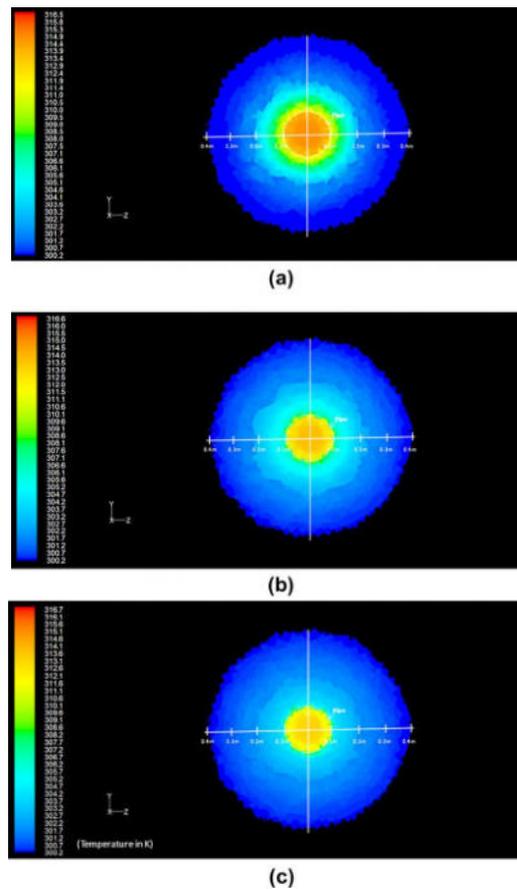
**Figure I.2.** Emplacement des capteurs de température dans le tube enterré [23].

Les auteurs ont examiné et vérifié expérimentalement les modèles théoriques qui ont été établis jusqu'à présent, qui traduisent l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction des différents paramètres. Les résultats expérimentaux par comparaison à ceux analytiques ont permis de conclure que le modèle présenté pourra être amélioré. En effet, expérimentalement la température du fluide continue à chuter avec la longueur de l'échangeur.

Bansal et al. [15,16] ont étudié expérimentalement et numériquement l'effet de la conductivité thermique du sol et la période de fonctionnement continu de l'EAHE pour différentes longueurs de tuyaux (figure I.3). Les auteurs ont constaté que les performances de l'échangeur dépendent principalement de la conductivité thermique et aussi de la durée de fonctionnement. Les résultats montrent également que l'épaisseur du sol de la couche du sol est constante est égal 2 fois le rayon du tube (figure I.4).



**Figure I.3.** Banc d'essai expérimental de Bansal et al. [15]



**Figure I.4.** Température de l'air et du sol à une section de 10 m de l'entrée du tube après 12 h de fonctionnement pour trois sols (a) 0,52, (b) 2,00 et (c) 4,00 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>[16].

Bisoniya et al. en 2014 [21] ont examiné expérimentalement la performance d'un échangeur air/sol dans les conditions climatiques chaudes et sèches à Bhopal en Inde. L'installation expérimentale présentée sur (la figure 1.5) est composée de deux tubes en PVC cylindrique de 0,1016 m de diamètre intérieur. La longueur de chaque tube est de 9,114 m et les deux tubes sont connectés en série. La longueur totale de l'échangeur est de 19,228 m y compris les coudes et les raccords, enterré à une profondeur de 2 m.

Le modèle de simulation du système échangeur air/sol développé sur la plateforme CFD CFX et validé avec les résultats expérimentaux réalisés sur site. La simulation et les résultats expérimentaux obtenus pour des vitesses de débit d'air de 2 m/s, 3,5 m/s et 5 m/s ont conclu que la température de l'air chute rapidement dans les premiers mètres du tube que les derniers mètres. L'échangeur gagne 12,9 °C et 11,3 °C de température pour des vitesses de l'air de l'ordre de 2 m/s et 5 m/s respectivement.

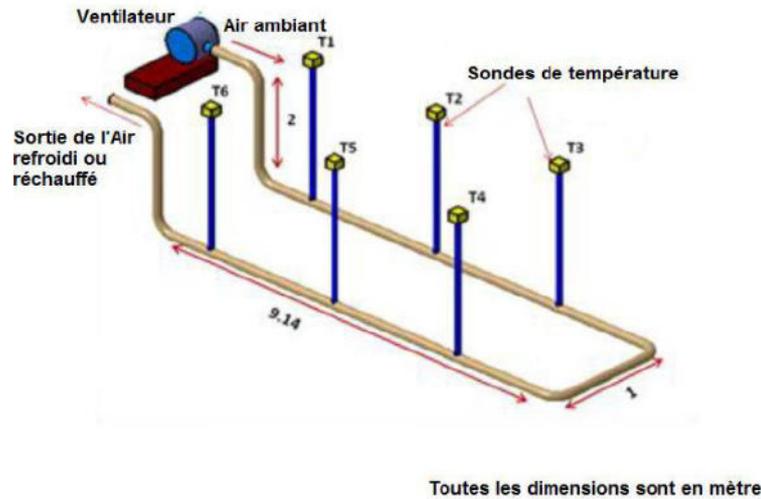
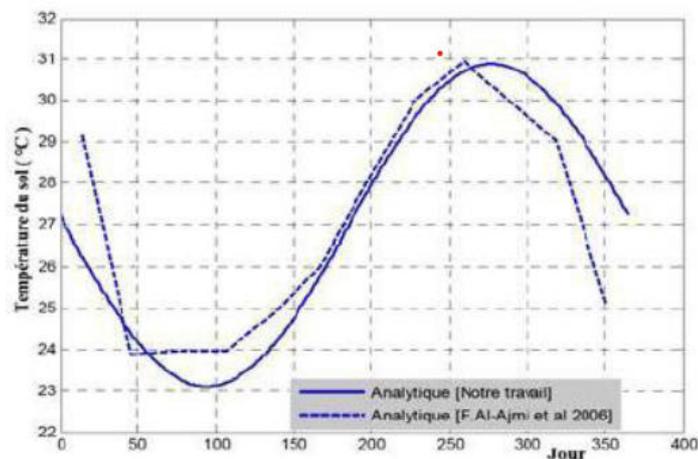


Figure .I.5.Schéma d'installation de l'échangeur [22]

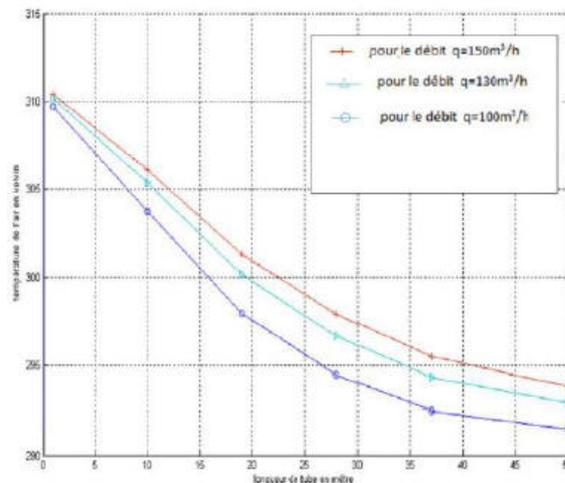
### I.3 Quelques études théoriques sur les échangeurs air/sol

L'étude présentée par B. Mebarki et al [18] en 2011 a été réalisée sur un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar. Dans ce travail, une étude des performances d'un échangeur air-sol a été effectuée par voie de modélisation analytique. Le modèle de la température du sol et la température de l'air dans l'échangeur a été validé (voir **figure I.6**), puis ils ont étudié l'influence de quelques paramètres (la profondeur, le diamètre et la longueur du tube) sur la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur [17].



**Figure I.6.** Validation du model analytique de la température du sol durant toute l'année [17]

Saad Eddine [18] en 2012 a donné une description et définition détaillée des échangeurs air/sol ainsi que leurs composants, il a étudié les différents paramètres qui influent les performances thermiques d'un tel système. Ensuite, il s'est intéressé à la profondeur où la température du sol reste stable qui peut être exploité dans le rafraichissement par l'utilisation d'échangeur air/sol enterré à cette profondeur. Puis, l'auteur a proposé un modèle analytique pour suivre l'évolution de la température du sol en fonction de la profondeur et la journée de l'année. Une étude de modalisation numérique est entamée qui a pour objectif de calculer la température de sortie à chaque jour durant la période estivale dans la région de Biskra. La figure ci-dessous montre l'évolution la température de l'air dans l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie pour trois débits différents (**voir figure I.7**)



**Figure I.7.** Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour la 200ième journée de l'année [18]

## I.4 Conclusion

A partir de cette étude bibliographique on conclut que le rafraichissement par la géothermie est un domaine de recherche très large et approfondi soit de point de vue théorique ou expérimental. Partant des constatations et observations faites après un passage en revue à travers une brève étude bibliographique, il a été jugé utile d'entamer une étude numérique et expérimentale basée sur la distribution de la température à l'intérieur de l'échangeur

---

géothermique, en ayant pour objectif de déterminer les profils de température de l'échangeur géothermique à partir des essais effectuées sur un banc d'essai installé à l'université de Biskra.

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

## **II.1. Introduction**

Le système géothermique utilise une technologie de chauffage et de refroidissement qui transfère de la chaleur provenant du sol ou de l'eau afin de conditionner les locaux; il affiche un rendement énergétique supérieur à celui des systèmes classiques. La chaleur naturelle du sol ou de l'eau est absorbée par un fluide caloporteur. Elle est transportée par un réseau de tuyaux enfouis dans la terre jusqu'à un bâtiment. Ces techniques passives sont prouvées très efficaces et peuvent contribuer à atteindre le confort thermique de l'habitat ainsi qu'une meilleure qualité de l'air à l'intérieur du local [6].

## **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 [7].

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

On distingue 4 types différents de géothermie :

#### **II.2.2.1. Géothermie à haute énergie**

De température inférieure à 150°C. Dite également géothermie à haute enthalpie, haute température et profonde: La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150 °C. Les réservoirs, généralement localisés au-delà de 1500 m de profondeur, sont 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 [8].

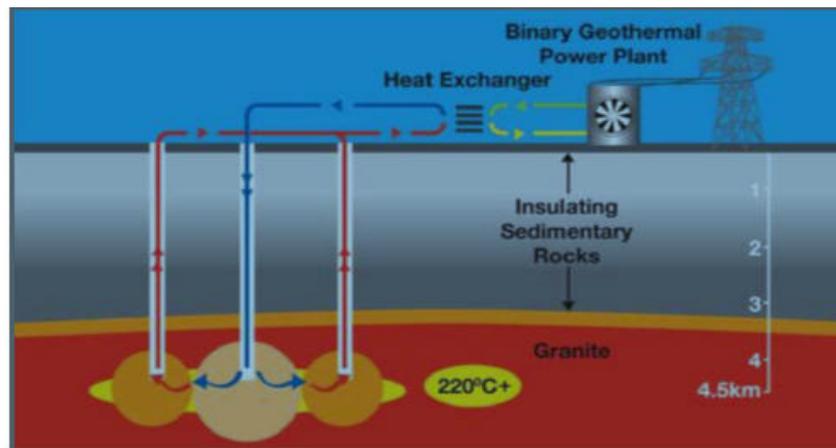


Figure .II.1. Géothermie à haute énergie [8].

### II .2.2.2. Géothermie moyenne énergie

La géothermie de moyenne température ( $T^{\circ}\text{C}:90\text{à}150$  °C) 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 allant de 2000 à 4000 mètres. Pour produire de l'électricité, une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire est nécessaire [8].

### II.2.2.3. Géothermie de basse énergie

La géothermie de basse énergie (de 30 à 90 °C) consiste en l'utilisation de la chaleur, par extraction d'eau chaude contenue dans les aquifères profonds (1500-2000 mètres) des bassins sédimentaires 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 [8].

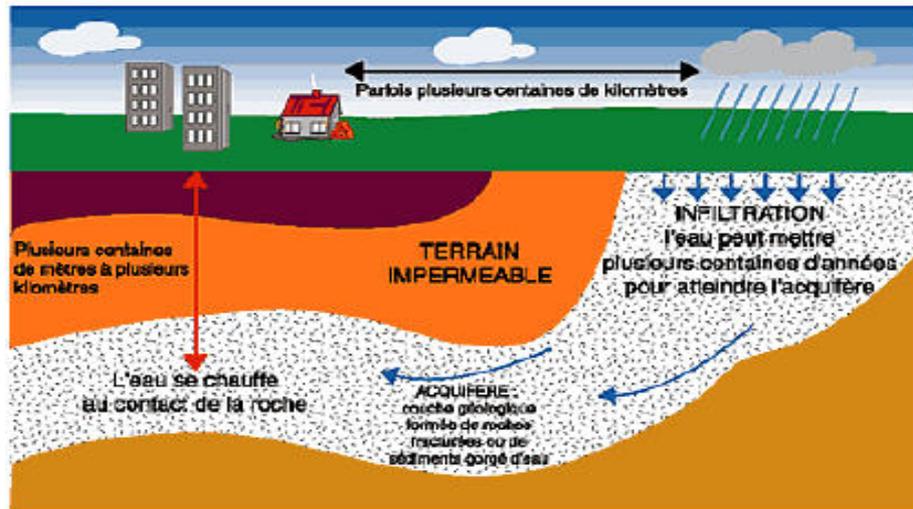


Figure .II.2. Géothermie à basse énergie [8].

#### II.2.2.4. Géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie ( $T^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C}$ ) concerne la production de chaleur et/ou de froid 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 à chaleur (PAC). Les PAC peuvent fonctionner sur des dispositifs d'échange et extraction d'énergie avec le sol (capteur horizontal profondeur  $< 2.0\text{m}$ ), le sous-sol (capteur vertical, 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) [8].



Figure .II.3. Géothermie à très basse énergie. [10]

### **II.2.3. La géothermie dans l'Algérie**

#### **II. 2.3.1. La géothermie en Algérie**

L'Algérie, est considérée parmi les pays riches en eaux thermo-minérales. Et dispose des nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C. Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90°C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C. Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouelmen et 119 °C à Biskra. On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser. Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région d'El Meni3a. [9].

#### **II.2.3.2 Les zones géothermiques en Algérie**

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien, 'Carte Géothermique Préliminaire du Nord de l'Algérie. Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nordalgérien, majoritaires au Nord-est (Tableau 1). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Bou taleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bou hanifia (66°C) à Mascara. Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Omanie, de la Kabylie et du Constantinois. [8]

**Tableau II.1:** Caractéristiques de quelques sources thermique du Nord de l'Algérie [8]

Sources Thermique	Région	Faciés Chimique	Résidus Secs(mg/l)	Température e(°C)	Dedit (l/s)
H.chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H.Bouhadjar	Ain-Timouchent	Chloruré sodique	3210	66.5	-
H.Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	-
H.Boutaleb	Setif	Chloruré sodique	3416	52	-
H.Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
H.Salhine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
H.SudiBou Abdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H.Della	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	-
H.Rabi	Saida	Chloruré sodique	1524	47	-
H.Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
H.Ben Haroun	constantine	Chloruré sodique	3762	42	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 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 en sortie d'échangeur. Ce modèle a été intégré à un outil de simulation thermique du bâtiment [19].

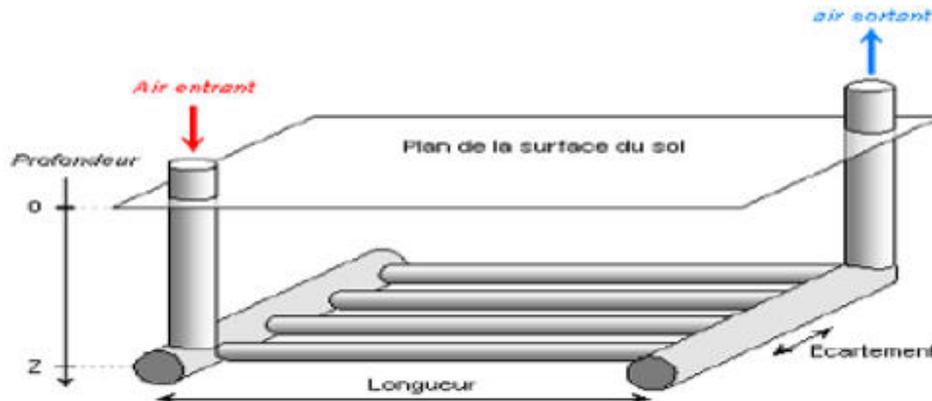
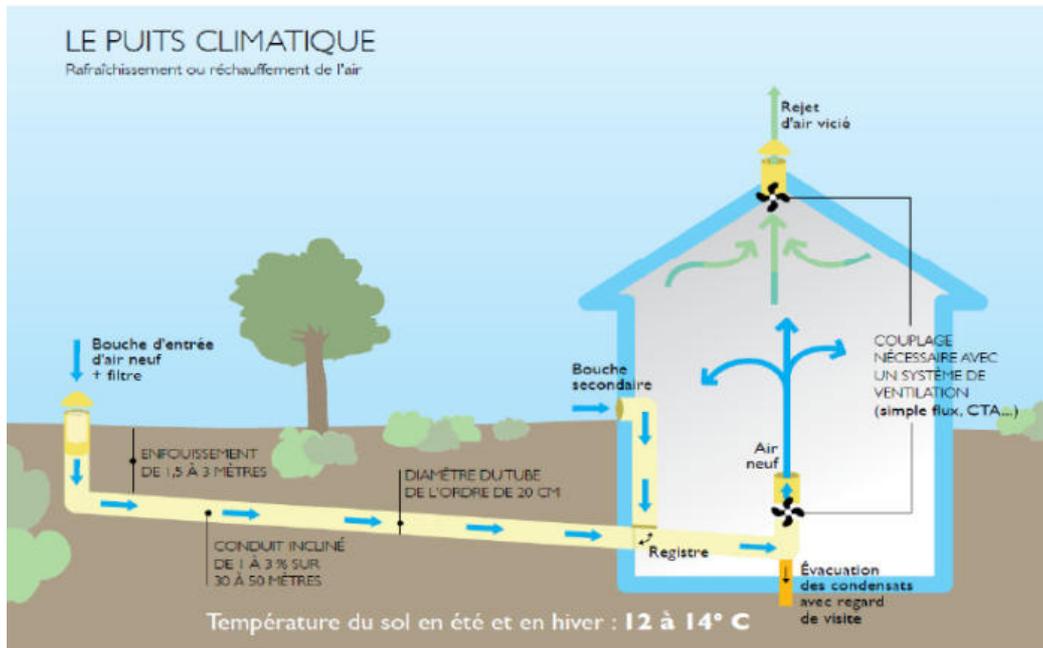


Figure .II.9. Géométrie de l'échangeur de chaleur sol-air modélisé [12].

### II.3.2. Fonctionnement

Le principe de cet échangeur est assez simple. L'air est prélevé à température ambiante extérieure pour être envoyé sous terre dans des tubes. L'air est progressivement chauffé ou refroidi, selon les saisons, par échange thermique avec le sol. Il est ensuite diffusé dans un bâtiment. On présente (**La Figure II.10**) Comme un schéma représentant un puits canadien. En plus des tubes souterrains, un système de dérivation est nécessaire pour déconnecter le système dans le cas où l'effet du sol serait une contrainte pour le conditionnement de l'air. (Flaga-Maryanczyk, Schnotale, Radon, & Was, 2014) ont observé le cas où un échangeur à air refroidissait l'air ambiant pendant certains jours de l'hiver. Ce système de dérivation permet également au sol de récupérer de l'influence de l'échangeur. Le sol peut ainsi revenir à sa température non influencée lors des périodes de non-utilisation, comme la nuit pour les bureaux. Lorsque l'échangeur est utilisé sans interruption, donc sans possibilité de récupération, les performances peuvent être affectées.



**Figure II.10.** Schéma d'un puits canadien, tiré de (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), 2012)

### II.3.3. Composants d'échangeur air/sol

Prise d'air neuf : Chaque échangeur de chaleur air-sol généralement possède une prise d'air neuf, Elle peut être en colonne extérieure circulaire ou cubique et placée en façade de bâtiment ou à distance lorsque le terrain le permet. Ses dimensions sont généralement les mêmes que celles des conduits auxquels elle est reliée de manière à ne pas occasionner de variations de vitesse et de pertes de charge. Elle peut être omnidirectionnelle ou unidirectionnelle en fonction des éventuelles sources de pollution environnantes. Elle est souvent pourvue d'un chapeau et d'ailettes empêchant l'eau de pluie de pénétrer dans l'échangeur air-sol. La prise d'air est généralement placée légèrement en hauteur de manière à ne pas capter trop de poussières. Elle est fixée dans le sol par socle béton [26].



**Figure .II.11.** Quelques modèles des Prises d'air [26].

La matière de la prise d'air peut être : l'acier inoxydable, l'acier galvanisé, le béton, le polyéthylène.

Échangeur géothermique :Il est constitué d'un ou plusieurs tubes assurant un triple rôle : canaliser le flux d'air, permettre les échanges thermiques entre l'air et le sol et assurer la tenue mécanique de l'ouvrage [26]. Plusieurs méthodes sont alors utilisées pour assurer les raccords : vissage, emboîtement, collage avec parfois des joints en caoutchouc [26].

L'échangeur est généralement enterré entre 4 et 6 m pour le tertiaire et entre 1 et 2 m pour le résidentiel individuel. Il est assez éloigné de la dalle des bâtiments pour éviter toute fuite de chaleur de celle-ci vers l'échangeur air-sol. Une pente régulière de 2 à 3% est mise en place afin d'évacuer les éventuels condensats [26]



**Figure .II.12.** Echangeur géothermique [26].

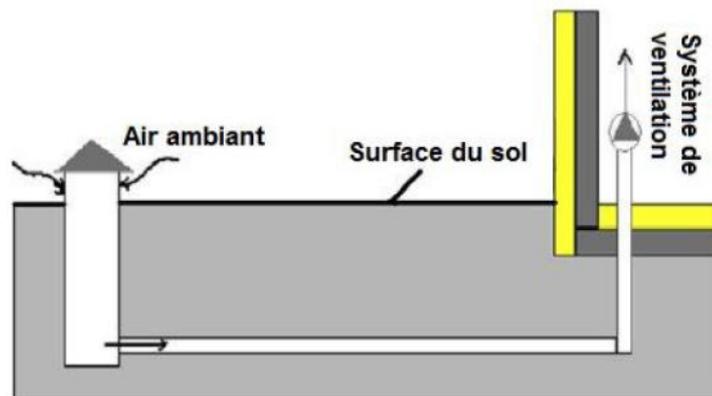
Système d'évacuation des condensats : Lorsque l'air chaud et humide entrant et sortant de l'extérieur est refroidi dès qu'il touche les parois de l'échangeur, de la condensation se produit dans les conduites, un système doit permettre d'extraire ces condensats.

### II.3.4. Les type les échangeurs air/ sol

Pour choisir le type de système échangeur sol-air à utiliser et dans la conception du système, il faut connaître les propriétés thermiques et physiques du sol (conductivité thermique, densité, diffusivité etc.), profondeur du substratum rocheux, profondeur de l'eau et la nature du sol.

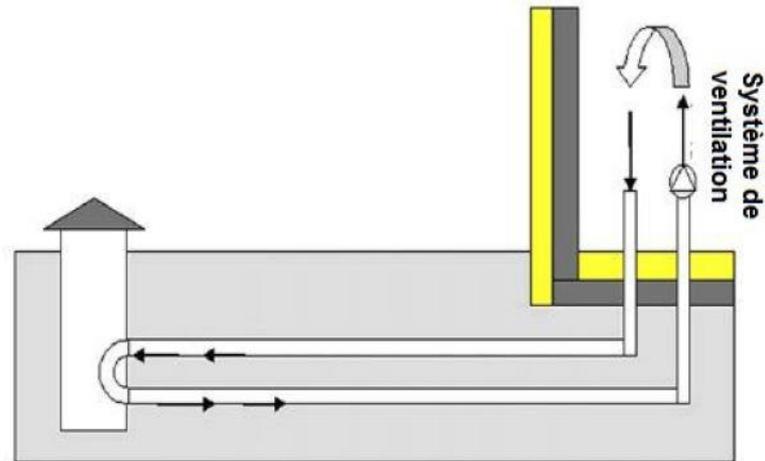
Il existe deux types principaux :

- Boucle ouverte : aspirer l'air extérieur à travers les tuyaux pour ventiler le local [24]



**Figure II.13.** Echangeur air sol (système à boucle ouverte) [25].

- Boucle fermé : dans ce cas l'air dy bâtiment recircule à travers les tubes de terre [24]

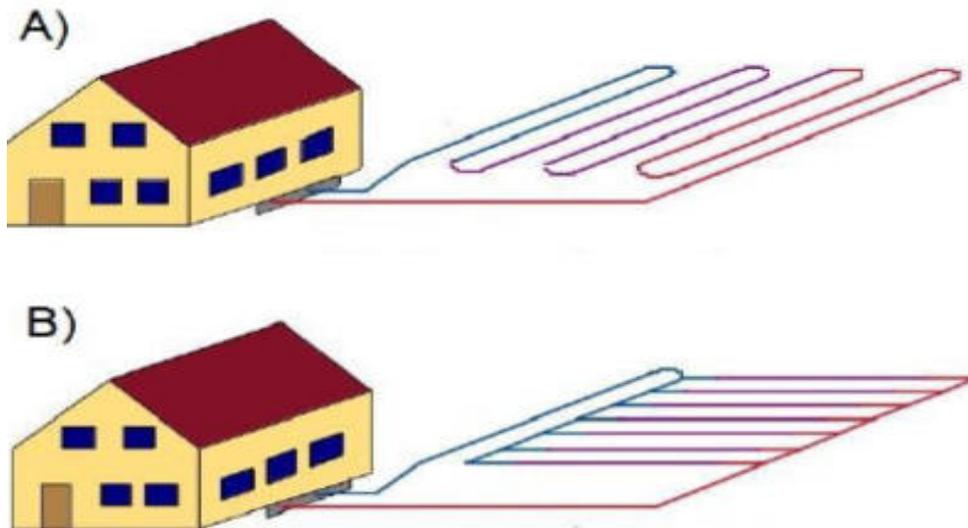


**Figure II.14.** Echangeur air sol (système à boucle fermée) [25].

### II.3.5. La forme d'échangeur air/ sol

#### II.3.5.1. Échangeur horizontal

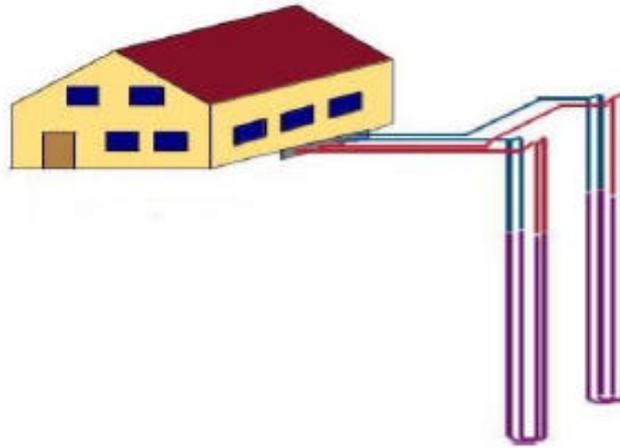
Un échangeur air sol horizontal qui comporte un certain nombre de tubes raccordés entre eux soit en série ou en parallèle [21].



**Figure. II.15.** Echangeur air/sol horizontal (style européen) **A.** Connexion en série, **B.** Connexion en parallèle [20].

#### II.3.5.2. 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 [20].



**Figure .II.16.** Échangeur air sol vertical [20].

### II.3.6. Efficacité des échangeurs de chaleur air-sol

De nos jours, les échangeurs air-sol sont généralement utilisés comme solution pour l'exploitation rationnelle de l'énergie et le contrôle du confort thermique dans l'habitat. Ce déploiement à grand échelle dans l'habitat est dû principalement à leur efficacité énergétique qui reste assez élevée, comparée aux anciens systèmes de chauffage/climatisation supposés conventionnels.

Les propriétés thermiques du sol et la conception de l'échangeur ont une grande influence sur l'efficacité de l'échange thermique avec l'air. Autrement dit, l'efficacité repose sur la qualité d'échange de chaleur entre le sol et le réseau d'air enfoui ; en effet, un sol avec une inertie thermique importante est plus performant en échange de chaleur. Les capacités d'accumulation de chaleur du sol, sa conductivité thermique et les caractéristiques des réseaux d'air représentent ainsi des facteurs très importants de l'efficacité des échangeurs.

En effet, l'efficacité de l'échangeur air-sol exprime son rendement à une profondeur bien définie. Elle se définit comme étant le rapport entre la différence de la température de l'air (entrant-sortant) sur la différence de température du sol et celle de l'air entrant. Elle se formule par l'expression a :

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}}}{T_{\text{sol}} - T_{\text{entrée}}} \quad (I)$$

Outre les paramètres thermo-physiques, l'efficacité des échangeurs de chaleur air-sol reste très sensible au type de conception - géométrique- et aux paramètres environnementaux qui seront développés dans la partie suivante du manuscrit [13].

## II.4 Paramètres importants et performances thermiques des échangeurs air-sol

Les réseaux d'air ou plus précisément les tubes où circule le fluide caloporteur, sont choisis suivant des caractéristiques physiques telles que : la résistance, la rigidité, la conductivité thermique et la durabilité. Tous ces paramètres ont une influence directe sur le dimensionnement d'un puits canadien et donc sur son comportement thermique.

La configuration de ce réseau constitue un élément clé répercutant les performances du puits canadien. Le dimensionnement se base sur l'optimisation de plusieurs paramètres : la longueur, le diamètre et la distance entre les tubes ainsi que leur nombre (configuration de tubes en parallèles) ; la profondeur d'enfouissement, le débit d'écoulement et la température de sortie (température du bâtiment) [13].

### II.4.1 La longueur de tube

La longueur des tubes consiste à déterminer la surface d'échange de l'air au long de son parcours dans le réseau d'air ainsi que son temps de séjour dans le tube enfoui. Il existe alors une longueur optimale pour un meilleur échange de chaleur permettant d'obtenir des températures de sorties proches de celle de la terre.

Il a été conclu dans des études précédentes que l'échange thermique n'est pas rentable si la longueur de tube est inférieure à 25 m. Au-delà de 40 m, l'échange devient aléatoire sans signification précise. Dans ce cas, il est préférable de limiter longueur entre 20 m et 45 m [13].

### II.4.2 Le diamètre de tube

Le diamètre de tube définit la section de passage de l'air et influe la vitesse et la pression d'écoulement. Il contribue également à la qualité d'échange entre le tube et le sol vu que le mode de ventilation varie en fonction du diamètre du canal, car comme mentionné précédemment il constitue un paramètre essentiel dans la définition du débit d'écoulement.

#### **II.4.3 Débit d'air total**

Le débit d'air total intervient lors de l'échange thermique avec le sol par convection, il doit aussi répondre aux besoins de renouvellement d'air neuf dans l'habitat tout en laissant son empreinte sur la qualité de la puissance thermique. On distingue deux modes de fonctionnements ou le débit est fort en rafraîchissement mais relativement faible en phase de préchauffage.

#### **II.4.4 Vitesse d'écoulement de l'air**

La vitesse d'écoulement de l'air dans les conduites est une conséquence des deux paramètres précédents, donc elle y dépend : le diamètre de tube et du débit d'air circulant à l'intérieur. La vitesse est le facteur qui impose le régime d'écoulement : laminaire ou turbulent. Elle impacte directement le coefficient d'échange par convection entre l'air et les parois de l'EAS mais aussi la nature des pertes de charge dans le réseau installé.

#### **II.4.5 Profondeur d'enfouissement**

Le sol joue le rôle d'un tampon qui isole l'atmosphère des réseaux d'installation d'air. Hollumuller [14] a montré que les variations de température de l'air extérieur sont d'autant plus amorties et déphasées par le sol quand la profondeur est grande. Le sol est donc indépendant des conditions météorologiques à partir d'une certaine profondeur. Le choix de la profondeur d'enfouissement se repose sur la nature du sol et ses caractéristiques physiques tels que la diffusivité thermique, la conductivité thermique, la densité et l'humidité. Ces derniers paramètres, à savoir l'humidité du sol, est considérée comme un facteur sensible lors des études de saturation du sol. En effet, un sol humide assure une durée d'échange plus importante qu'un sol aride.

#### **II.4.6 Nombre et espace entre les tubes**

Il existe des réseaux avec plusieurs tubes, en parallèle ou en série selon l'espace d'installation disponible pour l'échangeur de chaleur et les besoins du bâtiment. L'objectif est d'augmenter le débit total de ventilation. Dans le cas de puits à plusieurs tubes, il est nécessaire de laisser un espacement entre les tubes afin de permettre au sol de se régénérer en évitant la saturation thermique de ce dernier. D'après Hollmuller [14], une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour des variations journalières. Il est conseillé de laisser plus pour un fonctionnement saisonnier.

#### **II.4.7 D'autres paramètres influant les performances de l'installation**

La nature des tubes (matériaux) : Le choix du matériau utilisé dans la conception des tubes est un enjeu qui affecte le comportement thermique du réseau, dont sa conductivité thermique et sa durabilité. Selon l'application des matériaux sont regroupés comme suite :

Application dans le secteur tertiaire : les matériaux comme l'acier inoxydable, l'acier galvanisé ou le béton sont les plus répandus.

Application dans l'habitat individuel : c'est plutôt des matériaux de type Polyéthylène, polypropylène ou bien le PVC qui sont les plus utilisés.

La rugosité intérieure des tubes : La rugosité intérieure des tubes est bénéfique pour la création des turbulences qui favorise l'échange de chaleur. Toutefois, ces rugosités peuvent engendrer d'importantes pertes de charge qui risquent même de décroître la qualité de ventilation et par conséquent les performances de l'échangeur de chaleur.

#### **II.4.8 Pente de conduite**

La vapeur d'eau contenue dans l'air circulant dans le conduit enterré peut se condenser en fines gouttelettes quand celui-ci est en contact avec les parois intérieures froides du puits. Or, ceci favorise le développement de bactéries pathogènes, pouvant altérer la qualité de l'air neuf. C'est pourquoi, le puits dont le conduit est incliné environs de 2%, doit obligatoirement être doté d'un système d'évacuation des condensats. [21]

### **II.5. Avantages et inconvénients de l'échangeur air/sol**

**Avantages :**

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

**Inconvénients :**

- Efficacité des grilles anti-rongeurs imparfaites.
- Difficultés pour nettoyer correctement le ou les conduits.
- Nettoyage régulier des filtres nécessaire.
- Risque pour la santé s'ils sont mal entretenus (développement des organismes Pathogènes).

**II.6 Conclusion**

Le comportement de l'échangeur de chaleur dépend des conditions climatiques et des paramètres du sol en premier degré. La performance thermique dynamique d'un échangeur air-sol n'est donc pas dans ces cas universels et doit être étudiée dans le cadre du climat, du sol et des conditions de charge du bâtiment à l'emplacement géographique qui lui est destiné.

La température de sortie d'un tube enterré est directement liée à la température du sol. Pour une meilleure performance, le tube doit donc être enterré à une profondeur suffisante de manière à profiter au mieux de l'inertie du sol.

# **Chapitre III : Modélisation de l'échangeur sol-air**

### III.1 Introduction

Chaque échangeur air-sol, met en contact thermique deux sources de températures différentes. L'une c'est l'air qui circule dans les tubes entrées et l'autre est le sol placé au contact des tubes. La température de l'air dans les tubes et la température du sol au contact des tubes constituent donc les deux variables d'entrée de l'échangeur, le sol comme une masse immobile au voisinage des tubes participe à l'échange par conduction donc la température du sol évolue.

L'énergie reçue par le sol est transmise jusqu'à une distance indéterminée des tubes. Ce troisième chapitre présente un modèle semi-analytique (Modèle GRBM) est développé au LGEM de l'Université de Biskra pour prédire les performances thermiques d'échangeur air-sol fonctionnant dans des conditions transitoires pour le mode refroidissement. Ce modèle GRBM prend en considération tous les paramètres affectant les performances du système (propriétés thermo physiques de l'air et du sol, température de l'air d'admission (la température ambiante), paramètres géométriques des conduites et durée de fonctionnement) ce qui rend plus fiable la conception des échangeurs de chaleur géothermiques horizontaux peu profonds.

### III.2 Description du modèle GRBM

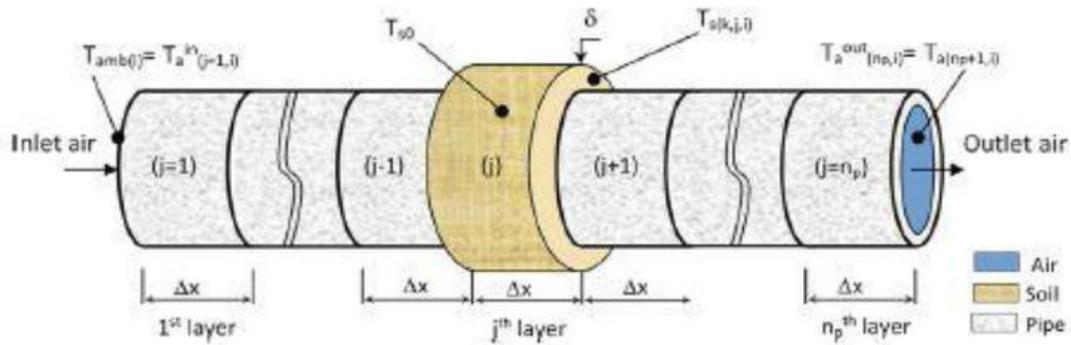
Pour rendre le dimensionnement plus précis, Les spécifications du modèle proposé reposent sur des conditions aux limites variables pour l'air et le sol avec le temps. Le contenu de ce modèle repose sur quelques étapes :

Tout d'abord, le sol et le tube d'échangeur air-sol sont subdivisés en plusieurs couches. Pour chaque couche, l'épaisseur du sol perturbé et la température radiale du sol au voisinage de la conduite ont été déterminées par le modèle RBM. Ce dernier est développé précédemment par Rouag et al. (2018) afin de calculer la température du sol et sa résistance thermique. Par la suite, la résistance thermique totale est calculée pour l'ensemble: air, conduite et sol. Enfin, les paramètres déterminés, considérés comme des constantes pour le pas de temps courant complet, sont utilisés pour évaluer la température de sortie d'air de la couche courante.

Selon le modèle GRBM et pour chaque pas de temps, toutes les étapes ci-dessus sont appliquées à chaque couche où la température de l'air de sortie de la jth couche est

considérée comme la température de l'air d'entrée pour la couche suivante, (j+1)<sup>th</sup> couche. Cette opération est répétée jusqu'à l'extrémité du tube d'échangeur air-sol (j = np) comme indiqué sur la Figure III.1.

La résistance thermique du sol pour chaque couche du pas de temps précédent sert d'initialisation pour le prochain incrément de temps [28].



**Figure III.1** Le schéma montre la subdivision du tube d'échangeur air-sol et du sol en plusieurs couches selon le modèle GRBM, où i, j et k sont respectivement les indices de temps, de couche et de rayon [28].

### III.2.1 Estimation de la température de l'air

La modélisation d'échangeur air-sol est établie de telle manière que les hypothèses suivantes sont respectées: (i) Le sol autour de l'échangeur de chaleur est homogène; (ii) Les propriétés du sol sont isotropes et il y a un contact parfait entre le sol et la conduite ; (iii) Le débit d'air est uniforme sur toute la longueur des tubes enterrés; (iv) Les propriétés thermo-physiques de l'air sont des constantes ; (v) On suppose que le tube et le sol sont subdivisés en plusieurs couches de longueur ( $\Delta x$ ) disposées en série; (vi) Le flux d'air est considéré unidimensionnel comme le montre la figure 3.1; (vii) Dans chaque couche, le flux de chaleur entre l'air et le sol est supposé constant pendant tout le pas de temps actuel.

Pour une  $j^{\text{th}}$  couche, le bilan énergétique s'écrit comme suit relation:

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

où  $T_a$ ,  $C p_a$  et  $\dot{m}_a$  sont respectivement la température, la capacité calorifique spécifique et le débit massique d'air. La résistance thermique totale,  $R_{tot}$ , est la somme des résistances

thermiques de l'air,  $R_{cv}$ , du tube  $R_p$  et  $R_s$  du sol perturbé entourant la  $j^{\text{th}}$  couche. En résolvant analytiquement l'Eq différentiel. (1), la température de sortie d'air de la  $j^{\text{th}}$  couche est donnée comme suit:

$$T_{a(j)}^{out} = (T_{a(j)}^{in} - T_{s0}) \exp\left(\frac{-\Delta x}{R_{tot} \dot{m}_a C p_a}\right) + T_{s0} \quad \text{Eq. 2}$$

Pendant 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  $j^{\text{th}}$  couche actuelle comme température de l'air de sortie de la  $(j - 1)^{\text{th}}$  couche précédente, l'Eq. (2) peut s'écrire:

$$T_{a(j+1,i)} = (T_{a(j,i)} - T_{s0}) \exp\left(\frac{-1}{\rho_a C p_a S V_a R_{tot(j,i)}}\right) + T_{s0} \quad \text{Eq. 3}$$

Comme mentionné ci-dessus, Eq. (2) est exprimé en régime permanent en supposant des propriétés thermiques du sol constantes pour le pas de temps courant complet. Le calcul de la température de l'air est répété pour la prochaine étape de temps avec nouveau (température du sol, résistance thermique du sol) en utilisant le modèle RBM comme suit:

### III.2.2 Estimation de la résistance thermique du sol

La résistance thermique totale entre l'air, le tube et la  $j^{\text{th}}$  couche entourant le sol de d'échangeur air-sol peut être exprimée par la relation suivante:

$$R_{tot} = R_{cv} + R_p + R_g \quad \text{Eq. 4}$$

où la résistance thermique due au transfert de chaleur par convection entre l'air et la surface intérieure du tube  $R_{cv}$ , est calculée comme suit:

$$R_{cv} = 1/(h_a 2\pi r_{int}) \quad \text{Eq. 5}$$

Le coefficient de convection d'air est:

$$h_a = Nu. \lambda_a / d_{int} \quad \text{Eq. 6}$$

où  $d_i$  est le diamètre intérieur du tube. Le nombre Nusselt pour le débit d'air à l'intérieur du tube est donné par l'Eq. (7):

$$Nu = 0.023. Re^{0.8}. Pr^{0.3} \quad \text{Eq. 7}$$

où  $Re$  et  $Pr$  sont respectivement des nombres de Reynolds et Prandtl sont définis comme:

$$Re = \frac{V_a \cdot d_H}{\nu_a} \tag{Eq. 8}$$

$$Pr = \frac{\mu_a \cdot Cp_a}{\lambda_a} \tag{Eq. 9}$$

La résistance thermique du tube,  $R_p$ , est donnée par l'équation suivante:

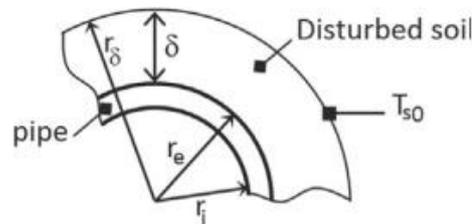
$$R_p = \frac{\log\left(\frac{r_e}{r_{int}}\right)}{(2\pi\lambda_p)} \tag{Eq. 10}$$

La résistance thermique de l'anneau du sol,  $R_s$ , est donnée par l'Eq.( 11):

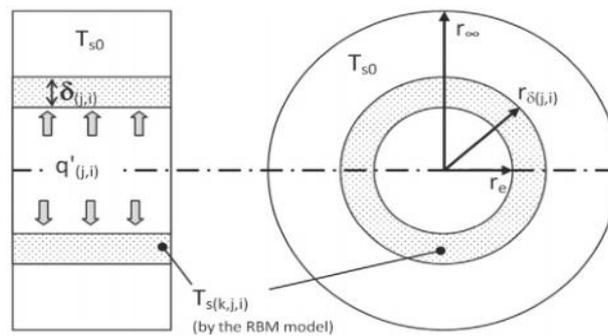
$$R_s = \frac{\log\left(\frac{r_\delta}{r_e}\right)}{(2\pi\lambda_s)} \tag{Eq. 11}$$

$$r_\delta = r_e + \delta \tag{Eq. 12}$$

où  $r_\delta$  et  $\delta$  sont respectivement le rayon du sol et le sol perturbé épaisseur (Figure III.2). Généralement, la résistance thermique du tube,  $R_p$ , et la résistance due à la convection de l'air dans le tube, les  $R_{cv}$  sont des constantes [27].



**Figure III.2.** Le schéma montre l'épaisseur du sol perturbé,  $\delta$ , et le rayon du sol,  $r_\delta$ .



**Figure III.3** Vues axiales et radiales du tube et du sol environnant à la  $j^{th}$  couche où le sol est considéré comme un cylindre creux semi-infini, où  $i, j$  et  $k$  sont respectivement les indices du temps, de la couche et du rayon [28].

Cependant, il n'y a pas d'accord dans la littérature pour calculer la résistance thermique du sol. Les auteurs calculent la résistance thermique du sol,  $R_s$ , en supposant que l'effet thermique de l'air sur le sol entourant la conduite est négligeable après un certain rayon constant dans le sol (Al-Ajmi et al., 2006; Bansal et al., 2013a). Ce rayon du sol, appelé  $r_\delta$ , est la première distance où aucune élévation significative de la température initiale du sol  $T_{s0}$  (Figure III.2). Par exemple, certains auteurs proposent que le rayon du sol,  $r_\delta$ , soit égal à trois fois le rayon du tube (Bansal et al., 2013a) ou égal au diamètre du tube (Al-Ajmi et al., 2006) [29]. Dans ce travail, nous avons considéré une résistance thermique transitoire du sol dans la prédiction de la température de l'air de sortie en utilisant le modèle RBM développé précédemment (Rouag et al., 2018). Le modèle RBM considère que la distance  $r_\delta$  n'est pas constante, mais variable en fonction du diamètre du tube ( $r_e$ ), du temps de fonctionnement ( $t$ ) et de la diffusivité du sol (Rouag et al. 2018). Pour cela, la solution analytique de l'équation de conduction thermique (Eq. (13)) dans le sol est présentée ci-dessous. Cette équation est exprimée en coordonnées cylindriques au niveau de la  $j^{\text{th}}$  couche du tube et du sol environnant considéré comme un cylindre creux semi-infini comme le montre la Figure III.3.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \text{ For } r \geq r_e \\ \text{With } \theta(r, 0) = 0 \\ \theta(r \rightarrow \infty, t) = 0 \\ \left[ -\lambda_s \frac{\partial \theta}{\partial r} 2\pi r \right]_{r=r_e} = q' \end{array} \right. \quad \text{Eq. 13}$$

où  $u(k, j, i) = T_s(k, j, i) - T_{s0}$ , avec  $i, j$  et  $k$  sont les indices du temps, couche et rayon respectivement.  $T_{s0}$  est la température initiale du sol et  $q'$  est le flux thermique par unité de longueur de la  $j^{\text{th}}$  couche pour le  $i^{\text{th}}$  pas de temps (Al-Khoury, 2011).

$$\theta(k, j, i) = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_i} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \int_0^{t_i} e^{\alpha_s \beta_n^2 \tau} q'(\tau) d\tau \quad \text{Eq. 14}$$

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  $J_0(z) = 0$ . Dans cet article, seules dix racines ( $z_n$ ) ont été considérées (Özisik, 1993). En référence à l'hypothèse (vii), il y a deux façons de calculer le flux thermique par unité de longueur,  $q'(\tau)$ , dans l'équation. (14):

a) Le flux de chaleur,  $q'$ , est considéré comme constant dans l'échelon de temps complet,  $\Delta t$ . Dans ce cas, l'entité  $q'(\tau)$  peut être sortie directement de l'intégrale de l'Eq. (14). Ainsi, la température du sol à la  $j^{\text{th}}$  couche peut s'écrire:

$$T_s(k, j, i) - T_{s0} = \frac{q'(j, i)}{\pi \lambda_s r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_i}}{\beta_n^2} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \quad \text{Eq. 15}$$

Pour le  $i^{\text{th}}$  pas de temps actuel, le flux thermique par unité de longueur,  $q'(j, i)$ , est calculé par la résistance thermique du sol,  $R_s(j, i-1)$ , comme suit:

$$q'(j, i) = \frac{(T_{a(j,i)} - T_{s0})}{R_s(j, i-1)} \quad \text{Eq. 16}$$

Où  $T_{a(j,i)} = T_{a(j-1,i)}^{\text{out}}$

$$R_s(j, i-1) = \frac{1}{2\pi \lambda_s} \log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right) \quad \text{Eq. 17}$$

Après substitution des équations. (16) et (17) dans l'Eq. (15), les températures transitoires du sol entourant le tube peuvent s'écrire:

$$T_s(k, j, i) = \frac{2(T_{a(j,i)} - T_{s0})}{r_\infty^2 \log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_i}}{\beta_n^2} \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} + T_{s0} \quad \text{Eq. 18}$$

b) Les propriétés intégrales habituelles de la relation de Chasles (Fiche et al., 2010) ont été utilisées dans le développement. Dans ce cas, l'Eq. (14) devient pour la  $j^{\text{th}}$  couche:

$$\theta(k, j, m) = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e) e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \left( \int_0^{t_1} e^{\alpha_s \beta_n^2 \tau} q'_{(j)}(\tau) d\tau \right. \right. \\ \left. \left. + \int_{t_1}^{t_2} e^{\alpha_s \beta_n^2 \tau} q'_{(j)}(\tau) d\tau + \dots + \int_{t_{m-1}}^{t_m} e^{\alpha_s \beta_n^2 \tau} q'_{(j)}(\tau) d\tau \right) \right) \quad \text{Eq. 19}$$

Or

$$\theta(k, j, m) \\ = \frac{1}{\pi r_\infty^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e) e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{J_1^2(\beta_n r_\infty)} \sum_{i=1}^m \left( q'_{(i,j)} \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\alpha_s \beta_n^2 \tau} d\tau \right) \right) \quad \text{Eq. 20}$$

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

$$q'_{(i,j)} \Big|_{t_{i-1}}^{t_i} = \frac{T_{a(j,i)} - T_{s0}}{R_{s(j,i-1)}} \quad \text{Eq. 21}$$

$$R_{s(j,i-1)} = \frac{1}{2\pi\lambda_s} \log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right) \quad \text{Eq. 22}$$

Où  $T_{a(j,i)} = T_{a(j-1,i)}^{out}$

En conséquence, la température du sol de la  $j^{th}$  couche étudiée avec une température d'air d'entrée variable peut être exprimée en Eqs. (23) et (24):

$$\theta(k, j, m) = \frac{1}{\pi\lambda_s r_{\infty}^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e) e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m}}{J_1^2(\beta_n r_{\infty})} \sum_{i=1}^m \left( \frac{q'_{(i,j)}}{\beta_n^2} [e^{\alpha_s \beta_n^2 \tau}]_{t_{i-1}}^{t_i} \right) \right) \quad \text{Eq. 23}$$

$$T_s(k, j, m) = \frac{2}{r_{\infty}^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-\alpha_s \beta_n^2 t_m} J_0(\beta_n r_k) J_0(\beta_n r_e)}{\beta_n^2 J_1^2(\beta_n r_{\infty})} \sum_{i=1}^m \left( \frac{T_{a(j,i)}}{\log\left(\frac{r_{\delta(j,i-1)}}{r_e}\right)} [e^{\alpha_s \beta_n^2 \tau}]_{t_{i-1}}^{t_i} \right) \right) \quad \text{Eq. 24}$$

$$+ T_{s0}$$

Ainsi, à la fois les températures transitoires du sol autour du tube et le rayon du sol  $r_{\delta}$  sont estimées en utilisant Eq. (18). Dans le cas d'une température d'air d'admission constante et en utilisant l'Eq. (23). En cas de température d'air d'admission variable [28].

### III.3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un modèle semi-analytique connu dans la littérature sous le nom RBM généralisé (modèle GRBM). Ce modèle permet de prédire la température de l'air circulant dans le tube au même temps que l'évolution de la température dans le sol.

## **Chapitre IV : Résultats et discussion**

## IV.1 Introduction

Le modèle semi analytique GRBM proposé par Mehdid et al. [7] est détaillé dans le chapitre précédent. Pour dimensionner un échangeur de chaleur air-sol et pouvoir appliquer les conditions climatiques extrêmes de la région de Biskra, un programme en langage ‘MATLAB’ a été développé en se basant sur les équations présentées dans ce chapitre et l’organigramme présenté par Mehdid et al. [7].

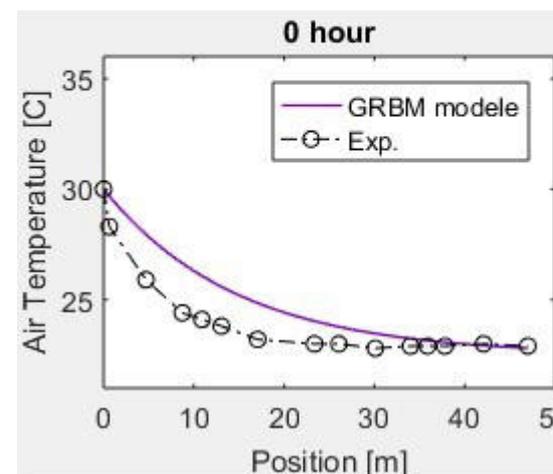
Après la validation du code de calcul, une étude paramétrique est réalisée pour étudier l’effet de quelques paramètres sur l’évolution des températures : de sol, ambiante et de l’air à la sortie du système.

## IV.2 Validation

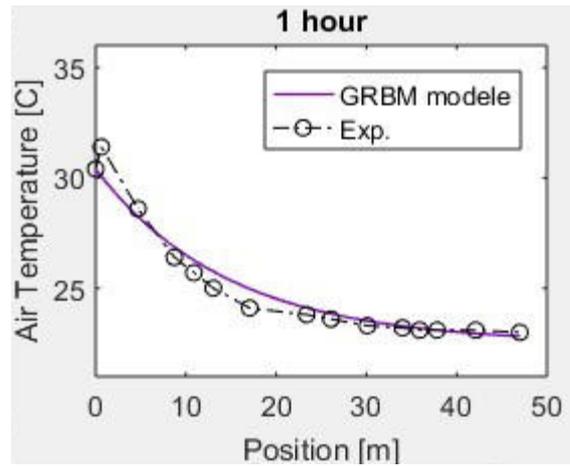
Notre modèle semi-analytique nous a donné des résultats, et nous les avons comparés avec l’expérimental de Mehdid et al [27] en utilisant les mêmes paramètres géométriques et thermo-physiques pour une durée de fonctionnement continu de six heures. Les paramètres et les caractéristiques spécifiques de l’échangeur air-sol testé par Mehdid et al. [27] sont regroupés dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** Caractéristiques spécifiques de l’échangeur air-sol de Mehdid et al. [27].

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



**Figure IV.1** Validation du modèle GRBM avec des résultats expérimentaux de Mehdid et al (0heure)



**Figure IV.2** Validation du modèle GRM avec des résultats expérimentaux de Mehdid et al (1 heure)

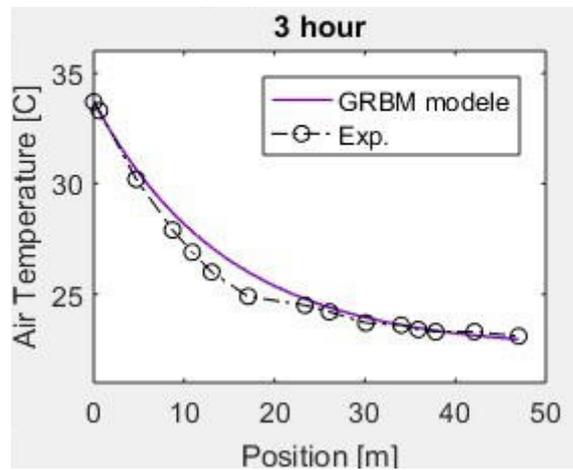


Figure IV.3 validation pour (3h)

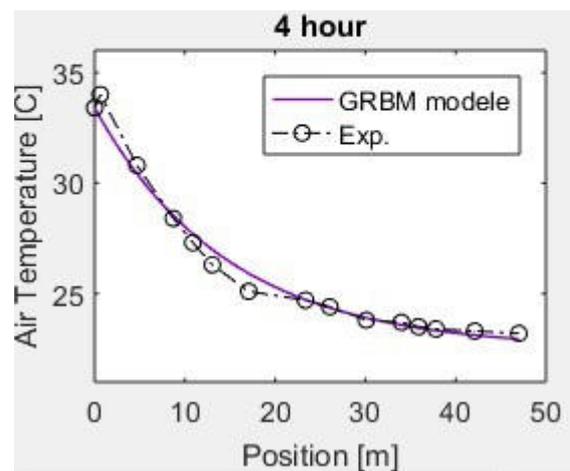


Figure IV.4 validation pour (4h)

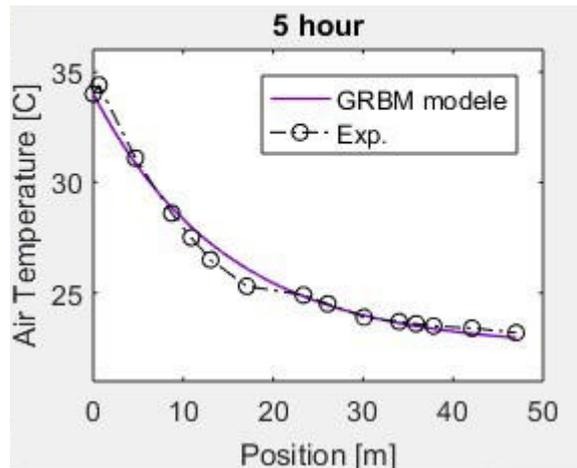


Figure IV.6 validation pour (5h)

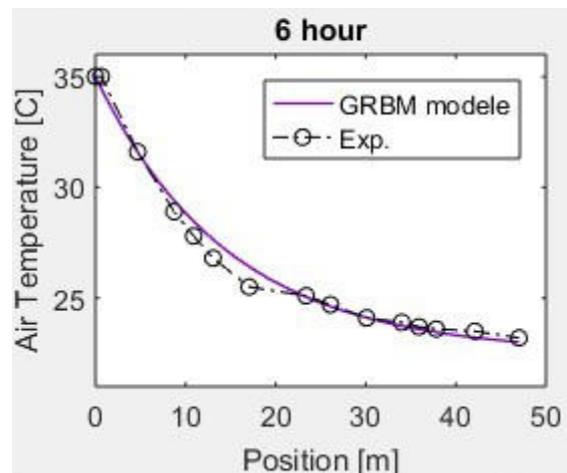


Figure IV.7 validation pour (6h)

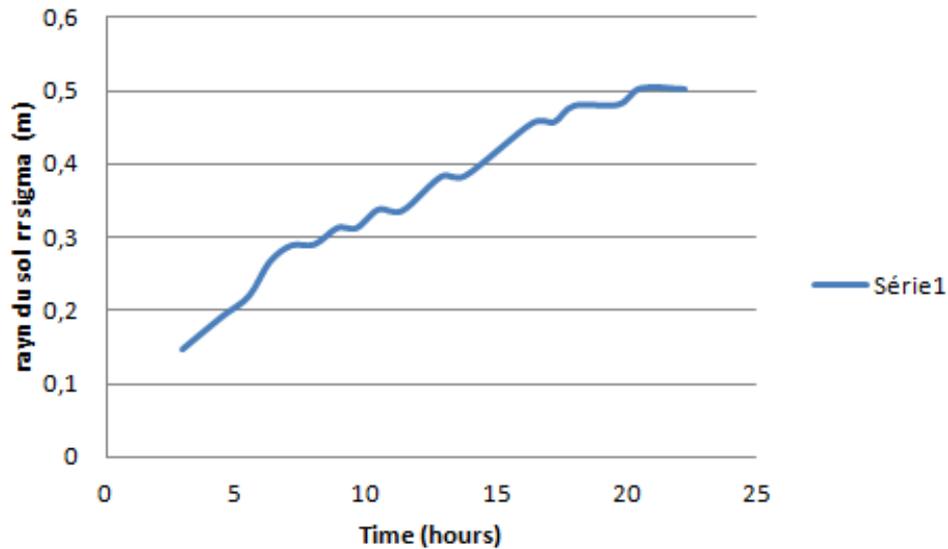
Les figures (IV.1) ;(IV.2) ;(IV.3) ;(IV.4) ;(IV.5) ;(IV.6) ;(IV.7) présentent Validation du modèle GRBM avec des résultats expérimentaux de Mehdid et al [27], pour une durée de fonctionnement continu de six heures [27].

Les sept figures montrent la comparaison entre notre modèle et l'étude expérimentale de l'échangeur air-sol réalisée par Mehdid et al. [28]. Les températures de l'air calculées à l'intérieur de l'échangeur air-sol nous ont donné 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 2.5%.

### IV.3 Etude paramétrique

#### IV.3.1 Effet de la durée de fonctionnement sur le rayon du sol $r_0$

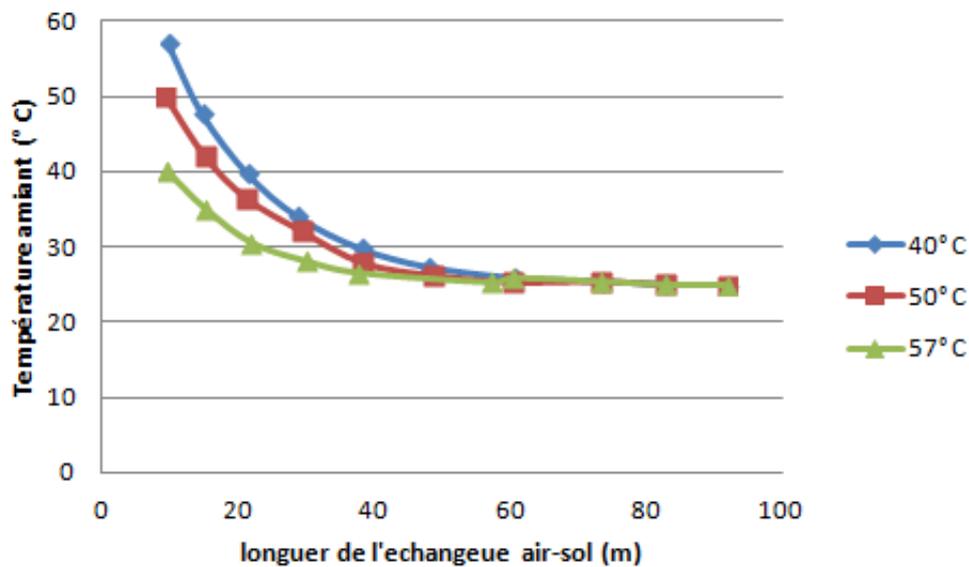
La figure ci-dessous (IV.8) représente la variation de rayon du sol  $r_{\delta}$ , calculée par le modèle RBM en fonction de la durée de fonctionnement. On trouve que l'augmentation du rayon du sol en augmentant la durée de fonctionnement qui provoque l'augmentation de la résistance thermique du sol, et donc la diminution du flux thermique transféré au sol. Par conséquent, les performances du système se détériorent en raison de la saturation du sol entourant le tube pendant le fonctionnement continu.



**Figure IV.8** Effet de la durée de fonctionnement sur le rayon du sol  $r_{\delta}$

### IV.3.2 Effet de la température ambiante sur la longueur de l'échangeur air-sol

La figure ci-dessous (IV.9) représente la variation de différente température d'air ambiante (40°C, 50 °C et 57 °C) en fonction de la longueur de l'échangeur air-sol. On note Lors du changement de la température de l'air extérieur de 40 à 50 à 57 que plus la température de l'air extérieur n'est basse, il faut une longueur réciproque inférieure, et vice versa, lorsque la température de l'air extérieur est élevée, nous avons besoin d'un coup de main dans la longueur de l'échangeur.



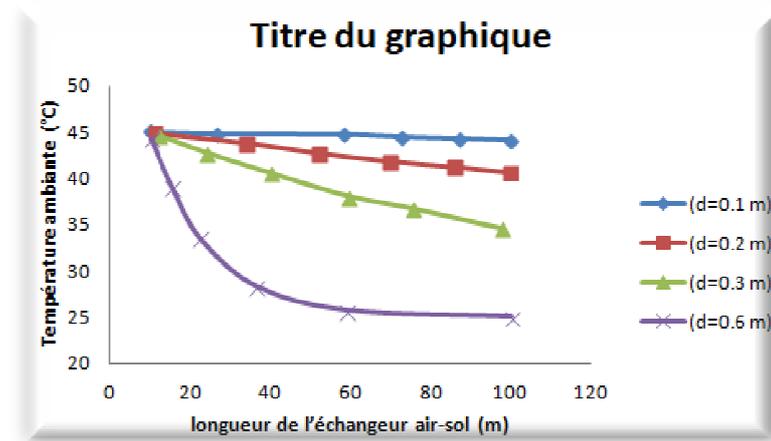
**Figure IV.9** Effet de la température ambiante sur la longueur de l'échangeur air-sol (40°C, 50 °C et 57 °C).

### IV.3.3 Effet du diamètre des tubes sur la longueur de l'échangeur air-sol

La figure ci-dessous (IV.10) représente la variation de la température de l'air ambiante en fonction de la longueur de l'échangeur pour différentes diamètres des tubes (0,1 0,2 m, 0,3 m, 0, 6 m). on trouve une légère baisse de température pour 0,1 m.

On remarque une diminution importante de la température par rapport au diamètre du tube précédent pour les deux diamètres (0.2 et 0.3m).

Pour le diamètre 0.6 on remarque une diminution très élevée par rapport aux diamètres précédentes.

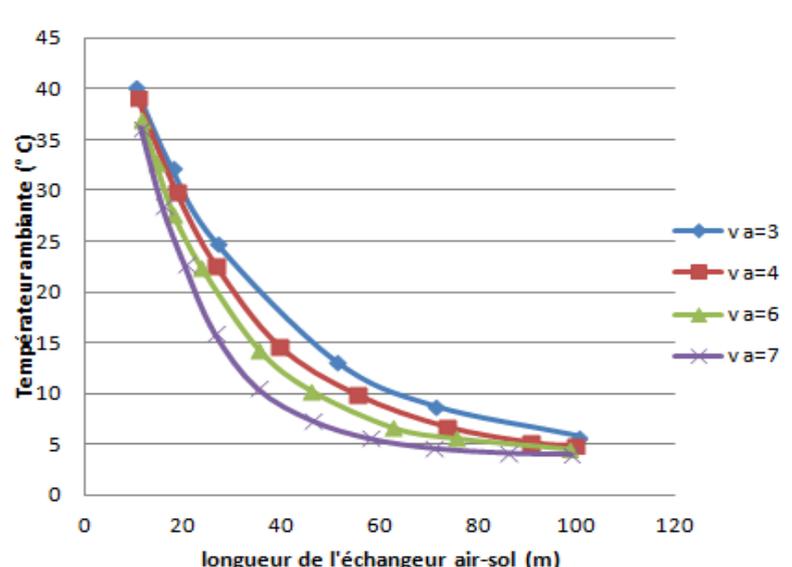


**Figure IV.10** Effet du diamètre des tubes sur la longueur de l'échangeur air-sol (0,1 0,2 m, 0,3 m, 0,6 m)

#### IV.3.4 Effet de débit l'air sur la longueur de l'échangeur air-sol

Quatre différents débit l'air ( $3\text{m}^3/\text{s}$ ,  $4\text{m}^3/\text{s}$ ,  $6\text{m}^3/\text{s}$ ,  $7\text{m}^3/\text{s}$ ) pour examiner la performance de l'échangeur.

La figure(IV.11) ci-dessous 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 ambiante diminue avec la diminution de la vitesse d'écoulement de l'air et s'élèvent avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air, autrement dit, le fluide n'aura pas suffisamment de temps pour échanger sa chaleur avec le sol.



**Figure IV.11** Effet de débit l'air sur la longueur de l'échangeur air-sol ( $T=f(L)$  pour différents débits)

# **Conclusion générale**

Ce travail s'inscrit dans un contexte mondial visant à promouvoir et rationaliser l'utilisation des énergies renouvelables ainsi à minimiser les émissions de gaz et à contribuer positivement dans la lutte contre le réchauffement climatique. On s'est intéressé dans la présente étude à l'échangeur de chaleur géothermal comme solution passive de réchauffer/rafraîchir l'air avec moins d'énergie dépensée comparés à celle employé dans les systèmes conventionnels.

L'objectif de ce travail est de modéliser le comportement thermique transitoire d'un échangeur géothermal air-sol en utilisant un modèle semi-analytique développé auparavant au laboratoire LGEM de l'université de Biskra [1, 7, 29]. L'exemple d'application traité est un échangeur géothermique horizontal de forme serpentine installé à une profondeur de 3m à l'Université de Biskra.

L'étude bibliographique a montré que le rafraichissement par la géothermie est un domaine de recherche très large soit de point de vue théorique ou expérimental. Il a été établi que le comportement thermique de l'échangeur de chaleur géothermal peu profonde dépend des conditions climatiques et des paramètres du sol. Les performances thermiques transitoires d'un échangeur air-sol doit être étudiée dans le cadre du climat, du sol et des conditions de charge du bâtiment à l'emplacement géographique qui lui est destiné.

Pour pouvoir dimensionner un échangeur de chaleur air-sol, une description détaillée du modèle semi-analytique GRBM [1, 7, 29] est reproduite dans le présent mémoire. Ce modèle permet de prédire le comportement transitoire de la température de l'air circulant dans le tube au même temps que l'évolution de la température dans le sol. Un programme en langage 'Matlab' a été développé en se basant sur les équations présentées dans ce manuscrit et l'organigramme proposé par Mehdid et al. [7]. Ce code prend en compte tous les paramètres affectant les performances du système (propriétés thermo-physiques de l'air et du sol, température de l'air d'entrée, paramètres géométriques des tubes et durée de fonctionnement) qui rendent la conception des échangeurs géothermiques horizontaux peu profonds plus fiable. Ainsi, ce code Matlab comporte deux sous-programmes :

- Le premier sous-programmes est basé sur un modèle mathématique permettant de proposer une formule de calcul du rayon (épaisseur) du sol en fonction de: i) la durée de fonctionnement, ii) la diffusivité thermique du sol, iii) le diamètre du tube et iv) température de l'air.

- Le deuxième sous-programme est développé pour prédire les champs de température transitoire de l'air circulant dans le tube d'échangeur en mode de refroidissement continu.

La comparaison entre les résultats du code développé et les résultats expérimentaux[7] a permis la validation du code développé en reflétant le phénomène transitoire de transfert de chaleur dans un échangeur air-sol avec une erreur maximale de 2.5%. Ainsi, l'étude paramétrique a montré que la détérioration maximale des performances thermiques du système étudié est relative au sol ayant la plus faible conductivité thermique et la dissipation continue de la chaleur de l'air au sol pendant le fonctionnement continu. Ceci conduit à la conclusion que les propriétés du sol jouent un rôle clé dans la conception de ces échangeurs.

# Références bibliographiques

- [1] Rouag, A., Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption, 2017, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [2] Benhammou, M. and B. Draoui, Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar-Effet de la nature du sol. *Revue des Energies Renouvelables*, 2011. **14**(2): p. 219-228.
- [3] Moummi, N., et al., Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra. *Revue des Energies Renouvelables*, 2010. **13**(3): p. 399-406.
- [4] Ozgener, O., L. Ozgener, and D.Y. Goswami, Experimental prediction of total thermal resistance of a closed loop EAHE for greenhouse cooling system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011. **38**(6): p. 711-716.
- [5] Trombe, A. and L. Serres, Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation. *Energy and Buildings*, 1994. **21**(2): p. 155-162
- [6] David Amitrano, Elément de dimensionnement d'un échangeur Air/sol, dit puits Canadien', Université J.Fourrier, Grenoble, 2006.
- [7] 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.
- [8] <https://www.infoclimat.fr/climatologie/normales-records/1991-2020/ouargla/valeurs/60580.html>.
- [9] Sung Lok Do, Jeff S. Haberl . A review of ground coupled heat pump models used in whole building computer simulation programs. 2010

- [10] Julien HEINTZ (CETIAT). Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d informations) "janvier 2008
- [11] Belloufi Yousef, Modélisation d'un échangeur Air/Sol dont le but de rafraîchissement des locaux. 2012
- [12] Jean Le male. La géothermie. Le moniteur. © Dunod, Paris 2009. ISBN 978-2-10-052879-0.
- [13] S. Thiers, "Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive," École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.
- [14] P. Hollmuller, "Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments," Thèse, 2002.
- [15] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal and J. Mathur, Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling, *Energy and Buildings*, vol. 42 5, pp. 645-648, 2010. DOI:
- [16] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal and J. Mathur, Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied energy*, vol. 103 pp. 1-11, 2013. DOI:
- [17] B. Mebarki, B. Draoui, S. Abdessemed, A. Keboucha, S. Drici and A. Sahli, Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar, *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 15 3, pp. 465-478, 2012. DOI:
- [18] M. Saaddine, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/Sol enterré, Université Mohamed Khider de Biskra, 2012.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] EOLE. Les principes du puits canadien. Catalogue. Année: 2014.
- [22] Bisoniya, T.S., A. Kumar, and P. Baredar, Cooling potential evaluation of earth-air heat exchanger system for summer season. *Int J Eng Tech Res*, 2014. **2**(4): p. 309-316.
- [23] Khabbaz, M., et al., Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate. *Energy and buildings*, 2016. **125**: p. 109-121.
- [24] Bisoniya, T.S., A. Kumar, and P. Baredar, Experimental and analytical studies of earth-air heat exchanger (EAHE) systems in India: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. **19**: p. 238-246.
- [25] Bouanani, M. and A. Djelaili, performance en été de la cheminé solaire sur toit incliné par la ventilation naturelle
- [26] Saifi, N., N. Settou, Contribution à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans les zones arides, 2016.
- [27] Agrawal, K.K., R. Misra, and G.D. Agrawal, Improving the thermal performance of ground air heat exchanger system using sand-bentonite (in dry and wet condition) as backfilling material. *Renewable Energy*, 2020. **146**: p. 2008-2023.
- [28] Agrawal, K.K., R. Misra, and G.D. Agrawal, Improving the thermal performance of ground air heat exchanger system using sand-bentonite (in dry and wet condition) as backfilling material. *Renewable Energy*, 2020. **146**: p. 2008-2023.
- [29] Rouag, A., A. Benchabane, and C.-E. Mehdid, 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*, 2018. **198**: p. 1536 - 1544.

# Résumé

L'objectif de ce travail est de modéliser le comportement thermique transitoire d'un échangeur géothermique air-sol en utilisant un modèle semi-analytique développé auparavant au laboratoire LGEM de l'université de Biskra. L'étude bibliographique a montré que le comportement thermique de l'échangeur de chaleur géothermique peu profonde dépend des conditions climatiques et des paramètres du sol. Une description détaillée du modèle semi-analytique GRBM est reproduite dans le présent mémoire pour pouvoir dimensionner un échangeur de chaleur air-sol. Un programme en langage 'Matlab' a été développé en se basant sur la démarche mathématique et numérique présentée dans ce manuscrit. Ce code prend en compte tous les paramètres affectant les performances du système (propriétés thermo-physiques de l'air et du sol, température de l'air d'entrée, paramètres géométriques des tubes et durée de fonctionnement) qui rendent la conception des échangeurs géothermiques horizontaux peu profonds plus fiable. La comparaison entre les résultats du code développé et les résultats expérimentaux a permis la validation du code développé avec une erreur maximale de 2.5%. Une étude paramétrique est réalisée et a montré que les propriétés du sol jouent un rôle clé dans la conception de ces échangeurs.

**Mots-clés :** énergies renouvelables, géothermie, échangeur air/sol, modèle semi-analytique, inertie thermique du sol, la distribution de température.

## ملخص

**عنوان:** مذكرة: مساهمة في تصميم المبادلات الحرارية هواء/تراب باستخدام نموذج شبه تحليلي.

**ملخص:** الهدف من هذا العمل هو نمذجة السلوك الحراري بدلالة الزمن لمبادل جيوحراري هواء- تراب باستخدام نموذج شبه تحليلي تم تطويره سابقاً في مختبر هندسة الطاقة والمواد بجيلة بسكرة. أظهرت الدراسة البيولوجرافية أن السلوك الحراري للمبادل الجيوحراري الضحل يتعلق بالظروف المناخية وخصائص التربة. تم الرجوع للوفا التفصيلي للنموذج شبه التحليلي GRBM في هذه المذكرة من أجل التمكن من نمذجة وتصميم مبادل جيوحراري هواء- تراب. تم تطوير برنامج بلغة 'Matlab' بناءً على المنهج الرياضي والعددي المقدم في هذه المذكرة. يهدف هذا البرنامج في الاعتبار جميع المعطيات والخصائص التي تؤثر على أداء النظام الجيوحراري (الخصائص الحرارية الفيزيائية للهواء وللتربة، درجة حرارة الهواء الداخل، وكذلك المعطيات الهندسية الخاصة بمبادل التربة ووقت التشغيل) ما يجعل تصميم هذه المبادلات أكثر دقة وثوقية. سمحت المقارنة بين نتائج البرنامج المطور والنتائج التجريبية بالتحقق من دقة البرنامج بخطأ لا يتعدى 2.5%. كما تم إجراء دراسة تحليلية وأظهرت أن خصائص التربة تلعب دوراً رئيسياً في تصميم المبادلات الحرارية الأرضية الأفقية الضحلة.

**كلمات مفتاحية:** الطاقات المتجددة، الطاقة الحرارية الأرضية، مبادل هواء/تراب، نموذج شبه تحليلي، العتالة

الحرارية للتربة، توزيع درجة الحرارة.