



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

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :  
**Youcef TARCHA**

Le : dimanche 27 septembre 2020

## **Refroidissement des eaux d'irrigation par la géothermie : Echangeur enterré eau/sol de forme spirale.**

---

### **Jury :**

M.	Abdelouahed ALIOUALI	MCB	Université de Biskra	Président
M.	Miloud ZELLOUF	MAA	Université de Biskra	Rapporteur
M.	Kamel AOUES	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 - 2020

## *Sommaire*

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>I</b>
<b>LIST DE FIGURES .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>V</b>
<b>NOMENCLATURE.....</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>

### **CHAPITRE 1 REVU BIBLIOGRAPHIQUES**

1.1 Introduction.....	3
1.2 Travaux précédents .....	3

### **CHAPITRE 2 GENERALITES SUR LA GEOTHERMIE**

2.1 Généralités sur la géothermie.....	8
2.2 Classification des ressources géothermiques .....	8
2.3 Mode de captage .....	9
2.3.1 Captage horizontale.....	9
2.3.2 Captage verticale .....	9
2.3.3 Captage sur nappe d'eau souterraine.....	10
2.4 L'échangeur thermique air/sol (puits canadien).....	10
2.5 Composition d'un puits canadien.....	11
2.6 L'intérêt des puits canadien .....	12
2.7 Les avantages du puits canadien.....	13
2.8 Les inconvénients du puits canadien.....	13
2.9 Choix des matériaux pour le conduit .....	13
2.9.1 Le polypropylène.....	14
2.9.2 Polyéthylène haute densité (PEHD).....	14
2.9.3 Polyéthylène (PE).....	15
2.9.4 Béton ou la terre cuite .....	15
2.9.5 Polychlorure de vinyle (PVC).....	16
2.10 Conclusion .....	17

### **CHAPITRE 3 FORMULATION MATHEMATIQUE & MODELISATION**

#### **NUMERIQUE**

3.1 Ansys Fluent .....	18
3.2 Définition du CFD .....	18
3.3 Équations générales (Équations gouvernantes des problèmes étudiés) .....	18
3.3.1 Équation de continuité.....	18
3.3.2 Équations de la conservation de la quantité de mouvement.....	18
3.3.3 Équation de conservation de l'énergie .....	19
3.3.4 Le modèle turbulent Standard ( $k - \epsilon$ ).....	19
3.4 Méthodes de résolution des équations régissant.....	19

3.5	L'algorithme SIMPLE .....	20
3.6	Les conditions initiales et aux limites .....	21
3.7	Menu principal du logiciel .....	21
3.8	Les différentes étapes de simulation .....	21
3.8.1	Création de la géométrie.....	21
3.8.2	Maillage.....	22
3.8.3	Effet du maillage sur les résultats de calcul .....	23
3.8.4	Configuration.....	23
<b>CHAPITRE 4 RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>		
4.1	Résultats et Commentaires.....	29
4.1.1	Visualisation générale comparative pour les trois Longueurs.....	29
4.1.2	Effet de la longueur d'échange :.....	36
4.1.3	Effet du débit :.....	38
4.1.4	Effet de la nature et de type du sol .....	40
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>		<b>41</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>42</b>

## *List de figures*

Figure 1.1 : Situation géographique de la région d'étude .....	4
Figure 1.2 : Carte du flux de chaleur du Sud algérien .....	4
Figure 1.3 : Configuration étudiée .....	5
Figure 1.4 : Géométrie de l'échangeur air-sol modélisé.....	5
Figure 1.5 : Schéma de puits canadien.....	6
Figure 1.6 : Géométrie simplifiée de l'échangeur air-sol étudié.....	6
Figure 1.7 : Schéma simplifié d'un échangeur air/sol en forme « U » .....	7
Figure 2.1 : les différents types de géothermie et leurs utilisations .....	8
Figure 2.2 : Capteur horizontal. ....	9
Figure 2.3 : Capture vertical. ....	10
Figure 2.4 : nappes souterraines.....	10
Figure 2.5 : Schéma de principe du puits canadien.....	11
Figure 2.6 : La prise d'entrée de l'air neuf.....	11
Figure 2.7 : Disposition en méandre et Tube en boucle.....	12
Figure 2.8 : Évacuation des condensats par un regard de visite .....	12
Figure 2.9 : Conduite polypropylène. ....	14
Figure 2.10 : Tuyaux Le polyéthylène haute densité (PEHD).....	15
Figure 2.11 : Conduit Le polyéthylène (PE) .....	15
Figure 2.12 : conduite en béton.....	16
Figure 2.13 : conduits en Polychlorure de vinyle (PVC).....	16
Figure 3.1 : L'algorithme SIMPLE .....	20
Figure 3.2 : L'interface principale du logiciel ANSYS Workbench.....	21
Figure 3.3 : Géométrie de l'échangeur .....	22
Figure 3.4 : Maillage de la géométrie .....	22
Figure 3.5 : Maillage d'échangeurs. ....	23
Figure 3.6 : Choix le régime transitoire. ....	24
Figure 3.7 : l'équation d'énergie et la turbulent.....	24
Figure 3.8 : choix des matériaux.....	25
Figure 3.9 : les caractéristiques physiques de l'eau.....	25
Figure 3.10 : les caractéristiques physiques du tube.....	26
Figure 3.11 : les caractéristiques physiques du sol. ....	26
Figure 3.12 : choix le débit d'eau. ....	27
Figure 3.13 : choix de la température de l'eau. ....	27
Figure 3.14 : choix de la température du sol.....	28
Figure 3.15 : activation l'option de couplage des parois.....	28
Figure 4.1 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=100m) et débit 0.2kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	29

Figure 4.2 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=100m) et débit 0.3kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	29
Figure 4.3: Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=100m) et débit 0.5kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	30
Figure 4.4 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=100m) et débit 1kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	30
Figure 4.5 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=125m) et débit 0.2kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	31
Figure 4.6 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=125m) et débit 0.3kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	31
Figure 4.7 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=125m) et débit 0.5kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	32
Figure 4.8 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=125m) et débit 1kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	32
Figure 4.9 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=150m) et débit 0.2kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	33
Figure 4.10 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=150m) et débit 0.3kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures. ....	34
Figure 4.11 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=150m) et débit 0.5kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures. ....	34
Figure 4.12 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=150m) et débit 1kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.....	35
Figure 4.13 : Évolution de la température d'eau dans la longueur de l'échangeur (L=150m) en 1 heure. ....	36
Figure 4.14 : Évolution de la température d'eau dans la longueur de l'échangeur (L=150m) en 2 heures.....	36
Figure 4.15 : Évolution de la température d'eau dans la longueur de l'échangeur (L=150m) en 3 heures.....	37
Figure 4.16 : Évolution de la température de sortie d'eau en 3 heures pour un échangeur de chaleur de 100 m pour différents débits. ....	38
Figure 4.17 : Évolution de la température de sortie d'eau en 3 heures pour un échangeur de chaleur de 125 m pour différents débits. ....	38
Figure 4.18 : Évolution de la température de sortie d'eau en 3 heures pour un échangeur de chaleur de 150 m pour différents débits. ....	39
Figure 4.19 : Évolution de la température de sortie d'eau en 3 heures et débit 0.2kg/s pour différents types de sols.....	40

## *Liste des tableaux*

Tableau 2.1 : Classification des ressources géothermiques .....	8
Tableau 3.1: Caractéristiques de spiral. ....	22
Tableau 3.2 : Testé de maillage. ....	23
Tableau 4.1 : variations de température de sortie d'eau pour différents débits (L=100m) .....	30
Tableau 4.2 : variations de température de sortie d'eau pour différents débits (L=125m). ....	33
Tableau 4.3 : variations de température de sortie d'eau pour différents débits (L=150m). ....	35
Tableau 4.4 : Température de sortie pour les trois longueurs (100m, 125m et 150m) pour différents débits.....	39
Tableau 4.5 : Température de sortie d'eau pour différents types de sols en 3 heures et débit 0.2kg/s .....	40

## *Nomenclature*

<b>Symboles</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
$T$	Température	[°C]
$T_{sol}$	La température du sol	[°C]
$t$	Temps	[s]
$x, y, z$	Coordonnées cartésiennes	[m]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/m.k]
$\lambda_{sol}$	Conductivité thermique du sol	[W/m.k]
$\rho$	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{sol}$	Masse volumique du sol	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	Capacité calorifique	[kj/kg.k]
$C_{p_{sol}}$	Capacité calorifique du sol	[kj/kg.k]
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\mu}$	Constantes de la turbulence (modèle k-ε)	[-]
$\mu_t$	Viscosité turbulent	[m <sup>2</sup> /s]
$\mu$	Viscosité dynamique	[m <sup>2</sup> /s]
$\sigma_k, \sigma_{\epsilon}$	Nombres de Prandtl turbulent associés à k et ε Respectivement	[-]
$Pr_t$	Nombre turbulent de Prandtl pour l'énergie	[-]
$Pr$	Nombre de Prandtl	[-]
$P$	Pression	[Pa]

## ***Introduction générale***

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie, à travers l'échangeur de chaleur que transférer la chaleur lorsqu'il existe une différence de température entre deux points sont mises en contact. Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans les processus de refroidissement et de chauffage. En effet, le transfert de chaleur est nécessaire pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, ... etc.

La région de Biskra est considérée comme une zone riche en eau souterraine, qui peut être utilisée pour l'irrigation, car il y a un réservoir d'eau naturel sous cette zone qui atteint une profondeur de 2000 mètres et s'appelle nappe albienne.

En effet, le problème de la température de l'eau de source chaude sur la nappe de l'albien qui atteint 60°C est d'une grande importance et a un impact social et économique sur la culture du palmier dattier et d'autres arbres et plantes dans la région.

D'autre part, Par conséquent, ce problème qui provoque de grandes pertes doit être résolu, et l'une de ces solutions est de refroidir cette eau, il existe de nombreuses méthodes traditionnelles de refroidissement de l'eau qui étaient utilisées dans le passé et sont encore utilisées aujourd'hui.

Ce travail est basé sur des simulations numériques d'un échangeur de chaleur enterré dans le sol. Dans cette simulation, nous utiliserons le logiciel commercial ANSYS Fluent V19.3 qui vous permet de modéliser l'écoulement de fluide, le transfert de chaleur et les réactions chimiques dans des formes géométriques complexes.

À cet égard, nous créerons ce travail, qui est divisé en chapitres, dans le premier chapitre, qui contient des concepts de base et complets sur le thème de l'énergie géothermique, et l'énergies thermiques, l'échangeurs de chaleur et les eaux souterraines ... etc.

Le deuxième chapitre contient des recherches bibliographiques sur des expériences similaires antérieures dans ce domaine (refroidissement / chauffage) de l'eau ou l'air pour d'avoir des idées sur ce problème.

Dans le troisième chapitre, la formulation mathématique et la méthode numérique choisie sont présentées pour résoudre le problème avec le logiciel du calcul ANSYS Fluent V19.3, ainsi qu'une brève explication des étapes de simulation du comportement de l'échangeur de chaleur.



Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présenterons les résultats obtenus pour les différentes longueurs, débits et types de sols utilisés dans cette étude.

# **Chapitre 1**

Revu bibliographiques

# Chapitre 1 Revu bibliographiques

## 1.1 Introduction

Un échangeur géothermique air-sol est un système qui utilise l'énergie thermique du sol pour chauffer ou refroidir une partie de l'air de renouvellement d'un local. Il est parfois appelé puits canadien ou puits provençal. Le principe du système consiste à faire passer, avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf de renouvellement par des tuyaux enterrés dans le sol, à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 mètres.

Nous présentons dans ce chapitre quelques travaux des chercheurs disponibles dans la littérature qui mènent les phénomènes des échanges thermiques dans des échangeurs de type aie/sol.

Dans ce qui suit nous exposons les travaux antérieurs de quelques chercheurs dans ce domaine :

## 1.2 Travaux précédents

**Awali et al. (2006)** [1], ont exposé une étude sur l'énergie géothermique qui se réfère à l'exploitation des sources chaudes en profondeur. C'est l'une des importantes sources d'énergie renouvelable au monde. Il existe deux importants 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 large zone présentant un potentiel géothermique dans des bassins sédimentaires dans des zones continentales stables. Les ressources géothermiques sont essentiellement à faible énergie. Afin de reconnaître les zones d'importance géothermique, des cartes de températures géothermiques ont été développées. Deux zones géothermiques distinctes ont été tenues en évidence à travers ces cartes, l'une dans la partie orientale et l'autre dans la partie occidentale du Sahara algérien.

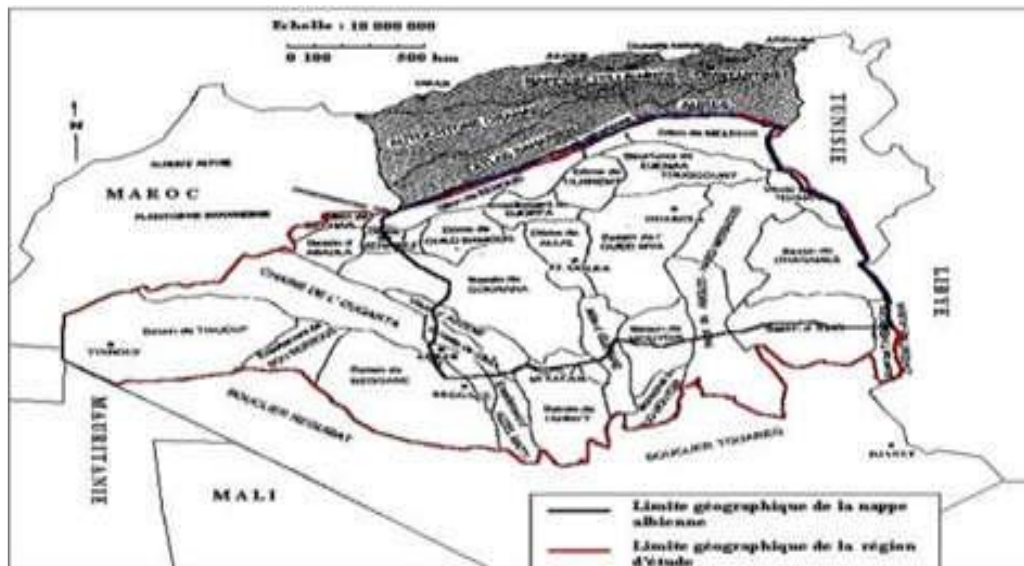


Figure 1.1 : Situation géographique de la région d'étude [1].

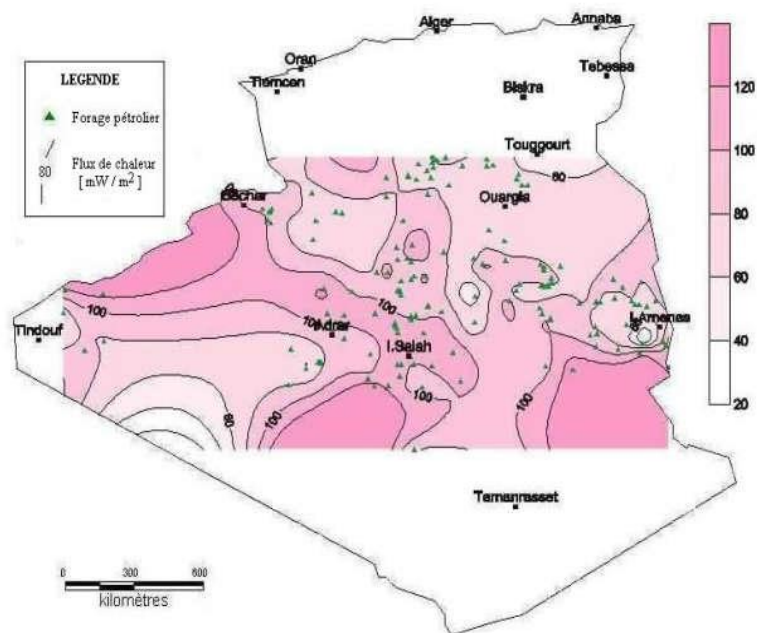
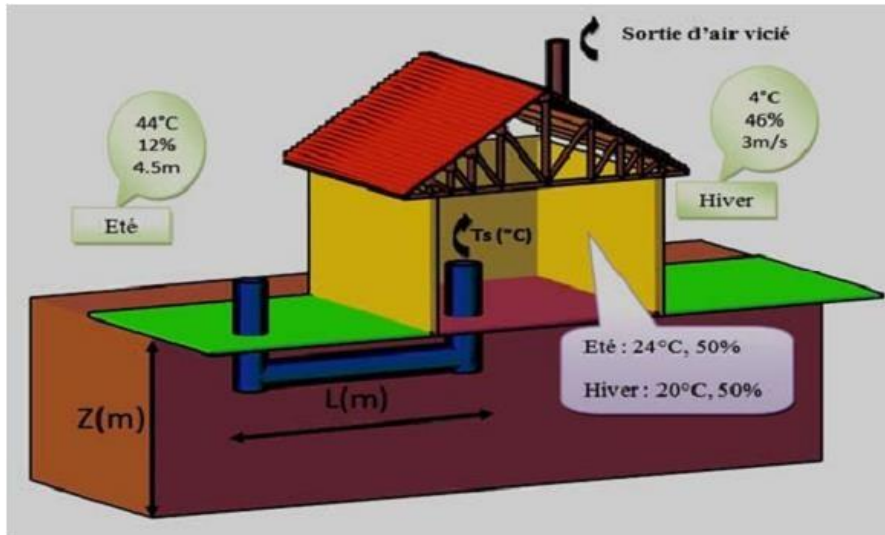


Figure 1.2 : Carte du flux de chaleur du Sud algérien [1].

Mebarki et al. (2012) [2], ont étudié les performances d'un échangeur air-sol, ont été entreprises par une voie de la modélisation analytique. Ils ont premièrement validé le modèle de la température de sol et la température de l'air dans l'échangeur, puis ils ont analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir : la profondeur, le diamètre et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur.

Il s'agit d'un échangeur enterré constitué d'un seul tube qui va être utilisé dans la ville de Béchar.



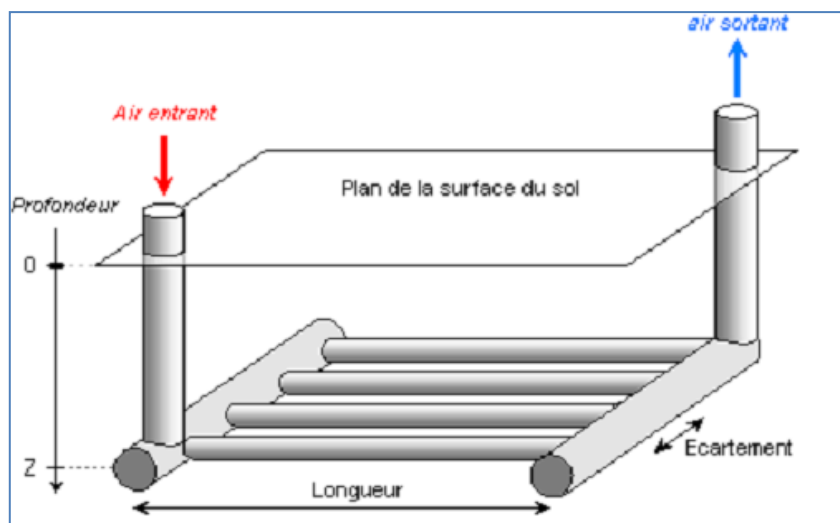
**Figure 1.3 :** Configuration étude [2].

**Stéphane THIERS et Bruno PEUPORTIER (2012)** [3], ont développé un modèle, qui tient compte des principaux phénomènes intervenant durant l'échange air-sol. Il se compose de deux éléments : un modèle thermique de sol et un modèle d'échangeur.

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

Le deuxième utilise la température du sol calculée pour déterminer la température de l'air en sortie d'échangeur.

Ce modèle a été intégré à un outil de simulation thermique du bâtiment. Deux bâtiments réels équipés chacun d'un échangeur air-sol instrumenté ont permis de confronter les résultats de simulation à des mesures, validant ainsi le modèle sur les configurations étudiées.

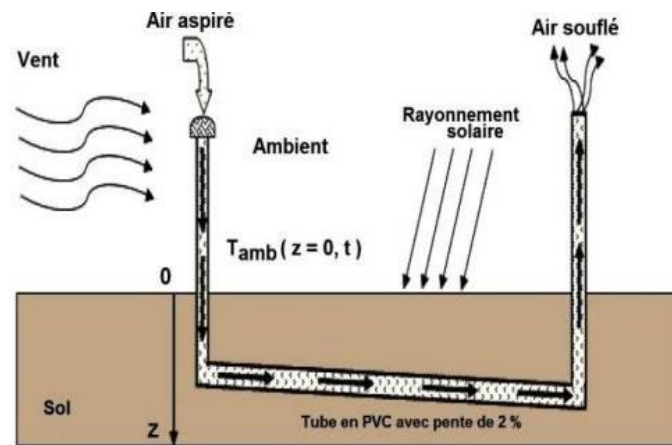


**Figure 1.4 :** Géométrie de l'échangeur air-sol modélisé [3].

**Nebbar, Moumimi et al. (2014)** [4], ont établi une étude relative à un échangeur Air /sol, deux modèles :

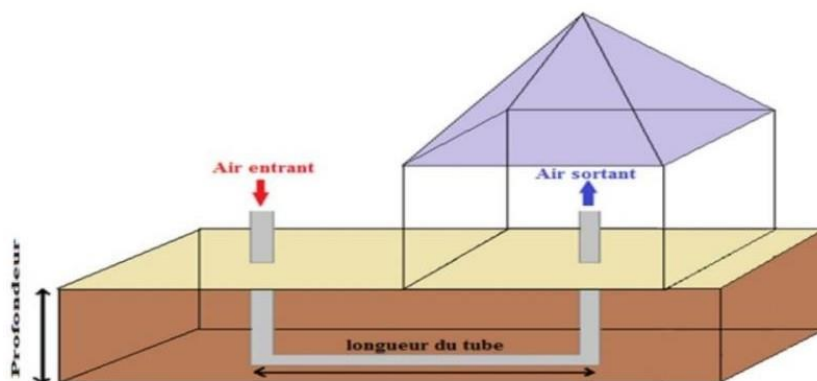
- Un modèle thermique pour chercher la température du sol.
- Un modèle pour trouver la température de l'air dans l'échangeur air /sol.

À travers ces deux modèles on affecte l'allure de l'échangeur pour voir l'influence de quelques paramètres principaux conceptuels (géométrie de l'échangeur) et environnementaux (site, sol, rayonnement solaire) ainsi que ceux relatifs aux propriétés physiques du fluide caloporteur sur l'évolution de la température de l'air à la sortie l'échangeur.



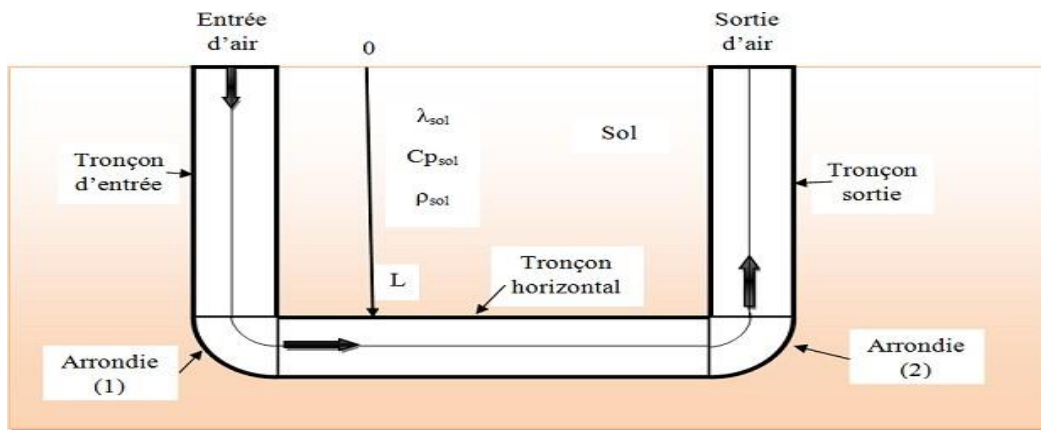
**Figure 1.5** : Schéma de puits canadien [4].

**Kabore, Ouedraogo, et al. (2017)** [5], ont mené une revue bibliographique et une étude analytique de l'échangeur de chaleur air-sol. Ont aussi présenté notre prototype expérimental mis en œuvre à Ouagadougou. Cette étude a permis de déterminer les paramètres importants pour la mise en œuvre d'un échangeur de chaleur air- sol.



**Figure 1.6** : Géométrie simplifiée de l'échangeur air-sol étudié [5].

**CHEBANA et BRIMA (2016)** [6], ont étudié la distribution de la température à l'intérieur du sol et aussi à l'intérieur et à travers l'échangeur géothermique et l'étude de son efficacité a aussi établi une étude d'un échangeur géothermique au niveau de l'université de Biskra cette étude servira comme support de comparaison entre les rapproches ces deux études.



**Figure 1.7 :** Schéma simplifié d'un échangeur air/sol en forme « U » [6].

**FONTAINE Pier-Olivier et MARCOTTE Denis (2010)** [7], ont présenté une solution à des problèmes géothermiques dans leur mémoire. Il s'agit d'utiliser un échangeur géothermique horizontal couplé à une pompe à chaleur pour à la fois chauffer un bâtiment et conserver l'intégrité du pergélisol sous celui-ci. Un nouveau modèle analytique pour boucle horizontale basé sur la méthode de la source linéique finie est présenté. Ce modèle est l'extension au cas transitoire dans le sol, et pour n'importe quelle disposition des tubes placés en série, du modèle en régime permanent pour tubes parallèles de Classons et Dunant (1983). Il permet d'avoir une variation de flux le long de l'échangeur géothermique. Le modèle analytique ne peut pas tenir compte du changement de phase de l'eau souterraine étant donné la complexité du phénomène. Lorsqu'il n'y a pas de changement de phase, le modèle analytique est validé par un modèle numérique d'éléments finis 3D. Une comparaison entre un modèle numérique tenant compte du changement de phase et le modèle analytique utilisant les paramètres thermiques d'un sol-gelé en permanence a été faite. Les résultats de cette comparaison ont démontré que le modèle analytique procure toujours une bonne approximation de la température du sol pendant la période annuelle de chauffage intensif et par le fait même, il permet de bien estimer la quantité d'énergie retirée du sol par l'échangeur géothermique souterrain (EGS). En été, la température du sol et l'épaisseur du mollisol sont surestimés par le modèle analytique ce qui fait que le modèle analytique donne des résultats conservateurs.

# **Chapitre 2**

## Généralités sur la géothermie



# Chapitre 2 Généralités sur la géothermie

## 2.1 Généralités sur la géothermie

La Géothermie, du grec Géo (La terre) et thermie (la chaleur), est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur d'une part, et d'utilisé l'énergie géothermique pour chauffe ou rafraîchit des maisons et produit de l'électricité sans faire du mal à l'environnement [8].

## 2.2 Classification des ressources géothermiques

On distingue plusieurs types de géothermie :

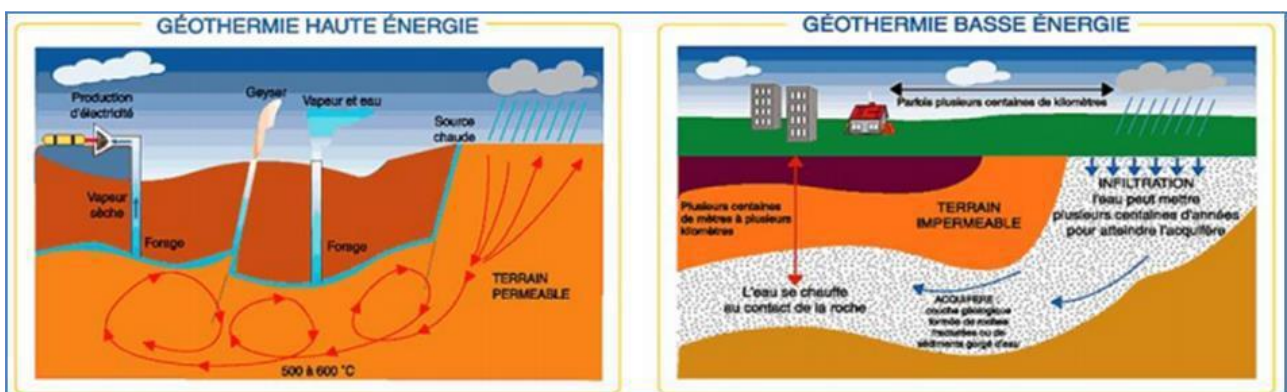


Figure 2.1 : les différents types de géothermie et leurs utilisations [9].

Tableau 2.1 : Classification des ressources géothermiques [10].

Type de Géothermique	Caractéristiques du "réservoir" de chaleur	Utilisations
Géothermie de Surface	Sol entre 10 et 15 (le sol est principalement chauffé par le soleil)	Chauffage et rafraichissement de locaux avec pompe à chaleur
Très basse Energie	Nappe à moins de 100 m température à 30	Chauffage et rafraichissement De locaux avec pompe à chaleur
Basse énergie	30 <températures< 150	Chauffage urbain, utilisations Industrielles, Thermalisme, Balnéothérapie
Moyenne et Haute énergie	180 <températures <350	Production d'électricité

## 2.3 Mode de captage

Nous étudierons essentiellement la géothermie de surface et la géothermie à très basse énergie qui sont utilisées pour le chauffage et le rafraîchissement de locaux. Pour capter ces calories provenant du sol, on peut utiliser [7]:

Les pompes à chaleur géothermiques qui prélèvent la chaleur présente dans un milieu naturel (l'air, l'eau, la terre) pour la transférer vers un autre (par exemple, dans un logement pour le chauffer).

Les puits canadiens hydraulique ou aéraulique parfois appelé puits provençal utilise également de la stabilité thermique du sol quel que soit la saison. Ce système consiste à faire passer, avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf de renouvellement par des tuyaux enterrés dans le sol, à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 mètres. Ce système du puits canadien sert surtout de climatisation.

Il existe trois modes principaux pour capter la chaleur de la terre, il s'agit de :

### 2.3.1 Captage horizontale

Captage horizontal est constitué d'un réseau de tubes en polyéthylène enterré entre 80 et 100 centimètres de profondeur, rempli d'un mélange d'eau et de mono propylène glycol non toxique pour l'environnement. L'énergie exploitée provient principalement du rayonnement solaire. Les infiltrations d'eau de pluie et du vent constituent le complément. Il est nécessaire de disposer d'une surface de terrain équivalente de 1 à 2 fois la surface chauffée. Cette solution de captage est idéale pour tous les projets de construction neuve.

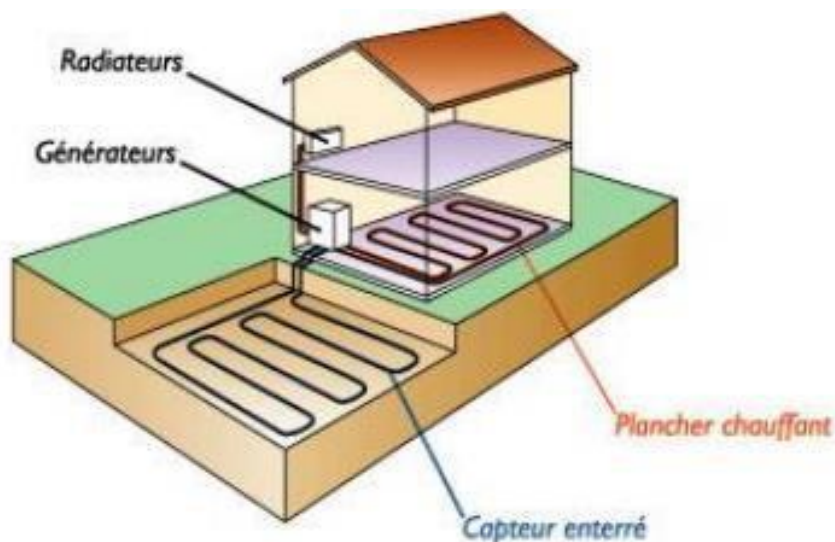


Figure 2.2 : Capteur horizontal [7].

### 2.3.2 Captage verticale

Captage vertical est composé d'une ou plusieurs sondes thermiques constituées de 4 tubes polyéthylène en « U » descendues à une profondeur de 50 à 100 mètres. Ces sondes sont remplies d'un mélange d'eau et de mono -propylène glycol non toxique pour l'environnement. Ce système

est l'un des plus performants car la température du sol à 100 mètres de profondeur est plus élevée qu'en surface. Cette solution est idéale pour tous les projets de rénovation ou de construction neuve.

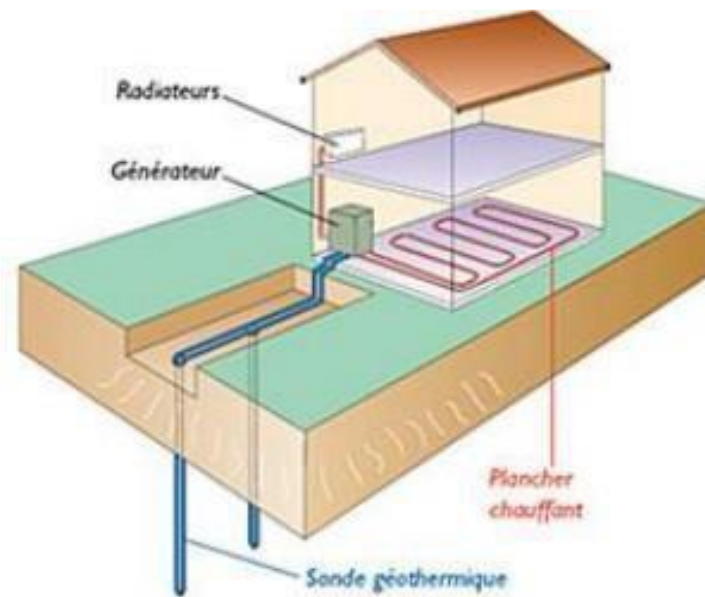


Figure 2.3 : Capture vertical [7].

### 2.3.3 Captage sur nappe d'eau souterraine

Le système de captage sur nappe d'eau souterraine consiste à prélever l'eau de cette nappe et à en récupérer la chaleur. Il nécessite la réalisation de deux forages, l'un pour captage proprement dit, l'autre pour rejeter l'eau une fois les calories extraites. Selon les types d'eau, il est conseillé d'installer un échangeur entre le capteur et la pompe à chaleur, voire un filtre, afin de récupérer les impuretés éventuelles de l'eau.

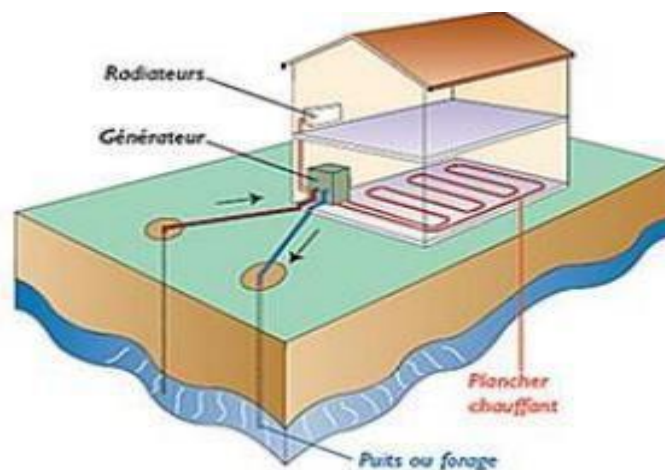
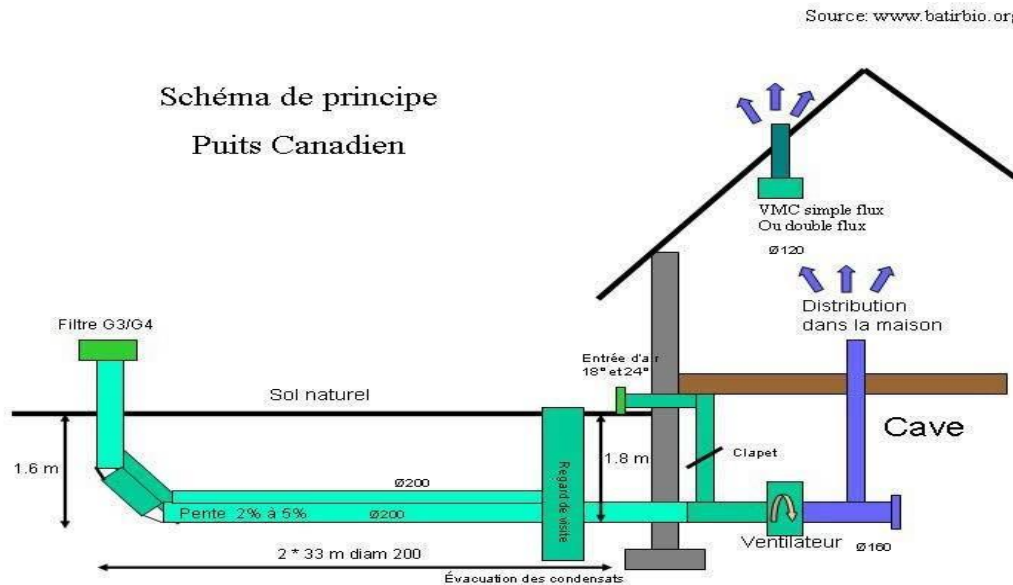


Figure 2.4 : nappes souterraines [7].

## 2.4 L'échangeur thermique air/sol (puits canadien)

Le puits canadien consiste à faire passer, avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf de renouvellement par des tuyaux enterrés dans le sol, à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 mètres. En hiver, le sol à cette profondeur est plus chaud que la température extérieure. L'air froid est alors préchauffé lors de son passage dans ce circuit sous terrain [11].

En été, de la même manière, l'air passant dans les tubes enterrés récupère la fraîcheur du sol et l'introduit dans la maison, même par +30°C extérieur, l'air peut arriver entre 15 et 20°C ! Dans ce cas, le puits canadien est appelé puits provençal.



**Figure 2.5 :** Schéma de principe du puits canadien [11].

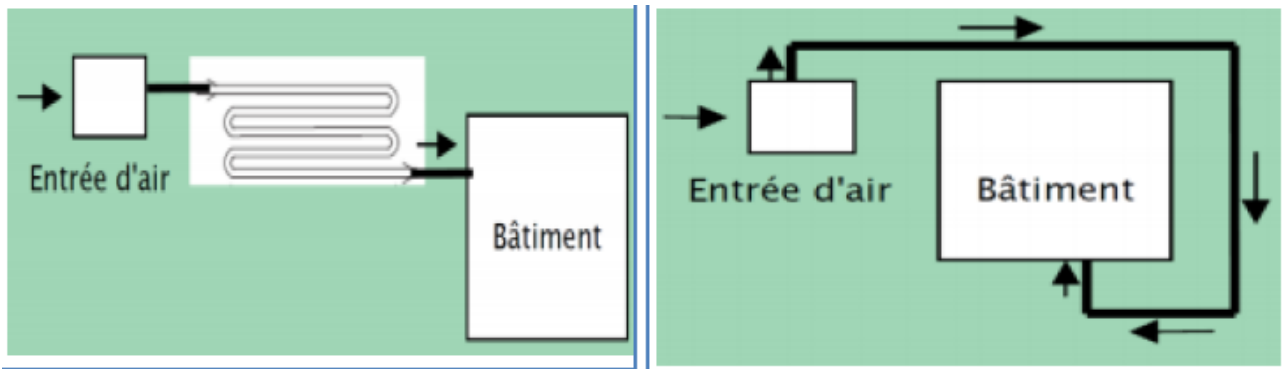
## 2.5 Composition d'un puits canadien

- Une entrée d'air neuf : une bouche d'aspiration de l'air, avec une grille et un filtre [12],



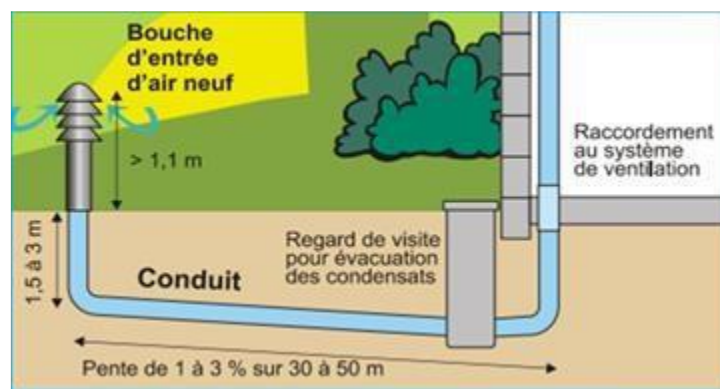
**Figure 2.6 :** La prise d'entrée de l'air neuf [12].

- Des conduits enterrés récupérateurs : un ou plusieurs tuyaux pour le passage de l'air avec une pente supérieure à 2 % pour permettre l'évacuation des condensats et ainsi éviter les risques de moisissure et d'humidité résiduelle [12],



**Figure 2.7 :** Disposition en méandre et Tube en boucle [13].

- Un regard de visite pour inspecter votre installation,



**Figure 2.8 :** Évacuation des condensats par un regard de visite [14].

- Un by-pass pour court-circuiter le puits canadien, à l'intersaison. Il peut en effet être plus intéressant de prendre directement l'air extérieur sans passer par le puits canadien. C'est à cet instant qu'entre en action le relais by-pass commandé par une sonde thermique extérieure,
- Un ventilateur pour forcer et réguler le débit de l'air à distribuer dans la maison,
- Un système de ventilation simple flux ou double flux en fonction des besoins énergétiques de votre maison [12].

## 2.6 L'intérêt des puits canadien

Le puits canadien hydraulique est un système géothermique : il utilise l'inertie thermique du sol pour préchauffer ou bien rafraîchir l'air neuf de votre maison. Si l'on compare la température du sol qui reste toute l'année constante (environ à 12°C à quelques mètres de profondeur), l'air extérieur est variable en France de -20 ° à + 35° [9].

Le puits canadien hydraulique utilise cette température constante pour préchauffer l'air de votre maison en hiver et le rafraîchir en été via l'échangeur de chaleur connecté sur l'entrée d'air neuf. L'intérêt est donc double :

**En hiver :** L'air entrant dans la maison ne descend pas en dessous de zéro degré, ce qui empêche l'échangeur de la VMC double flux de givrer et la résistance électrique antigel de se mettre en fonctionnement. De plus, cela permet d'assurer un rendement élevé de l'échangeur de la VMC double flux.

**En été :** Sous réserve que la maison soit bien conçue thermiquement (isolation, inertie, protections solaires, étanchéité) les surchauffes sont minimisées. La température intérieure est maintenue à un niveau confortable pour les habitants [14].

- Economie d'énergie : des économies sur votre facture de chauffage,
- Ecologie : une énergie propre, gratuite et inépuisable,
- Performance énergétique : les coefficients de performance peuvent atteindre des valeurs entre 10 et 20 (contre 2 à 4 pour des climatisations classiques),
- Coût énergétique : très faible par rapport à une climatisation classique,
- Coût de maintenance : très faible par rapport à une climatisation classique ; Intégration possible avec d'autres systèmes de climatisation,
- Conductivité,
- Matériau résistant aux fortes chaleurs : sans dégagement de vapeurs toxiques,
- Matériau offrant une bonne conductivité thermique,
- meilleur Matériau résistant : évite les risques de déchirures et donc assure une bonne étanchéité,
- Bonne conductivité : 7 fois supérieure au PVC.

## **2.7 Les avantages du puits canadien**

- Economie d'énergie : des économies sur votre facture de chauffage,
- Ecologie : une énergie propre, gratuite et inépuisable,
- Performance énergétique : les coefficients de performance peuvent atteindre des valeurs entre 10 et 20 (contre 2 à 4 pour des climatisations classiques),
- Coût énergétique : très faible par rapport à une climatisation classique,
- Coût de maintenance : très faible par rapport à une climatisation classique ; Intégration possible avec d'autres systèmes de climatisation.

## **2.8 Les inconvénients du puits canadien**

La pose d'une ventilation double flux nécessite d'être planifiée dès la conception de la maison [11].

## **2.9 Choix des matériaux pour le conduit**

Le conduit est l'élément le plus important du puits canadien. C'est lui qui échange des calories avec le sol.

Le choix des matériaux est également primordial pour la durée de vie de votre puits canadien. Voici les caractéristiques optimales conseillées : Paroi intérieure lisse : évite les dépôts de saletés et de bactéries : Paroi extérieure annelé :

- Conductivité,
- Matériau résistant aux fortes chaleurs : sans dégagement de vapeurs toxiques,
- Matériau offrant une bonne conductivité thermique,
- meilleur Matériau résistant : évite les risques de déchirures et donc assure une bonne étanchéité.

### **2.9.1 Le polypropylène**

Ce matériau est spécialement conçu pour les conduits de puits canadien :

- Bonne conductivité : 7 fois supérieure au PVC,
- Couche anti bactérienne à l'intérieur,
- Excellente longévité,
- Matériau très résistant,
- Etanchéité assurée.



**Figure 2.9 :** Conduite polypropylène.

Le polypropylène est un matériau cher mais son prix se justifie par ses caractéristiques parfaitement adaptées pour les conduits extérieurs

### **2.9.2 Polyéthylène haute densité (PEHD)**

Le PEHD est très utilisé pour la réalisation des puits canadiens :

- Intérieur lisse,
- Extérieur annelé,
- Très rigide : excellente résistance,
- Excellente conductivité : 2,5 fois supérieure au PVC,
- Pas de dégagements toxiques en cas de fortes chaleurs.



**Figure 2.10 :** Tuyaux Le polyéthylène haute densité (PEHD).

Le PEHD est donc, comme le polypropylène, un des matériaux à privilégier pour les conduits extérieurs.

### 2.9.3 Polyéthylène (PE)

Ce matériau est généralement utilisé pour la protection des câbles électriques :

- Extérieur annelé,
- Intérieur lisse : bonne évacuation des condensats,
- Résistance moyenne : à ne pas enfouir trop profond pour garantir sa longévité,
- Matériau plus écologique que le PVC pour un prix similaire.



**Figure 2.11 :** Conduit Le polyéthylène (PE)

### 2.9.4 Béton ou la terre cuite

Utilisé pour des diamètres supérieurs à 300 mm. Les raccords sont difficiles à étanchéifier. L'échange thermique est plus important (la conductivité du béton est plus élevée que celle des tuyaux en plastique, relativement isolants).





**Figure 2.12 :** conduite en béton.

### 2.9.5 Polychlorure de vinyle (PVC)

Le moins cher, pas très écologique. Il peut "éventuellement" dégager des vapeurs nocives dues au mode de fabrication.



**Figure 2.13 :** conduits en Polychlorure de vinyle (PVC).

Le PVC est le matériau le moins cher mais ses caractéristiques en font le matériau le moins adapté et le plus dangereux pour la santé.

## 2.10 Conclusion

Le puits climatique est une solution géothermique de surface ayant pour objectif de :

- réchauffer l'air neuf en hiver et de le rafraichir en été,
- Elle s'appuie sur des échanges thermiques air-sol ; elle est dite passive,
- C'est un réseau de canalisations enterrées qui fonctionne comme un échangeur air- sol,
- Utilisé pour le renouvellement d'air des bâtiments ; cet échangeur s'appuie sur le différentiel entre la température de l'air capté à l'extérieur du bâtiment (air ambiant) et celle du sol qui tend à devenir constante lorsqu'une profondeur suffisante est atteinte,
- L'air qui circule dans ces canalisations va capter des frigidités en période chaude et des calories en période froide et ainsi, contribuer à rafraichir ou réchauffer l'air neuf d'un bâtiment,
- Enterré à une profondeur avoisinante 1.5m / 2m, le réseau exploite l'inertie thermique de la masse de terre qui entoure les tuyaux, et permet au puits climatique d'agir comme un régulateur naturel de température,
- Couplé à un équipement de ventilation, il contribuera à diffuser dans le bâtiment un air température et confortable,
- Une approche globale du bâtiment,
- Partie intégrante de la stratégie chauffage/rafraichissement d'un bâtiment, le puits climatique doit être intégré dans le projet de construction dès sa conception,
- Son bon fonctionnement est tributaire de l'ensemble des précautions prises pour lutter c contre les déperditions,
- Priorité à la maîtrise de l'énergie,
- Dans tous les pays développés, réduire les dépenses énergétiques des,
- Au rafraichissement en ...été.

Quel que soit l'objectif, il permettra d'écarter les pics chauds ou froids, de limiter le recours aux équipements ou de les sous-dimensionner en raison d'une utilisation plus faible.

Enfin, le puits a le mérite reconnu de diffuser une température constante, sans à-coups, sans sens de soufflage ou de courant d'air.

# Chapitre 3

Formulation

mathématique &

modélisation numérique

# Chapitre 3 Formulation mathématique & modélisation numérique

## 3.1 Ansys Fluent

Le logiciel Fluent offre de nombreuses capacités de modélisation physique requises pour modéliser le flux, les turbulences, le transfert de chaleur et les réactions pour les applications industrielles. Celles-ci vont du flux d'air sur une aile d'avion à la combustion dans un four, des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolières, du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteurs et de la conception de salles blanches aux usines de traitement des eaux usées. Fluent couvre une gamme étendue, ceci incluant des modèles spéciaux, avec des capacités de modélisation de la combustion dans les cylindres, de l'aéro-acoustique, des turbomachines et des systèmes multiphasiques [15].

## 3.2 Définition du CFD

La dynamique des fluides computationnelle ou CFD (Computational Fluid Dynamics) est l'analyse des systèmes d'écoulement des fluides, le transfert de la chaleur et tous les phénomènes associés tels que les réactions chimiques en utilisant la simulation par ordinateur. La technique est très puissante et couvre un large champ d'applications industrielles et non industrielles tels que : l'aérodynamique, hydrodynamique, centrale électrique, turbomachines, de l'ingénierie de processus chimique, génie maritime, génie de l'environnement, de la métrologie, de l'ingénierie biomédicale, l'hydrologie et l'océanographie voire l'environnement externe et interne des bâtiments [15].

## 3.3 Équations générales (Équations gouvernantes des problèmes étudiés)

Le modèle mathématique généralement fondée sur les équations de la conservation qui sont :

- Equation de la continuité,
- Équations de la conservation de la quantité de mouvement,
- Équation de la conservation d'énergie.

Dans les coordonnées 3D cartésiennes, un écoulement instationnaire d'un fluide incompressible en régime turbulent; les équations de transfert de la chaleur et de la masse sont données comme suit [16]:

### 3.3.1 Équation de continuité

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0$$

### 3.3.2 Équations de la conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\bar{d}(\rho \bar{U}_i)}{\bar{d}t} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{P} + \frac{2}{3} \rho k_t \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t) \bar{S}_{ij}]$$

### 3.3.3 Équation de conservation de l'énergie

$$\frac{\bar{d}(\rho C_p T)}{\bar{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial C_p T}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j \bar{P})}{\partial x_j} + \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + \rho \epsilon^h$$

Où :  $\mu_t = C_\mu \rho k_t^2 / \epsilon^h$

### 3.3.4 Le modèle turbulent Standard ( $k - \epsilon$ )

Pour modéliser la turbulence, plusieurs modèles sont proposés. Le modèle k- $\epsilon$  standard (qu'on a adopté pour cette étude) est un modèle semi empirique basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente k et de sa dissipation  $\epsilon$ . L'équation modélisée de l'énergie turbulente est dérivée de l'équation exacte. Celle de la dissipation est obtenue sur la base d'un raisonnement physique. Dans ce modèle, l'écoulement est supposé complètement turbulent [17].

#### L'énergie cinétique de turbulence (k)

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

#### Le taux de dissipation ( $\epsilon$ )

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t / \sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$$

#### Les Coefficients

$$C_{\epsilon 1} = 1.44 ; C_{\epsilon 2} = 1.92 ; C_\mu = 0.09 ; \sigma_k = 1.0 ; \sigma_\epsilon = 1.3$$

## 3.4 Méthodes de résolution des équations régissant

L'étude d'un phénomène physique passe par la formulation d'une ou plusieurs lois sous forme d'équation mathématique aux dérivées partielles. La résolution de ces équations se fait par des méthodes numériques qui sont :

- Méthodes des différences finies (MDF),
- Méthodes des éléments finis (MEF),
- Méthodes des volumes finis (MVF).

Pour résoudre ce problème « Ansys fluent » utiliser la méthode des volumes finis (MVF) qui elle basé sur l'algorithme SIMPLE.

### 3.5 L'algorithme SIMPLE

L'algorithme SIMPLE utilise une relation entre les corrections de vitesse et de pression pour appliquer la conservation de la masse et obtenir le champ de pression [18].

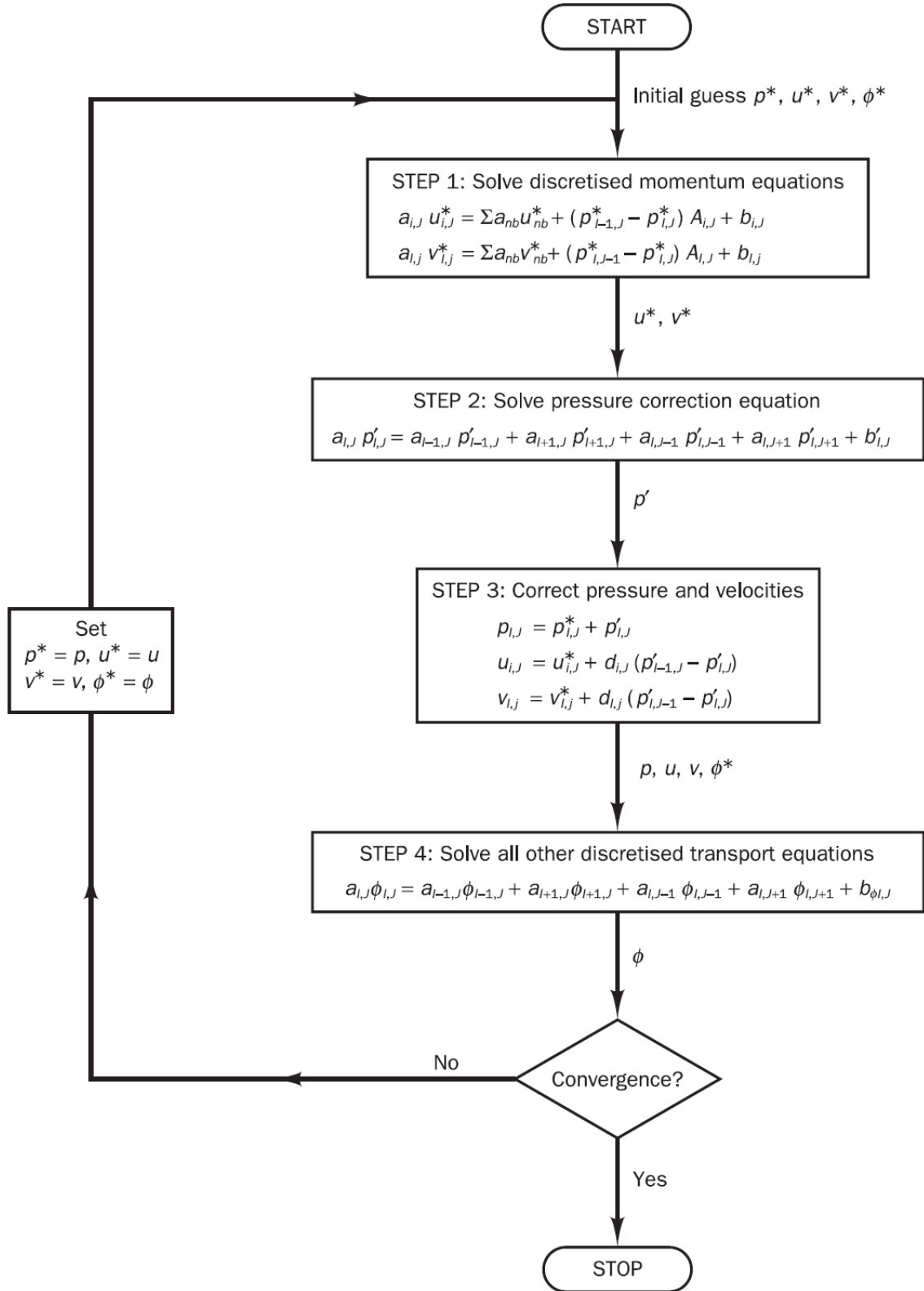


Figure 3.1 : L'algorithme SIMPLE [18].

### 3.6 Les conditions initiales et aux limites

- Température d'entrée constante.

$$T_e = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Température du sol constante.

$$T_{sol} = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 3.7 Menu principal du logiciel

L'interface graphique de Workbench ANSYS est montrée sur la (Figure 3.2). Dans cette étude, nous utilisons mécanique des fluides (fluents) qui se trouve en la barre d'outils.

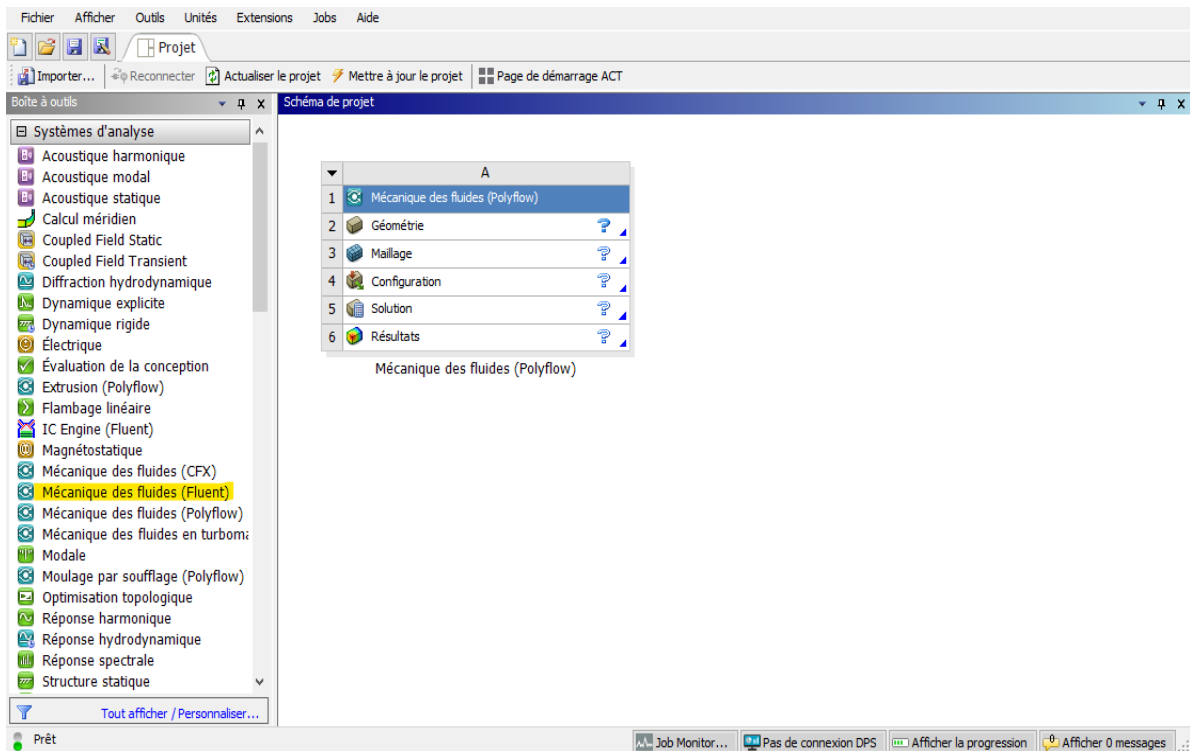
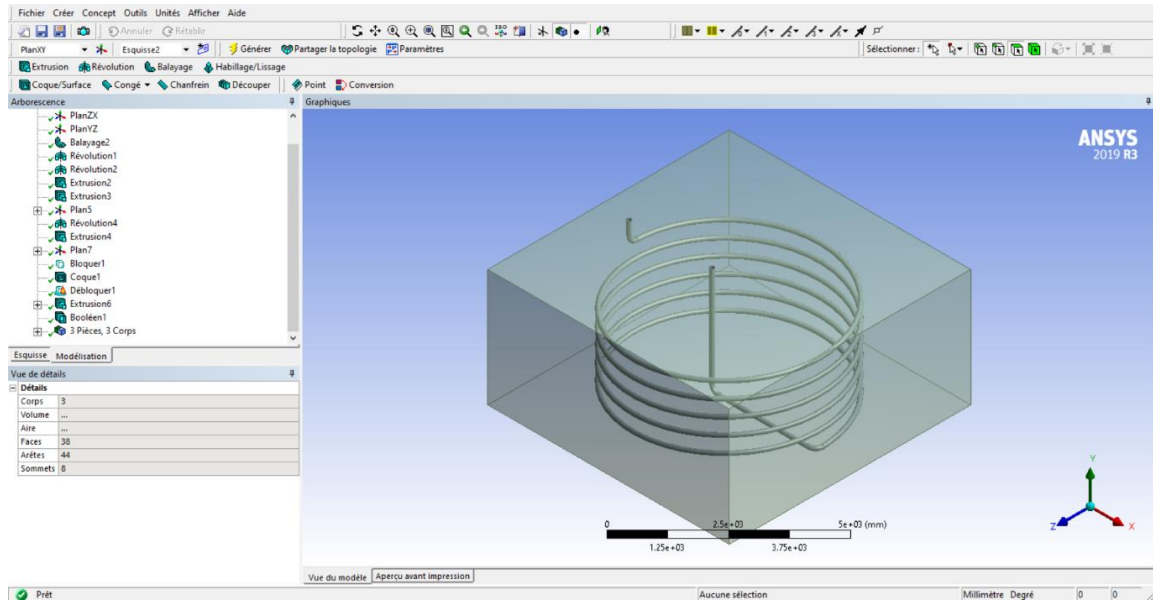


Figure 3.2 : L'interface principale du logiciel ANSYS Workbench.

### 3.8 Les différentes étapes de simulation

#### 3.8.1 Création de la géométrie

Dans ces étapes ont utilisé l'option Géométrie (Utilisé pour importer ou de créer ou de modifier ou de mettre à jour un modèle) pour créer la forme.



**Figure 3.3 :** Géométrie de l'échangeur.

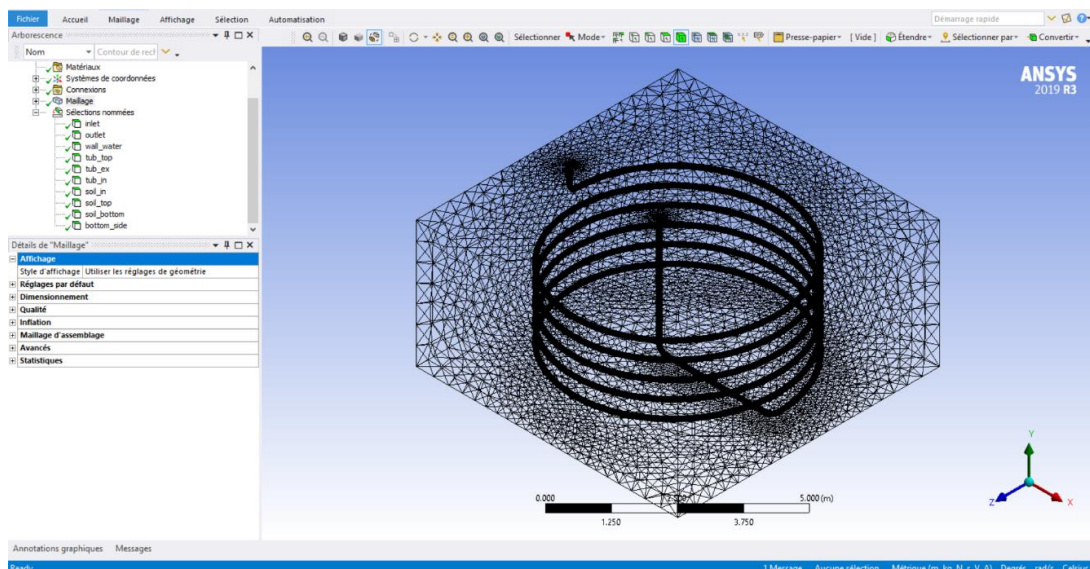
Les caractéristiques de l'échangeur sont présentées sur le Tableau 3.1.

**Tableau 3.1:** Caractéristiques de spiral.

Configuration	Verticale
Profondeur (m)	3
Longueur (m)	100 et 125 et 150
Diamètre intérieur (m)	0.11
Epaisseur (m)	0.002

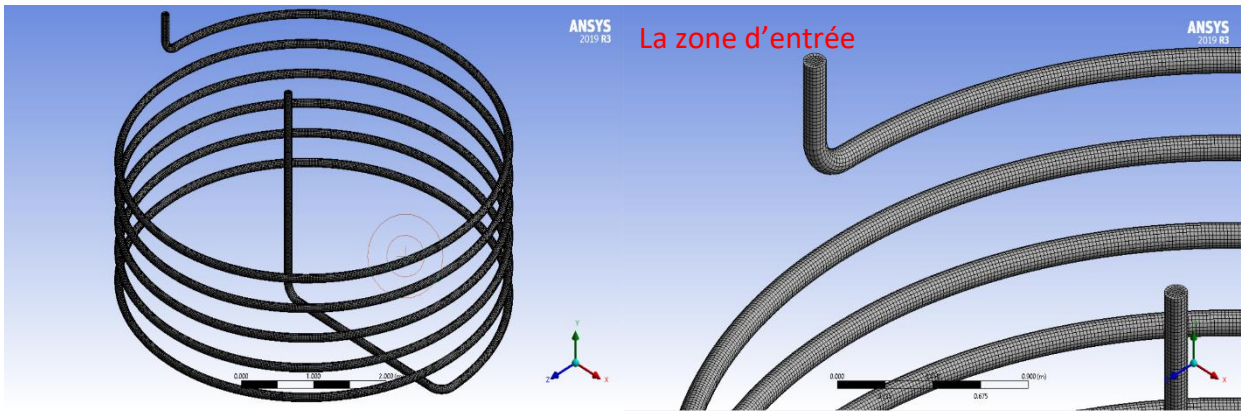
### 3.8.2 Maillage

Dans cette étape, on fait le maillage et nommés les surfaces du corps. C'est via l'option « Meshing ». Il est nécessaire de nommés les surfaces pour la prochaine.



**Figure 3.4 :** Maillage de la géométrie.





**Figure 3.5 :** Maillage d'échangeurs.

### 3.8.3 Effet du maillage sur les résultats de calcul

Le choix du maillage a une grande influence sur la précision des résultats et le temps de calcul et les capacités de la machine (Acer - processeur i5-7300hq, RAM 8 Go). Afin d'optimiser ces paramètres nous avons effectué plusieurs simulations pour tester les différents maillages. Pour créer un maillage, il existe plusieurs méthode et type de maillage (Tétraèdres, A dominance hexaédrique, Balayage ...), Nous avons utilisé maillage de type Tétraèdres pour le domaine du sol et l'eau, pour le tube, nous avons utilisé à dominance hexaédrique. Le tableau 3.3 montre la température dans la section sortie pour les trois types de maillage.

**Tableau 3.2 :** Testé de maillage.

	<b>Nodes</b>	<b>Température (k)</b>	<b>Déviaton (%)</b>
<b>1er maillage</b>	645242	301.812	0.006618
<b>2ème maillage</b>	1722238	303.415	0.001342
<b>3ème maillage</b>	2352200	303.823	-

### 3.8.4 Configuration

La 3ème étape de la modélisation, c'est l'étape critique, c'est l'étape ou on doit définir et modélisé notre cas. Nous allons d'abord choisir Transitoire, puis le type d'écoulement turbulent, activerons l'équation d'énergie, entrerons les caractéristiques physiques et définirons les conditions aux limites.

## Choix du régime

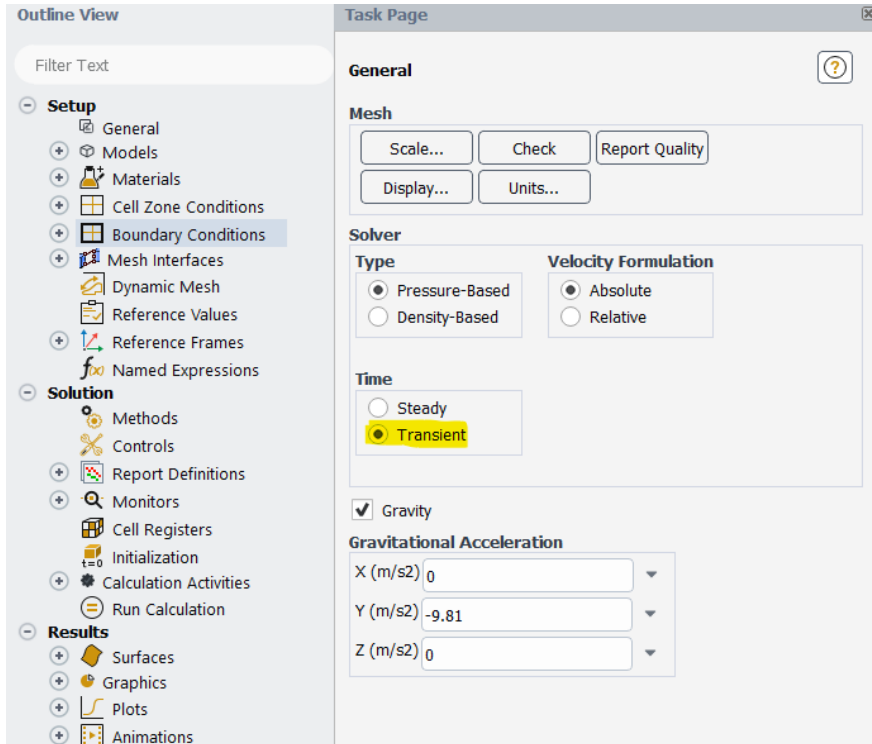


Figure 3.6 : Choix le régime transitoire.

## Choix l'équation d'énergie et type de turbulent

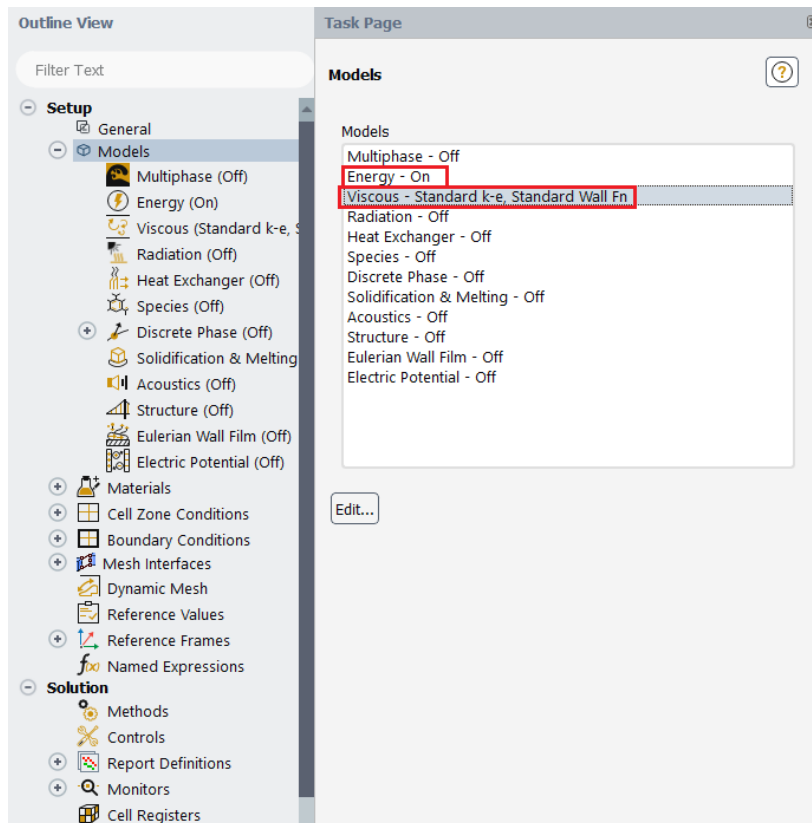


Figure 3.7 : l'équation d'énergie et la turbulent.

## Choix les caractéristiques physiques

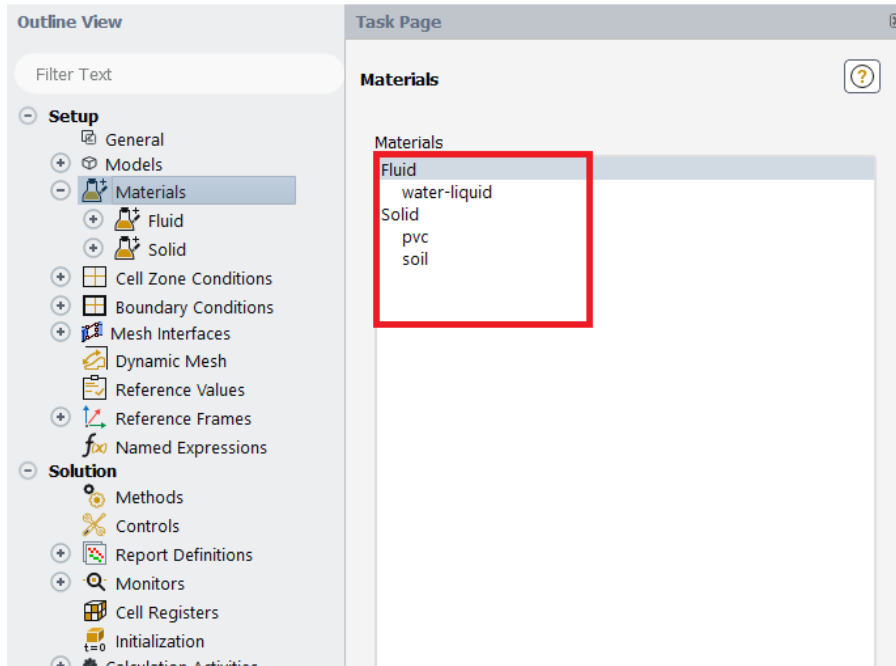


Figure 3.8 : choix des matériaux.

Dans cette étape, nous choisissons les caractéristiques physiques de l'eau, du tube et de sol.

Name	Material Type	Order Materials by
water-liquid	fluid	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula	Fluent Fluid Materials	<input type="radio"/> Chemical Formula
h2o< >	water-liquid (h2o< >)	Fluent Database...
	Mixture	User-Defined Database...
	none	
<b>Properties</b>		
Density (kg/m3)	constant	Edit...
	998.2	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	4182	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	0.6	
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...
Change/Create Delete Close Help		

Figure 3.9 : les caractéristiques physiques de l'eau.

Name	Material Type	Order Materials by
pvc	solid	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula	Fluent Solid Materials	<input type="radio"/> Chemical Formula
	pvc	Fluent Database...
	Mixture	User-Defined Database...
	none	

<b>Properties</b>		
Density (kg/m3)	constant	Edit...
	1300	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	900	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	0.17	

Change/Create	Delete	Close	Help
---------------	--------	-------	------

**Figure 3.10** : les caractéristiques physiques du tube.

Name	Material Type	Order Materials by
soil	solid	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula	Fluent Solid Materials	<input type="radio"/> Chemical Formula
	soil	Fluent Database...
	Mixture	User-Defined Database...
	none	

<b>Properties</b>		
Density (kg/m3)	constant	Edit...
	1450	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	880	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	1.25	

Change/Create	Delete	Close	Help
---------------	--------	-------	------

**Figure 3.11** : les caractéristiques physiques du sol.

## Condition aux limites

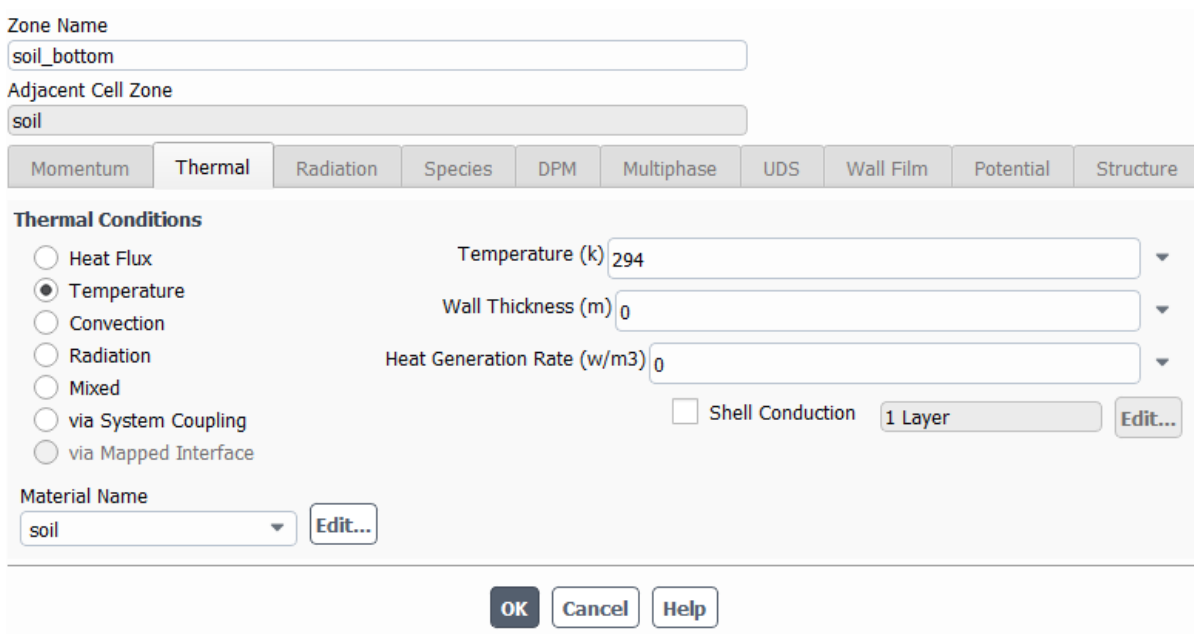
En plus d'un maillage adéquat, les conditions aux limites sont très importantes pour obtenir une solution précise avec une convergence rapide. Fluent de type des conditions aux limites et de régler les données suivantes nos besoin.

The screenshot shows the 'Boundary Conditions' dialog for an inlet zone. The 'Zone Name' is 'inlet'. The 'Momentum' tab is selected. The 'Reference Frame' is set to 'Absolute'. The 'Mass Flow Specification Method' is 'Mass Flow Rate', with a value of '1' kg/s. The 'Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)' is '0'. The 'Direction Specification Method' is 'Normal to Boundary'. Under the 'Turbulence' section, the 'Specification Method' is 'Intensity and Viscosity Ratio', with 'Turbulent Intensity (%)' set to '5' and 'Turbulent Viscosity Ratio' set to '10'. Buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help' are at the bottom.

**Figure 3.12** : choix le débit d'eau.

The screenshot shows the 'Boundary Conditions' dialog for an inlet zone. The 'Zone Name' is 'inlet'. The 'Thermal' tab is selected. The 'Total Temperature (k)' is set to '333'. Buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help' are at the bottom.

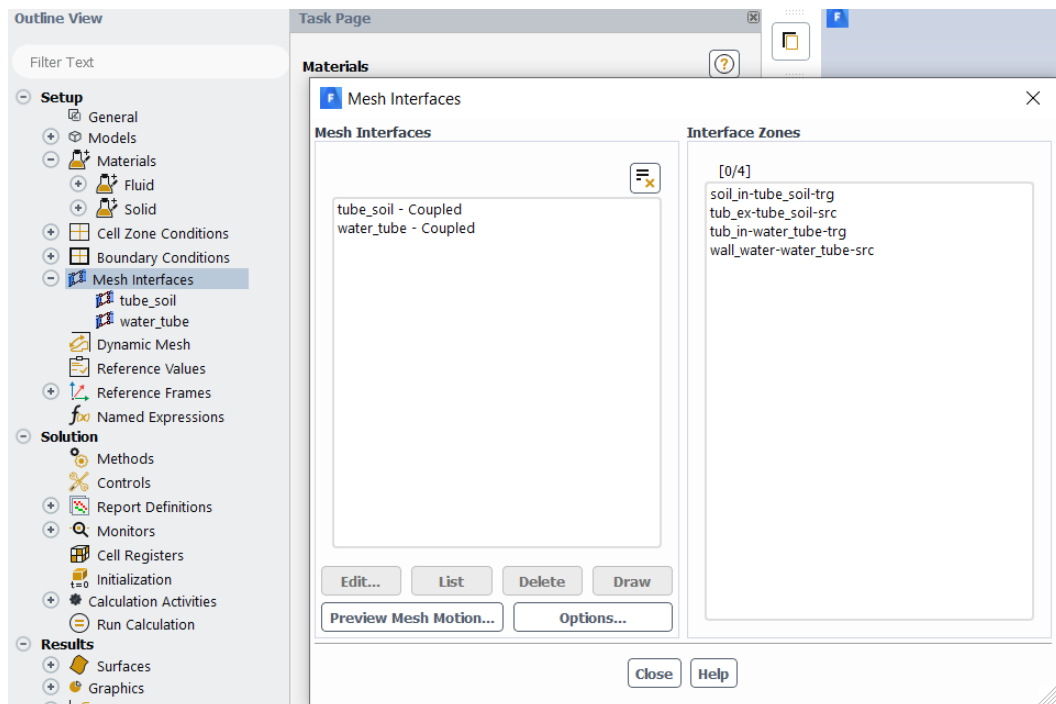
**Figure 3.13** : choix de la température de l'eau.



**Figure 3.14** : choix de la température du sol.

Cette étape est très importante d'où les murs doivent être couplés où il est possible de passer à l'étape suivante (condition limites).

- 1- La paroi d'eau avec parois intérieur de pvc.
- 2- La paroi extérieure de pvc avec parois de sol.



**Figure 3.15** : activation l'option de couplage des parois.

# **Chapitre 4**

## **Résultats et Discussions**

# Chapitre 4 Résultats et Discussions

## 4.1 Résultats et Commentaires

### 4.1.1 Visualisation générale comparative pour les trois Longueurs

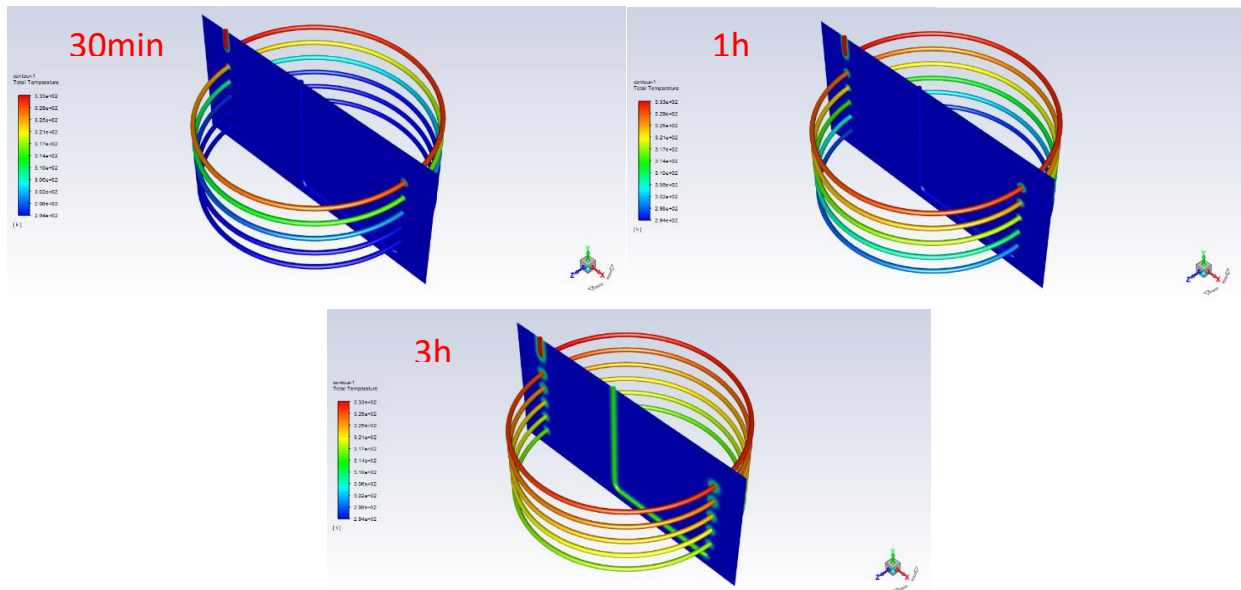


Figure 4.1 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=100m) et débit 0.2kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.

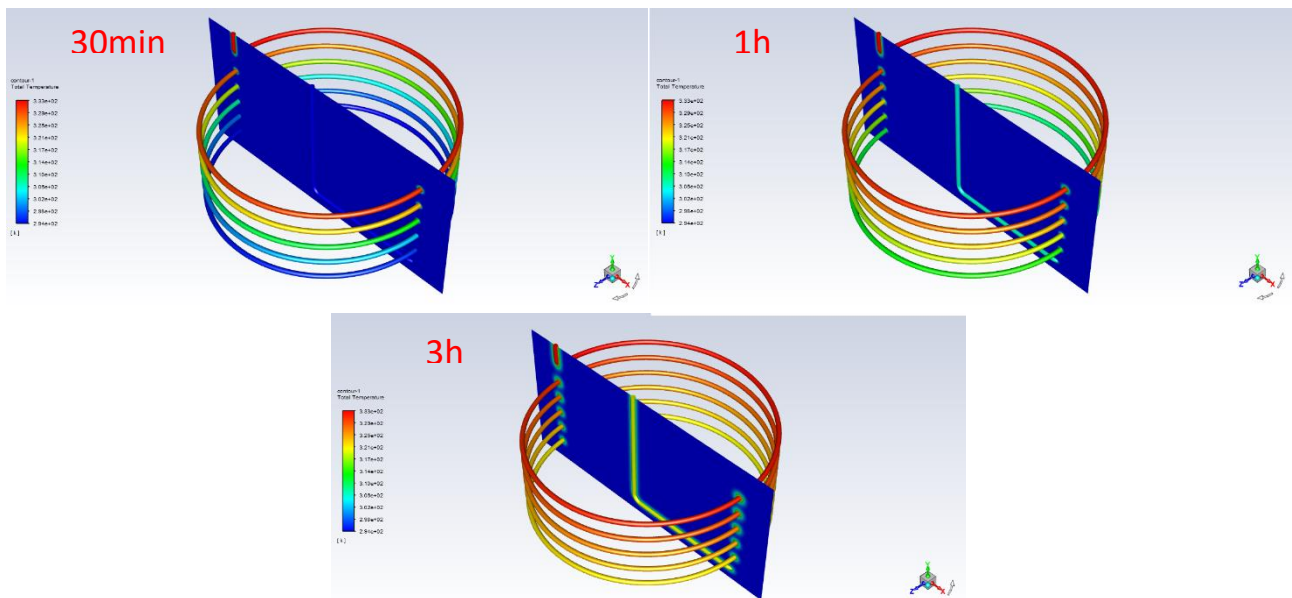
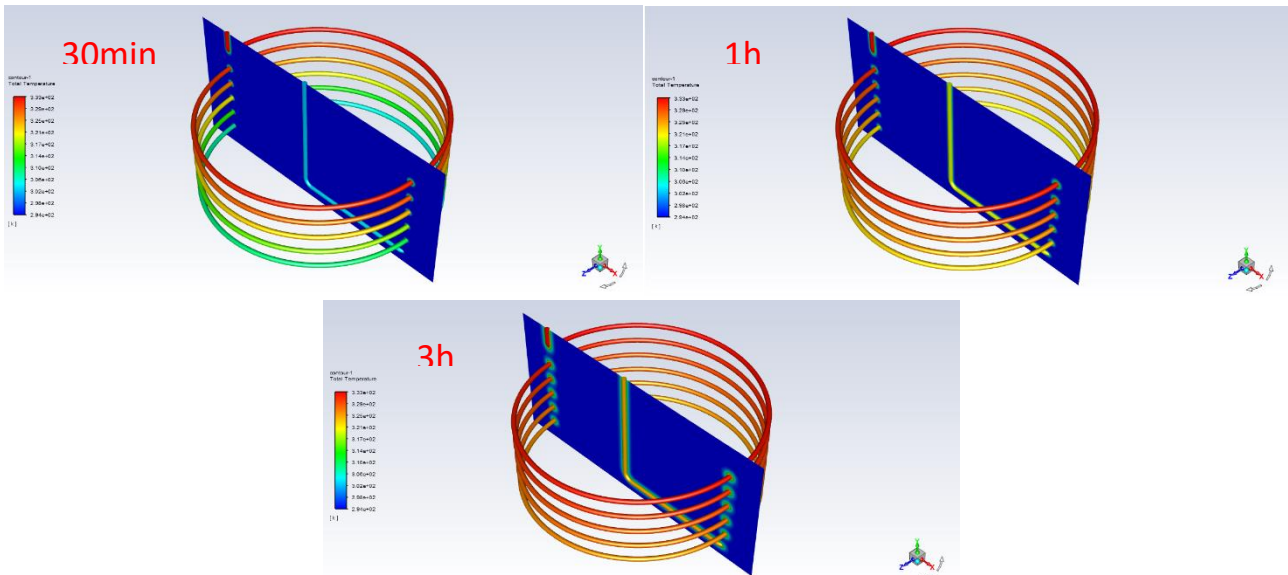
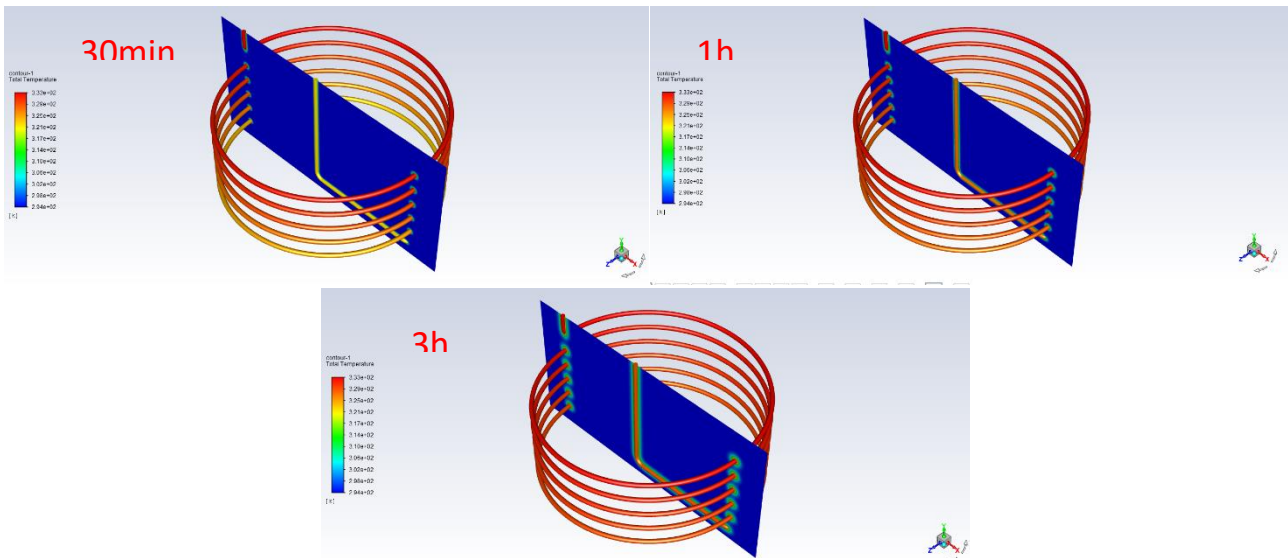


Figure 4.2 : Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=100m) et débit 0.3kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.





**Figure 4.3:** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=100m) et débit 0.5kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.

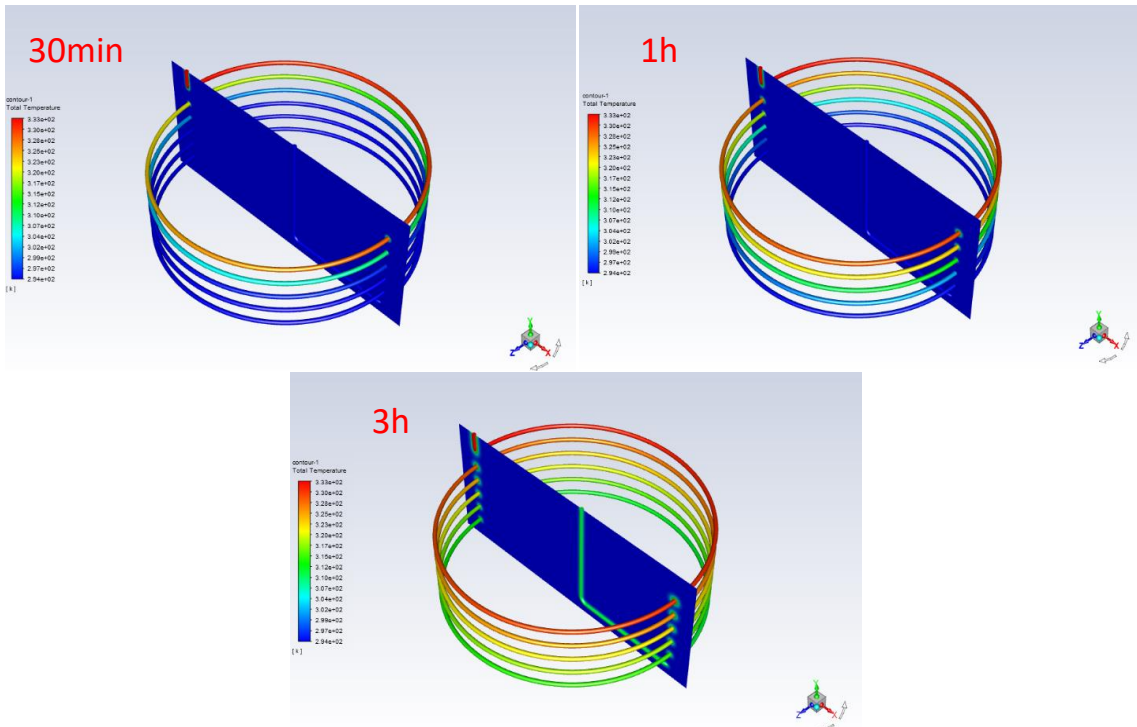


**Figure 4.4 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=100m) et débit 1kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.

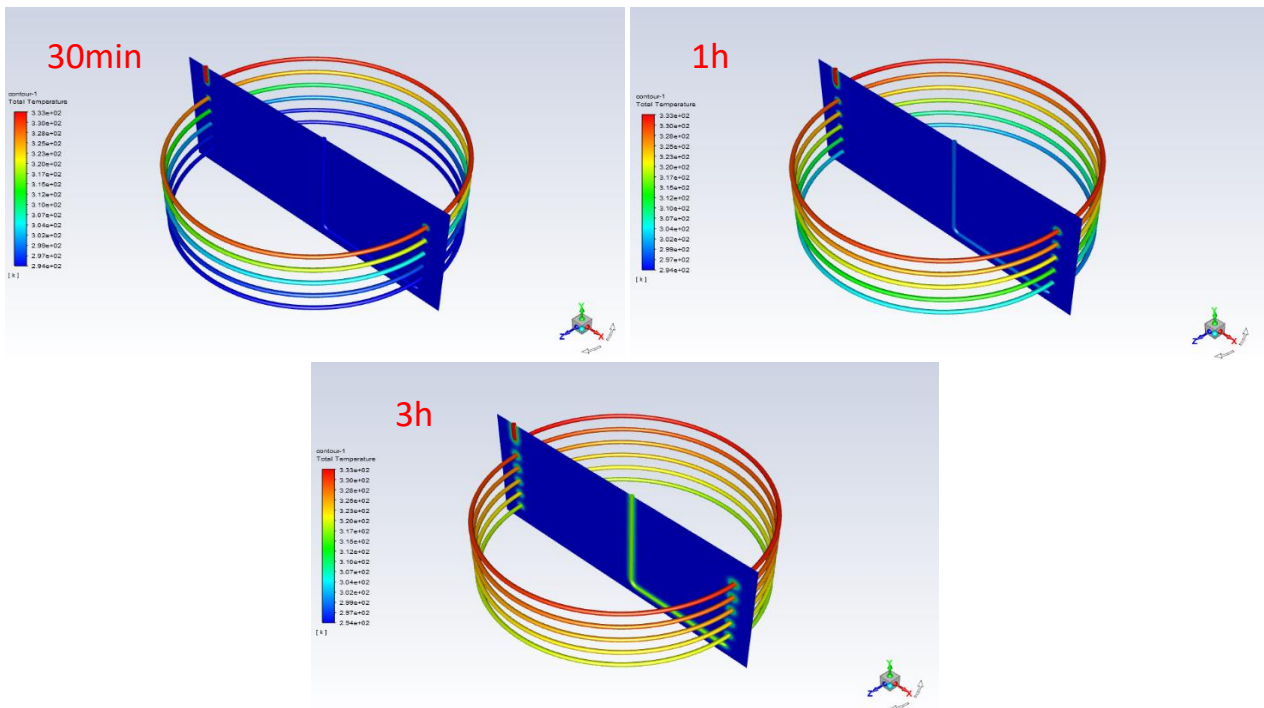
Les figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4 montrent les résultats obtenus en tant que champs de température de l'eau le long de l'échangeur pour différents débits (0,2kg/s, 0,3kg/s, 0,5kg/s et 1kg/s) pour un échangeur de chaleur de longueur 100 m. Le tableau 4.1 résume les résultats.

**Tableau 4.1 :** variations de température de sortie d'eau pour différents débits (L=100m).

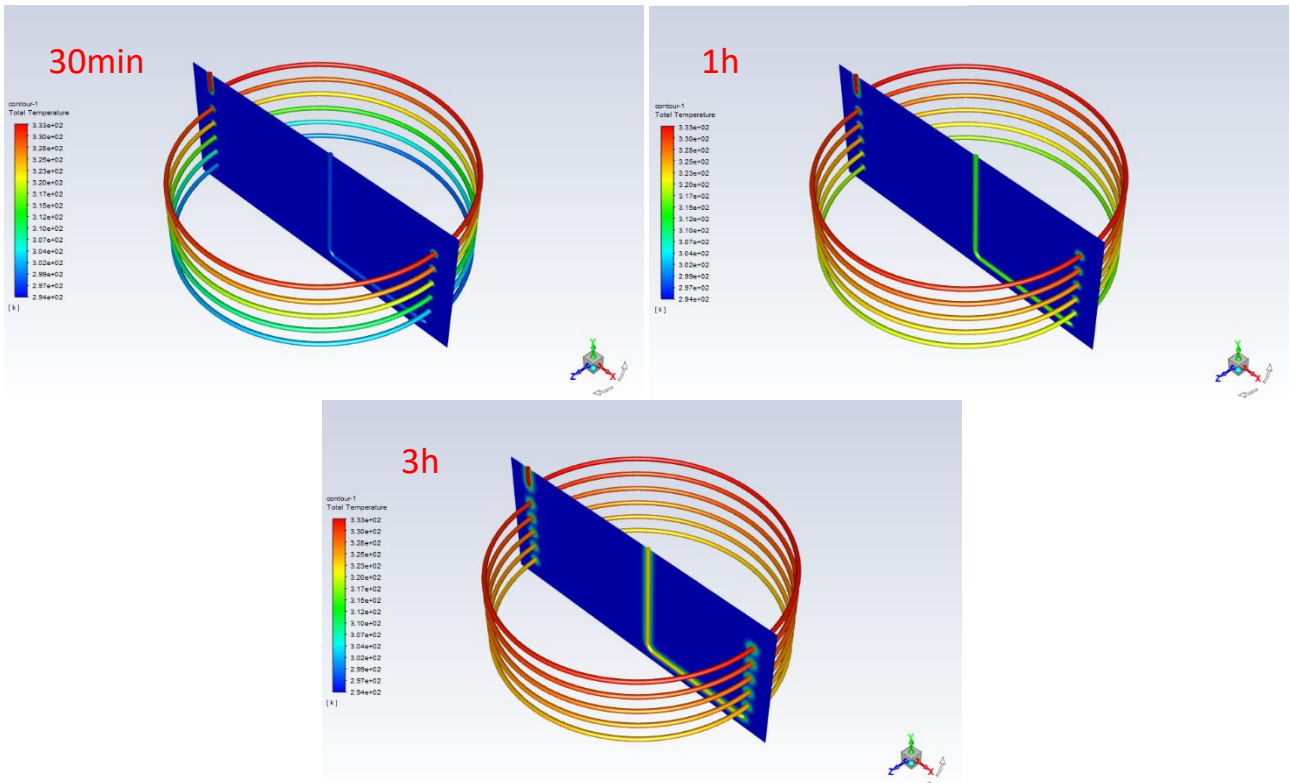
<i>Durée</i>	<i>30min</i>	<i>1h</i>	<i>2h</i>	<i>3h</i>
<i>Débit 0.2kg/s</i>	<b>294.028K</b>	<b>295.828K</b>	<b>310.888K</b>	<b>314.858K</b>
<i>Débit 0.3kg/s</i>	<b>294.869K</b>	<b>306.208K</b>	<b>318.26K</b>	<b>320.205K</b>
<i>Débit 0.5kg/s</i>	<b>303.415K</b>	<b>320.009K</b>	<b>323.884K</b>	<b>324.934K</b>
<i>Débit 1kg/s</i>	<b>321.829K</b>	<b>327.051K</b>	<b>328.303K</b>	<b>328.806K</b>



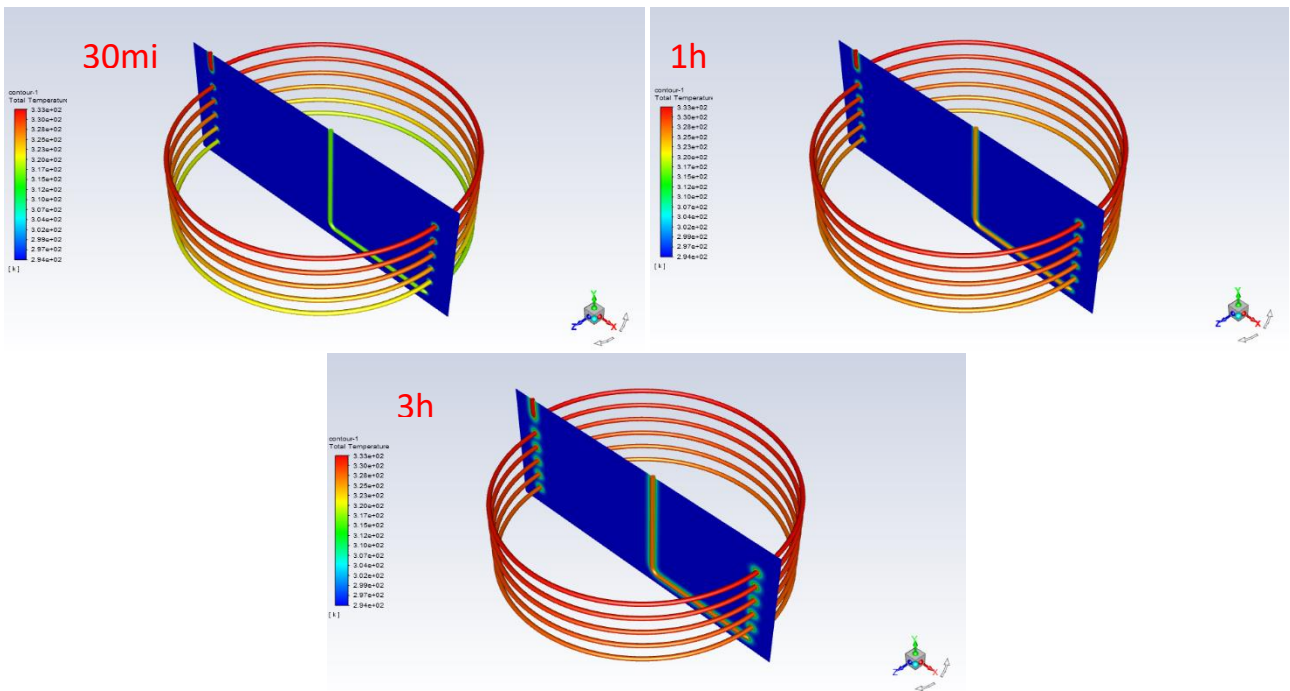
**Figure 4.5 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=125m) et débit 0.2kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.



**Figure 4.6 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=125m) et débit 0.3kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.



**Figure 4.7 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=125m) et débit 0.5kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.

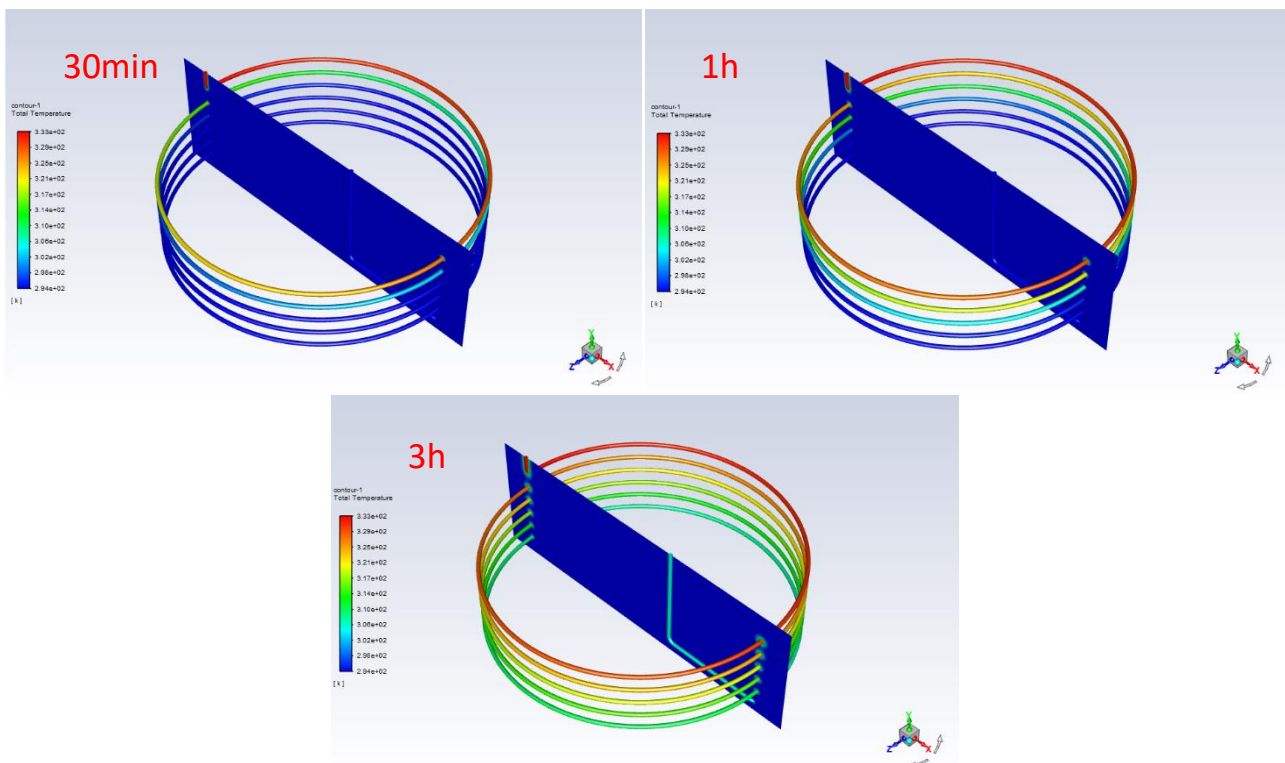


**Figure 4.8 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=125m) et débit 1kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.

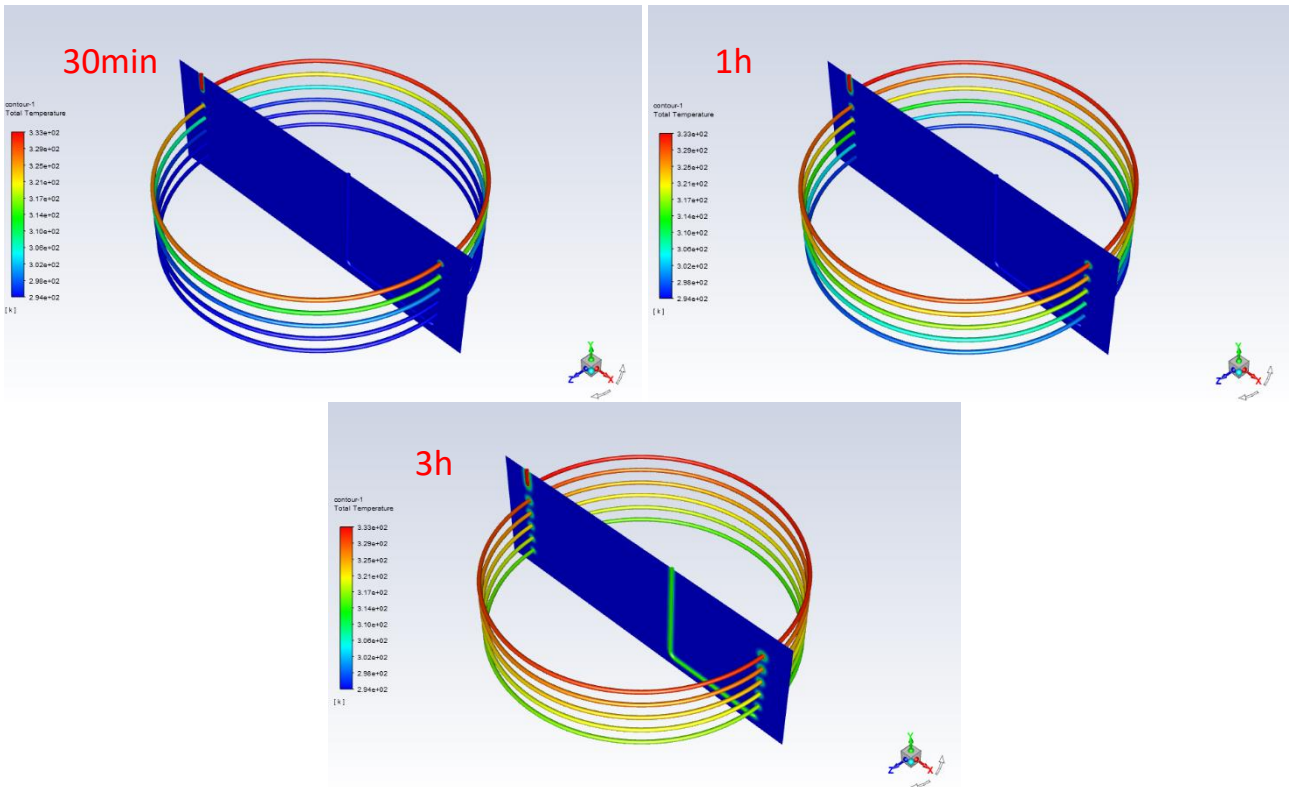
Les figures 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8 montrent les résultats obtenus en tant que champs de température de l'eau le long de l'échangeur pour différents débits (0,2kg/s, 0,3kg/s, 0,5kg/s et 1kg/s) pour un échangeur de chaleur de longueur 125 m. Le tableau 4.2 résume les résultats.

**Tableau 4.2 :** variations de température de sortie d'eau pour différents débits (L=125m).

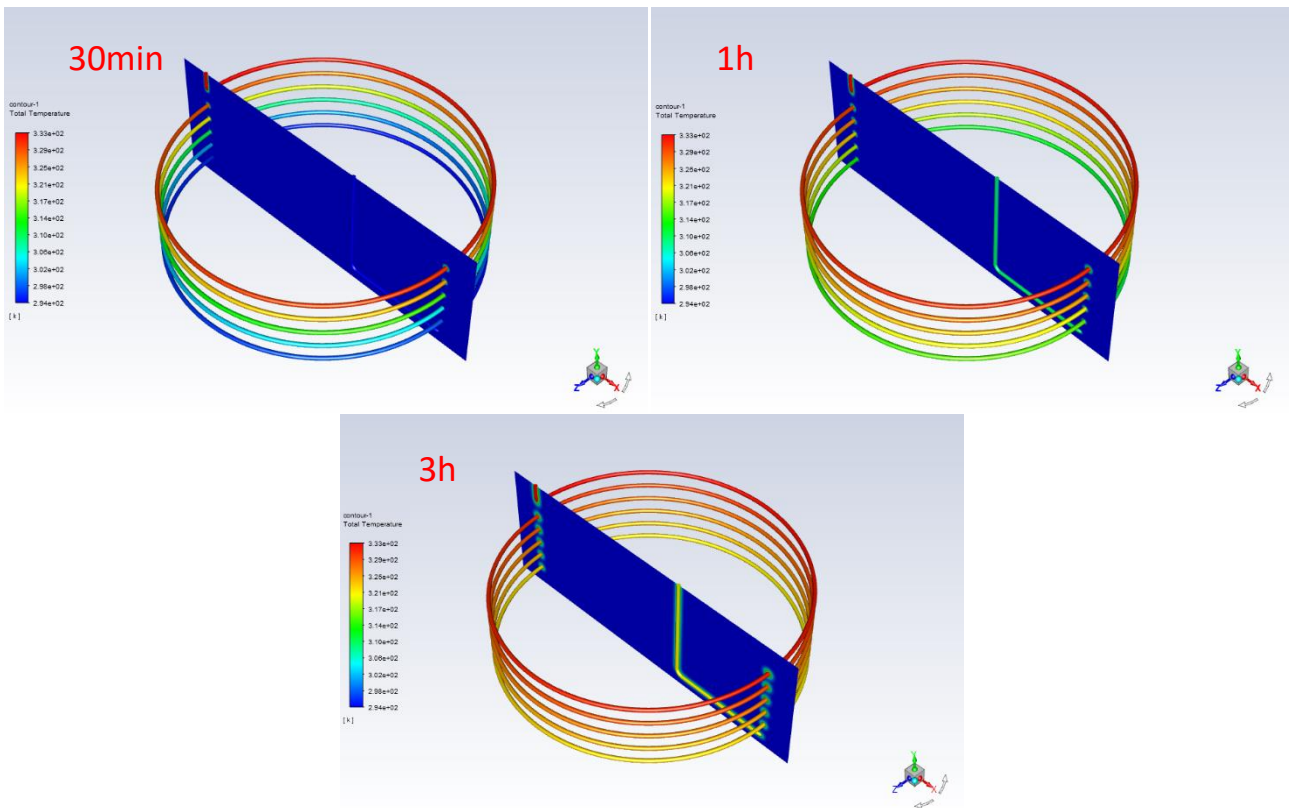
<i>Durée</i>	<i>30min</i>	<i>1h</i>	<i>2h</i>	<i>3h</i>
<i>Débit 0.2kg/s</i>	<b>294.007K</b>	<b>294.245K</b>	<b>304.173K</b>	<b>310.789K</b>
<i>Débit 0.3kg/s</i>	<b>294.142K</b>	<b>299.18K</b>	<b>314.442K</b>	<b>317.256K</b>
<i>Débit 0.5kg/s</i>	<b>298.151K</b>	<b>314.977K</b>	<b>321.619K</b>	<b>323.002K</b>
<i>Débit 1kg/s</i>	<b>316.831K</b>	<b>325.432K</b>	<b>327.127K</b>	<b>327.772K</b>



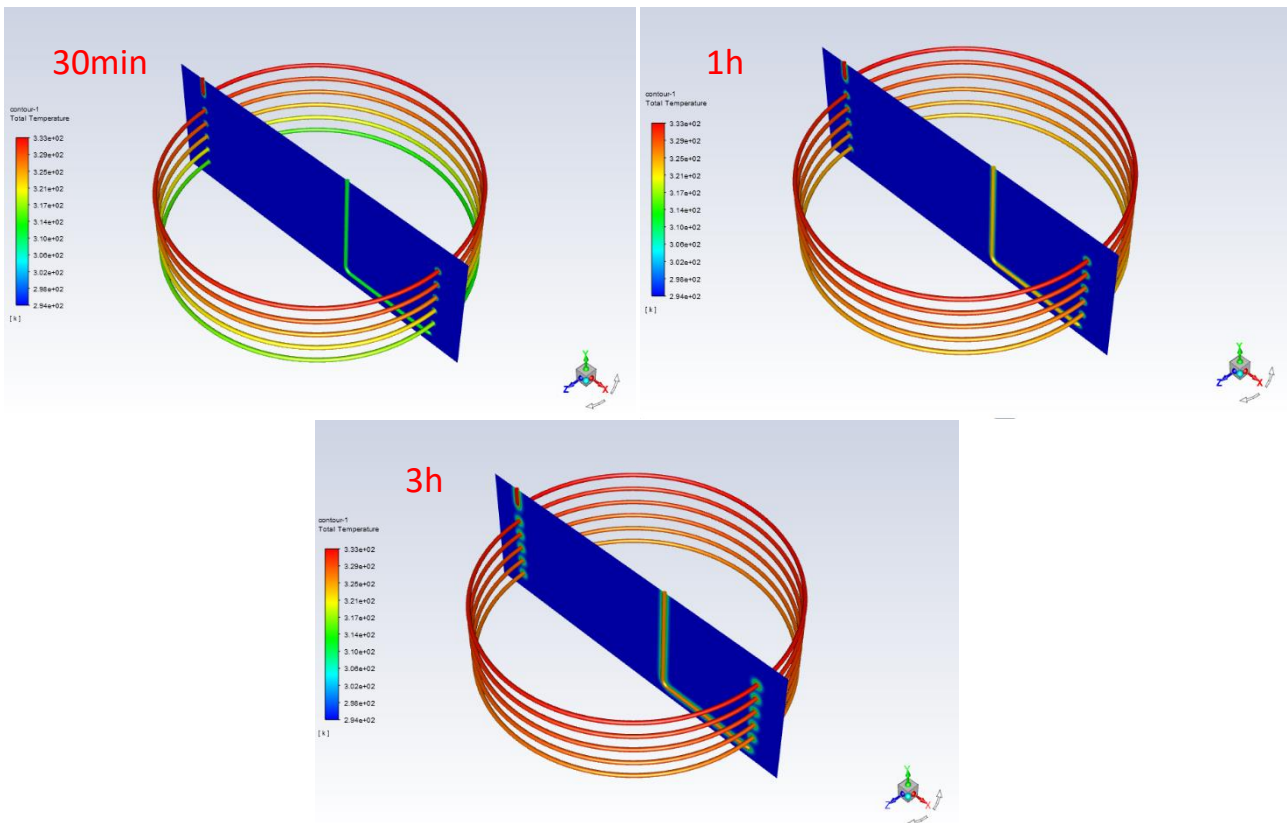
**Figure 4.9 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=150m) et débit 0.2kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.



**Figure 4.10 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=150m) et débit 0.3kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.



**Figure 4.11 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=150m) et débit 0.5kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.



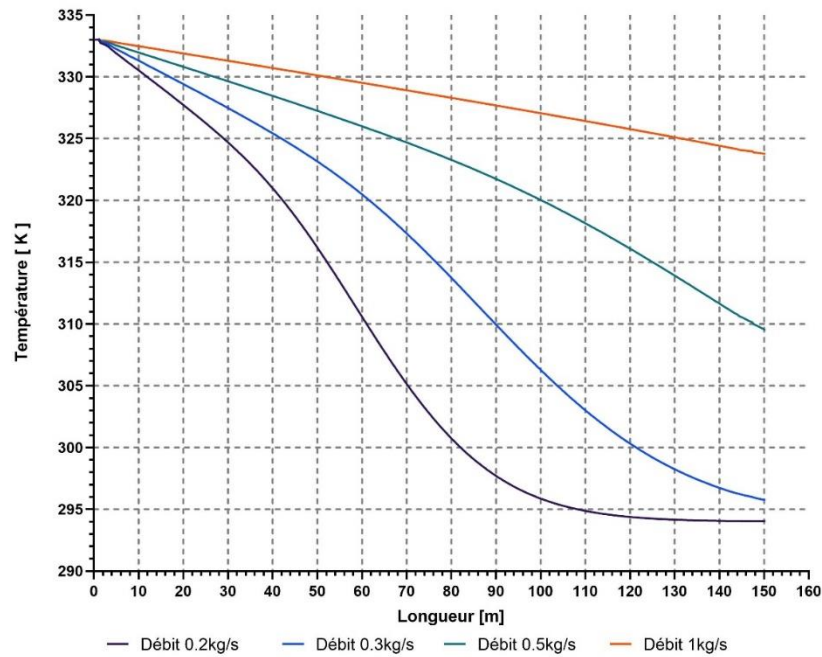
**Figure 4.12 :** Champs de température de l'eau le long de l'échangeur (L=150m) et débit 1kg/m avec coupe dans sol en la période de trois heures.

Les figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12 montrent les résultats obtenus en tant que champs de température de l'eau le long de l'échangeur pour différents débits (0,2kg/s, 0,3kg/s, 0,5kg/s et 1kg/s) pour un échangeur de chaleur de longueur 150 m. Le tableau 4.3 résume les résultats.

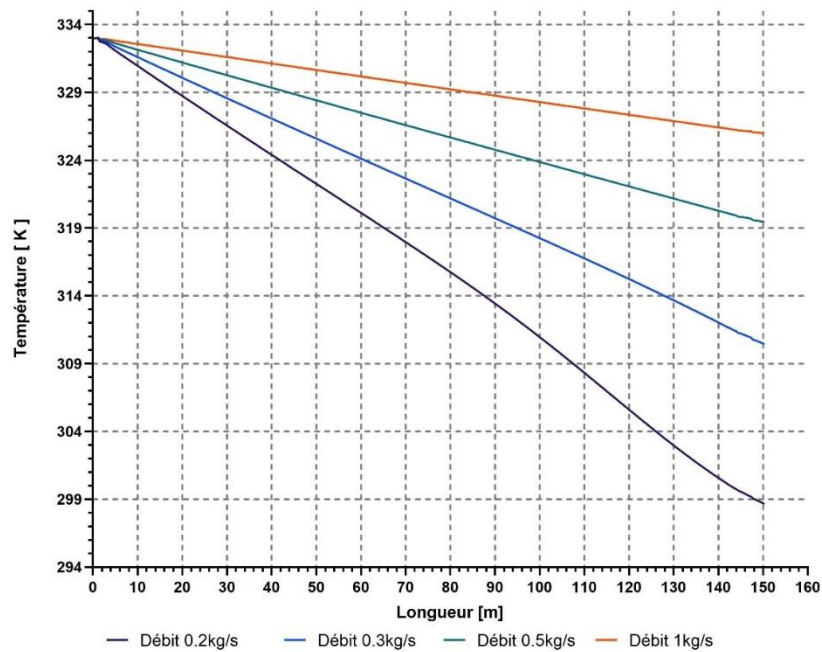
**Tableau 4.3 :** variations de température de sortie d'eau pour différents débits (L=150m).

<i>Durée</i>	<i>30min</i>	<i>1h</i>	<i>2h</i>	<i>3h</i>
<i>Débit 0.2kg/s</i>	<b>294.004K</b>	<b>294.027K</b>	<b>298.648K</b>	<b>307.279K</b>
<i>Débit 0.3kg/s</i>	<b>294.023K</b>	<b>295.743K</b>	<b>310.427K</b>	<b>314.5K</b>
<i>Débit 0.5kg/s</i>	<b>295.649K</b>	<b>309.494K</b>	<b>319.44K</b>	<b>321.174K</b>
<i>Débit 1kg/s</i>	<b>311.826K</b>	<b>323.757K</b>	<b>325.995K</b>	<b>326.778K</b>

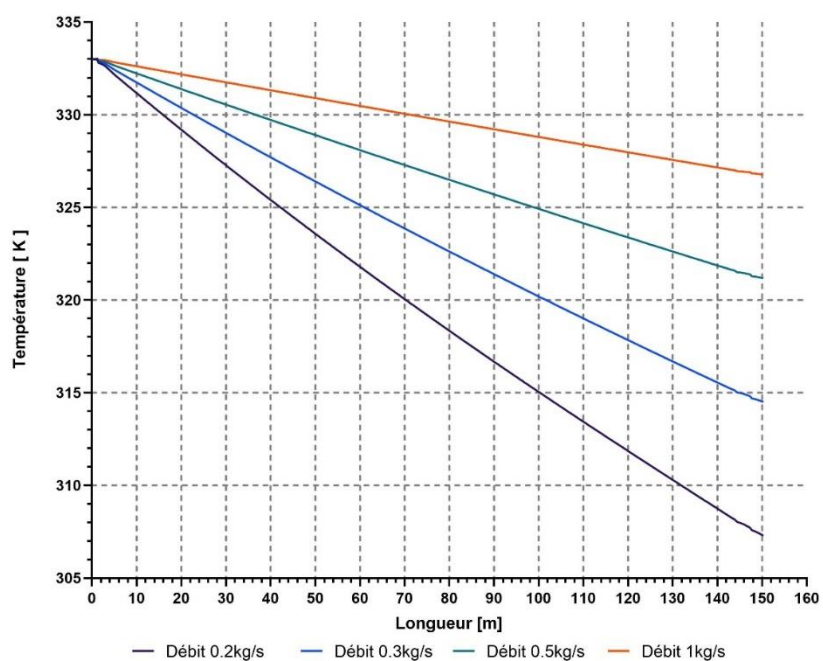
#### 4.1.2 Effet de la longueur d'échange :



**Figure 4.13 :** Évolution de la température d'eau dans la longueur de l'échangeur (L=150m) en 1 heure.



**Figure 4.14 :** Évolution de la température d'eau dans la longueur de l'échangeur (L=150m) en 2 heures.



**Figure 4.15 :** Évolution de la température d'eau dans la longueur de l'échangeur (L=150m) en 3 heures.

Les figures 4.13, 4.14 et 4.15 montrent pour un échangeur de longueur de 150m, la variation de la température dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur d'échangeur. Il est évident de remarquer que l'allure des courbes diminue à mesure que la longueur augmente, et que plus la durée de fonctionnement est élevée plus la température est élevée.



### 4.1.3 Effet du débit :

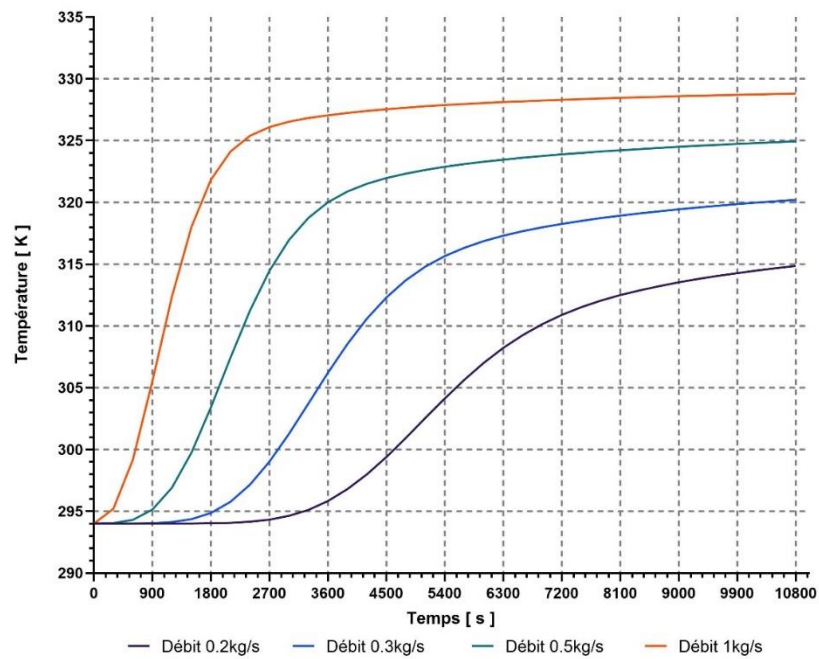


Figure 4.16 : Évolution de la température de sortie d'eau en 3 heures pour un échangeur de chaleur de 100 m pour différents débits.

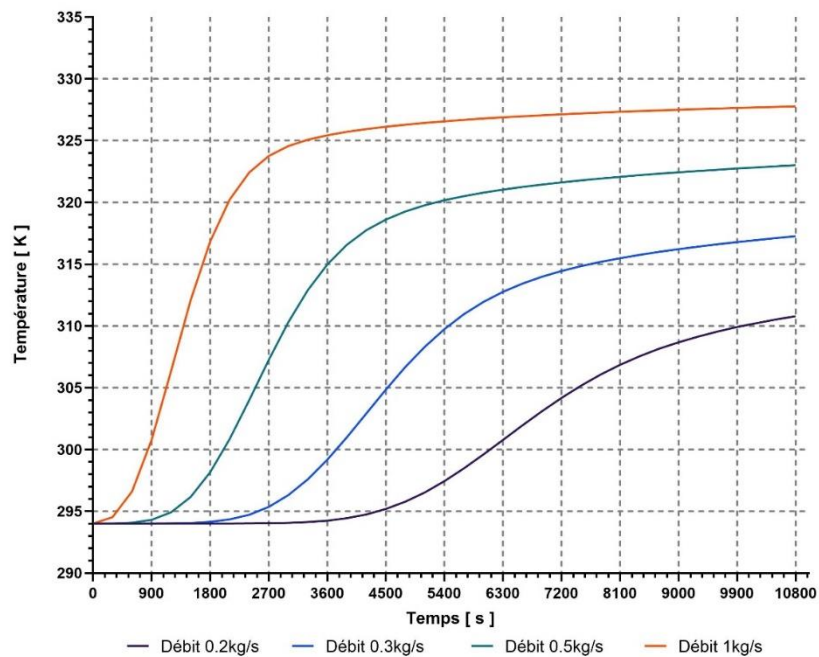
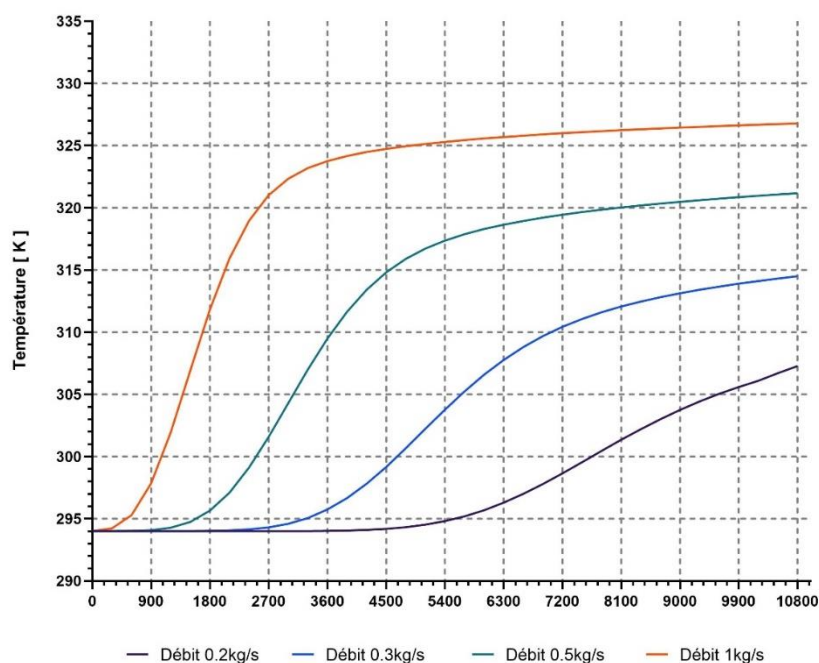


Figure 4.17 : Évolution de la température de sortie d'eau en 3 heures pour un échangeur de chaleur de 125 m pour différents débits.



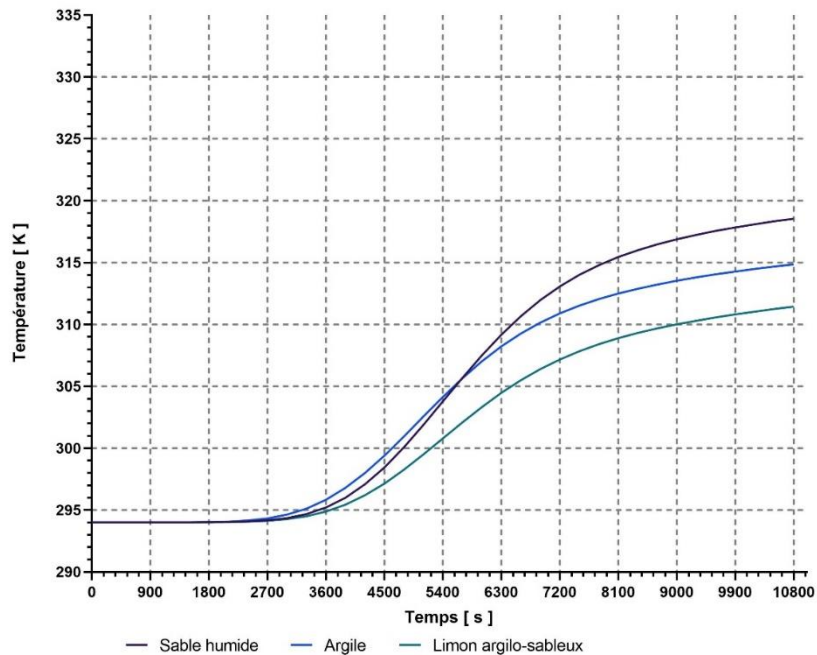
**Figure 4.18 :** Évolution de la température de sortie d'eau en 3 heures pour un échangeur de chaleur de 150 m pour différents débits.

Les figures 4.16, 4.17 et 4.18 montrent pour un échangeur de longueur de 100m, 125m et 150 m en 3 heures, la variation de la température de sortie en fonction du temps. On a pu voir l'influence du débit sur le comportement thermique de l'échangeur géothermique enterré. Les figures montrent que c'est pour un débit 0.2 Kg/h que la température de sortie est 314.858K pour une longueur d'échange 100 m et 310.789K pour une longueur d'échange 125 m et 307.279K pour une longueur d'échange 150 m.

**Tableau 4.4 :** Température de sortie pour les trois longueurs (100m, 125m et 150m) pour différents débits.

<i>Longueur</i>	<i>Débit 0.2kg/s</i>	<i>Débit 0.3kg/s</i>	<i>Débit 0.5kg/s</i>	<i>Débit 1kg/s</i>
<i>100m</i>	<b>314.858K</b>	<b>320.205K</b>	<b>324.934K</b>	<b>328.806K</b>
<i>125m</i>	<b>310.789K</b>	<b>317.256K</b>	<b>323.002K</b>	<b>327.772K</b>
<i>150m</i>	<b>307.279K</b>	<b>314.5K</b>	<b>321.174K</b>	<b>326.778K</b>

#### 4.1.4 Effet de la nature et de type du sol



**Figure 4.19** : Évolution de la température de sortie d'eau en 3 heures et débit 0.2kg/s pour différents types de sols.

**Tableau 4.5** : Température de sortie d'eau pour différents types de sols en 3 heures et débit 0.2kg/s.

Nature du sol	Conductivité thermique $\lambda_{sol}$ (W/m.k)	Chaleur spécifique $C_p$ (J/kg.K)	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Température de sortie Ts (k)
Sable humide	0.58	1000	1750	318.547
Argile	1.25	880	1450	314.858
Limon argilo-sableux	1.5	1340	1800	311.439

On observe les changements de température de l'eau en fonction du sol dans lequel l'échangeur de chaleur est enterré. Alors que les sols contenant des minéraux ont un meilleur rendement, mais que dans un sol Sable humide, la température n'a pas chuté de manière significative.

Le rôle que joue la qualité du sol est très important car il accumule la chaleur perdue de l'eau. Le choix du sol comporte donc de nombreuses conditions, dont la plus importante est de ne pas stocker de chaleur pour éviter le phénomène de saturation.

## *Conclusion générale*

Le 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.

Dans une première partie, nous avons exposé la base théorique et les notions d'énergie géothermique, les échangeurs de chaleur et ses types, ensuite on fait une synthèse bibliographique pour d'avoir quelque solution proposée dans les travaux antérieurs et comparez-le avec les résultats obtenus. La deuxième partie représente la formulation mathématique et les équations générales utilisées, la modélisation numérique du problème avec une brève présentation du logiciel utilisé, puis les résultats obtenus et les discussions.

La simulation numérique a été réalisée par le logiciel commercial ANSYS FLUENT V19.3. L'emploi de ce logiciel dans l'approche numérique est simple et facile d'utilisation et très peu coûteux en temps de calcul, il permet de résoudre et d'analyser rapidement les géométries complexes, et de simuler l'influence de différents paramètres sur les performances thermiques de l'échangeur.

Nous avons choisi l'échangeur de chaleur de forme corbeille et proposé trois longueurs différentes (100 m, 125 m et 150 m) et quatre débits différents (0,2 kg/s, 0,3 kg/s, 0,5 kg/s et 1 kg/s) ainsi que trois types de sol différents.

L'étude bibliographique a montré que le fonctionnement continu de l'échangeur de chaleur provoque une accumulation de chaleur dans le sol entourant le tube, et c'est ce qui a été observé dans ce travail lors de la réalisation de la simulation.

Nous rappelons quelques conclusions importantes obtenues au cours de ces travaux :

Les calculs ont montré que les meilleures performances étaient obtenues au débit le plus bas (0.2 kg/s). Cependant, les débits utilisés dans l'expérience sont très faibles par rapport à ce que demande l'agriculteur (au moins 3 kg/s).

Afin d'obtenir le meilleur débit et la meilleure température, la longueur doit être augmentée. Nous n'avons pas pu expérimenter avec une longueur plus que cela selon les capacités de l'ordinateur utilisé. Pour cela, nous proposons quelques solutions, qui consistent soit à augmenter la longueur de l'échangeur, soit à ajouter un autre ou plusieurs échangeurs, où l'entrée du deuxième échangeur est la sortie du premier échangeur, et ainsi de suite.

Une dégradation des performances thermiques des échangeurs en fonctionnement continu due à l'accumulation de chaleur dans le sol entourant le tube. La détérioration maximale de la performance thermique obtenue par le système étudié est pour le sol à faible conductivité thermique (Sable humide). Ceci conduit à la conclusion que les propriétés du sol jouent un rôle clé dans la conception de ces échangeurs.

## ***Bibliographie***

- [1] S. Ouali, «Etude Géothermique du Sud de l'Algérie,» Université Boumerdès, 2006.
- [2] B. Mebarki et B. Draoui, «Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar,» *des énergies renouvelables*, vol. 15, pp. 465-478, 2012.
- [3] S. Thiers et B. Peuportier, «Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraichissement de bâtiment,» *Centre Énergétique et Procédés École National Supérieure des Mines de Paris*, 2012.
- [4] H. Nebbar, O. Hamdi, A. Moumami et A. Brima, «Etude de comportement thermique d'un échangeur entré air/sol Expérimentation de Biskra,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 14, pp. 199-204, 2014.
- [5] O. Kaboré, «Echangeur de chaleur air-sol à Ouagadougou,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 20, pp. 363-375, 2017.
- [6] C. Abdelbasset, «Contribution à l'étude de la convection forcée à l'intérieur d'un échangeur en « U » à usage géothermique,» *Mémoire de master*, 2016.
- [7] P. Olivier et M. Denis, «modélisation des systèmes géothermiques à boucles horizontales pour chauffer les bâtiments et prévenir la fonte du pergélisol,» *mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maitrisées sciences appliquées*, p. 99, 2010.
- [8] E. Ad, «Dimensionnement d'un échangeur air/sol enterré destiné au rafraichissement de l'air. Mémoire de master, Université de Biskra,» 2014.
- [9] M. SaadEddine, «Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré", Mémoire de magister,» UNIV BISKRA, 2012.
- [10] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/geothermie/>, (consulter le 19/02/2020).
- [11] <https://piuts-canadien-ooreka.fe/comrende/piuts-canadien-borne-prise-air/>, (consulter le 19/02/2020).
- [12] S. Abououbaida, «Traitement de microclimat intérieur des bâtiments industriels,» *Mémoire de Master*, vol. Université de Tébessa, 2016.
- [13] J. Heintz, «Les puits Canadiens/ Provençaux guide d'information,» Centre technique des industries Aérauliques et thermiques(CETIAT), france, 2008.

- [14] H. Nebbar, «Etude théorique et expérimentale d'un échangeur air/sol destiné au rafraichissement des locaux par la géothermie,» UNIV BISKRA, 2012.
- [15] <https://www.ansys.com/>, (consulter le 11/08/2020).
- [16] C. Bailly et G. Comte-Bellot, Turbulence, CNRS Editions, 2003.
- [17] D. C. Wilcox, Turbulence modeling for CFD, DCW industries La Canada, CA, 1993.
- [18] H. Versteeg et W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson Education Limited, 2007.

## Résumé

**Titre du mémoire :** Refroidissement des eaux d'irrigation par la géothermie : Echangeur enterré eau/sol de forme spirale.

Dans cette étude, nous avons simulé un échangeur de chaleur eau / sol en forme de spirale 3D et utilisé le logiciel ANSYS FLUENT dans cette simulation. Le but de ce travail est de réduire la température de l'eau d'irrigation au degré requis par les agriculteurs. Nous avons calculé la température de l'eau le long de l'échangeur et pris en compte l'accumulation de chaleur dans le sol entourant le tube. Nous avons changé les longueurs, les débits et les sols. Les résultats obtenus ont montré que la longueur de l'échangeur, les caractéristiques du sol et la durée de fonctionnement ont une grande influence sur la température de l'eau sortant de l'échangeur.

**Mots clés :** Géothermie, échangeur eau/sol, refroidissement d'eau, irrigation.

## Abstract

**Thesis title:** Cooling of waters of irrigation by geothermal power: Buried exchanger water/ground of form spiral.

In this study, we simulated a 3D spiral-shaped water/ground heat exchanger and used ANSYS FLUENT software in this simulation. The aim of this work is to reduce the temperature of irrigation water to the degree required by farmers. We calculated the water temperature along the exchanger and considered the heat build-up in the soil surrounding the tube. We have changed lengths, flows, and soils. The results obtained showed that the length of the exchanger, the soil characteristics and the duration of operation have a great influence on the temperature of the water coming out of the exchanger.

**Keywords:** Geothermal, water/ground heat exchanger, water cooling, irrigation.

## ملخص:

**عنوان المذكرة:** تبريد مياه الري بالطاقة الحرارية الأرضية: مبادل حراري مدفون (ماء/تربة) على شكل حلزوني.

في هذه الدراسة، قمنا بمحاكاة مبادل حراري مياه / تربة على شكل حلزوني ثلاثي الابعاد واستخدمنا برنامج ANSYS FLUENT في هذه المحاكاة. الهدف من هذا العمل هو خفض درجة حرارة مياه الري الى الدرجة المطلوبة عند الفلاحين. قمنا بحساب درجة حرارة الماء على طول المبادل وأخذنا في الاعتبار تراكم الحرارة في التربة المحيطة بالأنبوب. لقد قمنا بتغيير الطوال والتدفقات وأنواع التربة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن طول المبادل وخصائص التربة ومدة التشغيل لها تأثير كبير على درجة حرارة الماء الخارج من المبادل .

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الحرارية الأرضية، مبادل حراري ماء/تربة، تبريد المياه، الري.