

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 l'Ingénierie Mécanique

Ref :...../2021

## Mémoire

Présenté pour l'obtention du

## Master

En génie mécanique

**Option:** énergétiques

**Par**

Yassine CHITOUR

---

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

---

Devante le jury compose de

Mr. Adel Benchabane	Professor, Univ-Biskra, Alegria	superviseur
Mr. Fouad Chabane	MCA, Univ-Biskra, Alegria	président
Mr. Chawki Mahboub	MCB, Univ-Biskra, Alegria	Examiner

**Université de Biskra 2021.**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# DEDICACE

---

## DEDICACE

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents << ma mère et mon père >> qui  
m'ont bien élevé, aidé, soutenus et encouragé durant toutes ces  
années d'étude.

Mes frères,

Toute ma grande famille,

A mes amis qui m'ont beaucoup encouragé durant mes années  
d'étude.

A tous mes professeurs que j'ai connus durant mes études. A  
mes connaissances de proche ou de loin.

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

# REMERCIEMENTS

---

## REMERCIEMENTS

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

En second lieu j'adresse mes remerciements à mon enseignant Pr. Adel BENCHABANE qui m'a guidé dans mon travail et m'a aidé pour trouver des solutions à des problèmes rencontrés lors de la préparation de ce mémoire. Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accepté d'examiner mon travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs de l'université Mohamed Khider Biskra qui mon enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu durant mes études.

Je remercie mes amies pour leurs encouragements et leurs aides pour surmonter tous obstacles. Merci

# Sommaire

---

## Sommaire

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAU	IX
Nomenclature	X
RESUME	XII
الملخص	XIV

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I.....	1
Généralités sur la géothermie.....	1
I.1. Introduction.....	2
I.2. Histoire de la géothermie.....	2
I.3. Définition de la géothermie.....	3
I.4. Gradient géothermique.....	3
I.5. Type de systèmes géothermiques.....	4
I.5.L'utilisation de l'énergie géothermique.....	4
I.6.Les avantages de la géothermie.....	5
I.7.Les inconvénients de la géothermie.....	5
I.8.La géothermie dans l'Algérie.....	5
I.8.1. La géothermie en Algérie.....	5
I.8.2 Les zones géothermiques En Algérie.....	6
I.8.3. Classification des ressources géothermiques.....	6
CHAPITRE II.....	8
Utilisation des échangeurs géothermaux à eau pour améliorer le fonctionnement des pompes à chaleur.....	8
II.1. Introduction.....	10
II.2.Pompe à chaleur géothermique.....	10
II.1.1. Définition.....	11
II .1.3. Composants d'un PAC.....	11

# Sommaire

---

II .1.4. Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur.....	11
II .1.5. Fonctionnement .....	12
II.1.7. Principe thermodynamique .....	13
II .2. Formes d'échangeur de chaleur .....	14
II.2.1. Echangeur Vertical .....	14
II.2.2. Echangeur Serpentins .....	14
II.2.3. Echangeur Spiral.....	15
II.2.4. Echangeur Horizontal .....	16
II.3. Raccordement d'une pompe à chaleur à l'échangeur de chaleur .....	17
II.3.1. Mode de fonctionnement Hivernal (Chauffage).....	17
II.3.2. Mode de fonctionnement Estival (Rafrâchissement).....	17
II.4. Raccordement d'une machine à absorption à l'échangeur de chaleur .....	18
II.4.1. Définition et historique machine à absorption .....	18
II.4.2. Eléments d'une machine à absorption .....	19
II.4.3. Fonctionnement général.....	21
CHAPITRE III .....	25
Modélisation mathématique : dimensionnement thermique d'un échangeur géothermal eau/sol.....	25
III.1. Système étudié.....	23
III.2. Calcul et dimensionnement thermique .....	24
III.2.1. Hypothèses de calcul .....	24
CHAPITRE IV .....	26
Résultats et discussion.....	26
IV.1. Validation.....	27
IV.2. Influence du diamètre du tube sur les pertes de charge totale.....	28
IV.3. Influence du diamètre du tube sur la température de sortie de l'eau.....	29
Conclusion générale .....	30
Références .....	31

## **LISTE DES FIGURES**

---

### **LISTE DES FIGURES**

Figure I.1 : Un système de systèmes géothermiques ouverts et fermés.	4
Figure.I.2. Géothermie à haute énergie.	7
Figure.I.3. Géothermie à basse énergie.	8
Figure. I.4.géothermie à très basse énergie.	8
Figure.II.1. Fonctionnement d'une pompe à chaleur.	10
Figure II.2. Diagramme P-H d'un fluide frigorigène.	12
Figure.II.3. Principe de fonctionnement d'une PAC.	13
Figure.II.4. Schéma de principe d'une machine thermodynamique.	13
Figure.II.5. Echangeur vertical.	14
Figure.II.6. Echangeur Serpentins.	15
Figure.II.7. Echangeur spiral.	16
Figure.II.8. Echangeur horizontal.	17
Figure.II.9. Exemple de dimensionnement en mode chauffage.	17
Figure.II.10. Exemple de dimensionnement en mode rafraîchissement.	18
Figure II.11. Principe de fonctionnement de condenseur.	19
Figure II.12. Principe de travail de l'évaporateur.	19
Figure.II.13. L'absorbeur.	20
Figure.II.14. Le bouilleur.	21
Figure.II.15. Schéma d'une machine à absorption simple étage.	22
Figure III.1. Schéma d'un Chiller fonctionne avec WEHE comme refroidisseur supplémentaire.	23
Figure III.2. Schéma du problème étudié.	24
Figure IV.1. Comparaison entre la présente méthode calcul avec l'étude expérimentale de Moummi et al.	27

## **LISTE DES FIGURES**

---

- Figure IV.2. Influence du diamètre du tube sur les pertes de charge totale pour différentes longueurs de l'échangeur eau-sol 28
- Figure IV.3. Influence du diamètre du tube sur la température de sortie de l'eau pour différentes longueurs de l'échangeur eau-sol 29

## **LISTE DES TABLEAU**

---

### **LISTE DES TABLEAU**

Tableau I.1: Caractéristiques de quelques sources thermique du Nord de l'Algérie.	6
Tableau I.2 : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol.	9
Tableau III.1. Caracteristiques de l'échangeur eau-sol proposé.	23
Tableau IV.1. Caractéristiques spécifiques de l'échangeur air-sol de Mehdid et al.	27
Tableau IV.2. Principales caractéristiques de l'échangeur eau-sol et de la tour de refroidissement.	29

## Nomenclature

---

### Nomenclature

Symboles	Définitions	Unités
R	Rayon	M
A	Dimension de l'ailette en m	M
Cp	Chaleur massique	J/Kg K
D	Diamètre	M
H	Coefficient d'échange de chaleur par convection	W/m <sup>2</sup> K
L	Longueur m la Longueur	M
P	Pression	Pa
S	Surface par unité de longueur	m <sup>2</sup> /m
T	Température	°C
T0	Température initiale du sol	°C
T	Temps	S
V	Volume	m <sup>3</sup>
V	Vitesse	m/s
R	Résistance thermique	m <sup>2</sup> K/W

Symbole	Définition	Unité
<b>Grecque</b>		
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/m K]
$\mu$	Viscosité dynamique	[Pas.s]
$\eta$	Rendement du condenseur	-
$\rho$	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\xi$	Efficacité	-
$\Delta$	Ecart	-
$\beta$	Coefficient de dilatation du fluide	(1/T) K-1
$\varphi$	Puissance échangée	W
$\delta$	Epaisseur	M

## Nomenclature

---

$\alpha$	Diffusivité thermique	$m^2/s$
<b>Indices</b>	<b>Définitions</b>	
c	Condensation	
S	Sortie	
m	Moyenne	
t	Tube	
ex	Extérieur tot Total	
th	Thermique	
sol	Sol	
<b>Nombres adimensionnels</b>		
Nu	Nombre de Nusselt	
Pr	Nombre de Prandlt	
Re	Nombre de Reynods	

## Résumé

---

### RESUME :

Le dysfonctionnement des échangeurs de chaleur refroidis par l'air ambiant est très courant dans les zones chaudes, en particulier pendant les vagues de chaleur estivales. Ces échangeurs de chaleur sont souvent des tours de refroidissement sèches et des condensateurs de machines frigorifiques. Pour surmonter ce problème on propose dans cette étude d'utiliser un échangeur géothermal eau/sol. L'objectif du présent mémoire est de modéliser le comportement thermique d'un échangeur géothermal eau/sol en utilisant un modèle analytique développé auparavant à l'université de Biskra. L'échangeur géothermique étudié est un serpentin horizontal de 3m de profondeur. L'exemple d'application traité est un couplage d'un refroidisseur à adsorption (Chiller) avec un échangeur géothermal eau/sol utilisé comme refroidisseur supplémentaire. L'environnement Matlab est utilisé pour implémenter le modèle analytique décrivant ainsi numériquement le comportement thermique de l'échangeur à travers une étude paramétrique.

**Mots-clés:** Échangeur de chaleur, modèle analytique, géothermie, eau/sol

### الملخص:

يعد خلل المبادلات الحرارية المبردة بالهواء شائعاً جداً في المناطق الحارة، خاصة أثناء موجات الحرارة الصيفية. غالباً ما تكون هذه المبادلات الحرارية أبراج تبريد جافة أو مكثفات خاصة بآلات التبريد. للتغلب على هذه المشكلة، نقترح في هذه الدراسة استخدام مبادل حراري ماء/تربة. الهدف من هذه المذكرة هو نمذجة السلوك الحراري لمبادل حراري أرضي ماء/تربة وذلك باستخدام نموذج تحليلي تم تطويره مسبقاً في جامعة بسكرة. المبادل الحراري الأرضي الذي تمت دراسته عبارة عن أنبوب لف أفقياً بعمق 3 أمتار مربوط مع مبرد يعمل بالإمتزاز (Chiler) أين يستخدم المبادل الجيوحراري كمبرد إضافي لألة التبريد. تم استخدام Matlab لتجسيد النموذج التحليلي وبالتالي التوصل لمحاكاة السلوك الحراري للمبادل.

**الكلمات المفتاحية:** مبادل جيوحراري، نموذج تحليلي، نظام جيوحراري، ماء/تربة

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

En raison de l'exploitation irrationnelle des ressources naturelles, la consommation d'énergie dans le monde a considérablement augmenté, au cours des dernières décennies, au détriment de l'environnement. Pour répondre à ces défis énergétiques, plusieurs techniques de chauffage et de production de froid utilisant les énergies alternatives peuvent être mises en œuvre. La géothermie est l'une des énergies renouvelables qui désigne l'énergie calorifique stockée dans le sous-sol, dans la mesure où l'énergie primaire est principalement consommée sous forme de chaleur et provenant du sous-sol. Le principe du système consiste à injecter dans un habitat par exemple, un flux d'eau provenant de l'extérieur que l'on force au préalable à circuler dans une canalisation enterrée à une profondeur dans le sol.

La présente étude porte sur le refroidissement par la géothermie qui n'est pas encore été exploité dans notre pays. La température du sol influe principalement sur les performances d'un échangeur eau/sol du fait que le sol, à une certaine profondeur devient le facteur primordial pour les échanges thermiques entre l'eau qui circule à l'intérieur de l'échangeur et le milieu qui l'entoure. Ainsi, l'objectif du présent mémoire est de modéliser le comportement thermique d'un échangeur géothermal eau/sol en utilisant un modèle analytique développé auparavant au sein du laboratoire LGEM. L'échangeur géothermique étudié est un tube de forme serpentine installé sur un plan horizontal de 3m de profondeur. L'environnement Matlab est utilisé pour implémenter le modèle analytique pour pouvoir décrire numériquement le comportement thermique de l'échangeur à travers une étude paramétrique.

Le présent travail est subdivisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre est présenté des généralités sur la géothermie. Le deuxième chapitre concerne l'utilisation de l'échangeur géothermal à eau pour l'amélioration de fonctionnement de pompe à chaleur.

Dans le troisième chapitre est présenté le système étudié où on a exposé d'une façon détaillée les équations mathématiques formant le modèle analytique utilisé pour le calcul des performances thermiques au sein d'un échangeur eau-sol.

Dans le quatrième chapitre présente une étude paramétrique après la validation du code de calcul Matlab avec des résultats expérimentaux sur un échangeur géothermal air-sol.

Enfin nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui contient une synthèse des principaux résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur la géothermie**

## **I.1. Introduction**

L'énergie géothermique est l'énergie extraite à partir de la chaleur de la terre pour produire de l'électricité ou fournir directement de la chaleur. C'est une énergie écologique, renouvelable, économique et surtout sans risques pour la santé humaine. Des raisons qui ont permis aux diverses applications géothermiques, notamment le chauffage et la climatisation, de connaître un développement rapide dans de nombreux pays. Cependant, de telles applications restent méconnues en Algérie et bien d'autres pays qui comptent un riche potentiel géothermique. La production de chaleur ou de froid d'origine géothermique consiste à récupérer la chaleur thermique de l'eau ou du sol, afin de l'utiliser dans une grande variété d'applications résidentielles, industrielles et commerciales.

## **I.2. Histoire de la géothermie**

L'énergie géothermique est l'énergie thermique dans la croûte terrestre : énergie thermique dans la roche et les fluides (eau, vapeur ou eau contenant de grandes quantités de solides dissous) qui remplit les pores et se fracture dans la roche, le sable et le gravier. Les calculs montrent que la Terre, provenant d'un état complètement fondu, se serait refroidie et serait devenue complètement solide il y a plusieurs milliers d'années sans un apport d'énergie supérieur à celui du soleil. On croit que la source ultime d'énergie géothermique est la désintégration radioactive dans la Terre. Par le mouvement des plaques et le volcanisme, une partie de cette énergie est concentrée à haute température près de la surface de la terre. L'énergie est également transférée des parties les plus profondes de la croûte à la surface de la Terre par conduction et par convection dans les régions où les conditions géologiques et la présence d'eau le permettent. En raison de la variation de l'activité volcanique, de la désintégration radioactive, de la conductivité des roches et de la circulation des fluides, différentes régions ont des flux de chaleur différents (de la croûte à la surface), ainsi que des températures différentes à une profondeur donnée. L'augmentation normale de la température avec la profondeur (c'est-à-dire le gradient géothermique normal) est d'environ 24 K / km de profondeur, les gradients allant de 9 à 48 K / km étant courants. Les zones présentant des gradients de température et / ou des débits thermiques supérieurs à la moyenne constituent les ressources économiques les plus intéressantes et les plus viables. Cependant, les zones à gradients normaux peuvent constituer des ressources précieuses si certaines caractéristiques géologiques sont présentées [1].

### **I.3. Définition de la géothermie**

La géothermie est une énergie renouvelable qui consiste à prélever la chaleur contenue dans le sol. Le but de la géothermie est d'assurer le confort thermique d'une habitation ou d'une construction en absorbant la chaleur inépuisable contenue dans le sol.

La géothermie permet de chauffer des habitations, des piscines et même de produire de l'eau chaude sanitaire. Elle sert aussi à rafraîchir ou à climatiser sa maison par simple inversion du système, avec le même appareil (« réversibilité »). La géothermie est l'un des rares modes de chauffage qui permette cette réversibilité.

La terre est chauffée à la fois par le soleil, l'air, le vent et l'eau de pluie. Le sol autour d'une maison constitue donc un réservoir qui reçoit en permanence de l'énergie sous forme de calories. Pour capter ces calories puis assurer le confort thermique d'une maison (chauffage, rafraîchissement) ou produire de l'eau chaude.

L'installation géothermique comporte trois éléments majeurs : des capteurs extérieurs, un générateur et un circuit de chauffage à l'intérieur de l'habitation.

La géothermie s'inscrit dans la famille des énergies renouvelables thermiques propres qui contribuent à préserver l'environnement. C'est donc une énergie d'avenir [2].

### **1.4. Gradient géothermique**

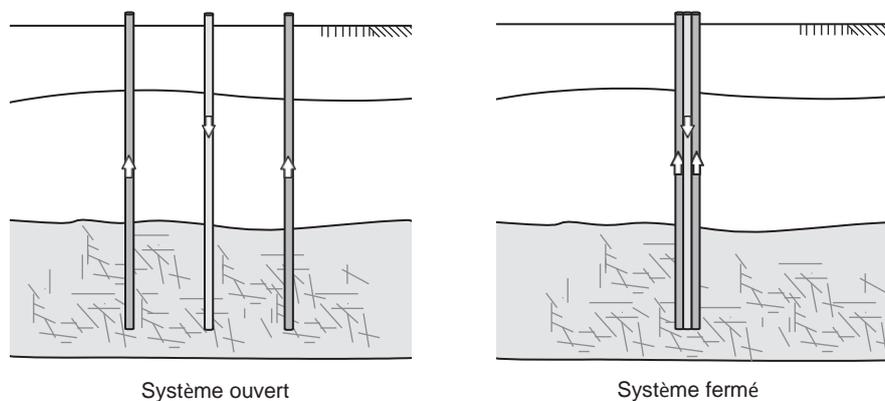
La température des roches augmente avec la profondeur; c'est ce qu'on appelle le gradient géothermique. Il varie selon les couches traversées. Les valeurs moyennes sont pour la croûte continentale  $3\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$  et pour le manteau  $1\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ . Le gradient géothermique observé dans la croûte continentale varie considérablement d'un endroit à l'autre, bien que la valeur normale de l'ordre de  $3\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ , néanmoins certaines régions enregistrent plus de  $100\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$  comme à Larderello en Italie, Tandis que d'autres ne dépassent pas  $1\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$  comme à Padoue. Le forage pétrolier le plus profond est la meilleure façon de tenir compte du gradient géothermique. Ce gradient est estimé pour chaque forage pétrolier à l'aide des températures de boue de forage.

Le Sahara algérien présente dans son ensemble un gradient géothermique moyen de l'ordre de  $4\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ . Dans la partie nord du Sahara, le gradient géothermique moyen est de  $3\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ ; cela semble être dû à l'effet de la profondeur. Une forte anomalie géothermique est bien démontrée au Sahara occidental dans les régions de Béchar, Beni Abbas et Timimoune. Le gradient est supérieur à  $6\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ , il est probablement dû à la tectonique intense vécue

par la partie occidentale de la plate-forme saharienne pendant l'orogénie hercynienne comme indiqué dans la référence [3].

### 1.5. Type de systèmes géothermiques

L'énergie géothermique peut être produite en perçant des trous profonds dans la croûte terrestre. Deux systèmes sont en service : ouvert et fermé. Dans le système ouvert, l'énergie est produite en pompant l'eau froide à travers un côté du réservoir; le faire circuler à travers la roche fracturée chaude; puis le ramasser de l'autre côté, pour être ramené à la surface. Dans le système fermé, l'énergie est produite à l'aide d'un seul forage où l'eau froide est pompée dans un chemin et retournée dans un autre, à l'aide du même tuyau. (La figure I.1 montre une représentation schématique de ces deux systèmes).



**Figure I.1** : Un système de systèmes géothermiques ouverts et fermés [4].

De nombreux systèmes géothermiques ont été développés, faisant usage des nombreux avantages de l'énergie géothermique. Ils sont généralement classés en deux catégories : les systèmes géothermiques profonds et les systèmes géothermiques peu profonds. Les systèmes géothermiques profonds sont principalement ceux qui vont aussi profondément que quelques kilomètres sous la surface et atteignent les aquifères hydrothermaux, les roches chaudes sèches ou le magma. Les projets de production d'électricité ou de production directe de chaleur sont classés dans cette catégorie. Les systèmes géothermiques peu profonds, d'autre part, sont ceux qui ne vont pas plus de 250 m sous la surface. La pompe à chaleur au sol (GHP) est classée dans cette catégorie [4].

#### I.5.L'utilisation de l'énergie géothermique

- 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 [1].

### **I.6. Les avantages de la géothermie**

- 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].

### **I.7. Les inconvénients de la géothermie**

- 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].

### **I.8. La géothermie dans l'Algérie**

#### **I.8.1. 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 Meni'a. [9]

### I.8.2 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 Nord algérien, majoritaires au Nord-est (Tableau 1). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Maskoutaine (98 °C) à Guelma, Hammam Bou Taleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Omanie, de la Kabylie et du Constantinois [6].

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

Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidus Secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H. Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H. Bou Hadjar	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. Sidi BouAbdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H. Delaa	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

### I.8.3. Classification des ressources géothermiques

#### I.8.3.1. La géothermie a haute énergie

(haute enthalpie, haute température, profonde),

- La profondeur : plus de 1500 mètres.
- La température : entre 80 °C et 300 °C
- L'objectif : Production d'électricité et de chaleur à la fois.
- Le moyen : une turbine à vapeur pour l'électricité et de récupération des condensats de vapeur pour la chaleur, Comme nous le notons sur l'image Fig.I.1 [8].

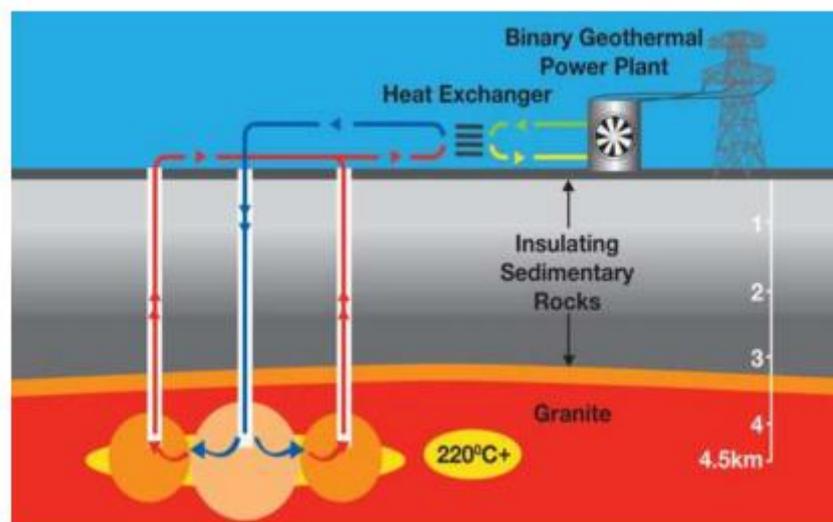


Figure.I.2.Géothermie à haute énergie [7].

### I.8.3.2. La géothermie à basse énergie

- La profondeur : 1500 et 2500 mètres.
- La température : entre 30 °C et 100 °C.
- L'objectif : le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur et certaines applications industrielles.
- Le moyen : Pompe à chaleur sur une nappe phréatique, afin de prélever et transférer de l'énergie contenue dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer ou climatiser, Comme nous le notons sur l'image Fig.I.2 [8].

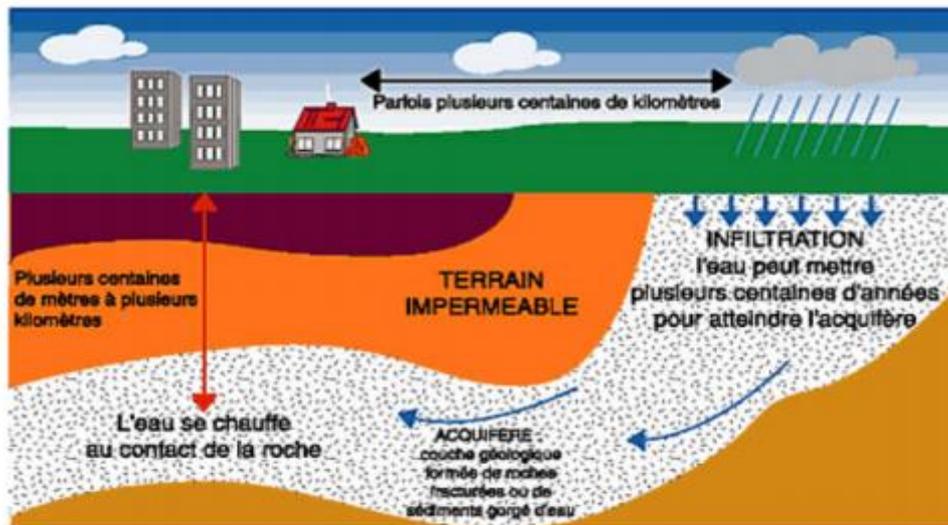


Figure.I.3.Géothermie à basse énergie [7].

### I.8.3.3. La géothermie à très basse énergie

- La profondeur : centaines mètres.
- La température : entre 10 et 30°C.
- L'objectif : la climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal et le chauffage et la climatisation.
- Le moyen : pompe à chaleur géothermique prélevant la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique, Comme nous le notons sur l'image Fig.I.3 [8].

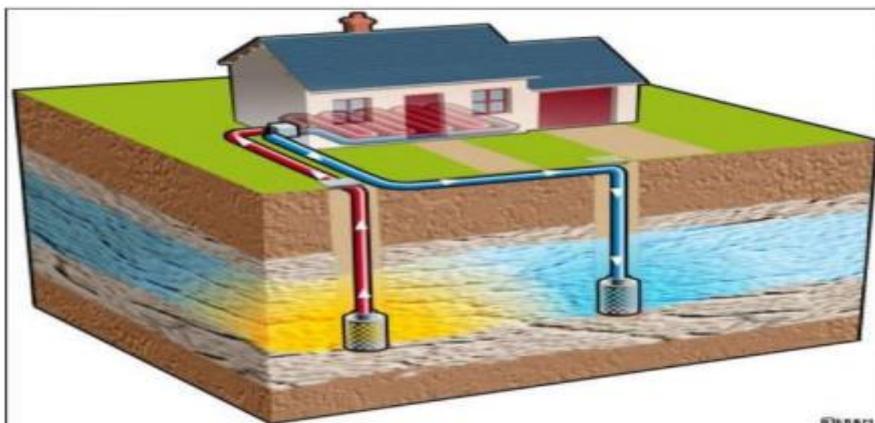


Figure. I.4.géothermie à très basse énergie [7].

### I.8.3.4. Selon la nature du sol

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 [7].

### I.8.3.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules ainsi que de sa teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide [7].

### I.8.3.6. Capacité calorifique du sol

La capacité calorifique d'un sol s'exprime par la moyenne pondérée des capacités calorifiques de ses constituants : minéraux, matière organique, eau, air [7].

**Tableau I.2** : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol

<b>Matière</b>	<b><math>\rho(kg/m^3)</math></b>	<b><math>C(kj/k.kg)</math></b>	<b><math>\lambda(w/k.m)</math></b>
<b>Minéraux (moy)</b>	2650	0.80	2.90
<b>Sable et Gravier</b>	1700 à 2200	0.91 à 1.18	2.00
<b>Argile et Limon</b>	1200 à 1880	1.67 à 2.50	1.50
<b>Matière organique</b>	1300	1.90	0.25

# **CHAPITRE II**

**Utilisation des échangeurs géothermaux à  
eau pour améliorer le fonctionnement des  
pompes à chaleur**

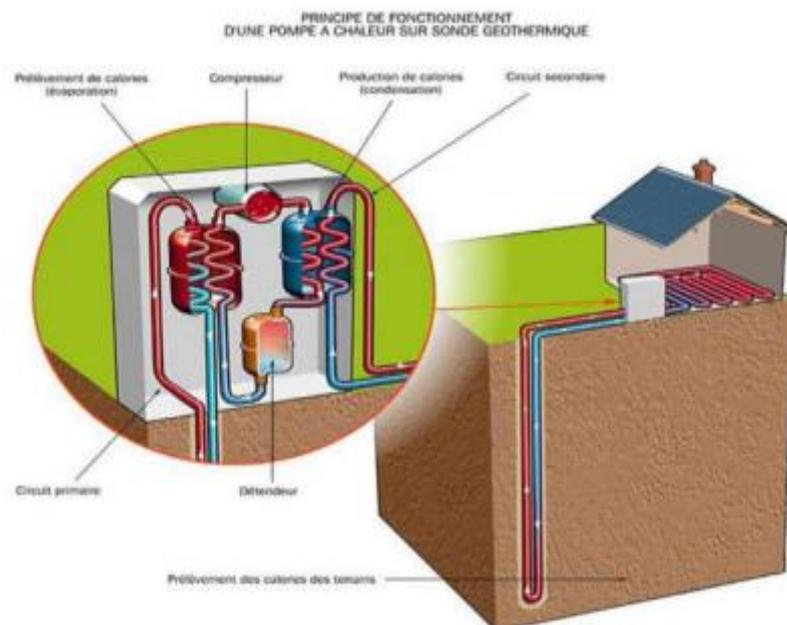
## II.1. Introduction

Ce chapitre présente quelques concepts généraux et définitions de la chaleur géothermique d'une part. D'autre part, nous montrons des généralités sur l'échangeur eau-sol, certains types d'échangeurs de chaleur, le principe de leur fonctionnement et leurs propriétés

## II.2. Pompe à chaleur géothermique

Le rayonnement du soleil et les conditions climatiques ont une influence sur la température terrestre des premiers mètres du sous-sol. Le sol et l'eau dont il est gorgé sont donc chauffés. Ce n'est pas très chaud, mais c'est suffisant pour pouvoir chauffer une maison... à condition d'installer une pompe à chaleur géothermique. Il s'agit d'un équipement qui fonctionne exactement comme le réfrigérateur qui trône dans ta cuisine, mais à l'envers. La pompe à chaleur géothermique, elle, capte la chaleur du sol pour la ramener à l'intérieur des bâtiments. Cependant, pour bien fonctionner tout au long de l'année, il faut qu'elle soit installée dans une zone où la température du sous-sol est stable (c'est-à-dire qu'elle reste la même tout au long de l'année).

Au final, le bilan reste intéressant car même si elle nécessite un peu d'électricité pour fonctionner, la pompe à chaleur géothermique peut fournir jusqu'à 60 % des besoins en énergie pour chauffer une maison. Fig.II.1. Fonctionnement d'une pompe à chaleur [10].



**Figure.II.1.** Fonctionnement d'une pompe à chaleur [10].

### **II.1.1. 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 [11].

### **II .1.3. Composants d'un PAC**

#### **II .1.3.1. Évaporateur**

La surface froide en pendant une part de sa chaleur cède une certaine quantité d'énergie a 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.

#### **II .1.3.2. 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 a la température de la pièce (supposée élevée).

#### **II .1.3.3. Condenseur**

Un condenseur capte cette chaleur pour la transmettre a l'air ambiant (ou l'eau pour les PAC a émetteurs a eau ou pour la production d'eau chaude sanitaire).

#### **II .1.3.4. 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 [16].

### **II .1.4. Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur**

Le diagramme de Mollier permet de visualiser le cycle complet en fonction du fluide frigorigène utilisé par la pompe à chaleur. L'ensemble du cycle peut être représenté dans le diagramme enthalpie-pression (voir Figure II.2). Sous la courbe en cloche se situent les états de mélange liquide-vapeur :

- à gauche des points 5-6, le fluide est à l'état liquide;
- à droite des points 1-4, le fluide est à l'état vapeur;

• à l'intérieur de la cloche, le fluide frigorigène est dans un mélange d'états (liquide gazeux). Le diagramme de Mollier permet également de mesurer le rendement d'une pompe à chaleur.

- Point 2-3 : puissance absorbée par le compresseur.
- Point 7-2 : puissance frigorifique.
- Point 3-6 : puissance de chauffage [15].

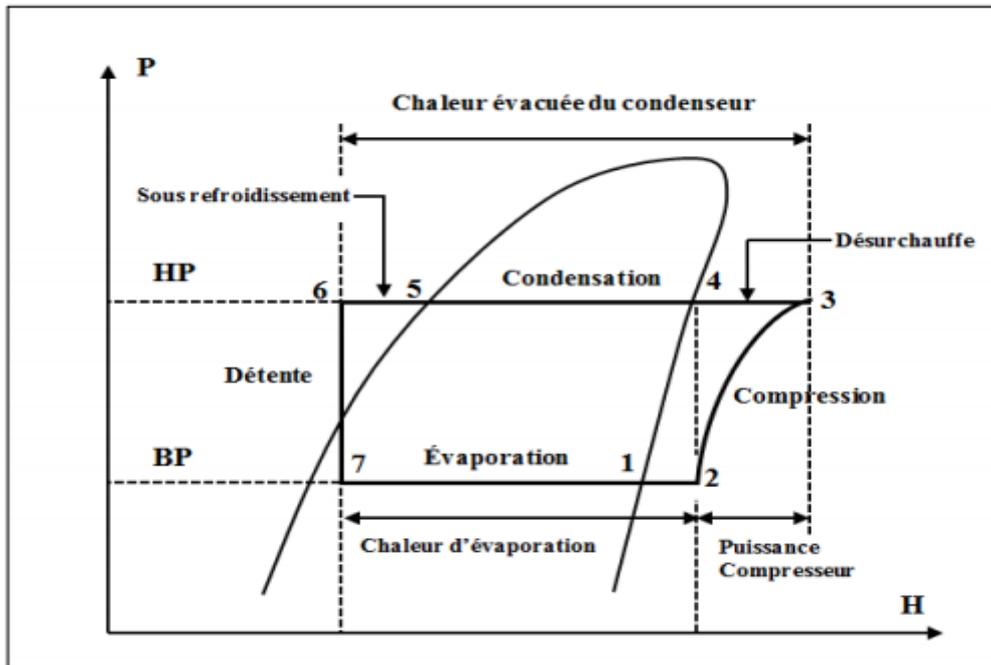
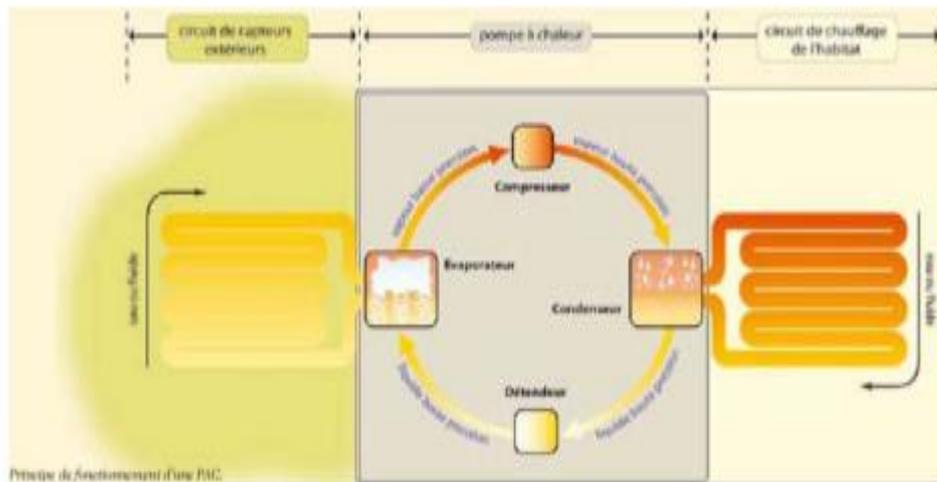


Figure II.2. Diagramme P-H d'un fluide frigorigène [15].

### II .1.5. Fonctionnement

De gauche à droite sur le schéma (Fig.II.3):

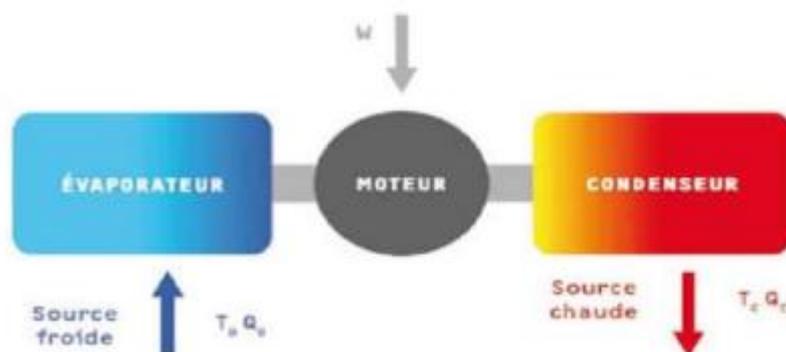
- La chaleur prélevée dans le milieu naturel est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur.
- Le fluide change d'état et se transforme en vapeur.
- Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température.
- Au niveau du condenseur, la vapeur, en se condensant, transmet 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 [11].



**Figure.II.3.**Principe de fonctionnement d'une PAC [11].

### II.1.7. Principe thermodynamique

Le principe de la pompe à chaleur (PAC) est connu depuis longtemps, si l'on prend pour origine l'énoncé des principes de la thermodynamique par Carnot(1824), qui a établi l'équivalence du travail et de la chaleur. 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), Comme nous le notons sur l'image Fig.II.4 [12].

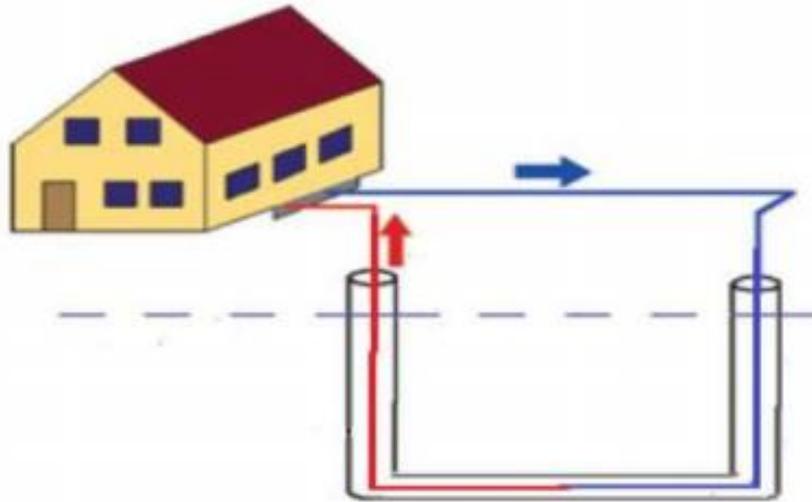


**Figure.II.4.**Schéma de principe d'une machine thermodynamique [12].

## II .2. Formes d'échangeur de chaleur

### II.2.1. Echangeur Vertical

Les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment. La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau glycosée. L'emprise au sol est minimale par rapport aux capteurs horizontaux, Comme nous le notons sur l'image Fig.II.5 [13].



**Figure.II.5.**Echangeur vertical [13].

### II.2.2. Echangeur Serpentins

Les nappes de tubes (serpentins) sont enterrées sur un plan horizontal jusqu'à une profondeur maximale de 3 m dans le sol et en soutirent ou ajoutent de la chaleur. Comme les nappes de tubes ne sont normalement disposées qu'à une profondeur de 0,5 à 3 m, le climat joue un rôle pour ce genre d'exploitation de la chaleur. Dans ce cas précis, le sol sert d'accumulateur d'énergie solaire, l'énergie géothermique proprement dite ne revêt alors qu'un rôle secondaire. Selon l'altitude topographique, les nappes de tubes permettent de retirer 20 à 30 W.m<sup>-2</sup> d'énergie thermique, Comme nous le notons sur l'image Fig.II.6 [13].



**Figure.II.6.**Echangeur Serpentins [13].

### II.2.3. Echangeur Spiral

L'échangeur de chaleur à spirale est constitué de 2 canaux concentriques formés par deux plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale. La distance entre les deux canaux est obtenue à l'aide de taquets soudés sur les plaques et tient compte des débits, de la taille des particules pour les fluides chargés et des pertes de charge. Ces taquets ont également pour effet de favoriser un écoulement turbulent dans chaque canal et d'améliorer ainsi le coefficient d'échange. L'échangeur peut être utilisé pour des transferts monophasiques (essentiellement liquide/liquide) ou avec changement de phase dans l'écoulement. Pour des applications monophasiques les fluides circulent généralement à contre-courant. Utilisé en mode bi phasique (condenseur ou évaporateur), la vapeur (ou le fluide à évaporer) s'écoule dans un canal complètement ouvert et le fluide réfrigérant dans un canal en spirale fermée. Ce type de système est utilisé dans des applications de chauffage/refroidissement. La conception de ces échangeurs leur donne la particularité intéressante d'être « autonettoyant ». En effet contrairement à des échangeurs qui distribuent le fluide dans des multiples canaux, la totalité du fluide s'écoule ici dans le canal de l'échangeur spiralé, sans zone morte. Si celui-ci s'encrasse, le fluide n'a pas d'autre chemin possible. Sa vitesse du fluide augmente alors sous l'effet de la pression et le fluide entre en turbulence, ce qui aide à éliminer les dépôts et à garder les surfaces propres sous l'effet des frottements. Outre les gains liés à une maintenance réduite, ce phénomène permet également de limiter la dégradation du coefficient d'échange liée à la résistance de la couche de dépôt, Comme nous le notons sur l'image Fig.II.7 [13].



**Figure.II.7.**Echangeur spiral [13].

## **II.2.4. Echangeur Horizontal**

### **II.2.4.1. Principes**

Un système géothermique à boucle horizontale, tel que schématisé à la Figure II.8, utilise typiquement un échangeur à tube simple en polyéthylène. La tuyauterie se trouve à des faibles profondeurs sous la surface du sol de l'ordre de 1 à 2 m. La densité de puissance thermique récupérée aux alentours de cette profondeur peut aller de 15 à 20 Watts par mètre linéaire de tube installé (Moch, 2013). La porthe (2004) suggère quelques recommandations pour bien mener son installation de réseau géothermique horizontal. En effet, la tuyauterie doit être loin de deux mètres des arbres, 1,5 m des réseaux enterrés non hydrauliques et 3 mètres des fondations et des fosses.

Le flux géothermique est négligeable sur une faible profondeur de la surface du sol, donc c'est l'énergie du soleil et les infiltrations de pluie qui alimente ce type de système. Par ailleurs, le terrain de l'installation doit être exposé totalement aux rayonnements solaires.

La surface de captation horizontale devrait être importante, typiquement c'est environ deux à trois fois la surface de l'espace à chauffer. L'E.M.R (1989) recommande une longueur de tuyau de 45 à 55 mètres par kilowatt de capacité de la pompe à chaleur utilisée. Les systèmes à échangeur horizontal ne sont pas coûteux. Mais ils sont moins efficaces que les capteurs verticaux, qui se distinguent par un coût d'installation initial relativement élevé [14].



Figure.II.8.échangeur horizontal [13].

### II.3. Raccordement d'une pompe à chaleur à l'échangeur de chaleur

#### II.3.1. Mode de fonctionnement Hivernal (Chauffage)

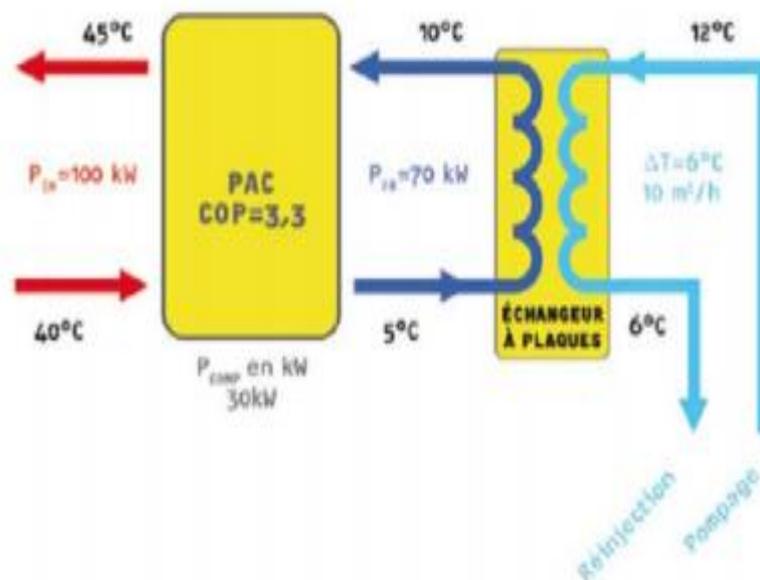


Figure.II.9. Exemple de dimensionnement en mode chauffage [11].

#### II.3.2. Mode de fonctionnement Estival (Rafrâichissement)

Pour ce mode de fonctionnement, la PAC prélève de la chaleur dans le local et la réinjecte dans la nappe. Il est nécessaire de prendre en compte les exigences réglementaires relatives à la limitation de la température de rejet et de l'écart de température prélèvement / rejet, Comme nous le notons sur l'image Fig.II.10 [11].

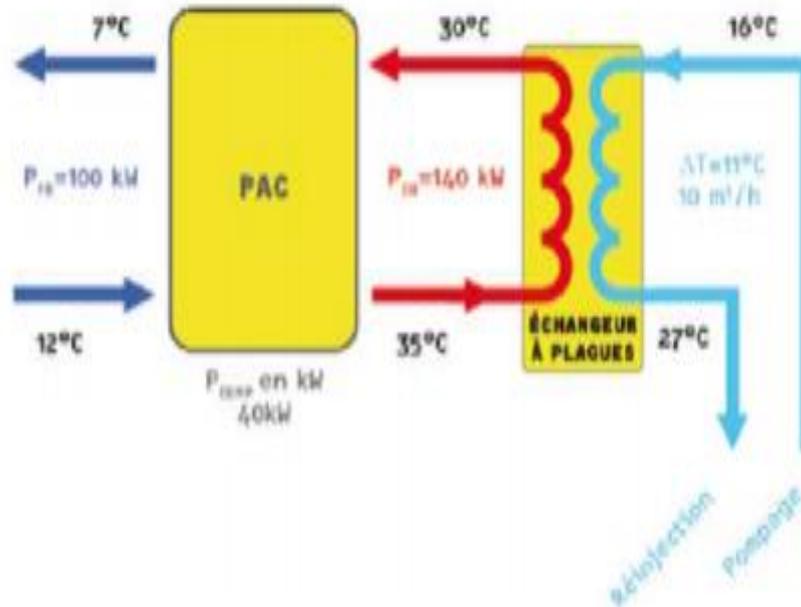


Figure.II.10.Exemple de dimensionnement en mode rafraîchissement [11].

## II.4. Raccordement d'une machine à absorption à l'échangeur de chaleur

### II.4.1. Définition et historique machine à absorption

La réfrigération par sorption est la méthode dominante pour produire du froid en utilisant une source de chaleur. «L'absorption est le procédé dans lequel une substance en une phase est incorporée dans une deuxième en une phase différente, par exemple un gaz étant absorbé par un liquide. L'adsorption réfère à l'utilisation d'un solide pour adhérer ou coller des ions et molécules d'une autre substance sur sa surface » (Deng et al. 2011). Ces procédés sont utilisés pour effectuer une compression thermique plutôt que mécanique du réfrigérant. Les principales différences entre les deux méthodes sont à rechercher dans la nature des sorbants et la durée des cycles. L'absorption est de manière générale exothermique alors que la désorption est endothermique nécessitant donc un apport d'énergie. Cet apport provient du rejet thermique.

En 1859, Ferdinand Carré introduisit la première machine à absorption utilisant de l'eau et de l'ammoniac. Des machines basées sur son brevet furent utilisées pour faire de la glace et stocker de la nourriture. Aujourd'hui seulement 2% des pompes à chaleurs installées en industrie sont des machines à absorption [17].

## II.4.2. Eléments d'une machine à absorption

### II.4.2.1. Condenseur

Composant analogue à celui des machines à compression de vapeur. C'est la température  $T_0$  du fluide. Le caloporteur alimentant le condenseur qui fixe la température de condensation et donc la pression dans l'ensemble désorbeur/condenseur.

La condensation du frigorigène nécessite le rejet de la chaleur de condensation  $C_{\text{ondo}}$  au fluide caloporteur à la température  $T_0$  [18].

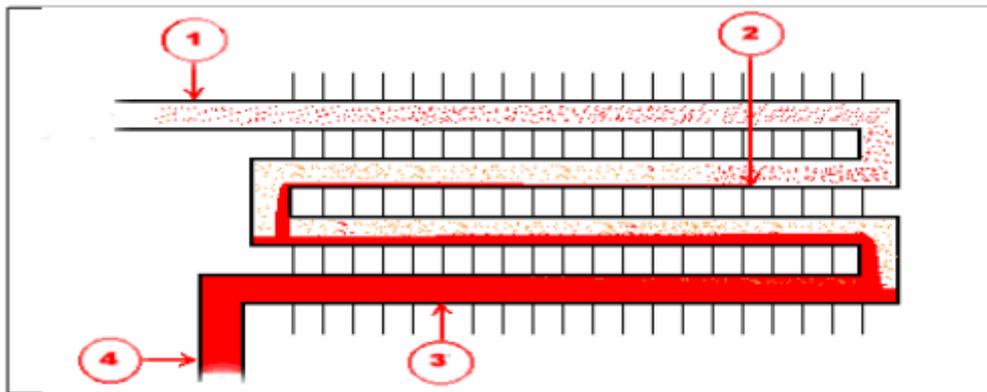


Figure II.11. Principe de fonctionnement de condenseur [18].

### II.4.2.2. Evaporateur

A la sortie du condenseur (point 1), le liquide subit un laminage à travers le détendeur (point 2), puis s'évapore en prenant la chaleur  $Q_{\text{evap}}$  à la température  $T_b$  du fluide ou l'enceinte à refroidir. La température d'évaporation, et par suite la pression dans l'ensemble évaporateur/absorbeur sont fixées par la température de la source froide  $T_b$  [18].

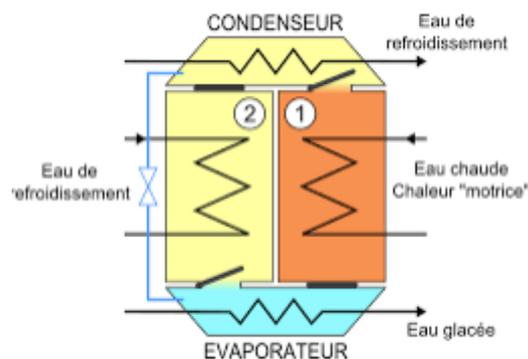


Figure II.12. Principe de travail de l'évaporateur [18].

### II.4.2.3. Absorbeur

La vapeur issue de l'évaporateur (point 3) y rencontre la solution appauvrie provenant du désorbeur (point 8), Elle se dissout dans cette solution, provoquant par cette transformation exothermique, un rejet d'une quantité de chaleur qui sera évacuée par un fluide caloporteur à la température  $T_0$ , En sortie d'absorbeur (point 4), on obtient ainsi une solution enrichie en frigorigène. Ce composant effectue donc une opération de mélangeage [18].

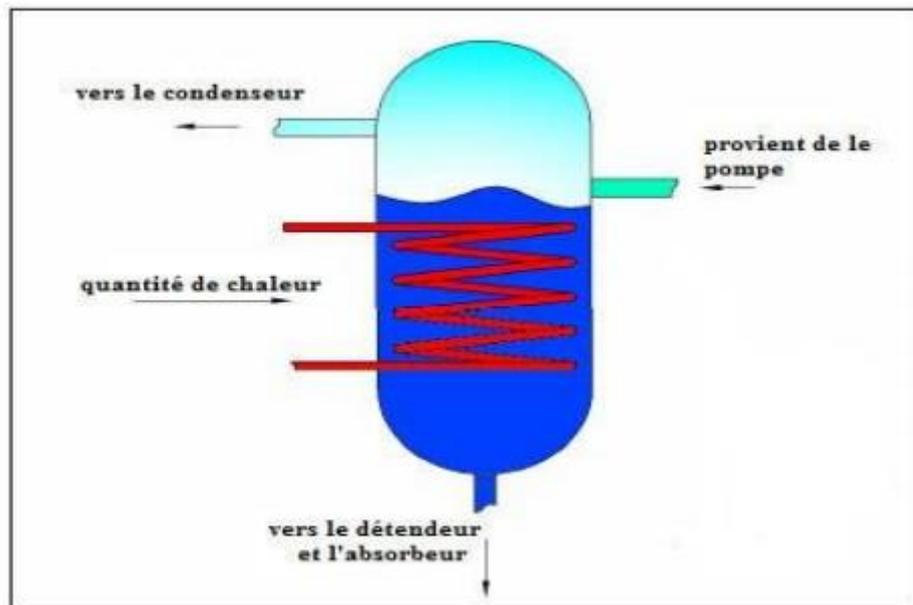


Figure.II.13. L'absorbeur [18].

### II.4.2.4. Bouilleur ou désorbeur :

La solution riche en frigorigène (point 5) y reçoit la quantité de Chaleur  $Q$  des à une température  $T_h$  ce qui provoque la vaporisation d'une partie du frigorigène dissous dans la solution. On parle alors de désorption. En sortie du désorbeur, on obtient donc de la vapeur de frigorigène (point 7) et une solution appauvrie en frigorigène (point 6). Cet organe effectue donc une séparation [18].

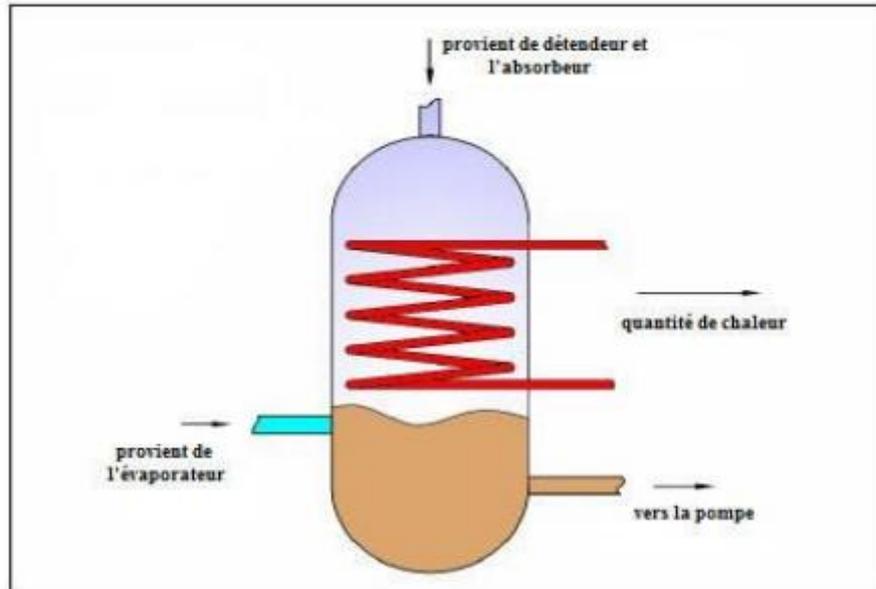


Figure.II.14. Le bouilleur [18].

### II.4.3. Fonctionnement général

Les machines à absorption sont activées thermiquement et sont composées d'une partie motrice et d'une partie réfrigérant. La partie réfrigérant est composée d'un évaporateur, d'un condenseur et d'un détendeur dans lesquels circule le fluide frigorigène afin de produire un effet frigorifique tout comme dans une machine à compression. La partie motrice est composée d'un absorbeur, d'un désorbeur ainsi que d'une pompe et d'un détendeur. Ces composants ont pour but de comprimer la vapeur d'ammoniac basse pression sortant de l'évaporateur avant qu'elle ne retourne dans le condenseur. Une compression mécanique du réfrigérant à l'état gazeux n'est donc plus nécessaire dans ce cycle de réfrigération. La pompe, ne compressant plus qu'un liquide, nécessite bien moins d'énergie, car cette compression est moins génératrice d'entropie [19].

La machine à absorption principalement étudiée dans ce rapport est dans une de ses architectures les plus simples, sous forme d'une machine mono étagée qui sera nommée machine traditionnelle, voir (Figure.II.15.).

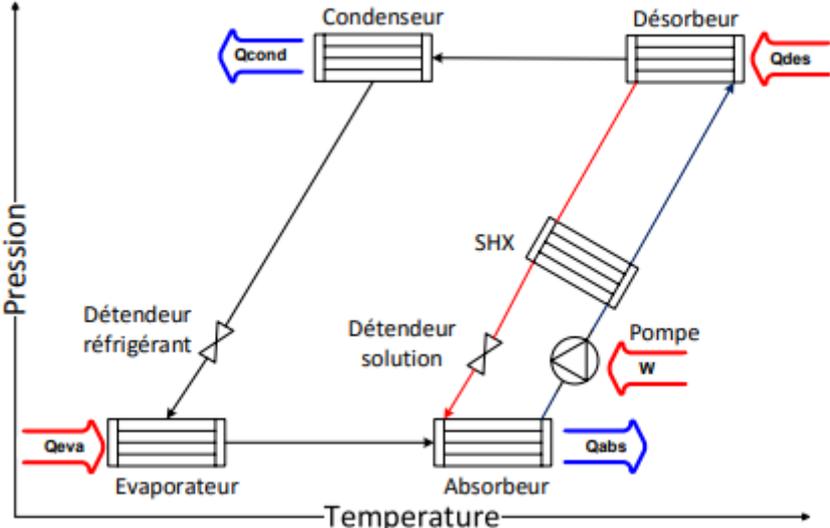


Figure.II.15.Schéma d'une machine à absorption simple étage [19].

# **CHAPITRE III**

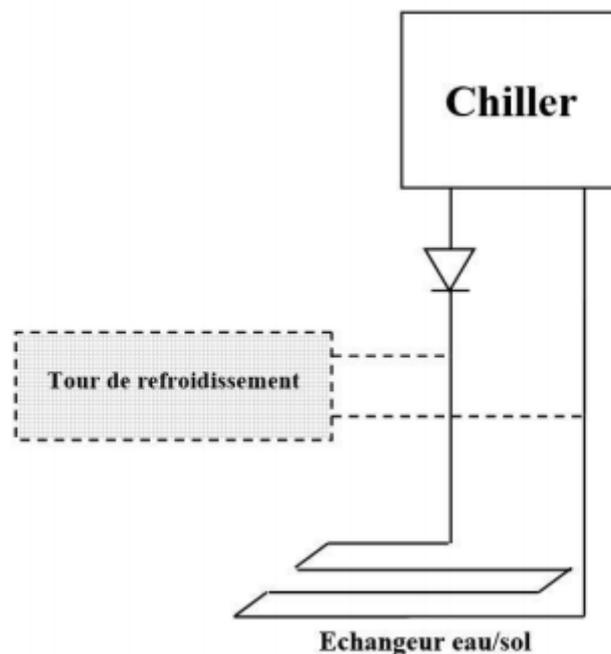
**Modélisation mathématique :  
dimensionnement thermique d'un  
échangeur géothermal eau/sol**

### III.1. Système étudié

Dans ce chapitre nous proposons l'exploitation de la géothermie peu profonde en utilisant un échangeur géothermal eau/sol enterré à une profondeur de 3 m dans le sol (cette profondeur a été déterminée précédemment dans la région de Biskra par Moummi et al. [20]). Cet échangeur remplace temporairement la tour de refroidissement dans le cas où la température ambiante dépasse les températures limites de fonctionnement de la tour (voir la figure III.1). Le tableau III.1 illustre les principales caractéristiques de cet échangeur.

Tableau III.1. Caractéristiques de l'échangeur eau-sol proposé.

Fluide	Ethylene glycol 34 Vol. %
Matériau du tube	HDPE
conductivité thermique du tube [W/mK]	0,46 [118]
Profondeur d'enfouissement [m]	3



**Figure III.1.** Schéma d'un Chiller fonctionne avec un échangeur géothermal eau/sol comme refroidisseur supplémentaire.

## III.2. Calcul et dimensionnement thermique

### III.2.1. Hypothèses de calcul

- L'échangeur eau-sol fonctionne seulement durant les pics de températures caniculaires.
- Le régime est stationnaire.
- le sol autour du tube enterré est homogène.
- La conductivité thermique du sol est constante.
- Les propriétés thermo-physiques de l'eau sont calculées à partir des corrélations trouvées dans la littérature. Le bilan énergétique entre deux sections distantes de  $dx$  (figure 5.3) s'écrit comme suit [21]:

$$mCP(T(x) - T(x + dx)) = -\frac{(T(x)-T_{sol})}{R_{th}}dx \quad \text{Eq. 1}$$

Où  $R_{th}$  est la résistance thermique totale entre l'eau, le tube et le sol autour de l'échangeur géothermal, elle peut être exprimée par la relation suivante [22]:

$$R_{th} = R_c + R_t + R_{sol} \quad \text{Eq. 2}$$

La résistance thermique  $R_c$  dû au transfert convectif entre l'eau dans le tube et la surface intérieure du tube est calculée comme suit:

$$R_c = \frac{1}{h_i p_i} \quad \text{Eq. 3}$$

Où

$$h_i = Nu \cdot \lambda_{eau}/d_i \quad \text{Eq. 4}$$

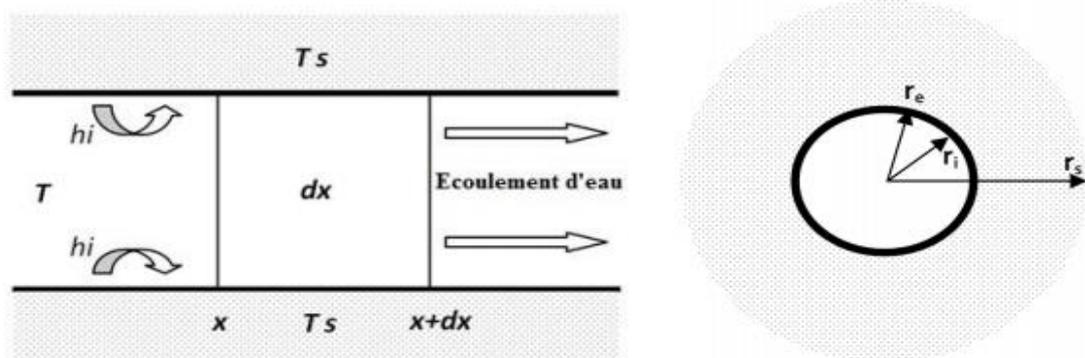


Figure III.3. Schéma du problème étudié.

Le nombre de Nusselt de l'eau en écoulement à l'intérieur du tube est donné par l'équation (5.5) [121] pour  $2300 < R_e < 10^5$  et  $1,5 < P_r < 500$

$$Nu = 0,012(R_e^{0,87} - 280)^{0,4} \left( 1 + \left( \frac{di}{L} \right)^{0,66} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

La résistance thermique du tube  $R_t$  :

$$R_t = \left( \frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi\lambda t L} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

La résistance thermique de l'anneau du sol  $R_s$  est donnée par l'équation (5.7)

$$R_s = \left( \frac{\ln(r_{sol} / r_i)}{2\pi\lambda_{sol} L} \right) \quad \text{Eq. 7}$$

Plusieurs travaux dans la littérature ont considéré le rayon du sol approprié des échangeurs géothermales.

Il a été conclu que le rayon du sol  $r_s$  varie en fonction de la durée de fonctionnement de l'échangeur [24-26]. Dans ce chapitre, l'échangeur géothermal eau/sol fonctionne seulement pendant les températures caniculaires qui ne dépassent pas généralement certaines heures. Par conséquent, le rayon du sol est considéré comme étant égale au rayon du tube ( $r_s = r_i$ ) [24, 25-26]

Après la division de l'équation (5.1) par  $dx$ , cette équation peut être écrite comme suit :

$$-mC_p \frac{dT_a}{dx} = \frac{(T(x) - T_{sol})}{R_{th}} \quad \text{Eq. 8}$$

Donc;

$$T(x) = A \exp\left(\frac{-x}{mC_p R_{th}}\right) + T_{sol} \quad \text{Eq. 9}$$

Nous pouvons déterminer les constantes A, B en utilisant la condition suivante :

- Pour  $x = 0$ ,  $T(x) = T_0 \rightarrow A = T_0 - T_{sol}$

$$T(x) = (T_0 - T_{sol}) \exp\left(\frac{-x}{mC_p R_{th}}\right) + T_{sol} \quad \text{Eq. 10}$$

On peut aussi écrire l'équation (5.10) comme:

$$T(x) = (T_0 - T_{sol}) \exp\left(\frac{-x}{\rho C_p S v R_{th}}\right) + T_{sol} \quad \text{Eq. 11}$$

## 2.2 Calcul des pertes de charge

Les pertes de charge totales de l'échangeur sont égales à la somme des pertes linéaires, singulières et les pertes à l'entrée et à la sortie de l'échangeur [27]

$$\Delta P_t = \Delta P_{lin} + \Delta P_{sin} + \Delta P_{e,s} \quad \text{Eq. 12}$$

Où les pertes de charges linéaires sont calculées par la relation suivante:

$$\Delta P_{lin} = \Lambda \rho e L \frac{v_e^2}{2d} \quad \text{Eq. 13}$$

Pour un régime turbulent lisse, nous pouvons utiliser la formule directe de Blasius pour déterminer le coefficient de pertes de charge  $\Lambda$  lorsque le nombre de Reynolds entre 2100 <math>Re < 105</math> [28]

$$\Lambda = 0,3164 Re^{-0,25} \quad \text{Eq. 14}$$

Les pertes de charge singulières sont des pertes de pression provoquées au cours du passage d'un fluide dans les obstacles tels que les vannes, coudes, élargissement...etc

$$\Delta P_{sin} = \xi \rho e \frac{v_e^2}{2d} \quad \text{Eq. 15}$$

Les pertes de charge dû à l'entrée et à la sortie de l'échangeur sont calculées en utilisant l'équation suivante [27]:

$$\Delta P_{e,s} = \frac{3}{4} \rho e v_e^2 \quad \text{Eq. 16}$$

# **CHAPITRE IV**

## **Résultats et discussion**

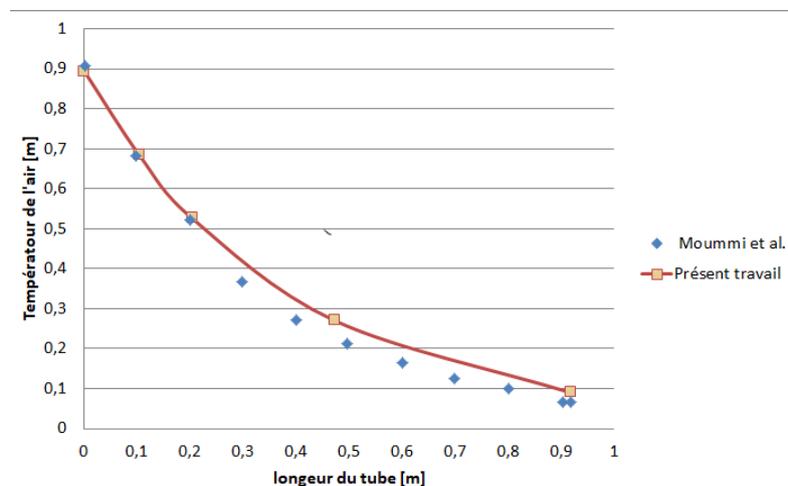
### IV.1. Validation

Pour valider notre model analytique, nous avons utilisés les paramètres géométriques et thermo-physiques de Moumami et al [20] et Mehdid et al. 2018 [28] sur un échangeur air-sol (tableau IV.1). Moumami et al [20] ont fait une étude expérimentale sur l'échangeur de chaleur sol-air dans la région du Biskra.

**Tableau IV.1.** Caractéristiques spécifiques de l'échangeur air-sol de Mehdid et al. [28]

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 Moumami et al [20]. 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%.

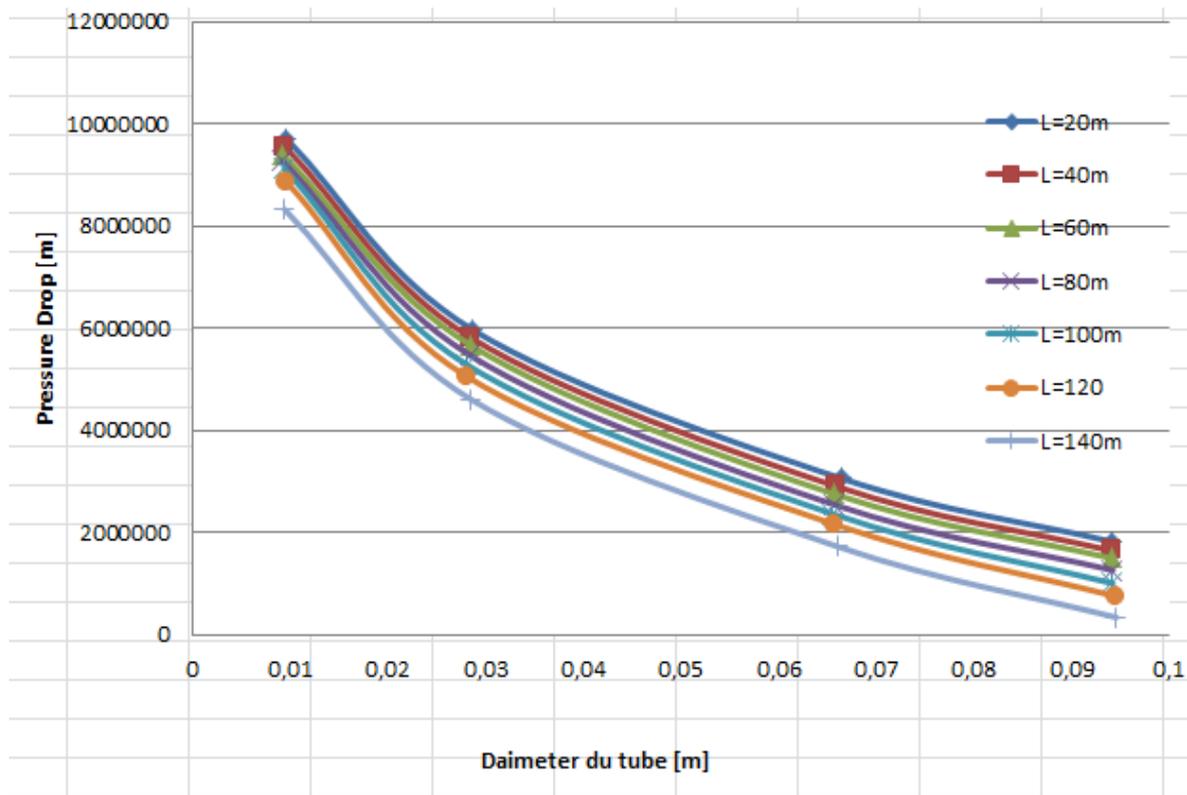


**Figure IV.1.** Comparaison entre la présente méthode calcul avec l'étude expérimentale de Moumami et al. [20].

Pour valider notre code de calcul avec ces derniers et bien sûr en utilisant les mêmes données géométriques et climatiques disponibles dans le tableau IV.1.

Une comparaison entre les résultats obtenus par le code et des résultats expérimentaux (voir la figure IV.1) a montré un bon accord.

## IV.2. Influence du diamètre du tube sur les pertes de charge totale



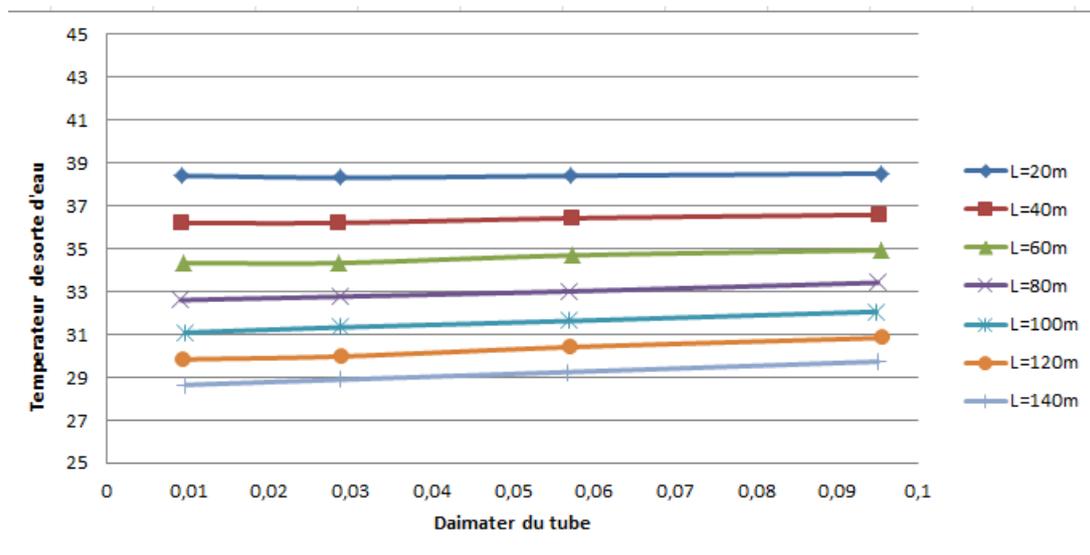
**Figure IV.2.** Influence du diamètre du tube sur les pertes de charge totale pour différentes longueurs de l'échangeur eau-sol.

Dans ce figure on a utilisé quelques longueurs du tubes différentes afin de voir l'influence de ce dernier sur les pertes de charges totale. et à partir de ça les résultats obtenus dit qu'on peut utiliser un diamètre de 0.033 comme un minimum, tandis que l'échangeur de chaleur doit être capable de réduire la température de l'eau à la valeur désirée.

### IV.3. Influence du diamètre du tube sur la température de sortie de l'eau

Tableau IV.2. Principales caractéristiques de l'échangeur eau-sol et la tour de refroidissement.

	Tour de refroidissement [29]	Échangeur eau-sol
Surface d'échange totale (m <sup>2</sup> )	270.6	10.37
Longueur du tube (m)	600	100
Diamètre du tube (m)	0.016	0.033
Pertes de charge (bar)	0.3	0.3



**Figure IV.3.** Influence du diamètre du tube sur la température de sortie de l'eau pour différentes longueurs de l'échangeur eau-sol.

La figure IV.3 présente l'effets du diamètre des tubes sur la température de sortie de l'eau pour différentes longueurs. La figure montre que pour atteindre la température 34 degré on doit utiliser des tubes de longueur minimale 100 m.

On peut sélectionner la zone d'applicabilité dans la figure IV.3 A partir de les deux figures précédentes de telle sorte que la figure IV.3 définit les caractéristiques géométriques (longueur, diamètre) de l'échangeur de chaleur approprié à Biskra et bien sur en respectant les principales caractéristiques de fonctionnement de la machine de climatisation à absorption de Citherlet [29] Le tableau IV.2 présente les principales caractéristiques de L'échangeur eau-sol dimensionné et la tour de refroidissement de Citherlet et Al [29].

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans la tendance internationale de rationalisation de la consommation d'énergie, la promotion des énergies renouvelables ainsi que la minimisation des émissions de gaz à effet de serre. La présente étude concerne l'évaluation des performances énergétiques d'un échangeur géothermique eau-sol en utilisant une méthode analytique développée auparavant à l'université de Biskra. Ainsi, l'objectif du présent mémoire est de modéliser le comportement thermique d'un échangeur géothermal eau/sol en utilisant un modèle analytique développé auparavant à l'université de Biskra. L'échangeur géothermique étudié est un serpentin horizontal de 3m de profondeur. L'exemple d'application traité est un couplage d'un refroidisseur à adsorption (Chiller) avec un échangeur géothermal eau/sol utilisé comme refroidisseur supplémentaire.

Deux chapitres bibliographiques ont été présentés sur la géothermie en général et l'utilisation des échangeurs géothermiques à eau pour l'amélioration de fonctionnement de pompe à chaleur.

Après un travail de modélisation et de validation de la méthode de calcul, nous avons dimensionné l'échangeur eau-sol approprié à la région de Biskra. Les résultats sont très encourageants et montrent que la solution géothermique est efficace et se présente avec un coût réduit.

## Références

---

### Référence

- [1] Benfateh, H. (2009). Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- [2] S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en géophysique, Université Boumer dès, Mars 2006\*.
- [3] Ouali, S., Étude géothermique du sud de l'Algérie. 2005.
- [4].Al-Khoury, R., Computational modeling of shallow geothermal systems. 2011: CRC press.
- [5] I. Benchemsa, L'utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique , Mémoire de master. Université BADJI MOKHTAR ,ANNABA.2016/2017.
- [6] S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en géophysique, Université Boumerdès, Mars 2006
- [7] Julien HEINTZ (CETIAT). Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d'informations) "janvier 2008
- [8] Idriss BENGHEZALA, "Contribution à l'étude des Performances Dynamiques et Thermiques d'un Echangeur Enterré", Mémoire de magistère, 2014.
- [9] Sung Lok Do.Jeff S.Haberl . à review of ground coupled heat pump models used in wholebuilding computersimulation programs. 2010
- [10] Loubna Ben Yahya. Modélisation statistique de la température de l'eau en rivière et en régime non-hivernal.2007
- [11] Belloufi Yousef .Modélisation D'un Echangeur Air/Sol Dont Le But De Rafrachissement Des Locaux. 2012
- [12] Jean Lemale. La géothermie. Le moniteur. © Dunod, Paris 2009. ISBN 978-2- 10-052879-0.
- [13] Mouloud AISSANI.et ALL Simulation des Flux Thermiques lors du soudage TIG et prédiction de la taille des zones du cordon dans les tôles d'Acier 304L.
- [14] Al-Khoury, R., Computational modeling of shallow geothermal systems. 2011: CRC press.
- [15] Jean-Louis Comlan FANNOU. ANALYSE ET MODÉLISATION D'UNE POMPE À CHALEUR GÉOTHERMIQUE À EXPANSION DIRECTE. COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU DOCTORAT EN GÉNIE Ph. D.

## Références

---

- [16] M. Benhammou, analyse et caractérisation d'un système géothermique de rafraîchissement approprié aux logements bâtis au sud algérien, Mémoire de Doctorate, . Université de BECHAR.
- [17] Borgås, A., 2014. Development of the Hybrid Absorption Heat Pump Process at High Temperature Operation. Mémoire de maîtrise, Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [18] Hamichi, Meriem, and Atika Chabanechaouche. Etude et analyse thermodynamique d'une machine a absorption (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O). Diss. Université Akli Mouhand Oulhadj-Bouira, 2018.
- [19] Bejan, A., 2006. Advanced engineering thermodynamics 3 e éd., John Wiley & Sons, New York, USA.
- [20] N. Moumami, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moumami and S. Youcef-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.
- [21] A. Trombe and L. Serres, Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation, Energy and Buildings, vol. 21 2, pp. 155-162, 1994. 10.1016/0378-7788(94)90008-6
- [22] O. Ozgener, 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, vol. 38 6, pp. 711-716, 2011.
- [23] H. Fallahsohi, Modélisation dynamique des échangeurs diphasiques, appliquée aux groupes frigorifiques contrôlés par une commande avancée, Doctorate thesis, Academic, Department, INSA de Lyon, 161, 2011.
- [24] 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>
- [25] N. Scott, Analysis and performance of an earth-air heat exchanger, Presented at Presented at the 1965 Winter meeting, Chicago, Illinois, pp. 1965.
- [26] B. Zoellick, Predicted and observed performance of a buried earth-air heat exchanger cooling system, Presented at Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc, United States, pp. p. 822–6., 1981.
- [27] I. E. Idelchik, Memento des pertes de charge-coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement, Editions Eyrolles; Saint-Germain, Paris: Eyrolles, 1969.
- [28] F. Zeng, C. Long and J. Guo, A NOVEL UNSTEADY MODEL OF PREDICTING THE PRODUCTIVITY OF MULTI-FRACTURED HORIZONTAL WELLS, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY, vol. 33 4, pp. 117-124, 2015. DOI: 10.18280/ijht.330415.
- [29] S. Citherlet, C. Hildbrand, J. Bony, A. Kleijer, M. Bunea and S. Eicher, Analyse des performances de la climatisation solaire par adsorption et potentiel pour la Suisse, Rapport final, Projet SOLCOOL HEIG-VD, Office fédérale de l'énergie OFEN, Rept. 152645, 25 Janvier 2011.