

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique

Thème

**Étude Numérique D'un Échangeur  
Géothermique Eau-sol**

Devant le jury composé de :

Présenté par :

Atia Abdelmalek

Président

- TOUIL Abdelhak

Hamdi Omar

Examineur

- SOUALAH MOHAMED Laid

.....

Examineur

MENECEUR Nouredine

Encadreur

2017-2018

## REMERCIEMENTS

En premier, je remercie le Tout Puissant ALLAH,  
notre créateur qui m'a donné la force d'accomplir ce  
travail.

travail, Je tiens à remercier vivement, le chargé du suivi de ce  
Mr **Meneceur Noureddine** pour ses encouragements, ses  
conseils précieux et sa disponibilité.

Je présente mes chaleureux remerciements aux enseignants  
du département Mécanique Energies Renouvelables pour  
leurs aides et orientations durant ma formation en  
particulier.

Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la  
réalisation de ce  
travail

## Dédicace

*Je suis très heureux de dédier ce travail humble, comme un geste de gratitude:*

*À la personne qui a donné naissance à la douleur et à la joie, le symbole de l'amour:*

*Chères Mères*

*Pour ceux qui aiment et apprécient son soutien continu tout au long de notre étude:*

*Chers Pères*

*Pour nos frères, sœurs et tous les membres de notre famille.*

*Pour nos amis*

## Sommaire

### REMERCIEMENTS

### Nomenclature

### Liste des Figures

### Liste Des Tableaux

### Introduction général.....1

#### Chapitre I: Etude Bibliographique

#### I.1 Introduction..... 3

#### I.2 Revue Bibliographique ..... 3

#### I.3 Conclusion ..... 12

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

#### II.1 Introduction ..... 13

#### II.2 L'énergie géothermique..... 13

##### II.2.1 Les avantages de la géothermie ..... 13

##### II.2.2 Les inconvénients de la géothermie ..... 13

##### II.2.3. La géothermie dans l'Algérie..... 13

##### II.2.3.1. La géothermie en Algérie: ..... 13

##### II.2.3.2 Les zones géothermiques En Algérie: ..... 14

##### II.2.4 Classification des ressources géothermiques ..... 15

##### II.2.4.1 La géothermie ahaute énergie ..... 15

##### II.2.4.2 La géothermie à basse énergie : ..... 15

##### II.2.4.3 La géothermie à très basse énergie : ..... 16

##### II.2.4.4 Selon la nature du sol : ..... 17

##### II.2.4.5 Conductivité thermique: ..... 17

##### II.2.4.6 Capacité calorifique du sol: ..... 17

#### II.3 Pompe à chaleur géothermique..... 17

##### II.3.1 Définition ..... 18

##### II.3.2 Fonctionnement..... 18

##### II.3.3 Principe thermodynamique ..... 19

##### II.3.4 Mode de fonctionnement Hivernal (Chauffage) ..... 20

##### II.3.5 Mode de fonctionnement Estival (Rafraîchissement) ..... 20

#### II.4 La forme d'échangeur de chaleur ..... 20

II.4.1 Echangeur Vertical.....	20
II.4.2 Echangeur Horizontal .....	21
II.4.3 Echangeur Serpentins.....	21
II.4.4 Echangeur Spiral.....	22
II.5 Principaux paramètres de dimensionnement .....	23
II.5.1 Le Débit D'air Total.....	23
II.5.2 Le Nombre Et Le Diamètre Des Tubes.....	23
II.5.3 La Vitesse De L'air Dans Les Tubes .....	23
II.5.4 La Longueur Des Tubes.....	24
II.5.5 La Distance Entre Tubes.....	24
II.5.6 La Profondeur D'enfouissement Des Tubes.....	24
II.5.7 Pente Du Conduit.....	25
II.5.8 Matériau Constitutif Des Tubes .....	25
II.5.9 Zone à risque radon.....	25
II.5.10 La nature du sol et son taux d'humidité .....	25
II.6 Emplacement du puits canadien .....	26
II.7 L'inertie du sol.....	26
II.8 Conclusion .....	27

### CHAPITRE III : Conception du modèle de calcul par logiciel de simulation et résultats & discussion

III.1 Introduction .....	28
III.2Présentationde la formulation mathématiques .....	28
III.2.1 Modèle thermique du sol .....	28
III.2.1.1 Description et hypothèses : .....	29
III.2.1.2 Modélisation stationnaire de la température du sol : .....	29
III.2.2 Le modèle thermique de l'échangeur eau-sol.....	31
III.2.2.1Température de l'eau dans le tube : .....	32
III.2.2.2 Quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur le long du tube	34
III.3Présentationdu logicielde simulation Comsol-Multiphysics.....	34
III.3.1 Définition.....	34
III.3.2 Avantages de conception avec Comsol-Multiphysics.....	34
III.3.3 L'interfaceutilisateur de Comsol-Multiphysics .....	35
III.4Modélisationet simulationpar Comsol-Multiphysics .....	36

---

III.4.1 Création du modèle de simulation .....	36
III.4.2 Définition des paramètres globaux .....	36
III.4.3 Création de la géométrie du problème .....	37
III.4.4 Les propriétés du matériau de la géométrie étudiée .....	38
III.4.5 Transfert de chaleur dans les solides .....	40
III.4.5.1 Isolation thermique : .....	41
III.4.5.2 Température externe du sol (température initiale) .....	41
III.4.5.3 Flux thermique du sol : .....	41
III.4.6 Transfert de chaleur dans le tube .....	42
III.4.6.1 Propriétés du tube : .....	43
III.4.6.2 Température à l'entrée et à la sortie de l'eau : .....	44
III.4.6.3 Transfert de chaleur au mur : .....	44
III.4.7 Maillage .....	46
III.5 Résultats et discussion .....	47
III.5.1 Effet des conditions climatiques sur la température de surface du sol .....	47
III.5.2 Effet de la température du sol sur l'eau à l'intérieur du tube .....	50
III.5.3 Effet du flux de chaleur sur le tube sous-sol .....	51
II.6 Conclusion .....	51
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>54</b>
<b>References' Bibliographique</b>	

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unit
$T_{sol}$	Température du sol	°C
$T_e$	Température de l'eau à l'intérieur de l'échangeur	°C
$T_{ee}$	Température de l'eau à l'entrée du tube	°C
$T_i$	Température initiale à l'intérieur du sol	°C
$T_p$	température à la paroi du sol	°C
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m.K
$h$	Coefficient d'échange de chaleur par convection	W/m <sup>2</sup> .K
$T$	Temps	s
$\delta$	la profondeur d'enfouissement de l'échangeur	m
$M$	Masse d'eau	kg
$C_p$	Chaleur massique de sol	J/kg.K
$u$	Vitesse axiale de l'air à l'intérieur de l'échangeur	m/s
$A$	Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> /s
$Z$	Cordonnée verticale	m
$\rho$	Masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>
$R$	Résistance thermique	m.K/W
$s$	Surface d'échange	m <sup>2</sup>
$C_p$	Chaleur massique de l'eau	J/kg.K
$R_{itot}$	la résistance thermique totale par unité de longueur	K/w
$x$	Longueur du tube	m
$r$	Rayon intérieur du tube enterré	m
$r_1$	Rayon extérieur du tube enterré	m
$r_{sol}$	Rayon de la couche adiabatique du sol	m
$Q$	quantité de chaleur échangée de l'eau dans le tube vers le sol	w
$q_s$	Source de chaleur linéaire	W/m.K
$Q_{mur}$	transfert de chaleur mur	w
$d_h$	Diamètre hydraulique	m
$K_{mur}$	Conductivité thermique de mur	W/m.K
$d_i$	Diamètre hydraulique à distance w de la paroi interne	m
$\mu$	Viscosité dynamique	kg/m.K
$f_D$	Facteur de friction de Darcy	
$NU$	Nombre de Nusselt	
$Pr$	Nombre de Prandtl	
$Re$	Nombre de Reynolds	
$pA$	Absolute pressure	Pa
$(Z)_{eff}$	Durées efficaces du coefficient de transfert de chaleur	W/m.K
$int$	Coefficient de transfert thermique interne du film	W/m <sup>2</sup> .K
$T_{ext}$	Température externe	K
$e$	Rugosité de surface	
$Z$	Périmètre mouillé	m

## Liste des Figures

### Chapitre I

Fig.I.1	Situation géographique de la région d'étude.	3
Fig.I.2	Carte du flux de chaleur du Sud algérien.	4
Fig.I.3	Carte montrant les nappes aquifères du Sahara algérien Le continental intercalaire - Le complexe terminal.	4
Fig.I.4	Courbes de variations (température – profondeur) au niveau des forages mentionnés ci-dessus	5
Fig.I.5	Variation du nombre de jour, $N$ , où le potentiel thermique $\Delta T$ pour la climatisation est obtenu, en fonction de la profondeur adimensionnelle $z/d$ .	5
Fig.I.6	Variation du nombre de jour, $N$ , où le potentiel thermique $\Delta T$ pour la climatisation est obtenu, pour trois profondeurs adimensionnelles $z/d$ .	6
Fig.I.7	Variation du nombre de jour, $N$ , où le potentiel thermique $\Delta T$ pour la Climatisation, pour une profondeur adimensionnelle $z/d = 2.0$ .	6
Fig.I.8	Variation du nombre de jour, $N$ , où le potentiel thermique $\Delta T$ pour le chauffage est obtenu, pour une profondeur adimensionnelle $z/d = 2.0$ .	7
Fig.I.9	Tranche du tube de l'échangeur tubulaire eau/sol placé dans le sol.	7
Fig.I.10	Variation de la quantité de chaleur récupérée du sol en fonction du temps pour un débit $0.12 \text{ kg/s}$ et une température d'entrée égale à $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .	8
Fig.I.11	Schéma descriptif de l'installation	8
Fig.I.12	Evolution, au cours de la journée, des températures de sortie de l'eau de l'échangeur eau/sol ( $T_{es}$ ), de l'air chaud ( $T_{ae}$ ) et de l'air refroidi ( $T_{as}$ ), ainsi que du taux de refroidissement de l'air ( $DT=T_{ae}-T_{as}$ ), pour des débits d'eau $m_e=0.35 \text{ kg.s}^{-1}$ et d'air $m_a=2 \text{ kg.s}^{-1}$ .	9
Fig.I.13	Géométrie de l'échangeur eau-sol modélisé .	9
Fig.I.14	Exemple de pompe à chaleur sol/eau	10
Fig.I.15	Températures d'entrée et de sortie de l'échangeur souterrain horizontale.	10
Fig.I.16	Température de sortie et débit de l'échangeur.	11
Fig.I.17	Représentation des températures de sortie de l'échangeur et de l'air ambiant.	11

### Chapitre II

Fig.II.1	géothermie à haute énergie	15
Fig.II.2	géothermie à basse énergie.	16
Fig.II.3	géothermie à très basse énergie	16
Fig.II.4	Fonctionnement d'une pompe à chaleur.	18
Fig.II.5	Principe de fonctionnement d'une PAC.	18
Fig.II.6	Schéma de principe d'une machine thermodynamique.	19
Fig.II.7	Exemple de dimensionnement en mode chauffage.	20
Fig.II.8	Exemple de dimensionnement en mode rafraîchissement.	20
Fig.II.9	Echangeur vertical.	21
Fig.II.10	échangeur horizontal.	21

Fig.II.11	échangeur Serpentins.	22
Fig.II.12	échangeur spiral.	23
Fig.II.13	Emplacement du puits.	26

### Chapitre III

Fig.III.1	Les trois modèles de configuration de serpentine pour la collection de la chaleur.	28
Fig.III.2	Schéma du milieu semi-infini du sol avec température constante à la surface.	30
Fig.III.3	Le transfert de chaleur entre l'échangeur et le tube coupe longitudinale et radiale.	31
Fig.III.4	L'interface du logiciel de simulation de comsol-multiphysics.	35
Fig.III.5	Les étapes de création d'un modèle de simulation.	36
Fig.III.6	Les paramètres ajoutent au modèle.	37
Fig.III.7	Construction de la géométrie 2D.	38
Fig.III.8	construction de la géométrie 3D.	38
Fig.III.9	Insertion de propriétés des matériaux	39
Fig.III.10	Matériaux utilisés en géométrie (sol et eau).	39
Fig.III.11	Schéma de sélection du module transfert de chaleur dans les solides.	40
Fig.III.12	Les conditions aux limites dans les frontières de la géométrie de l'échangeur.	40
Fig.III.13	Isolation thermique de la géométrie étudiée.	41
Fig.III.14	Température externe du sol	41
Fig.III.15	Flux thermique du sol.	42
Fig.III.16	Schéma du menu de Module transfert de chaleur dans les tubes.	42
Fig.III.17	Transfert de chaleur dans les tubes.	43
Fig.III.18	Température à l'entrée et à la sortie de l'eau.	44
Fig.III.19	La géométrie du maillage.	46
Fig.III.20	Evolution de la température de surface dans la période annuelle.	47
Fig.III.21	Profil de distribution de température de sol selon la profondeur pour le modèle de configuration de serpentine 1.	48
Fig.III.22	Profil de distribution de température de sol selon la profondeur pour le modèle de configuration de serpentine2.	48
Fig.III.23	Variation de la température de sol en fonction de la profondeur de sol	49
Fig.III.24	Contours isotherme de la surface de sol pour la troisième modèle de serpent	49
Fig.III.25	Profil de température de l'eau de l'entrée à la sortie du tube pour une période de 2 jours, le modèle de serpent 1.	50
Fig.III.26	Variation de la température d'eau à la sortie dans une période de deux jours, modèle de serpent 3.	50
Fig.III.27	Répartition de la température de l'échangeur eau-sol, selon la profondeur du sol. Modèle de serpent 2.	51
Fig.III.28	Evolution de l'écart de température d'eau dans l'échangeur en fonction du temps (période de deux jours en hiver).	52

Fig.III.29	Etat du fonctionnement de l'échangeur en fonction du temps.	52
Fig.III.30	Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps. (Période de deux jours en hiver).	53

## Liste Des Tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau II.1	Caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.	14
Tableau II.2	Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol .	17
Tableau III.1	Paramètres du modèle de simulation.	37
Tableau III.2	Paramètres de matériau.	39
Tableau III.3	Caractéristiques du maillage.	46

# **I**ntroduction général

## INTRODUCTION GENERAL

**A**u cours des dernières décennies, le monde a souffert de la consommation très élevée en énergie électrique nécessaire pour chauffer l'eau. Cette forte consommation apparait clairement dans les zones froides

**P**our répondre à ces défis énergétiques, plusieurs techniques de chauffage utilisant les énergies altératives 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. Cette énergie géothermique peut être exploitée à l'aide de différents outils pour le chauffage des serres agricoles et le confort thermique utilisant les échangeurs eau-sol

**U**n échangeur de chaleur eau-sol est un système géothermique qui utilise l'inertie thermique du sol pour chauffer ou refroidir une partie de l'eau de renouvellement d'un habitat. Le principe du système consiste à injecter dans un habitat, 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.

**D**ans cette étude on s'intéresse au chauffage des liquides par la géothermie, une technique qui est jusqu'à présent non exploitée dans notre pays. Cette technique a pour support technique un échangeur eau/sol. La température du sol influe principalement sur les performances d'un tel échangeur 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. On a mené en premier lieu, une étude théorique pour l'établissement d'un modèle qui traduit le mieux l'évolution de la température du sol, depuis la surface jusqu'à une profondeur optimale. Cette profondeur qui dépend des contextes géographiques et climatique servira de base pour le dimensionnement d'un tel système pour qu'il puisse être exploité. En deuxième étape, nous exposons les résultats issus d'une étude numérique que nous avons menée.

**D**ans cette étude nous utiliserons le logiciel CFD COMSOL-Multiphysics. Ce logiciel est utilisé pour la modélisation et la simulation de phénomènes physiques décrits par des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) résolues par éléments finis. En outre d'avantage de permettre un couplage et une résolution simultanée des équations provenant de domaines physiques très différents.

Un avantage très important de ce logiciel c'est que l'utilisateur peut se concentrer sur le modèle et n'a pas besoin de consacrer du temps à résoudre les équations, construire les lignes de programmation, ou visualiser les résultats.

Le présent travail est subdivisé en trois chapitres :

**D**ans le premier chapitre nous avons présenté une recherche bibliographique détaillée sur les travaux de recherche existant sur l'énergie géothermie et leur évolution au niveau national (en Algérie).

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

**D**ans le troisième chapitre nous avons exposé d'une façon détaillée les équations mathématiques employées pour le calcul des performances thermiques au sein d'un échangeur eau-sol. En utilisant le Logiciel de simulation Comsol-Multiphysics pour étudier les effets de certains paramètres sur l'écart de la température à la sortie du fluide au sein de l'échangeur. A la fin de ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation, ces résultats sont représentés sous forme des courbes, sont analysés et discutés.

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

# Chapitre I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## I.1 Introduction

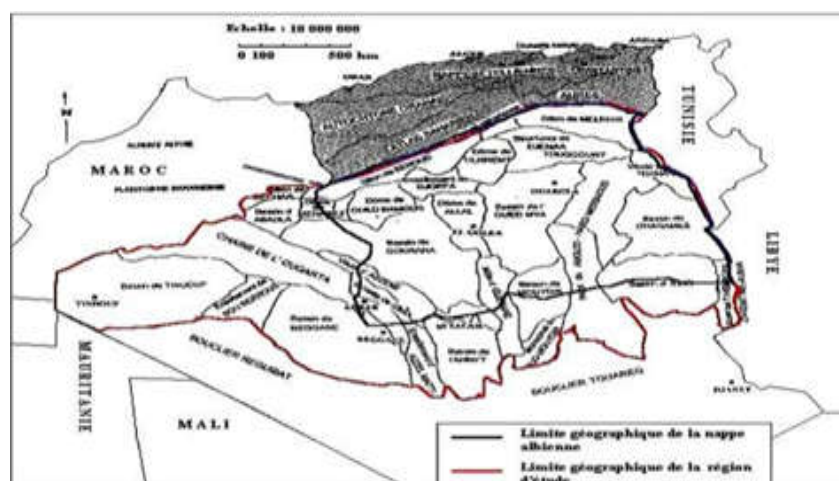
Plusieurs types des échangeurs eau-sol ont été réalisés et testés par plusieurs chercheurs dans le monde, l'objectif principal étant de libérer et /ou récupérer le maximum d'énergie thermique avec un coût financier faible et expertiser la performance thermique de l'échangeur. Pour atteindre ces objectifs, de grands travaux sont récemment explorés. Nous exposons dans ce chapitre quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent les phénomènes thermiques des échangeurs eau-sol [1].

## I.2 Revue Bibliographique

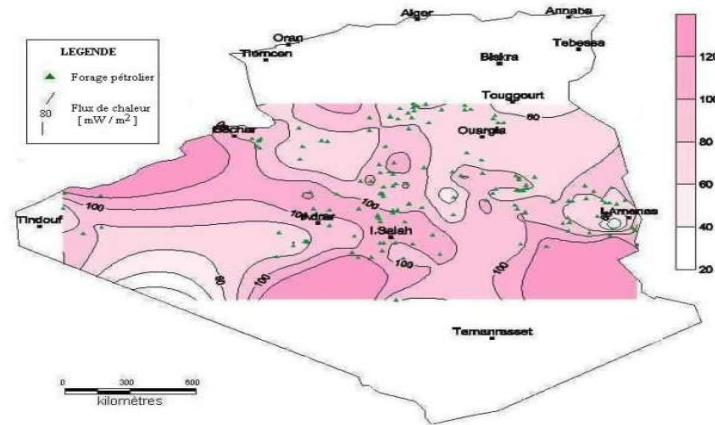
En 2006, S. Awali et al [2] ont présenté une étude sur l'énergie géothermique qui se réfère à l'exploitation des sources chaudes en profondeur. C'est l'une des principales sources d'énergie renouvelable au monde. Il existe deux principaux types d'énergie géothermique dans le monde :

- L'énergie géothermique à haute énergie.
- L'énergie géothermique à basse énergie.

Le sud de l'Algérie est une vaste zone présentant un potentiel géothermique dans des bassins sédimentaires dans des zones continentales stables. Les ressources géothermiques sont essentiellement à faible énergie. Afin d'identifier les zones d'importance géothermique, des cartes de températures géothermiques ont été développées. Deux zones géothermiques distinctes ont été mises en évidence à travers ces cartes, l'une dans la partie orientale et l'autre dans la partie occidentale du Sahara algérien.

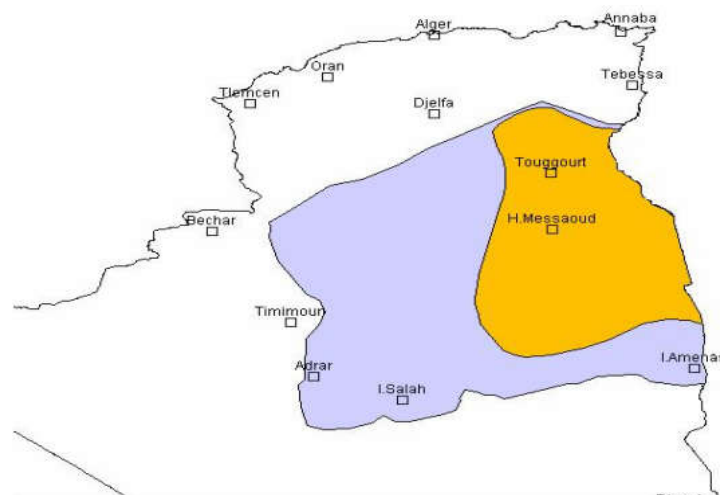


**Fig.I.1.** Situation géographique de la région d'étude [2].

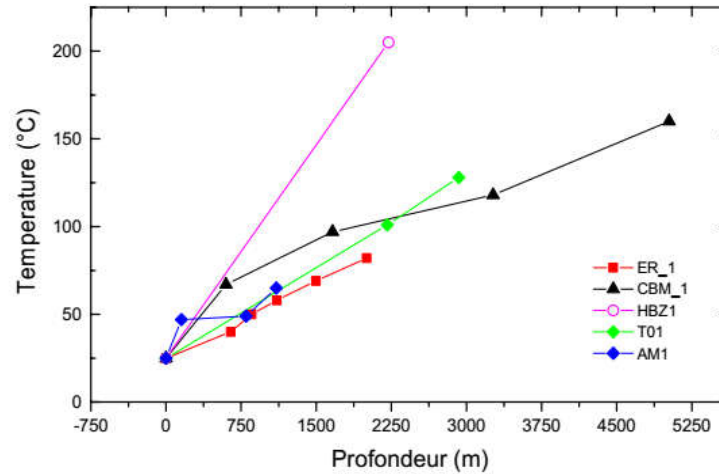


**Fig.I.2.** Carte du flux de chaleur du Sud algérien. [ 2 ]

En 2007S. Ouali1, et al.[3] ont étudiés des ressources géothermiques du sud algérien. Le but principal de la communication est la présentation du potentiel géothermique du Sud algérien à travers une esquisse du gradient géothermique. Les résultats sont présentés sous forme de cartes et de graphes de gradient. Ces résultats montrent que le Sud algérien est caractérisé dans son ensemble par un gradient géothermique moyen  $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . La partie Est montre une anomalie thermique qui est de  $3 \text{ à } 4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . Le bassin de Béchar est anormalement chaud avec un gradient dépassant les  $7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . A travers la carte réalisée, il convient de conclure que les conditions thermiques sont réunies dans le sud algérien pour avoir un important potentiel géothermique.



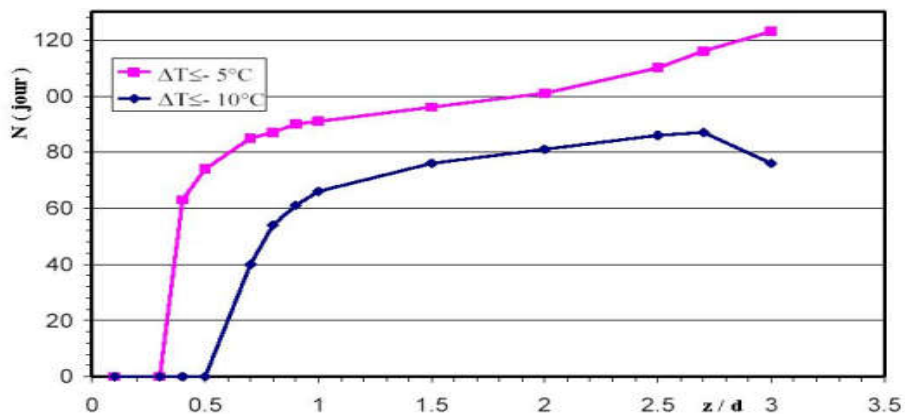
**Fig.I.3.** Carte montrant les nappes aquifères du Sahara algérien le continental intercalaire - Le complexe terminal [3].



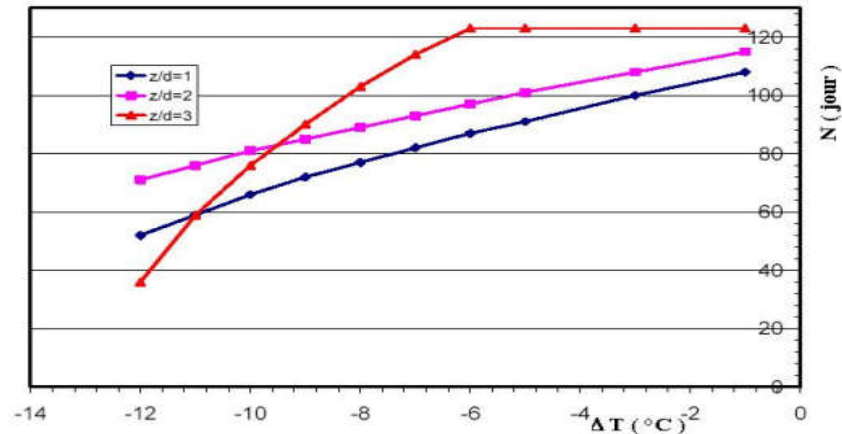
**Fig.I.4.** Courbes de variations (température – profondeur) au niveau des forages mentionnés ci-dessus. [ 3]

En 2008M.S. Guellouz et al. [4], ont fait une étude de faisabilité de la climatisation et du chauffage par géothermie de surface en Tunisie. Elle consiste en la modélisation de la température du sol à différentes profondeurs pour différents types de sols et différentes localités tunisiennes. Le modèle employé est développé à partir de l'équation instationnaire de la chaleur pour un milieu homogène et utilise les températures ambiantes journalières durant une année représentative pour les localités considérées.

- Les résultats de Climatisation :

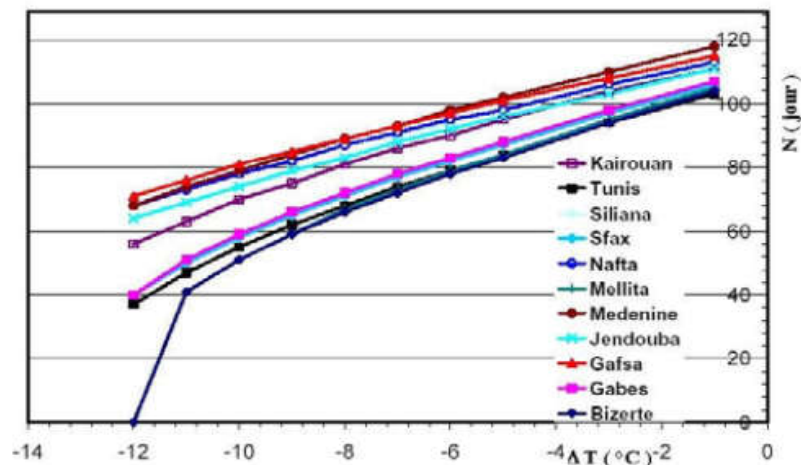


**Fig.I.5.** Variation du nombre de jour, N, où le potentiel thermique  $\Delta T$  pour la climatisation est obtenu, en fonction de la profondeur adimensionnelle  $z / d$ . [4]



**Fig.I.6.** Variation du nombre de jour,  $N$ , où le potentiel thermique  $\Delta T$  pour la climatisation est obtenu, pour trois profondeurs adimensionnelles  $z/d$ . [4]

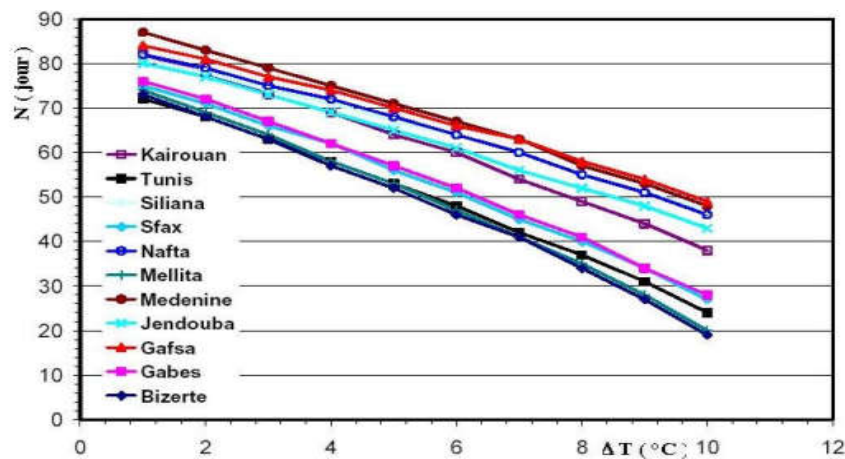
- Les résultats de Chauffage:



**Fig.I.7.** Variation du nombre de jour,  $N$ , où le potentiel thermique  $\Delta T$  pour la Climatisation, pour une profondeur adimensionnelle  $z/d = 2.0$ . [4]

En 2009 Nabiha NAILI, et al. [5] ont fait une étude analytique d'un échangeur eau/sol, L'échangeur eau/sol est un système qui exploite l'inertie thermique du sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Une étude analytique de l'échange thermique par convection forcée dans un tube enterré est réalisée pour mettre en évidence l'effet du diamètre, de la longueur de l'échangeur et du débit volumétrique sur le flux thermique fourni par l'échangeur enterré. Le but de ce travail est de dimensionner l'échangeur eau/sol de ce dernier. L'étude analytique nous a permis de conclure que :

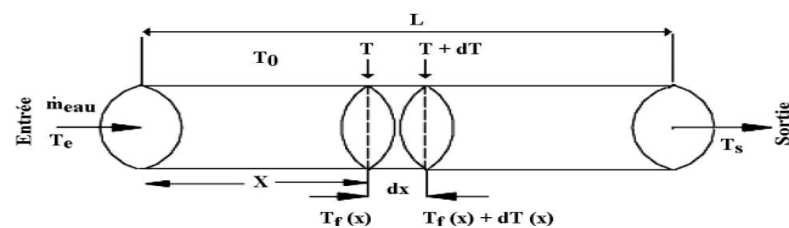
- Pour un débit constant on atteint une longueur optimale de l'échangeur inutile de la dépasser
- Pour une unité de longueur de l'échangeur on trouve de même un débit optimal
- La perte de charge est proportionnelle au débit et inversement proportionnelle au diamètre



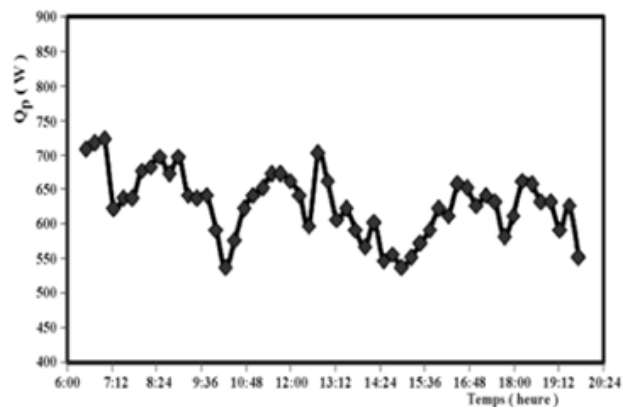
**Fig.I.8.** Variation du nombre de jour,  $N$ , où le potentiel thermique  $\Delta T$  pour le chauffage est obtenu, pour une profondeur adimensionnelle  $z/d = 2.0$ . [5]

En 2010 N. Naili, S. et al. [6] ont fait une optimisation analytique par une validation expérimentale d'un échangeur enterré, ont proposé une étude de l'opportunité d'exploiter l'inertie thermique du sol pour le chauffage. Elle consiste à évaluer les performances thermiques et ont optimisé les paramètres de fonctionnement de l'échangeur de chaleur eau/sol utilisé dans la récupération de l'énergie thermique du sol.

Les résultats de validation ont montré qu'il y a une bonne concordance, de l'ordre de 7 %, entre les résultats du modèle analytique et les points expérimentaux. Cet écart est probablement dû à la complexité de l'échange thermique au niveau du sol notamment.

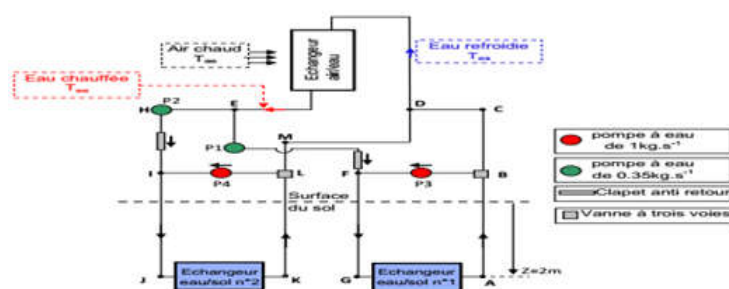


**Fig.I.9.** Tranche du tube de l'échangeur tubulaire eau/sol placé dans le sol. [6]



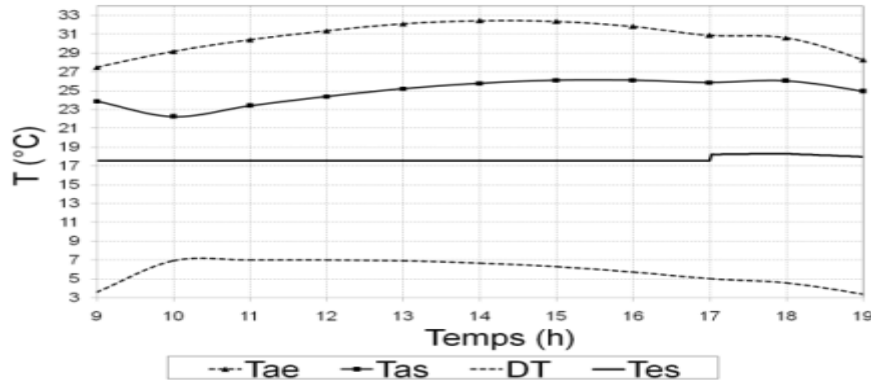
**Fig.I.10.** Variation de la quantité de chaleur récupérée du sol en fonction du temps pour un débit  $0.12 \text{ kg/s}$  et une température d'entrée égale à  $35 \text{ °C}$ . [6]

En 2013 R. Nebbali [7] fait un travail porte sur l'étude thermique d'un échangeur eau/sol. Ce dernier, contrairement aux échangeurs air/sol, améliore l'efficacité des échanges de chaleur et oncomptant à un faible coût d'exploitation. L'évolution de la température de sortie de l'eau de cet échangeur au cours du temps montre que le sol assure un refroidissement continu pendant une période limitée. En effet, à cause de la faible diffusivité thermique du sol, la température du sol au voisinage immédiat de l'échangeur augmente pour gagner l'ensemble de l'échangeur après quelques heures de fonctionnement.



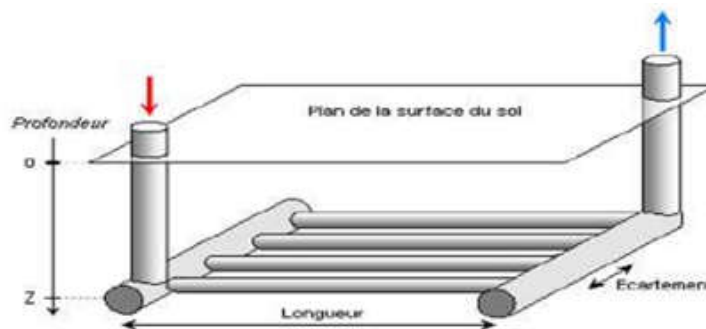
**Fig.I.11.** Schéma descriptif de l'installation. [7]

On apprécie d'avantage cette installation proposée en observant les niveaux de températures de l'air refroidi, obtenus à la sortie de l'échangeur air/eau. La figure 13 traduit l'évolution de la température de l'air refroidi, insufflé dans la serre entre 9h00 et 19h00. Un taux de refroidissement de l'ordre de  $7\text{°C}$  est obtenu. En effet, à l'heure de 14H00, on arrive à abaisser la température de l'air de  $32\text{°C}$  jusqu'à  $25\text{°C}$ .



**Fig.I.12.** Evolution, au cours de la journée, des températures de sortie de l'eau de l'échangeur eau/sol ( $T_{es}$ ), de l'air chaud ( $T_{ae}$ ) et de l'air refroidi ( $T_{as}$ ), ainsi que du taux de refroidissement de l'air ( $DT=T_{ae}-T_{as}$ ), pour des débits d'eau  $m_e=0.35 \text{ kg.s}^{-1}$  et d'air  $m_a=2 \text{ kg.s}^{-1}$ . [7].

En 2014 Yacine AHMOUDA [8] fait une étude intéressante au rafraîchissement par la géothermie. Cette technique très simple et moins chère n'est pas pratiquée chez nous. Elle réduit la consommation des hydrocarbures en limitant la pollution ; Cette technique renouvelable exploite l'énergie thermique du sol dans un échangeur enterré dit puits canadien ou puits provençal utilisé pour chauffer ou rafraîchir l'eau qui circule dans des tubes enterrés à quelques mètres de profondeur.



**Fig.I.13.** Géométrie de l'échangeur eau-sol modélisé. [8]

En 2016-2017 Karim Nahi [9] ont étudié une application de la simulation numérique dans l'étude technique de la géothermie par nappes horizontales de tuyauterie, appliquée à un projet immobilier mixte de commerces, bureaux et hôtel, ce travail qui a pour objectif le dimensionnement d'une pompe à chaleur géothermique pour répondre à une partie des besoins thermiques (chauffage et refroidissement) d'un futur bâtiment mixte de commerces, bureaux et hôtel situé à Luxembourg ville.

Au départ nous parlons des pompes à chaleur et de l'intérêt de les coupler au sol, en effet le sol présente l'avantage d'être une source de chaleur à stable température. Et nous présentons aussi quelques exemples de configurations existantes des systèmes géothermiques.

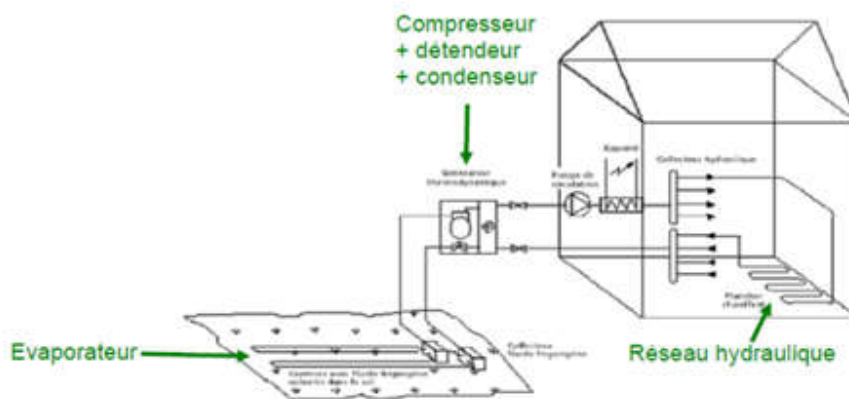


Fig.I.14.Exemple de pompe à chaleur sol/eau. [9]

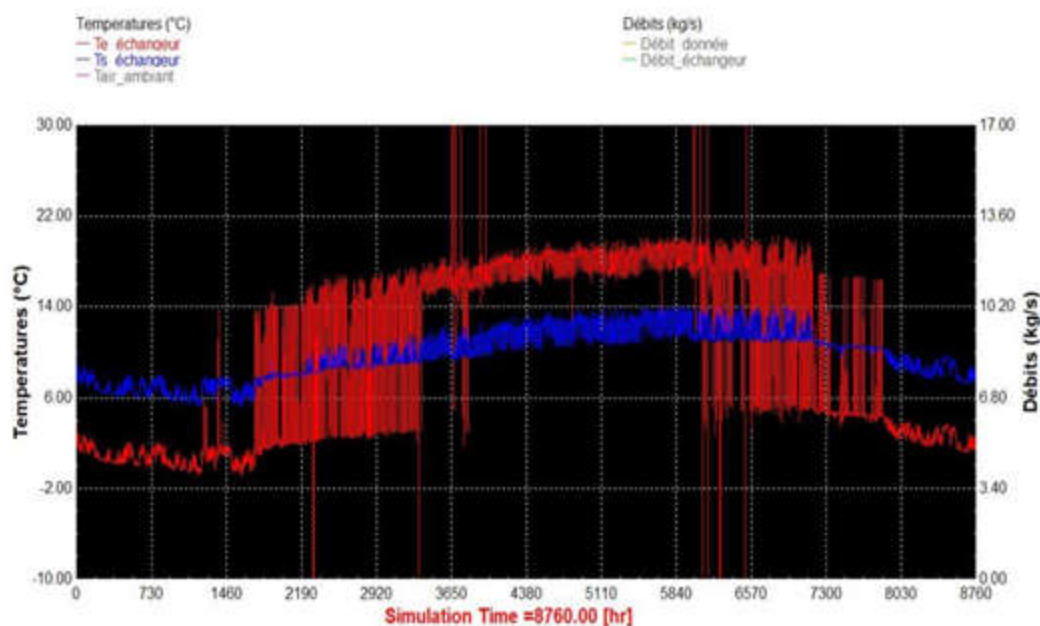


Fig.I.15.Températures d'entrée et de sortie de l'échangeur souterrain horizontale. [9]

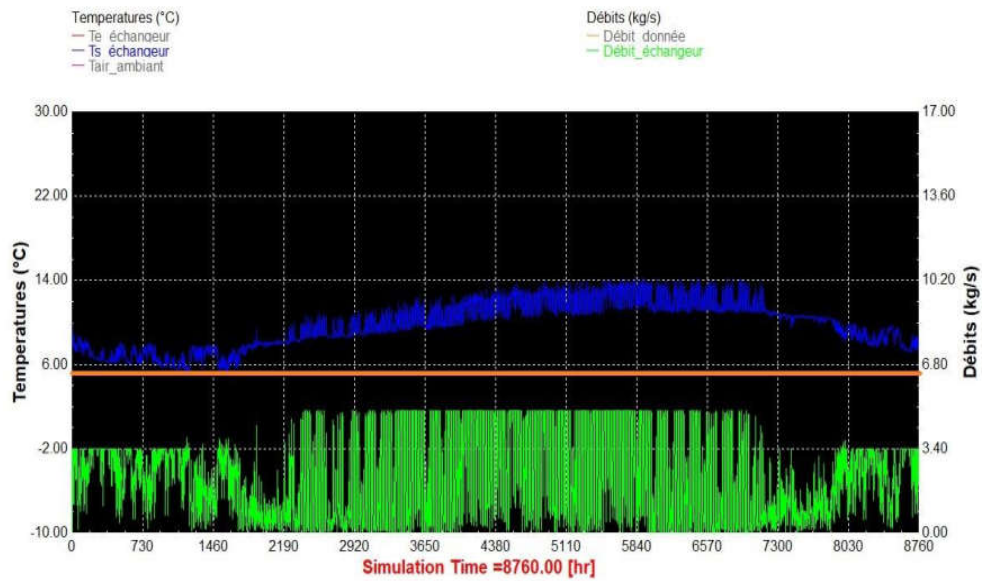


Fig.I.16. Température de sortie et débit de l'échangeur. [9]

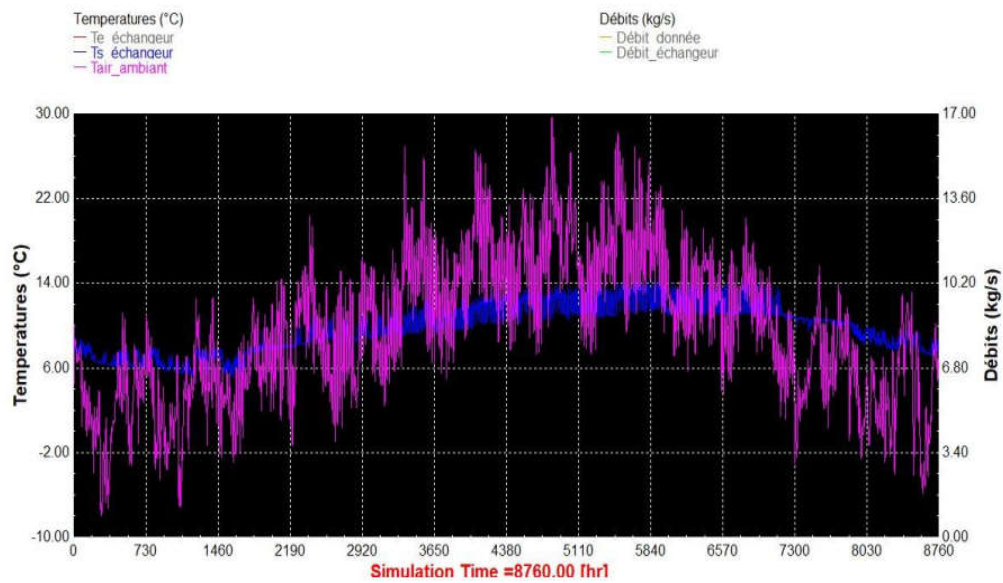


Fig.I.17. Représentation des températures de sortie de l'échangeur et de l'air ambiant. [9]

### **I.3 Conclusion**

A travers cette étude bibliographique, il en résulte que l'évaluation de la performance thermique en régime transitoire qui est lié principalement aux paramètres suivants :

La conductivité thermique du sol, la vitesse d'écoulement d'eau, la durée de fonctionnement de l'échangeur, le mode de fonctionnement (continu et intermittent) et la géométrie du tube enterré.

Il s'agit maintenant d'approfondir la modélisation analytique et la simulation numérique pour les deux régimes stationnaire et transitoire respectivement qui permettent d'aborder le comportement thermique de l'échangeur eau-sol et évaluer leur performance thermique.[1]

# **C**hapitre II

**GENERALITES SUR L'ENERGIE  
GEOtherMIQUE & LES ECHANGEURS DE  
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. L'énergie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie provenant de la chaleur contenue dans la croûte terrestre et dans les couches superficielles de la terre.

On distingue habituellement deux formes d'énergie géothermique avec la géothermie de surface et la géothermie profonde. La géothermie de surface consiste en la récupération de la chaleur pendant la période de l'hiver et de la fraîcheur pendant l'été à partir de la couche superficielle du sol. La géothermie profonde consiste quant à elle à capter la chaleur contenue par la croûte terrestre en vue de produire du chauffage lorsque la température est inférieure à 90°, ou même de l'électricité dès lors que la température est comprise entre 90 et 150. [2]

### II.2.1 Les avantages de la géothermie

- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport
- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelées
- Énergie de base, généralement, indépendante des conditions climatiques [10]

### I. 2.2 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 [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 de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C. Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90°C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C

à 56°C. Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain 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. [11]

### 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 Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Omanie, de la Kabylie et du Constantinois. [2]

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

Sources Thermique	Région	Faciés Chimique	Résidus Secs(mg/l)	Température e(°C)	Dedit (l/s)
<b>H.chellala</b>	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
<b>H.Bouhadjar</b>	Ain-Timouchent	Chloruré sodique	3210	66.5	-
<b>H.Bouhanifia</b>	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	-
<b>H.Boutaleb</b>	Setif	Chloruré sodique	3416	52	-
<b>H.Essalihine</b>	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
<b>H.Salhine</b>	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
<b>H.SudiBou Abdellah</b>	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
<b>H.Della</b>	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	-
<b>H.Rabi</b>	Saida	Chloruré sodique	1524	47	-
<b>H.Sillal</b>	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
<b>H.Ben Haroun</b>	constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

## II.2.4 Classification des ressources géothermiques

### II.2.4.1 La géothermie à 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.[12]

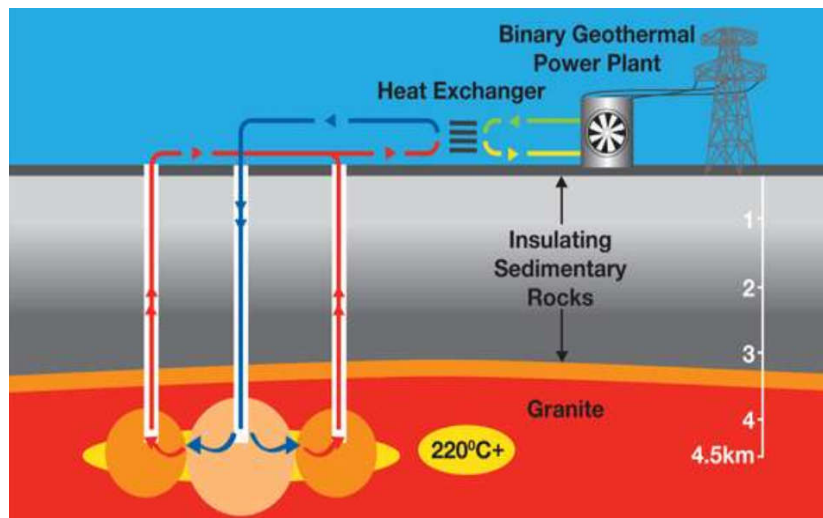


Fig.II.1. Géothermie à haute énergie [10].

### II.2.4.2 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 à climatiser. [12]

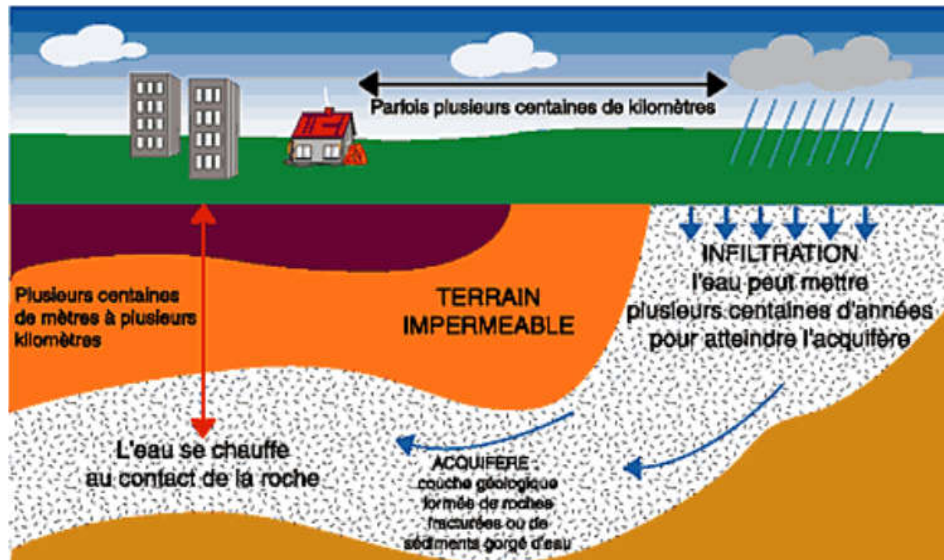


Fig.II.2.Géothermie à basse énergie [10].

#### II.2.4.3 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[12]

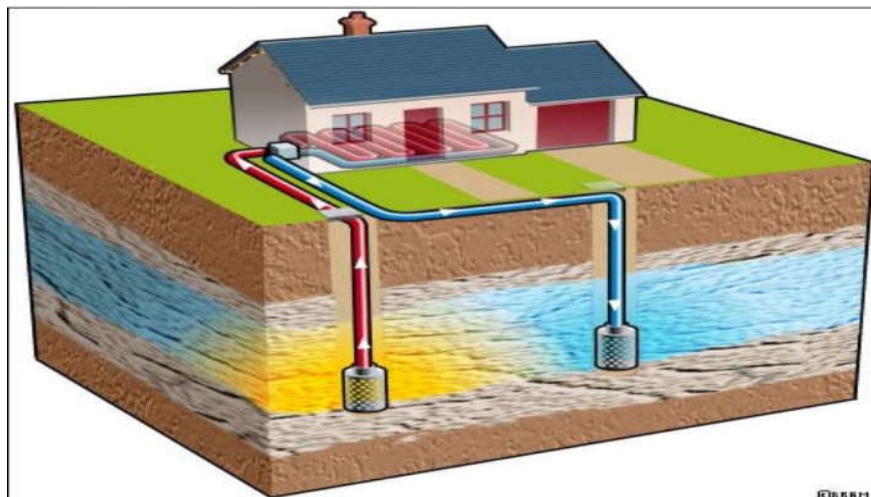


Fig.II.3.géothermie à très basse énergie [10].

#### II.2.4.4 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. [10]

#### II.2.4.5 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. [10]

#### II.2.4.6 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. [10]

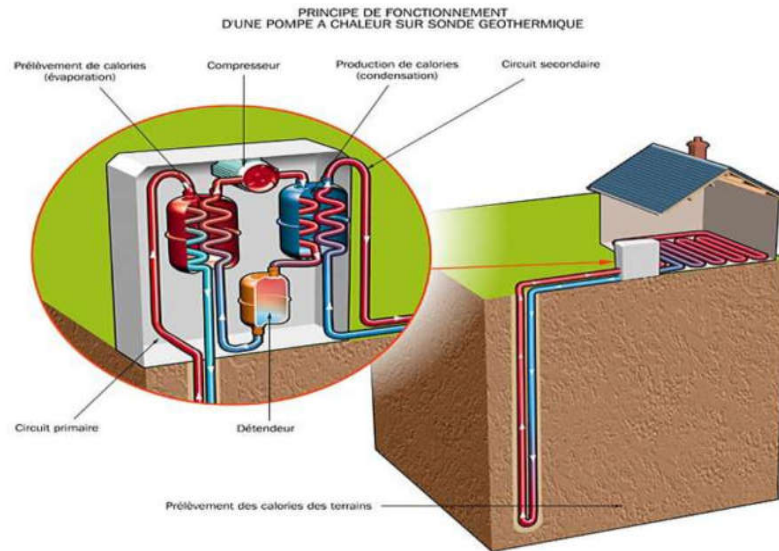
**Tableau II.2 :** Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol

Matière	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	C (kJ/k. kg)	$\lambda$ (w/k. m)
<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

### II.3 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 réchauffés. 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 [14].

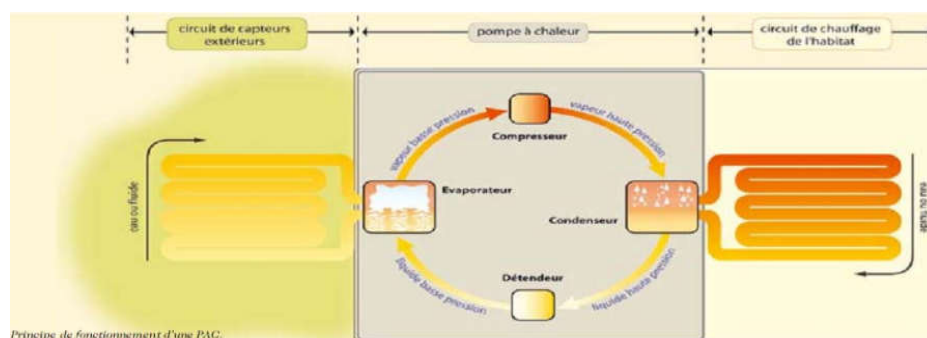


**Fig.II.4.** Fonctionnement d'une pompe à chaleur [14].

### II.3.1 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 [16].

### II.3.2 Fonctionnement



**Fig.II.5.** Principe de fonctionnement d'une PAC [16].

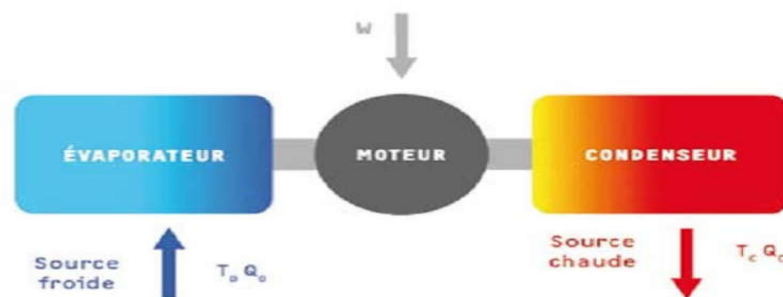
De gauche à droite sur le schéma :

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

Le principe est similaire à celui du réfrigérateur : la chaleur est extraite du compartiment interne du réfrigérateur, d'où l'apparition de froid. La chaleur produite est évacuée par la grille derrière l'appareil et chauffe... la cuisine [16]

### II.3.3 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). [15]



**Fig.II.6.** Schéma de principe d'une machine thermodynamique [15].

### II.3.4 Mode de fonctionnement Hivernal (Chauffage)

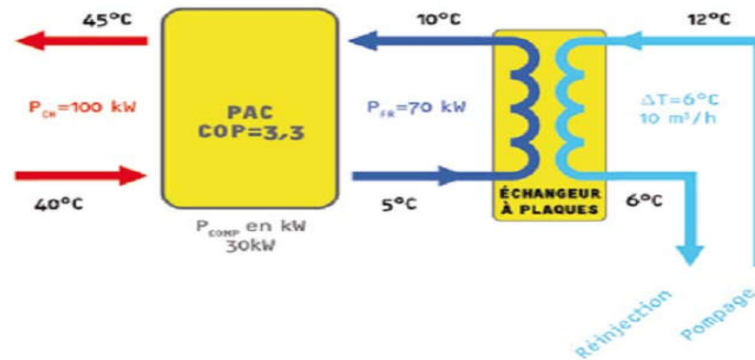


Fig.II.7.Exemple de dimensionnement en mode chauffage [16].

### II.3.5 Mode de fonctionnement Estival (Rafraîchissement)

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.[16].

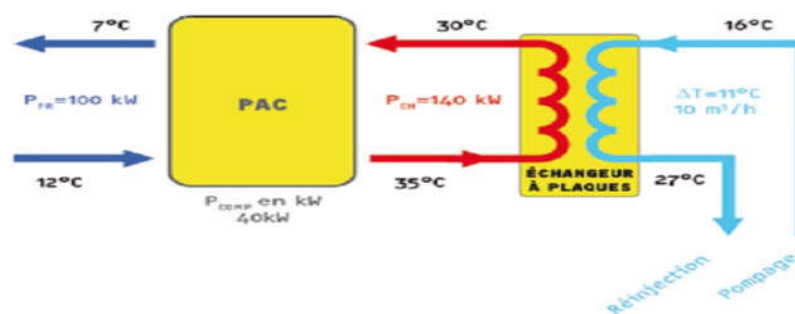
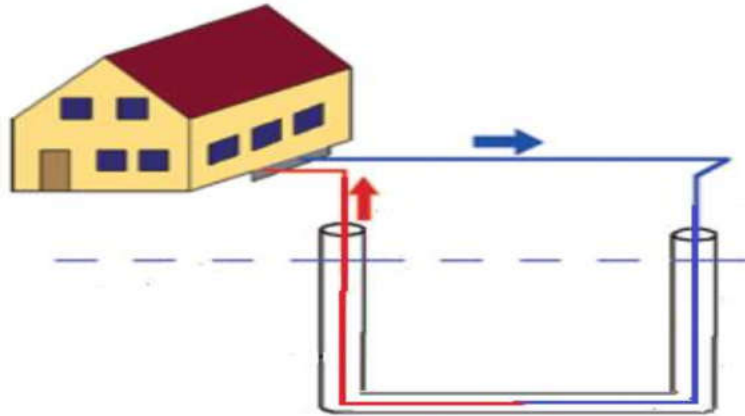


Fig.II.8.Exemple de dimensionnement en mode rafraîchissement [16].

## II.4 La forme d'échangeur de chaleur

### II.4.1 Echangeur Vertical

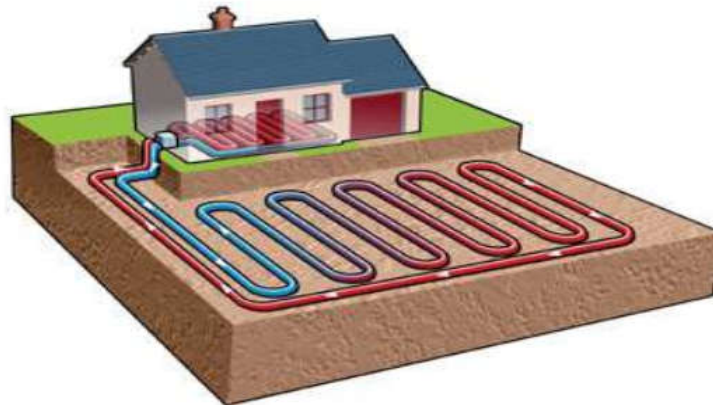
Les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment. La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau glycosée. L'emprise au sol est minime par rapport aux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



**Fig.II.9.***Echangeur vertical [13] .*

#### II.4.2 Echangeur Horizontal

Il n'existe actuellement pas de réglementation ou de normes concernant la mise en œuvre des capteurs horizontaux utilisés dans des installations géothermiques. Seules de recommandations et des conseils pratiques sont accessibles. [13]



**Fig.II.10.***échangeur horizontal[13].*

#### II.4.3 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. [13]



**Fig.II.11.***Echangeur Serpentins*[13].

#### **II.4.4 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.[13]

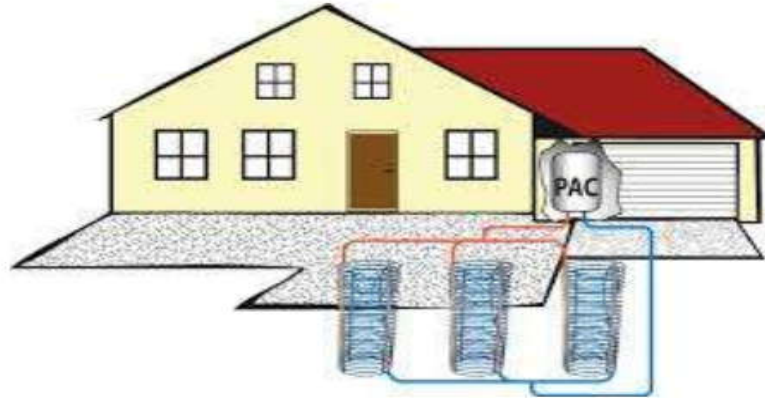


Fig.II.12.Echangeur spiral[13].

## II.5 Principaux paramètres de dimensionnement

L'analyse de la littérature consultée a permis d'identifier les paramètres influant sur le comportement thermique de l'échangeur air-sol et de distinguer les plus prépondérants. Ces paramètres sont considérés pour le dimensionnement d'un échangeur air-sol [17]

### II.5.1 Le Débit D'air Total

Le débit total de l'air circulant dans l'échangeur doit assurer l'ensemble des besoins de renouvellement d'air des pièces à ventiler. Le régime de ventilation peut varier selon le mode de fonctionnement (réduit en préchauffage, plus élevé en rafraîchissement).

La détermination du débit d'air total maximal constitue le premier paramètre de dimensionnement de l'échangeur.[17]

### II.5.2 Le Nombre Et Le Diamètre Des Tubes

Le nombre et le diamètre des tubes définissent la section totale de tubes par laquelle va circuler l'air. Ils influent à la fois sur la vitesse d'écoulement de l'air et sur la surface de contact entre l'air et le sol. Ces paramètres sont ajustés en fonction du débit nominal de ventilation. En pratique, pour les installations domestiques, le diamètre utilisé se situe entre 16 cm et 20 cm, mais il peut être bien supérieur sur des installations de grande taille. Le nombre de tubes est conditionné par l'espace disponible pour l'installation de l'échangeur [17]

### II.5.3 La Vitesse De L'air Dans Les Tubes

La vitesse de l'air ne constitue pas un paramètre indépendant, puisqu'elle découle directement du choix des trois paramètres précédents. Néanmoins, elle impose le type d'écoulement (laminaire, turbulent) et influe donc non seulement sur la valeur du coefficient d'échange convectif entre l'air et les tubes, mais aussi sur les pertes de charges mécaniques

qui doivent être compensées par le ventilateur. Afin de limiter les pertes de charge, cette vitesse est le plus souvent maintenue en deçà de 3 à 4 m/s[17]

#### **II.5.4 La Longueur Des Tubes**

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur, liée à la longueur caractéristique de l'échange thermique  $L$ , qui peut être obtenue en confrontant le surcoût économique de l'échangeur (constant avec la longueur) à l'économie d'énergie apportée par l'allongement des tubes. Par conséquent, il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un ou deux tubes beaucoup plus longs [17]

#### **II.5.5 La Distance Entre Tubes**

Les fonctions de stockage et d'amortisseur thermique du sol sont assurées par le volume de sol situé tout autour de chaque canalisation. L'épaisseur de sol concernée est proportionnelle à la profondeur de pénétration du signal thermique, qui dépend de la période de variation des phénomènes mis en jeu. Ainsi, si la distance entre deux tubes est du même ordre de grandeur ou inférieure à la profondeur de pénétration, la température de la portion de sol située entre ces tubes est influencée simultanément par ces deux tubes, ce qui réduit localement la capacité de stockage du sol.

L'influence de la distance entre les tubes sur les performances de l'échangeur est peu abordée dans la littérature. Pourtant, il semble important d'assurer une distance minimale afin de limiter l'interaction entre deux tubes adjacents et d'optimiser ainsi l'exploitation de l'inertie du sol. Donc, une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour des variations journalières. Par contre, un stockage thermique saisonnier nécessiterait un espacement de l'ordre de 3 m, qui n'est généralement pas envisageable en pratique.[17]

#### **II.5.6 La Profondeur D'enfouissement Des Tubes**

Pour un échangeur air-sol, le sol joue le rôle d'isolant et de tampon thermique entre l'atmosphère et les canalisations enterrées. La profondeur d'enfouissement influe sur la qualité de cette isolation. Les variations de température de l'air extérieur sont d'autant plus amorties et déphasées par le sol que la profondeur est grande. Au-delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne dépend quasiment plus des conditions atmosphériques[17].

### **II.5.7 Pente Du Conduit**

Elle doit être comprise entre 1 et 3% pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud est en contact avec les parois plus froides du puits.[16]

### **II.5.8 Matériau Constitutif Des Tubes**

Le choix du matériau est important car il impacte directement sur les échanges thermiques sol/puits. L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits. Les matériaux utilisés doivent également avoir une bonne tenue à l'enfouissement (une classe de rigidité minimale de 8 kN/m<sup>2</sup> est conseillée). Les tubes entrant dans la composition des puits canadiens/provençaux actuellement en fonctionnement sont généralement en PVC, en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide. Certains tubes sont constitués de matières plastiques (PVC structurés ou gaines type TPC) emprisonnant des bulles d'air, ce qui diminue l'échange thermique sol/conduit. Le recours à ce type de tube est donc déconseillé.[16]

### **II.5.9 Zone à risque radon**

Le radon peut être introduit dans la maison par l'intermédiaire du puits si le conduit apportant l'air extérieur n'est pas étanche. Dans les zones à risque radon, il convient donc de veiller à l'étanchéité du puits et de porter une attention particulière à l'enrobage du conduit avec de la terre afin d'éviter la formation de cavités où le radon pourrait se loger.[16]

### **II.5.10 La nature du sol et son taux d'humidité**

La capacité calorifique et la conductivité du sol ont une influence importante sur l'efficacité du système. Elles dépendent de la composition du sol mais aussi de son taux d'humidité et des migrations d'eau en son sein. La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants :

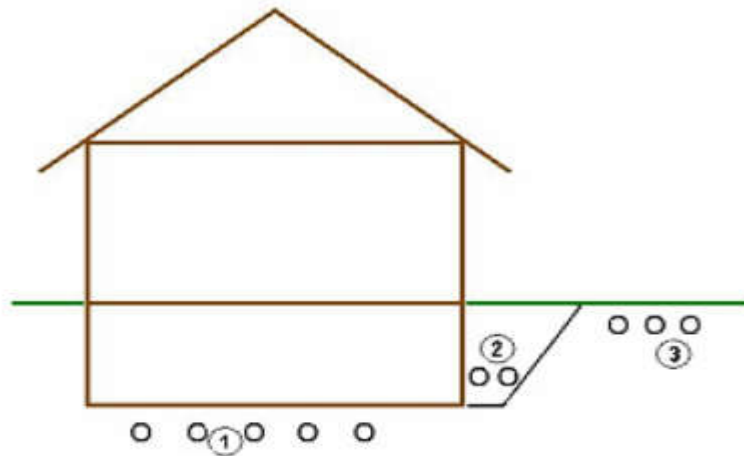
Minéraux, matières organiques, air et eau. L'eau possède une capacité et une conductivité thermiques supérieures à celles des autres constituants du sol. Ainsi, un sol humide emmagasine mieux la chaleur qu'un sol sec et la transmet plus facilement à l'air dans les canalisations de l'échangeur. Cet effet est mis à profit pour augmenter temporairement la performance des échangeurs thermiques air-sol en humidifiant le sol par arrosage.[17]

## II.6 Emplacement du puits canadien

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

- Sous le bâtiment
- Dans les fouilles du bâtiment
- Dans le terrain

Techniquement, ces variantes sont équivalentes, la différence se situe au niveau des coûts de terrassement, la deuxième variante étant la plus intéressante financièrement, aucun terrassement supplémentaire n'étant à réaliser. Lors de la mise en place des tuyaux, il faut éviter au maximum les coudes et angles créant des pertes de charge. de plus un écart entre les tuyaux parallèles d'au moins 0,8m doit être conservé.[17]



**Fig.II.13.**Emplacement du puits[17].

## II.7 L'inertie du sol

L'inertie est une qualité précieuse lorsqu'il s'agit de chauffage ou de rafraîchissement d'un bâtiment. En effet la fraîcheur estivale d'un bâtiment « ancien » s'explique principalement par son inertie thermique élevée, qui résulte à la fois de l'épaisseur et des propriétés du matériau "pierre". La ventilation pour le confort d'été est donc d'autant plus efficace que la masse du bâtiment est importante car l'inertie thermique est complémentaire de la ventilation, et indispensable pour que celle-ci soit efficace.[17]

Dans ce sens le puits canadien, associé au système de ventilation, est intéressant lorsque le bâtiment est léger c'est à dire avec peu d'inertie.

## II.8 Conclusion

nous avons présenté dans cette chapitre une définition de l'énergie géothermique, son effet et son utilisation par un dispositif appelé échangeur eau-sol. Ces types d'échangeurs de chaleur eau-sol mentionnés dans ce chapitre sont classés par forme, tels que l'échangeur de chaleur vertical, l'échangeur de chaleur horizontal, l'échangeur à serpentin, l'échangeur de chaleur en spirale.

Ainsi que la façon dont ces espèces travaillent et leurs utilisations.

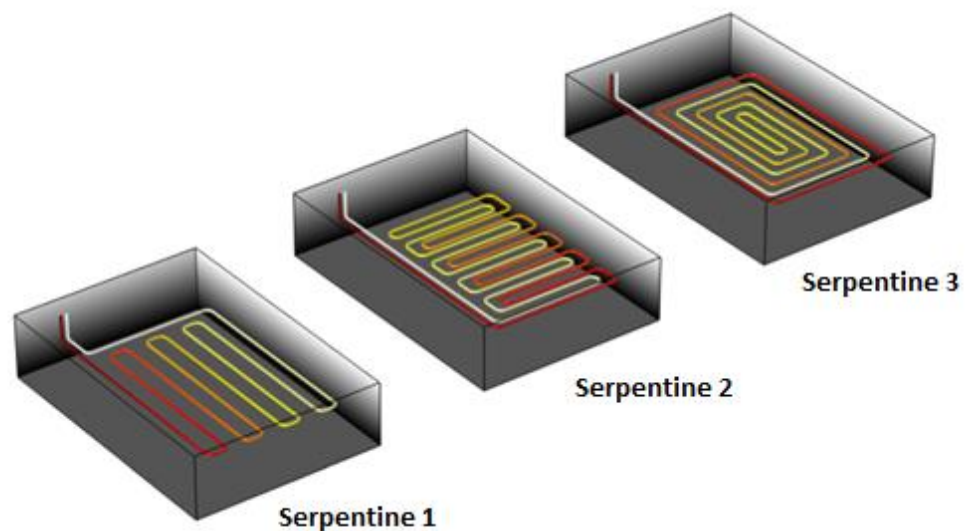
# **C**hapitre III

**CONCEPTION DU MODELE DE CALCUL  
PAR LOGICIEL DE SIMULATION  
ET  
RESULTATS & DISSCUSSION**

### III.1 Introduction

Le chauffage géothermique est une méthode écologique et éco énergétique pour alimenter en chaleur les maisons modernes et bien isolées. Les coûts d'investissement sont plus élevés que pour le chauffage au gaz ou au mazout ; il est donc nécessaire d'étudier les possibilités d'installer des capteurs de chaleur dans le sous-sol.

Cette étude de simulation compare trois modèles différents (figure III.2) de serpentin conçus dans le sous-sol. Les propriétés thermiques typiques d'une couche supérieure du sol dans un jardin sont utilisées pour les calculs.



**Fig.III.1** : Les trois modèles de configuration de serpentine pour la collection de la chaleur.

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

### III.2 Présentation de la formulation mathématiques

#### III.2.1 Modèle thermique du sol

Pour extraire l'énergie froide maximale contenue dans les premiers mètres du sous-sol à un coût financier fiable, nous devons étudier la profondeur de pénétration dans le sol pour l'emplacement idéal de l'échangeur eau-sol en sous-sol et cela signifie que là où la température reste invariante ou moins sensible aux conditions climatiques externes au cours du temps.

### III.2.1.1 Description et hypothèses :

Le sol est considéré comme un milieu homogène et invariant, caractérisé par des propriétés constantes telles que :

- La conductivité thermique  $\lambda_{sol}$ .
- la masse volumique  $\rho_{sol}$ .
- La capacité calorifique massique  $C_{sol}$ .

Le transfert de chaleur dans le sol est unidirectionnel dans le sens vertical. La variation temporelle du taux d'humidité du sol due à l'infiltration d'eau est négligée et aucune nappe phréatique n'est prise en compte sous la zone d'implantation de l'échangeur. Le sol s'apparente dans la modélisation à un massif semi-infini.

### III.2.1.2 Modélisation stationnaire de la température du sol :

La température du sol est régie par l'équation de la chaleur unidirectionnelle suivante [1] :

$$\frac{\delta^2 T_1}{\delta z^2} = \frac{1}{a} \frac{\delta T}{\delta t} \quad (\text{III.1})$$

Soit :

$T$ : Température du sol en [degré].

$t$  : Temps en [s].

$z$  : Coordonnée verticale en [m].

$\alpha$  : Diffusivité thermique du sol [ $a = \lambda / (\rho \cdot C_p)$ ] ( $m^2/s$ ).

$\lambda$ : Conductivité thermique du sol en [ $w/(m \cdot \text{degré})$ ].

$\rho$  : Masse volumique du sol en [ $kg/m^3$ ].

$C_p$ : La chaleur massique du sol en [ $J/kg \cdot \text{degré}$ ].

Lorsque le transfert s'effectue en régime stationnaire, donc le profil de température s'écrit :

$$T_{sol} = aZ + b \quad (\text{III.2})$$

Où  $a$  et  $b$  sont deux constantes d'intégration à déterminer par les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{cases} T_{sol}(z = 0) = T_p \\ T_{sol}(z = \delta) = T_i \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Étant la profondeur d'enfouissement de l'échangeur,  $T_i$  à température initiale du sol et  $T_p$  la température à la paroi du sol (voir Fig. III.1). Pour déterminer la température à la paroi du sol, on assure la continuité du flux de chaleur entre le sol et l'eau ambiante, ce la est donne par la relation suivante :

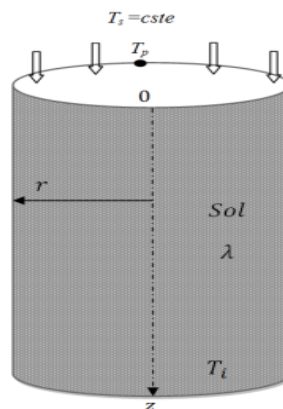
$$-\lambda \frac{\partial T_{SOL}}{\partial Z} \Big|_0 = h(T_p - T_{ee}) \quad (\text{III.4})$$

Après l'intégration de l'équation (III.4), on obtient :

$$-\lambda \frac{(T_i - T_p)}{\delta} = h(T_p - T_{ee}) \quad (\text{III.5})$$

Où  $\lambda$  est la conductivité thermique du sol,  $h$  le coefficient de transfert convectif moyen de l'eau avec le sol et  $T_{ee}$  la température d'eau à l'entrée de l'échangeur. On obtient la température à la surface du sol  $T_p$  comme suit :

$$T_p = \frac{\lambda}{\lambda - \delta \cdot h} T_i - \frac{\delta \cdot h}{\lambda - \delta \cdot h} \quad (\text{III.6})$$



**Fig.III.2.** Schéma du milieu semi-infini du sol avec température constante à la surface. [1].

Par conséquent, la température du sol loin de l'échangeur s'écrit comme [1] :

$$T_{sol}(z) = \frac{(T_i - T_p)}{\delta} z + T_p \quad (\text{III.7})$$

### III.2.2 Le modèle thermique de l'échangeur eau-sol

L'échange thermique entre le sol et l'eau circulant dans les tubes dépend de la structure de l'échangeur, de la température d'entrée de l'eau et de la température du sol à proximité des tubes.

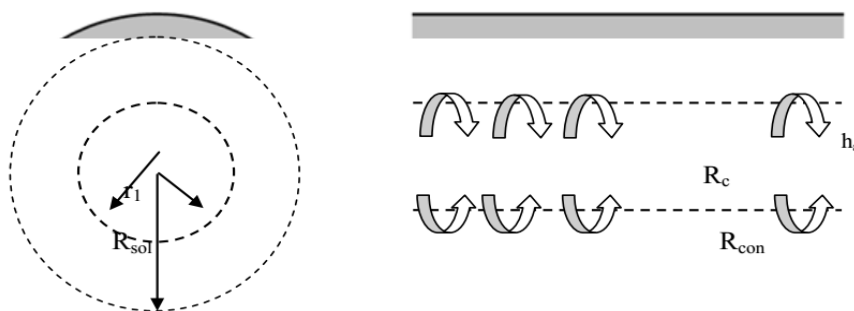
Nous faisons les hypothèses suivantes :

- La température au loin du tube est constante, ce qui revient à considérer que l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangée.
- Nous considérons de plus que l'échange thermique se fait en régime stationnaire, c'est à dire que les températures restent constantes dans le sol et à la paroi du tube.
- L'échange de chaleur à l'intérieur d'un tube enterrée où circule un fluide se fait par convection forcée.
- Le flux thermique  $\phi$ , à travers la paroi du tube est proportionnel à la différence entre la température du sol ( $T_{sol}$ ), et la température de l'eau dans le tube ( $T_{eau}$ ), et à l'inverse de la résistance thermique séparant les deux domaines.

$$q = \frac{(T_{sol} - T_{e(x)})}{R_{totale}} \quad (III.8)$$

La résistance thermique totale ( $R_{totale}$ ) est composée d'une part, de la résistance à la conduction du sol ( $R_{sol}$ ), et celle de la serpentin ( $R_{serp}$ ), et d'autre part de la résistance de la convection de l'eau ( $R_{cv}$ ).

$$R_{totale} = R_{sol} + R_{serp} + R_{cv} \quad (III.9)$$



**Fig.III.3.** Le transfert de chaleur entre l'échangeur et le tube coupe longitudinale et radiale. [16]

### III.2.2.1 Température de l'eau dans le tube :

La quantité de chaleur absorbée par l'eau est[16] :

$$mC_p \frac{dT}{dt} \quad (\text{III.10})$$

Le bilan d'énergie entre deux sections de tube distante de  $\Delta x$  s'écrit :

$$m \cdot C_p \text{ eau} \frac{dT}{dt} = \frac{(T_{sol} - T_{e(x)})}{R_{totale}} \quad (\text{III.11})$$

$$m \cdot C_p \text{ eau} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{(T_{sol} - T_{e(x)})}{R_{sol} + R_{serp} + R_{cv}} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$M$ : La masse de l'eau [kg].

$C_p \text{ eau}$ : Chaleur massique de l'eau  $\left[ \frac{J}{kg.K} \right]$ .

$R_{sol}$ : Résistance thermique entre le tube et le sol  $\left[ \frac{m.k}{W} \right]$ .

$R_{serp}$ : Résistance thermique convective entre l'eau et le tube  $\left[ \frac{m.k}{W} \right]$ .

$R_{cv}$ : Résistance thermique du tube enterré  $\left[ \frac{m.k}{W} \right]$ .

$T_{sol}$ : Température du sol [K].

$$R_{sol} = \frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \left( \frac{r_{sol}}{r_1} \right) \quad (\text{III.13})$$

$$R_{serp} = \frac{1}{\lambda_{serp} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \left( \frac{r_1}{r} \right) \quad (\text{III.14})$$

$$R_{cv} = \frac{1}{\lambda_{cv} \cdot 2\pi \cdot \Delta x \cdot r} \quad (\text{III.15})$$

Soit :  $R_{itot}$  la résistance thermique totale par unité de longueur.

Avec :

$$R_{itot} = \frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \left( \frac{r_{sol}}{r_1} \right) + \frac{1}{\lambda_{serp} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \left( \frac{r_1}{r} \right) + \frac{1}{\lambda_{cv} \cdot 2\pi \cdot \Delta x \cdot r} \quad (\text{III.16})$$

Où :

$r$  : Rayon intérieur du tube enterré[m].

$r_1$ : Rayon extérieur du tube enterré[m].

$r_{sol}$ : Rayon de la couche adiabatique du sol[m].

$\lambda_{serp}$  : Conductivité thermique du tube enterré $\left[\frac{W}{m.k}\right]$ .

$\lambda_{sol}$ : Conductivité thermique du sol $\left[\frac{W}{m.k}\right]$ .

$h_{cv}$ : Coefficient de convection de l'eau $\left[\frac{W}{m^2.k}\right]$ .

On considère le cas du transfert stationnaire :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (III.17)$$

$$(III.11) \Leftrightarrow \rho \cdot s \cdot \Delta x \cdot C_p \text{ eau} \cdot u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\Delta x (T_{sol} - T_{e(x)})}{R_{itot}} \quad (III.18)$$

Où :

$R_{itot}$ : La résistance thermique totale par unité de longueur.

$$\frac{1}{(T_{e(x)} - T_{sol})} dT = \frac{-1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 C_p \text{ eau} \cdot u \cdot R_{itot}} dx \quad (III.19)$$

$$\ln(T_{e(x)} - T_{sol}) = \frac{-1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 C_p \text{ eau} \cdot u \cdot R_{itot}} x + c \quad (III.20)$$

$$\text{à } x=0; \quad T_{e(x)} = T_{ee} \Rightarrow c = \ln(T_{ee} - T_{sol}) \quad (III.21)$$

Si :

$T_{ee}$ : Température de l'eau à l'entrée du tube.

Donc :

$$\ln\left(\frac{T_{e(x)} - T_{sol}}{T_{ee} - T_{sol}}\right) = \frac{-1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 C_p \text{ eau} \cdot u \cdot R_{itot}} x \quad (III.22)$$

$$\left(\frac{T_{e(x)} - T_{sol}}{T_{ee} - T_{sol}}\right) = \exp\left(-\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot C_{p\text{ eau}} \cdot u \cdot R_{itot}}\right) \quad (\text{III.23})$$

(III.23) est l'expression donnant la température d'un point quelconque de l'eau dans le tube enterré [16] :

$$T_{e(x)} = T_{sol} + (T_{ee} - T_{sol}) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot C_{p\text{ eau}} \cdot u \cdot R_{itot}}\right) \quad (\text{III.24})$$

### III.2.2.2 Quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur le long du tube

On note  $Q^*$  quantité de chaleur échangée de l'eau dans le tube vers le sol.

$$Q^* = \left(\frac{T_{e(x)} - T_{sol}}{R_{totale}}\right) \quad (\text{III.25})$$

Donc la quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur est :

$$Q^*/l = \frac{(T_{e(x)} - T_{sol})}{\frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi} \ln\left(\frac{r_{sol}}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_{serp} \cdot 2\pi} \ln\left(\frac{r_1}{r}\right) + \frac{1}{\lambda_{cv} \cdot 2\pi \cdot r}} \quad (\text{III.26})$$

## III.3 Présentation du logiciel de simulation Comsol-Multiphysics

### III.3.1 Définition

COMSOL-Multiphysics est un logiciel de simulation par éléments finis (FEM) permettant de résoudre tout type de problème pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles. Dans ce logiciel, les équations différentielles sont exprimées dans des petits volumes permettant leur expression sous forme de différences simples et transformant le problème continu en un problème comportant un nombre fini d'équations et d'inconnues pouvant se résoudre avec des techniques d'algèbre linéaire.

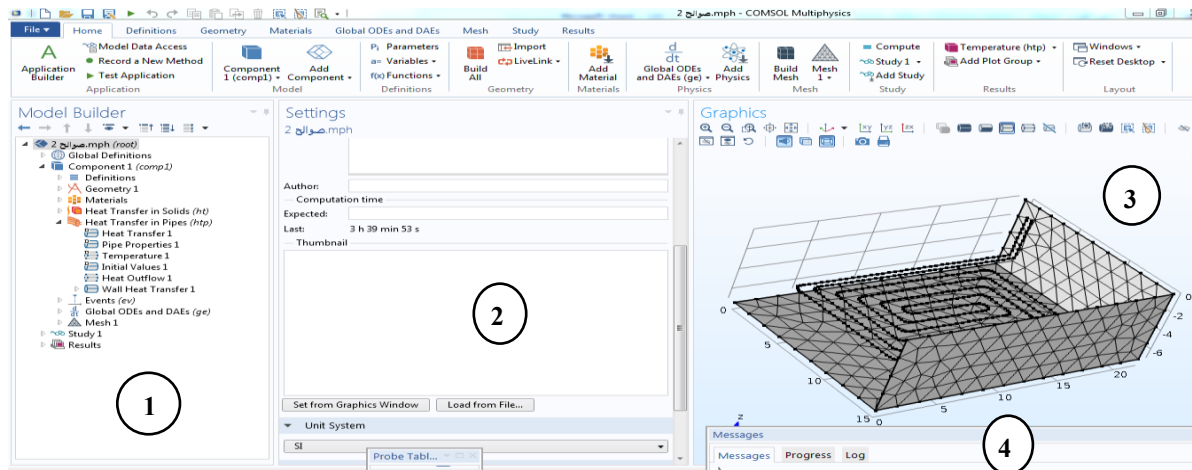
### III.3.2 Avantages de conception avec Comsol-Multiphysics

Le principal but de la création de COMSOL-Multiphysics est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en engineering. Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, par le système entièrement couplé. Des interfaces de modélisation prédéfinis pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multi physiques.

Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles.

### III.3.3 L'interface utilisateur de Comsol-Multiphysics

L'interface de COMSOL, peut être séparée en quatre parties :



**Fig.III.4.** L'interface du logiciel de simulation de comsol-multiphysics.

À gauche, on trouve le Model Builder ① dans lequel est défini le problème à étudier. Dans le détail, le menu Global Définitions regroupe notamment les variables et paramètres du problème. Dans le menu Component 1 sont définis le système de coordonnées (Définitions) par défaut le système cartésien, la géométrie (Geometry), les matériaux (Materials), la ou les physique(s) appliquées aux problèmes et le maillage (Mesh). Le menu suivant Study 1 permet de définir les paramètres de résolutions, (stationnaire ou dépendant du temps), ainsi que les options du solveur. Finalement, le menu Results regroupe l'ensemble des options de post-traitement des données.

La colonne directement à droite ② (Setting) permet d'entrer les données relatives aux options sélectionnées dans le Model Builder. Par exemple, les dimensions de l'objet créé dans Geometry. C'est aussi dans cette fenêtre que les valeurs initiales et les conditions frontières de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis.

En haut à droite, l'interface d'affichage graphique Graphics ③ permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se trouvent les options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, cacher certains éléments, etc.

Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre.


Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d’affichage graphique, une fenêtre ④ permet de visualiser les éventuels messages d’erreurs, la progression des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.

## III.4 Modélisation et simulation par Comsol-Multiphysics

### III.4.1 Création du modèle de simulation

① Ouvrez une nouvelle simulation COMSOL, sélectionnez Model Wizard. Cette option permet de définir pas à pas les modalités du problème.

② Choisissez ensuite un modèle spatial en 3D.

③ Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle Heat Transfer in Solids (ht) et Heat Transfer in Pipes (htp) dans la catégorie Chemical Species Transport. Cliquez sur Add puis sur  Study .

④ Après avoir sélectionné le modèle, vous devez sélectionner le type d’étude désiré. Sous PresetStudies, choisissez le cas d’étude en régime permanent (Stationary), puis cliquez sur

 Done .

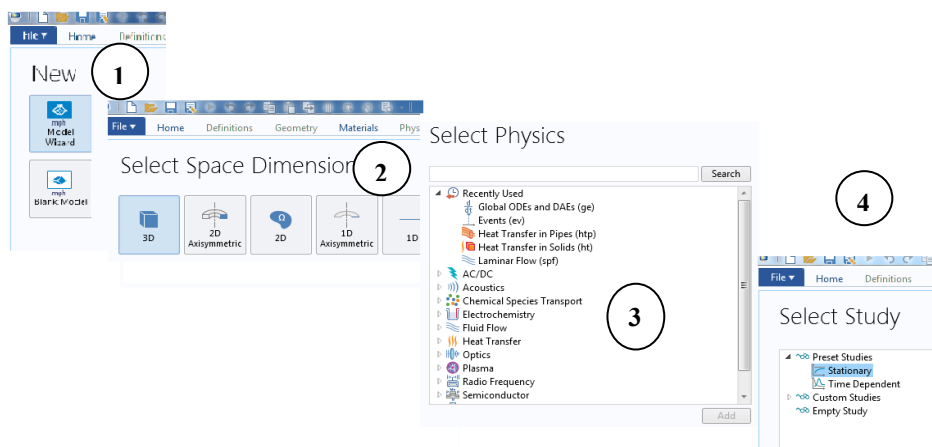
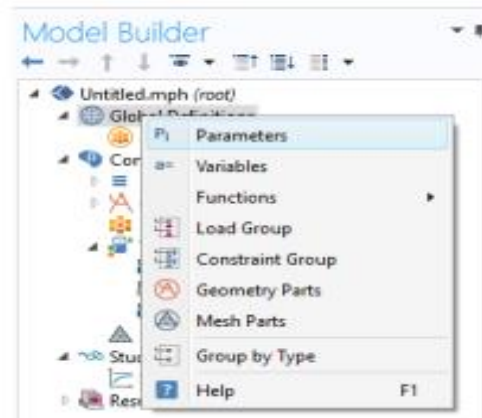


Fig.III.5. Les étapes de création d’un modèle de simulation.

### III.4.2 Définition des paramètres globaux

Dans le Model Builder, faites apparaître le menu contextuel (clic droit de la souris) de Global Definitions et cliquez sur Paramètres (voir Fig.III.6). Lorsque vous définissez une

nouvelle variable, il est possible et fortement conseillé de lui associer une unité. Les unités doivent être mises entre crochets.



**Fig.III.6.** Les paramètres ajoutent au modèle.

**Tableau III.1 :** Paramètres du modèle de simulation.

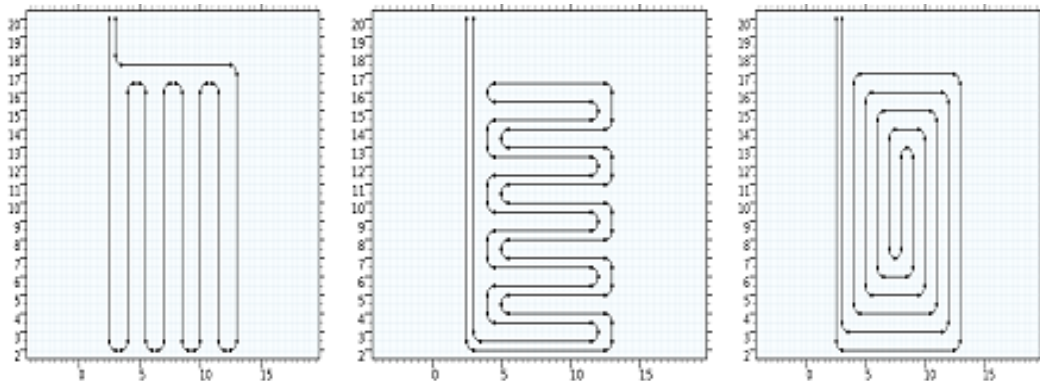
Name	Expression	Value	Description
pattern	3	3	Paramètre pour sélectionner le motif
d_pipe	36[mm]	0.036 m	Diamètre du tube dans le sol
flowrate_pipe	1[l/s]	0.001 m <sup>3</sup> /s	Débit à l'intérieur des tuyaux
heat_demand	30[kW*h]	1.08E8 J	Demande de chaleur quotidienne
Power	4[kW]	4000 W	Puissance de pompe à chaleur
Dt	30[s]	30 s	Zone de transition d'état de chauffage lissée
Depth	4[m]	4 m	Profondeur de l'échangeur de chaleur
Tz_depth	0.5[K/m]	0.5 K/m	Gradient de température
Month	1	1	Index du mois
humidity	1	1	Humidity du sol
k_soil	0.18[W/(m*K)] + (1.5 - 0.18)*humidity	1.5 W/(m·K)	Sol thermique du sol thermique

### III.4.3 Création de la géométrie du problème

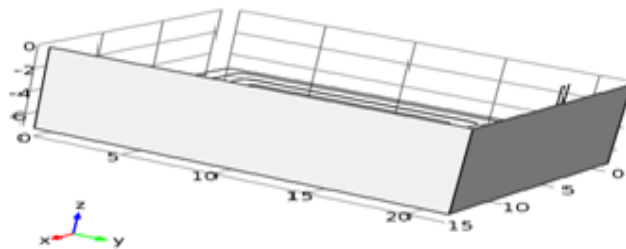
La conception de la géométrie de cette simulation est suivi par les étapes suivantes :

1. Première étape : on clique par le bouton droit de la souris sur Géométrie dans Model Builder et points.
2. Deuxième étape : on ajoute les coordonnées des points (x, y), puis attache entre les points pour obtenir la forme géométrique (Fig.7).

3. Troisième étape : convertir la forme géométrique de 2D à 3D (Fig.8).
4. En fin de compte, nous cliquons sur Construire tout.



**Fig.III.7.** Construction de la géométrie 2D.



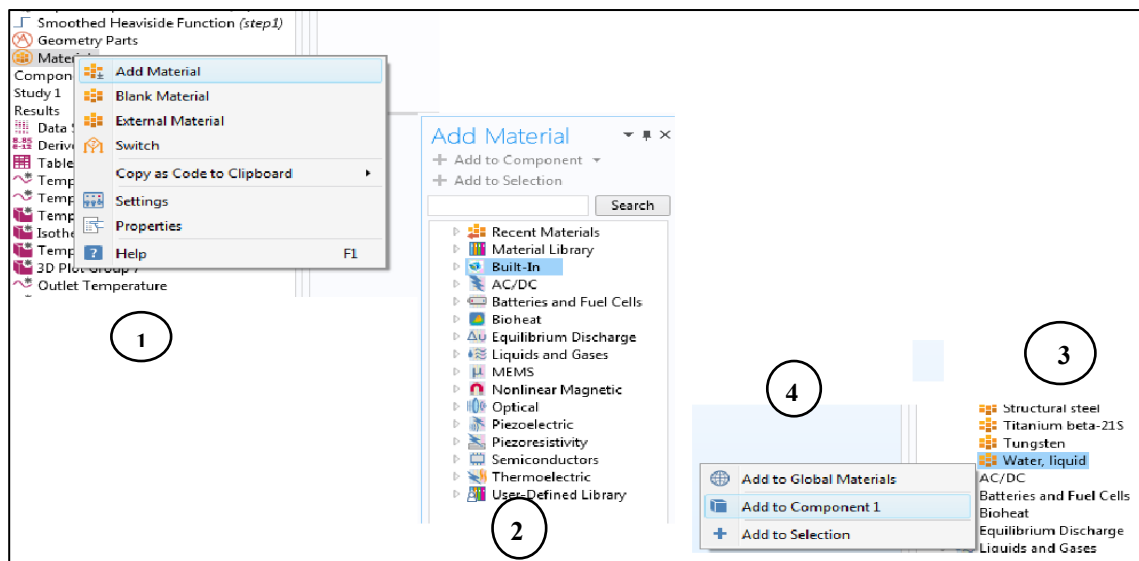
**Fig.III.8.** Construction de la géométrie 3D.

#### III.4.4 Les propriétés du matériau de la géométrie étudiée

L'insertion des matériaux aux formes géométriques précédentes, est faite par les étapes suivantes :

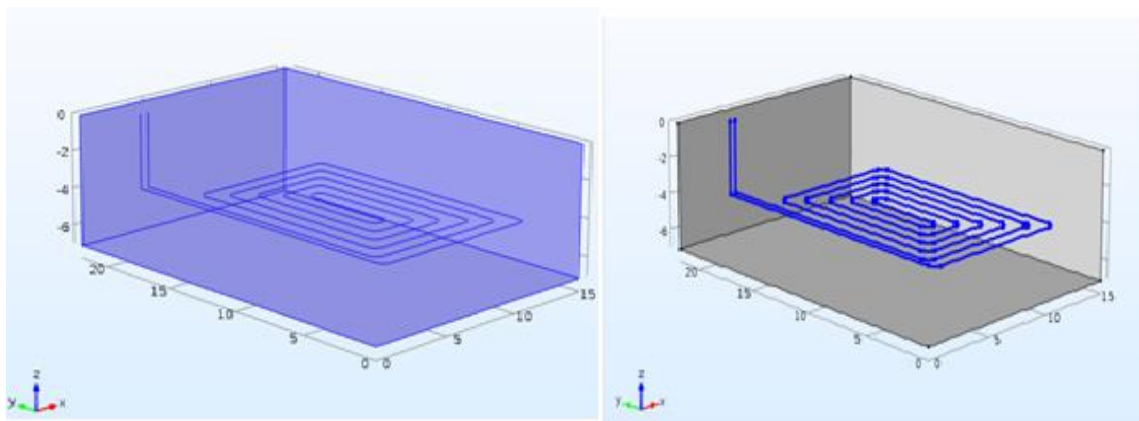
- ① On clique sur le bouton droit de la souris sur le sous-menu Ajouter du matériel existée dans le Model Builder.
- ② On trouve une nouvelle fenêtre à droite de la liste Ajouter du matériel sous l'onglet (gaz et liquides).
- ③ On choisit dans la liste de matériaux (gaz et liquides) sous l'onglet Intégré.
- ④ Puis l'ajouter au formulaire en cliquant par le bouton de la souris sur les matériaux sélectionnés.

Ces matériaux sont attachés avec le génie virtuel. On peut voir les domaines attachés des matériaux en bleu lorsque la sélection.



**Fig.III.9.** Insertion de propriétés des matériaux.

Les matériaux utilisés dans la forme géométrique dans le sol et l’eau à l’intérieur du tube :



**Fig.III.10.** Matériaux utilisés en géométrie (sol et eau).

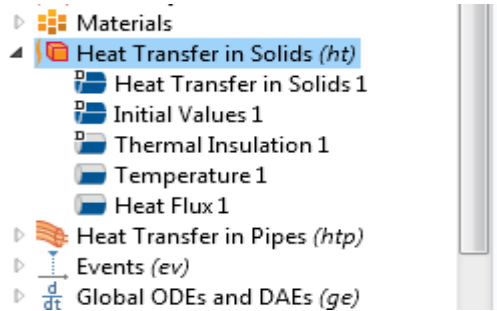
**Tableau III.2 :** Paramètres de matériau.

Name	Valeur	Unité
Viscosité dynamique de l'eau	$\eta(T[1/K])[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
Ratio de chaleurs spécifiques de l'eau	1.0	1
Capacité thermique à pression constante de l'eau	$C_p(T[1/K])[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Densité de l'eau	$\rho(T[1/K])[\text{kg}/\text{m}^3]$	$\text{kg}/\text{m}^3$
Conductivité thermique de l'eau	$k(T[1/K])[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Conductivité thermique du sol	1.5	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Densité du sol	1742	$\text{kg}/\text{m}^3$
Capacité thermique à pression constante du sol	1175	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

### III.4.5 Transfert de chaleur dans les solides

On ajoute les conditions de frontière telles que les suivantes :

On sélectionne le module du composant transfert de chaleur dans les solides (ht) dans la liste Modèle Boulder, puis on ajoute les conditions (la température initiale, isolation thermique et les conditions aux limites de flux thermique) dans le cas des matériaux solides.



**Fig.III.11.** Schéma de sélection du module transfert de chaleur dans les solides.

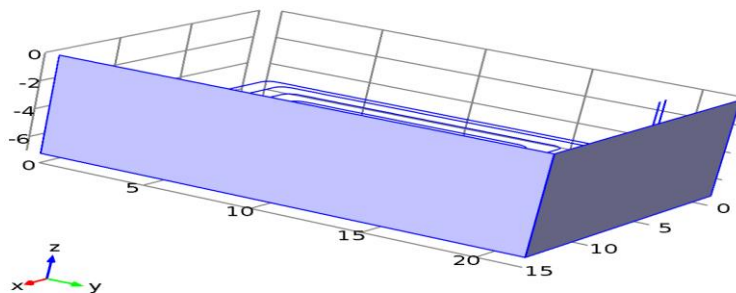
L'équation de transfert de chaleur dans les solides est donnée par l'expression suivante :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (\text{III.27})$$

Sa formule mathématique simplifiée est :

$$\rho \cdot C_p \cdot u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (\text{III.28})$$

$$q = -k \nabla T \quad (\text{III.29})$$

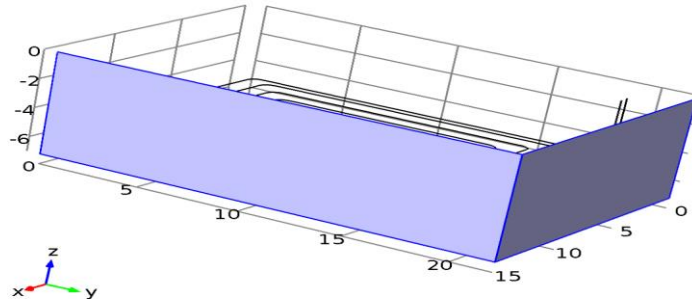


**Fig.III.12.** Les conditions aux limites dans les frontières de la géométrie de l'échangeur.

### III.4.5.1 Isolation thermique :

Après des simulations on obtient l'équation des isolants thermiques suivante :

$$-n \cdot q = 0 \quad (\text{III.30})$$



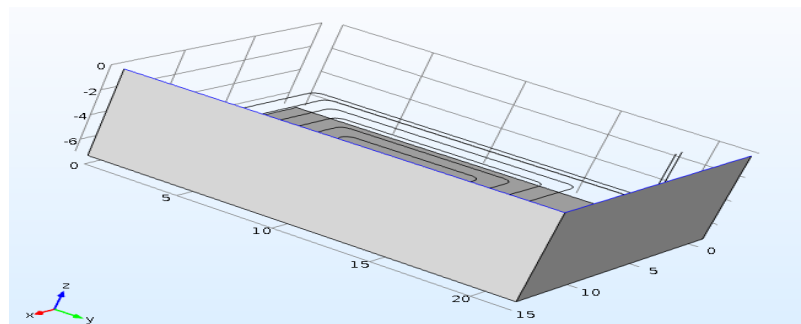
**Fig.III.13.** Isolation thermique de la géométrie étudiée.

### III.4.5.2 Température externe du sol (température initiale)

Pour créer la chaleur initiale, vous devez suivre les étapes suivantes :

- Dans la barre d'outils physique, nous avons cliqué sur Bordures et choisi Température.
- Nous avons défini seulement 4 frontières.
- Dans la fenêtre des paramètres de température, nous localisons la section de température.
- Dans le champ de texte T0, nous avons écrit l'équation de chaleur primaire suivante :

$$T = T_0 \quad (\text{III.31})$$



**Fig.III.14.** Température externe du sol.

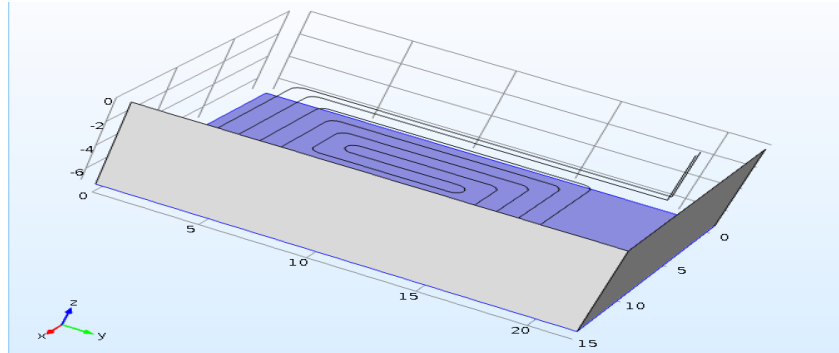
### III.4.5.3 Flux thermique du sol :

Pour créer un flux thermique, vous devez suivre les étapes suivantes :

- Dans la barre d'outils Physique, nous avons cliqué sur Bordures et choisi Flux thermique.
- Nous avons défini seulement 3 frontières.

- Dans la fenêtre Paramètres de débit thermique, nous spécifions l'emplacement de la section de flux de chaleur.
- Dans le champ de script q0, nous avons écrit l'équation de flux thermique suivante :

$$-n \cdot q = q_0 \tag{III.32}$$



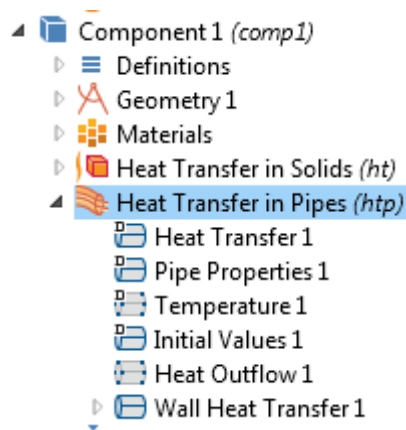
**Fig.III.15.** Flux thermique du sol.

### III.4.6 Transfert de chaleur dans le tube

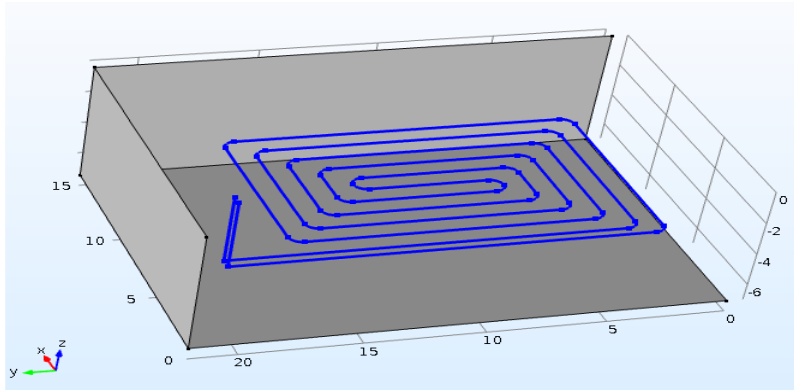
Cliquez sur le bouton droit sur Transfert de chaleur dans les tubes (htp) dans le menu Model Builder (voir figure III.16) et ajoutez les conditions de chaleur du tube (température, Propriétés du tube ,Température à l'entrée et à la sortie de l'eau ,Transfert de chaleur au mur).

L'équation suivante représente le transfert de chaleur dans les tubes :

$$\rho A c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A c_p u e_t \cdot \nabla_t T = \nabla_t \cdot (AK \nabla_t T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho A}{d_h} |u| u^2 + Q + Q_{mur} \tag{III.33}$$



**Fig.III.16.** Schéma du menu de Module transfert de chaleur dans les tubes.



**Fig.III.17.** *Transfert de chaleur dans les tubes.*

- Dans la fenêtre Model Builder, cliquez avec le bouton droit de la souris sur Transfert de chaleur dans les tuyaux (htp) et spécifiez Transfert de chaleur.
- Dans la fenêtre Paramètres de transfert thermique, nous sélectionnons la position thermique et la conductivité thermique de la pièce.
- Dans le champ de texte u, nous avons écrit l'équation de transfert thermique suivante :

$$\rho A c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A c_p u e_t \cdot \nabla_t T = \nabla_t \cdot (AK \nabla_t T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho A}{d_h} |u| u^2 + Q + q_s T + Q_{\text{mur}} \quad (\text{III.34})$$

#### III.4.6.1 Propriétés du tube :

Les caractéristiques du tube représenté par les équations suivantes :

$$Z = \pi d_i \quad (\text{III.35})$$

$$d_h = d_i \quad (\text{III.36})$$

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu} \quad (\text{III.37})$$

$$c_A = \left[ -2.45 \ln \left( \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \left( \frac{e}{d_h} \right) \right) \right]^{16} \quad (\text{III.38})$$

$$c_B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (\text{III.39})$$

$$f_D = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (c_A + c_B)^{-1.5} \right]^{-\frac{1}{12}} \quad (\text{III.40})$$

$$e = 0.0015 \text{ mm} \quad (\text{III.41})$$

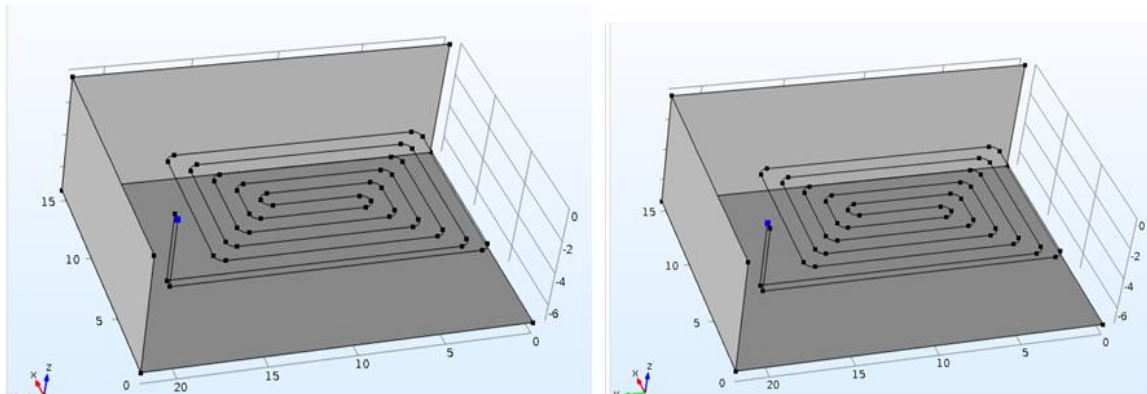
### III.4.6.2 Température à l'entrée et à la sortie de l'eau :

Pour étudier la température à l'entrée et à la sortie de l'eau, suivez les étapes suivantes :

- Dans la fenêtre Model Builder, cliquez avec le bouton droit sur le transfert de chaleur dans les tuyaux (htp) et choisissez la température.
- Dans la fenêtre "Paramètres de température", nous localisons la section de température.
- Dans le champ de texte  $T_{in}$ , nous avons écrit l'équation suivante :

$$T = T_{in} \quad (III.42)$$

- Dans la barre d'outils Physique, cliquez sur "Points" et sélectionnez Sortie de chaleur.
- Nous avons identifié seulement le point 11.



**Fig.III.18.** *Température à l'entrée et à la sortie de l'eau.*

### III.4.6.3 Transfert de chaleur au mur :

Nous ajoutons un mur de transfert de chaleur et suivons les étapes suivantes :

- Dans la barre d'outils Physique, cliquez avec le bouton droit sur les bords et choisissez Transfert de chaleur de mur.
- Dans la fenêtre Paramètres de transfert de mur sélectionnez l'emplacement de la section Editions.
- dans le menu Sélection puis choisissez Pipes.
- Nous localisons la section du modèle de transfert de chaleur. À partir du  $T_x$  menu de texte, nous avons choisi la température (ht).
- Nous faisons un clic droit sur le transfert de chaleur et choisissons la résistance interne du film.

L'équation suivante représente Transfert de chaleur au mur :

$$\rho A c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A c_p u (e_t \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (AK \nabla T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho A}{d_h} |u| u^2 + Q + q_s T + Q_{mur} \quad (\text{III.43})$$

$$Q_{mur} = (hZ)_{eff} (T_{ext} - T) \quad (\text{III.44})$$

Pour section transversale circulaire :

$$(hZ)_{eff} = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{0int}^h} + \frac{1}{r_{Next}^h} + \sum \left( \frac{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}{K_{mur.n}} \right)} \quad (\text{III.45})$$

Pour des tubes d'autres formes :

$$(hZ)_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{0int}^h} + \frac{1}{Z_{NExt}^h} + \sum \left( \frac{\nabla w_n}{K_{mur}(Z_{n-1} + Z_n)/2} \right)} \quad (\text{III.46})$$

Résistance de film interne :

$NU_{lam} = 3.66$  Pour des tubes ronds et des formes définies par l'utilisateur

Pour section transversale rectangulaire

$$NU_{lam} = \begin{cases} 2.98 \text{ pour } w/h = 1 \\ 3.08 \text{ pour } w/h = 1.43 \\ 3.39 \text{ pour } w/h = 2 \\ 4.44 \text{ pour } w/h = 4 \\ 5.60 \text{ pour } w/h = 8 \\ 7.54 \text{ pour } w/h = \infty \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

$$NU_{turb} = \frac{(f_d/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f_d}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (\text{III.48})$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (\text{III.49})$$

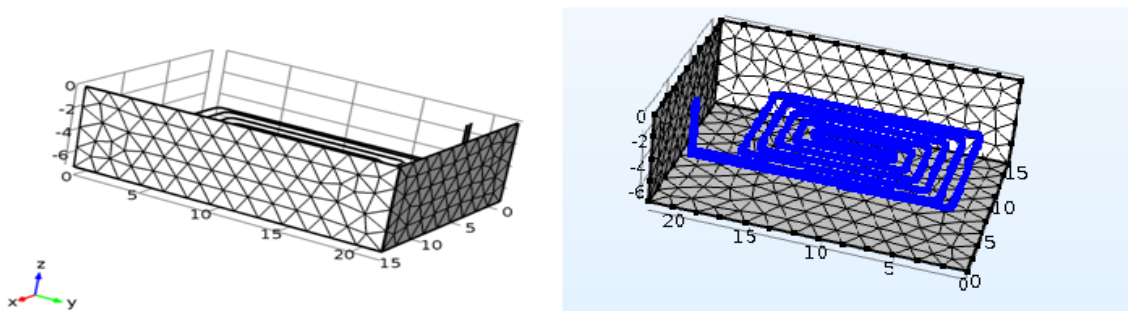
$$NU = \max(NU_{lam}, NU_{turb}) \quad (\text{III.50})$$

$$h_{int} = NU \frac{k}{d_h} \quad (\text{III.51})$$

### III.4.7 Maillage

Pour créer un Maillage, vous devez suivre les étapes suivantes :

- La première étape consiste à cliquer avec le bouton droit sur Maillage dans le Model Builder.
- La deuxième étape Nous faisons un cliquer droit sur Maillage et sélectionnez Plus d'opérations, puis sélectionnez Bord.
- La troisième étape, nous entrons dans les paramètres pour le tube sont (point d'entrée et de sortie, et les divisions du réseau le long du tube).
- La quatrième étape Nous faisons un cliquer droit sur Maillage et choisissez Free Tetrahedral.
- La cinquième étape Entrez les paramètres pour la géométrie uniquement.
- Enfin, nous cliquons sur Construire tout.



**Fig.III.19.** La géométrie du maillage.

**Tableau III.3:** Caractéristiques du maillage.

Description	Valeur
Qualité minimale de l'élément	0.1261
Qualité moyenne des éléments	0.7037
Éléments tétraèdres	39244
Éléments triangulaires	1088
Éléments de bord	559
Éléments Vertex	54

En supposant que les propriétés du fluide sont indépendantes de la température, la température d'entrée du collecteur de chaleur nécessaire pour atteindre un certain taux d'extraction de chaleur,  $P(t)$  est donné par :

$$T_{in} = T_{out} - \frac{P}{\rho C_p \dot{V}}$$

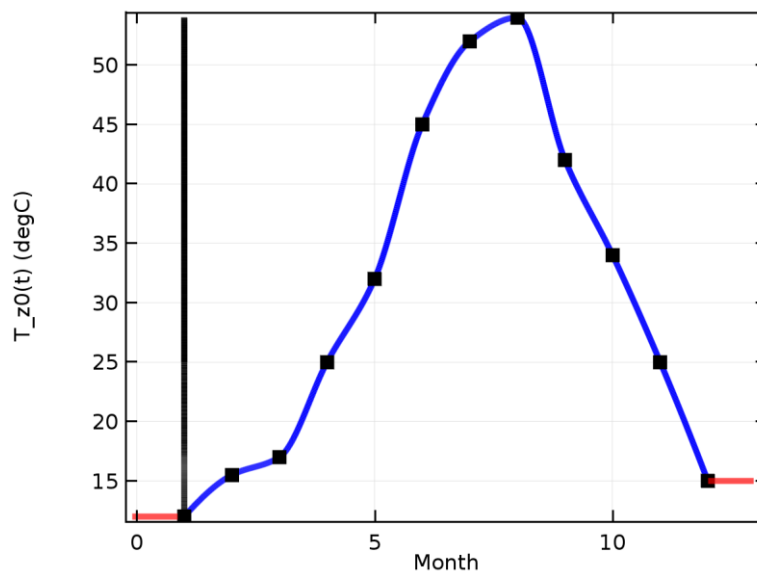
où  $\rho$  et  $C_p$  la densité et la capacité calorifique spécifique du fluide à l'intérieur des canalisations et  $\dot{V}$  le débit volumique, ici égal à 1 [l / s].

L'extraction de chaleur dynamique est déclenchée en fonction d'une demande de chaleur journalière typique d'une maison unifamiliale. Le processus d'extraction de chaleur est actif chaque jour jusqu'à ce que la chaleur demandée soit extraite. Lorsque la demande est atteinte, l'extraction de chaleur est arrêtée mais le débit de fluide dans les tuyaux continue à un débit plus faible. Dans cette application, ce débit pendant l'inaction de la pompe est fixé à 1 / 10ème du débit de fonctionnement, soit 0,1 [l / s].

La température du serpentin pour le troisième modèle après deux jours est indiquée ci-dessous.

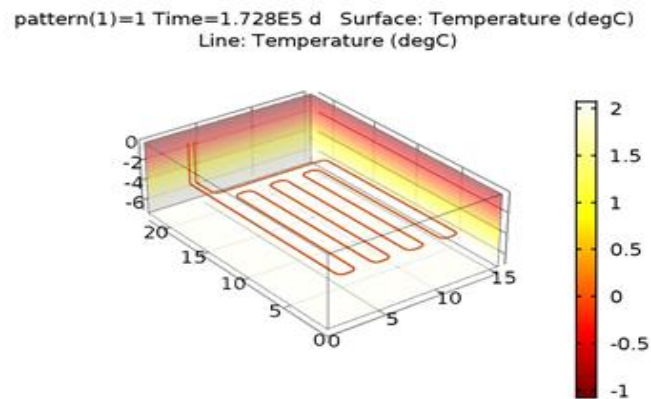
### III.5 Résultats et discussion

#### III.5.1 Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol

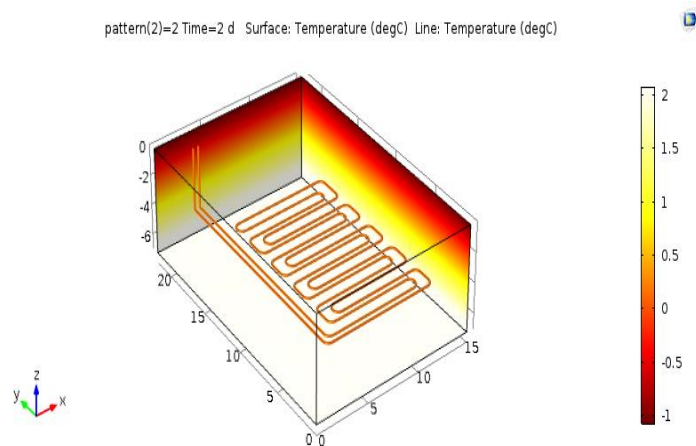


**Fig.III.20.** Evolution de la température de surface dans la période annuelle.

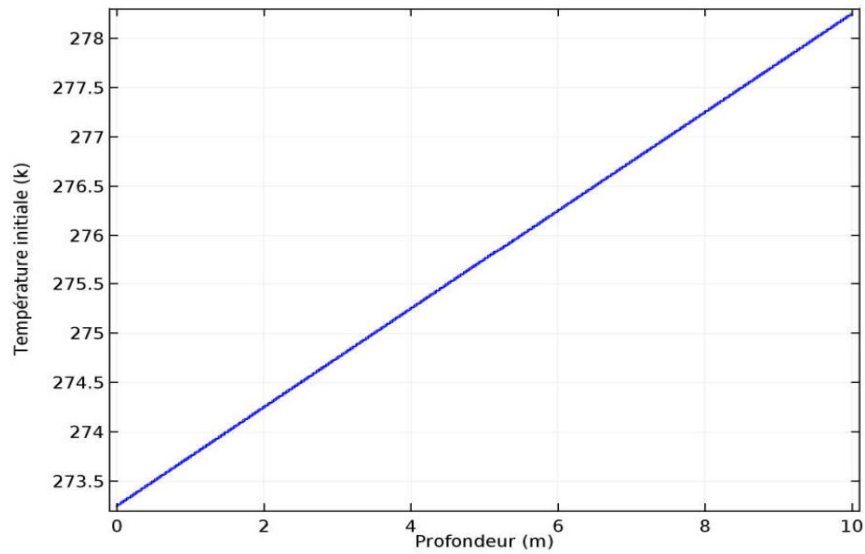
La figure III.20 représentée la variation de la température du sol dans la période annuel, on observé une augmentation de la température du sol dans les premières mois (du 1 à sixième mois), et puis on remarque une diminution progressive de la température du sol jusqu'au la fin de l'année. Cela est dû à l'effet des conditions climatiques qui entraîne l'acquisition de température à la surface du sol.



**Fig.III.21** : Profil de distribution de température de sol selon la profondeur pour le modèle de configuration de serpentine 1.



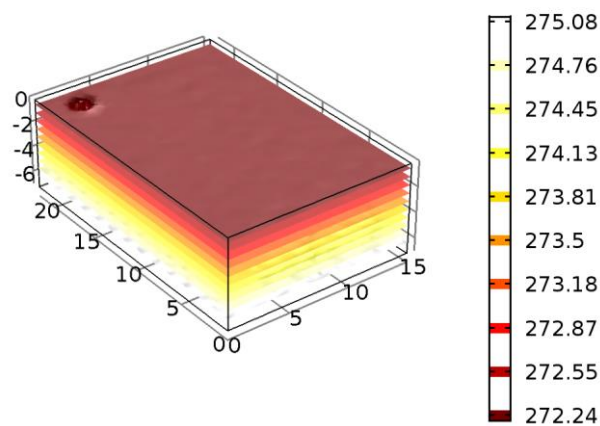
**Fig.III.22** : Profil de distribution de température de sol selon la profondeur pour le modèle de configuration de serpentine2.



**Fig.III. 23.** *Variation de la température de sol en fonction de la profondeur de sol.*

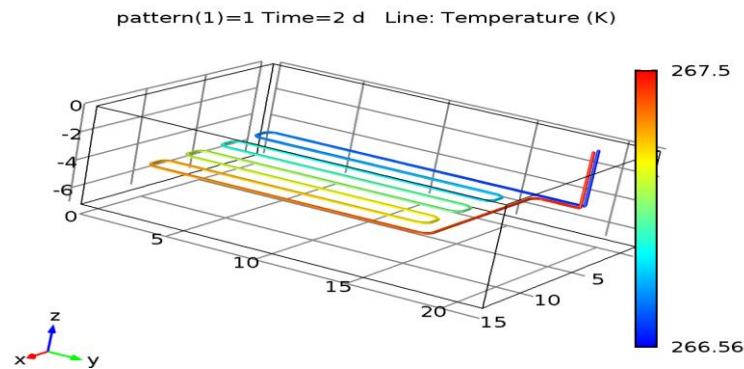
La figure III.23 représente la variation de la température de sol en fonction de leur profondeur, ont observé une augmentation linéaire entre la température de sol et la profondeur, tel que pour une profondeur à l'ordre de 10 mètres la température de sol est atteinte à une valeur de 278 k. Cette variation est simulée par les contours isothermes représentés à la figure III.24.

pattern(3)=3 Time=1.728E5 d Isosurface: Temperature (K)



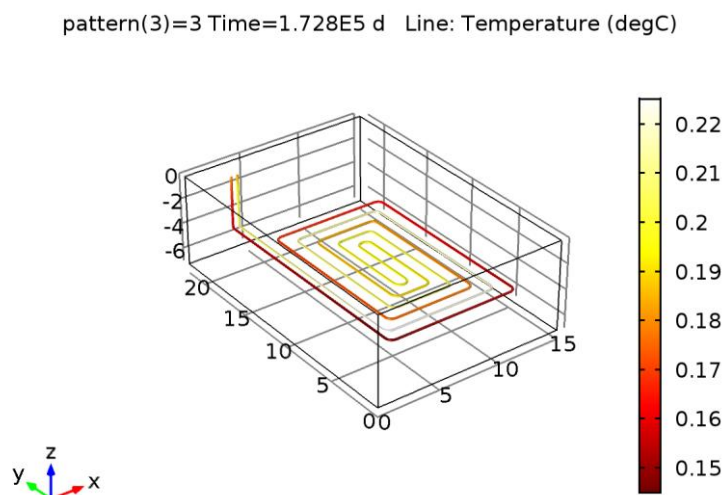
**Fig.III.24.** *Contours isotherme de la surface de sol pour la troisième modèle de serpent.*

### III.5.2 Effet de la température du sol sur l'eau à l'intérieur du tube



**Fig.III.25.** Profil de température de l'eau de l'entrée à la sortie du tube pour une période de 2 jours, le modèle de serpentin 1.

Le profil de distribution de la température de l'eau de l'entrée à la sortie de l'échangeur dans une période de deux jours est représenté à La figure III.25. A partir cette figure, on remarque que l'augmentation de la température de l'eau à la sortie du tube et atteint à 267.5 K, sachant que la température de l'eau à l'entrée est presque de 266.56 K, cette augmentation est causée par l'effet d'échange thermique entre la conductivité du sol et le serpentin de l'échangeur. L'écart de température entre l'entrée et la sortie de l'eau est montré dans la figure III.26.

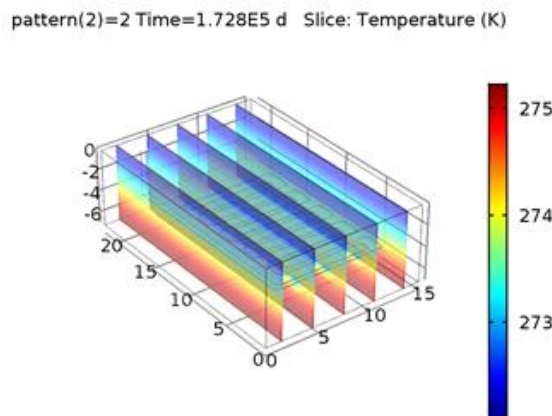


**Fig.III.26.** Variation de la température d'eau à la sortie dans une période de deux jours, modèle de serpentin 3.

### III.5.3 Effet du flux de chaleur sur le tube sous-sol

La figure III.27 simule le champ de distribution de la température de l'échangeur eau sol selon la profondeur dans une période de deux jours en hiver. Nous observons que l'écart de température est réparti d'une façon régulière et cela augmenté par l'augmentation de la profondeur, celle-ci est expliquée par la présence d'échanges thermique dans la profondeur entre le sol et le tube, ce phénomène est traduit par l'équation thématique Eq (III.26).

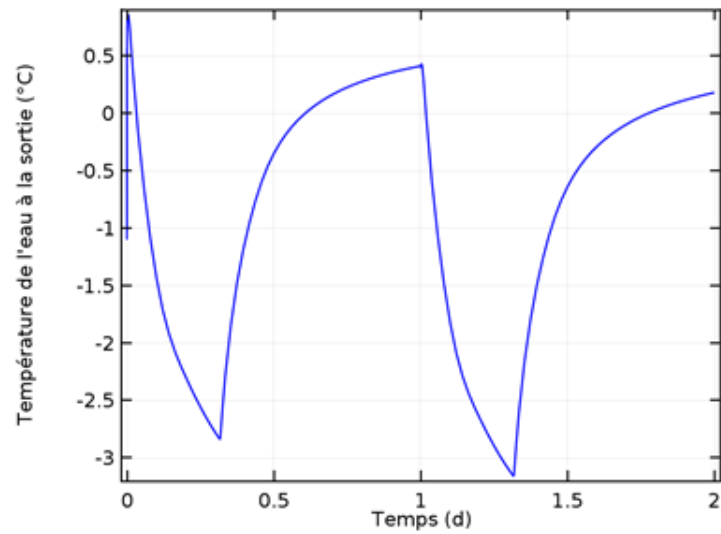
On remarque aussi le tube absorbe une puissance thermique, cela est dû au contact avec les molécules du sol.



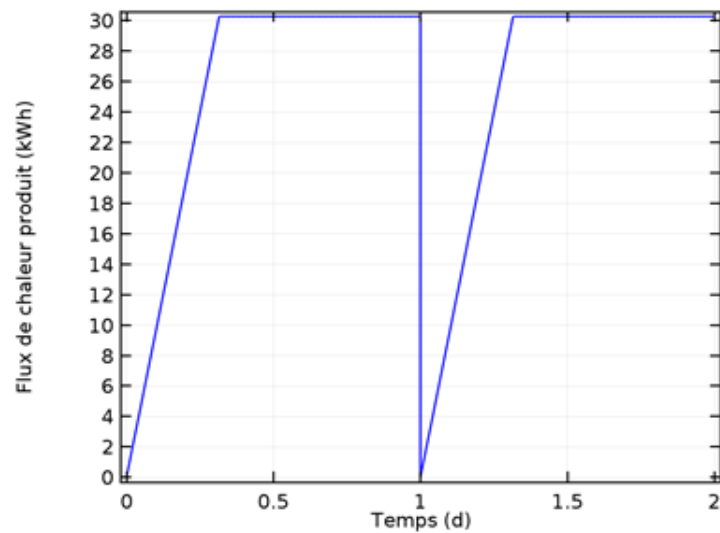
**Fig.III.27.** Répartition de la température de l'échangeur eau-sol, selon la profondeur du sol. Modèle de serpentins 2.

La figure III.28 présente la température de l'eau à la sortie en fonction du temps pour le troisième modèle de serpentins. C'est important pour s'assurer que le fluide à l'intérieur de serpentins reste au-dessus d'une certaine valeur. Dans cet exemple, l'eau est utilisée comme fluide de travail. Cependant, en hiver, la température ambiante au-dessus de la surface peut atteindre des valeurs inférieures à 0 °C. Dans des situations pratiques, des anti-gels tels que le glycérol sont ajoutés à l'eau et cette application suppose que ces additifs ne modifient pas leurs propriétés thermiques.

La variation de l'écart de la température de l'eau indiquée à la figure III.28 correspond aux moments où le chauffage est allumé ou éteint. L'état de fonctionnement de l'échangeur dans le temps est montré à la figure III.29. L'état de l'échauffement dépend de la production de chaleur quotidienne. Dès que la chaleur la production atteint la demande quotidienne, l'état du chauffage est éteint jusqu'au lendemain. La production de chaleur les deux jours du temps de simulation. Juste après l'exigence quotidienne de 30 [kWh], la production est arrêtée jusqu'au lendemain.



**Fig.III.28** .Evolution de l'écart de température d'eau dans l'échangeur en fonction du temps (période de deux jours en hiver).



**Fig.III.29**.Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps. (Période de deux jours en hiver).

### **III.6 Conclusion**

À partir de cette étude de simulation nous concluons que les conditions climatiques ont un impact significatif sur le travail des échangeurs de chaleur eau-sol.

La présence d'une certaine profondeur affecte le travail de l'échangeur de chaleur ou augmente la température de l'eau sortante, ainsi que l'augmentation de la profondeur du sol permet de stabiliser l'état du fonctionnement de l'échangeur et d'augmenter son efficacité. De nombreux facteurs influent sur la température de l'eau à l'intérieur du tube, notamment le mouvement du sol et la conductivité du matériau du tube.

# **C**onclusion générale

## CONCLUSION GENERALE

*L*e travail présenté dans cette mémoire est une simulation numérique d'un système d'échanges de chaleur géothermique eau-sol. L'objectif principal de cette étude c'est pour atteindre la meilleure efficacité thermique possible dans un échangeur eau-sol. L'échangeur géothermique eau-sol, est un système placé à une profondeur suffisante pour récupérer la chaleur du sous-sol pour chauffer l'eau pour produire une quantité de chaleur, et cela permet de chauffer un espace quelconque.

*U*ne simulation numérique est faite par le logiciel CFD COMSOL-Multiphysics en utilisant les deux modules : Transfert de chaleur et la mécanique des fluides. L'utilisation de ces modules permet alors de prévoir l'influence de plusieurs paramètres sur l'état de fonctionnement de l'échangeur. L'emploi de ce logiciel dans l'approche numérique est simple et facile d'utilisation et très peu couteux en temps de calcul, il permet de résoudre et d'analyser rapidement les géométries complexes, et de simulé l'influence de différents paramètres sur les performances thermiques de l'échangeur. La prédiction des performances nécessite la connaissance de quelques paramètres, notamment : la température de l'eau à l'entrée de conduite sous-sol, la température ambiante, les propriétés physique du sol. Ces paramètres on a pu constater qu'elle influe sur la performance thermique de l'échangeur.

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

- Les conditions climatiques affectent la température du sol tout au long de l'année, où nous constatons l'augmentation de la température au premier rang de l'année et diminuons dans la seconde moitié de l'année.
- La profondeur affecte la température du sol, mais nous encourageons la stabilité de la température du sol à une certaine profondeur.

- La présence d'une certaine profondeur affecte le travail de l'échangeur, l'augmentation ou la diminution de la température.
- Plusieurs facteurs influent sur le réchauffement de la température de l'eau à l'intérieur du tube, notamment la mobilité du sol et la qualité du matériau du tube.

## Références Bibliographiques

- [01] Yousef BELLOUFI Intitulé 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.2017
- [02] S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en géophysique, Université Boumerdès, Mars 2006\*
- [03] S. Ouali, A. Khellaf1 et K. Baddari ,Etude des ressources géothermiques du sud algérien, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3 (2007) 407 – 414
- [04] M.S. Guellouz et G. Arfaoui , " Potentiel de la géothermie de surface pour le chauffage et la climatisation en Tunisie ", Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse, pp. 143 -151, 2008
- [05] Nabiha Naili, Majdi Hazami, Abdel Hamid Farhat etude Analytique D'un Echangeur Eau/Sol BP 95 Hammam Lif 2050, Tunisie. 2009
- [06] N. Naili\*, S. Kooli et A. Farhat ,Optimisation analytique et validation expérimentale d'un échangeur enterré, Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 525 – 535
- [07] R. Nebbali ,Simulation Numérique Du Comportement Dynamique D'un Echangeur Eau-Sol CCTC 2013 Paper Number #87 (1569695069)
- [08] Yacine AHMOUDA. Etude numérique des phénomènes d'écoulement et d'échanges thermiques dans un échangeur eau/sol enterré de forme U.2014
- [09] Nahi, Karim, Application de la simulation numérique dans l'étude technique de la géothermie par nappes horizontale de tuyauterie appliquée à un projet immobilier mixte de commerces, bureaux et hôtel, à finalité spécialisée en énergies renouvelables ,2016-2017 <http://hdl.handle.net/2268.2/3369>
- [10] Julien HEINTZ (CETIAT). Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d informations) "janvier 2008.
- [11] Sung Lok Do.Jeff S.Haberl . à review of ground coupled heat pump models used in wholebuilding computersimulation programs. 2010

- [12] Idriss BENGHEZALA, "Contribution à l'étude des Performances Dynamiques et Thermiques d'un Echangeur Enterré", Mémoire de magistère, 2014
- [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] Loubna Benyahya. Modélisation statistique de la température de l'eau en rivière et en régime non-hivernal.2007
- [15] Jean Lemale. La géothermie. Le moniteur. © Dunod, Paris 2009. ISBN 978-2-10-052879-0.
- [16] Belloufi Yousef .Modélisation D'un Echangeur Air/Sol Dont Le But De Rafraichissement Des Locaux. 2012
- [17] Satara Elbouti ,Mabrouki Abdelhakim , Etude D'un Echangeur De Chaleur Air/Sol . 2016

**Titre du mémoire :** Étude Numérique D'un Échangeur Géothermique Eau-sol

**Master:** Énergies renouvelables en mécanique

**Auteur:** TOUIL abdelhak - Soualah Mohamed laid

### Résumé

Le travail présenté dans cette mémoire s'intéresse à la modélisation numérique d'un système de chauffage géothermique utilisé pour les maisons modernes. L'échangeur géothermique est un système placé à une profondeur suffisante utilise la chaleur du sous-sol, où les températures sont presque constantes tout au long de l'année. Dans cette étude trois modèles différents de serpentins ont été conçus pour le captage de la chaleur, celle-ci est parcourue par un fluide caloporteur (l'eau) pour récupérer les calories du sol afin de les transmettre à la maison. Nous avons utilisé le logiciel CFD Comsol-Multiphysics, pour simuler numériquement le comportement thermique de l'échangeur ainsi que pour montrer l'effet de certains paramètres sur les performances thermiques du système. Les résultats obtenus montrant que la variation de la température de surface extérieure, ainsi que les caractéristiques du sol ont une grande influence sur l'écart de température d'eau à la sortie de l'échangeur et son état de fonctionnement.

**Mots Clés :** Géothermique, pompe à chaleur, échangeur eau-sol, modélisation, Comsol-multiphysics.

---

**Thesis title:** Digital Study of a Ground-Water Geothermal Exchanger

### Abstract

The work presented in this thesis focuses on numerical modeling of a geothermal heating system used for modern homes. The geothermal heat exchanger is a system placed at a sufficient depth uses the heat of the subsoil, where temperatures are almost constant throughout the year. In this study, three different models of coil have been designed for the capture of heat; it is traversed by a coolant (water) to recover the calories from the soil to transmit them to the house. We used Comsol-Multiphysics CFD software to simulate numerically the thermal behavior of the exchanger and to show the effect of certain parameters on the thermal performance of the system. The obtained results show that the variation of the temperature of the external surface, as well as the characteristics of the soil have a great influence on the difference of outlet water temperature of the exchanger and your state of operation.

**Keywords:** Geothermal, heat pump, water-ground heat exchanger, modeling, Comsol-multiphysics

---

**عنوان المذكرة:** دراسة عددية لمبادل حراري جوفي حراري في التربة والمياه

### ملخص

يركز العمل المقدم في هذه المذكرة على النمذجة العددية لنظام التدفئة بالطاقة الحرارية الأرضية المستخدم في المنازل الحديثة. إن المبادل الحراري الأرضي هو نظام يتم وضعه على عمق كافٍ يستخدم حرارة باطن الأرض، حيث تكون درجات الحرارة ثابتة تقريباً طوال العام. في هذه الدراسة، تم تصميم ثلاثة نماذج مختلفة من اللولب من أجل التقاط الحرارة، ويتم عبورها بواسطة سائل التبريد (الماء) لاستعادة السعرات الحرارية من التربة لنقلها إلى المنزل. استخدمنا برنامج كومسول لمحاكاة السلوك الحراري للمبادل رقمياً وهذا لإظهار تأثير بعض المعلمات على الأداء الحراري للنظام. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن تغيير درجة حرارة السطح الخارجي، وكذلك خصائص التربة لها تأثير كبير على اختلاف درجة حرارة الماء عند مخرج المبادل وحالة تشغيله.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الحرارية الأرضية، المضخة الحرارية، مبادل حراري أرضي، النمذجة، كومسول