



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

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Énergétique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**Youcef Sif Eddine Bouzidi**

Le : [Click here to enter a date.](#)

## **Etude numérique d'un échangeur géothermal eau/sol pour le refroidissement des eaux.**

---

### **Jury :**

Dr. Abdelghani LAKROUNE	MAA	Université de Biskra	Président
Dr. Kamel AOUES	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr. Miloud ZELLOUF	MAA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2020 - 2021

# Dédicaces

Je dédie ce mémoire.

A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

A mon père et ses conseils exceptionnels.

Qui trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A ma sœur, mes grands-parents, ma famille et spécialement mon oncle Toufik et Dr. CHEBILA Samir et ma tante Halima et ma grande mère Zahra et ceux qui ont partagé avec moi

tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A tous mes amis, Heithem, Houssein, Anis et Anwar et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous ce que j'aime.

Merci !

*Youssef.*

# Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire, également je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de ma formation.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. Kamel AOUES, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous sommes conscientes de l'honneur que nous a fait Dr. Abdelghani LAKROUNE en étant président du jury et Dr. Miloud ZELLOUF d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos remerciement s'adresse au Dr. Mohammed Taher BOUZAHER, Mr. Mohamed Aymen KETHIRI, Mr. Heithem ELBAH et Mr. Larbi AZZOUZ pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.

On remercie aussi toute l'équipe de LGEM pour leurs aides et leurs encouragements. Nos remerciement s'adresse également à tout nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce modeste travail.

# Résumé

Ce travail est enregistré dans le cadre du projet PRFU, agréé depuis 01/01/2019 code A11N01UN070120190006, intitulé « Refroidissement des eaux d'irrigation des forêts du palmier-dattier par la géothermie dans la région ouest de la wilaya de Biskra ». Il représente la suite de l'étude débuté par Mr. M. A. KETHIRI sous la direction du Dr. K. Aoues. Dans cette partie, nous avons mené une étude numérique visant à déterminer les paramètres qui influencent directement les échangeurs géothermiques. Des échangeurs de chaleur géothermique enterré eau/sol destinés à refroidir l'eau d'irrigation du palmier-dattier. L'échangeur de chaleur traité est de forme linéaire de type horizontal tester pour différents débits, deux types de matériau de construction des tubes, trois nature de sol et le temps de fonctionnement, afin d'évaluer les caractéristiques de ces systèmes dans des installations et dans différentes conditions de travail. Les calculs ont été effectués avec le code CFD Fluent et les simulations ont couvert les conditions climatiques de la saison estivale (la période la plus chaude) dans le sud de l'Algérie (Biskra). Les paramètres les plus importants pour le transfert de chaleur de ce système a résulté ; la durée optimale de fonctionnement était de 4 heures avec un débits de 0,5 Kg/s et un échangeur en PE-HD dans un sol limon argilo-sableux dans les cas analysés. Les résultats obtenus sont très satisfaisants.

## Mots clés :

Géothermie, Énergie, Échangeur de chaleur, Énergie renouvelable, Eau, Refroidissement, Simulation CFD, Biskra.

# Abstract

This work is recorded within the framework of the PRFU project, approved since 01/01/2019 code A11N01UN070120190006, entitled "Cooling of irrigation water in date palm forests by geothermal energy in the western region of Biskra". It represents the continuation of the study started by Mr. M. A. KETHIRI under the direction of Dr. K. Aoues. In this part, we conducted a numerical study aimed at determining the parameters that directly influence geothermal exchangers. Underground geothermal heat exchangers intended to cool the irrigation water of the date palm. The heat exchanger treated is linear type horizontal test for different flow rates, two types of pipe construction material, three soil nature and operating time, in order to assess the characteristics of these systems in installations and under different working conditions. The calculations were carried out with the CFD Fluent code and the simulations covered the climatic conditions of the summer season (the hottest period) in the south of Algeria (Biskra). The most important parameter for the heat transfer of this system resulted; the optimum operating time was 4 hours with a flow rate of 0.5 kg / s and a PE-HD exchanger in a sandy clay loam soil in the cases analyzed. The results obtained are very satisfactory.

## **keywords :**

Geothermal, Energy, Heat Exchanger, renewable energy, Water, Cooling, CFD Simulation, Biskra.

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>I</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>III</b>
<b>Liste des tables</b>	<b>VIII</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Les énergies renouvelables . . . . .	4
1.3 La géothermie . . . . .	5
1.3.1 Définition . . . . .	5
1.3.2 Différent type de géothermie et potentiels d'utilisation . . . . .	5
1.3.2.1 Géothermie haute énergie ( $T^{\circ}\text{C} < 150^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	5
1.3.2.2 Géothermie moyenne énergie ( $T^{\circ}\text{C} : 90 \text{ à } 150^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	5
1.3.2.3 Géothermie basse énergie ( $T^{\circ}\text{C} : 30 \text{ à } 90^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	6
1.3.2.4 Géothermie très basse énergie ( $T^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	7
1.3.3 Applications de l'énergie géothermie . . . . .	7
1.4 Synthèses Bibliographiques . . . . .	8
1.5 Conclusion . . . . .	15
<b>2 problématique</b>	<b>16</b>
2.1 Introduction . . . . .	16
2.2 Problématique . . . . .	16
2.3 Les paramètres de dimensionnement . . . . .	16

2.3.1	Longueur des tubes . . . . .	17
2.3.2	Température de sortie . . . . .	17
2.3.3	Débit . . . . .	17
2.3.4	Diamètre des tubes . . . . .	18
2.3.5	Distance entre tube . . . . .	18
2.3.6	La profondeur d'enfouissement . . . . .	18
2.3.7	La qualité du sol et le taux d'humidité . . . . .	19
2.3.8	Les autres paramètres . . . . .	19
2.4	Introduction au CFD . . . . .	19
2.4.1	Définition du CFD . . . . .	20
2.4.2	Fonctionnement d'un code CFD . . . . .	20
2.5	Présentation du logiciel de simulation «ANSYS Fluent» . . . . .	22
2.5.1	Méthodes de résolution des équations régissantes . . . . .	22
2.5.2	Hypothèses et simplifications du cas . . . . .	23
2.5.3	Équations générales de l'outil Fluent (ANSYS) (Équations gouvernantes du problème étudié) . . . . .	23
2.5.4	Les conditions initiales et les conditions aux limites . . . . .	24
2.6	Conclusion . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>26</b>
3.1	Introduction . . . . .	26
3.2	Les cas étudiés . . . . .	26
3.3	Résultats et discussion . . . . .	28
3.3.1	Effet du débit . . . . .	28
3.3.2	Effet de la conductivité thermique du sol . . . . .	34
3.3.3	Effet de la conductivité thermique du tube . . . . .	43
3.3.4	Effet du temps . . . . .	49
3.3.5	L'efficacité de l'échangeur . . . . .	59
3.4	Comparaisons générales . . . . .	60
	<b>Conclusion générale</b>	<b>62</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>

# Liste des figures

1.1	Géothermie haute énergie . . . . .	6
1.2	Géothermie a basse énergie. . . . .	6
1.3	Géothermie très basse énergie. . . . .	7
1.4	Bâtiment Perret à Satigny [6]. . . . .	8
1.5	Schéma de principe du système de ventilation [6]. . . . .	9
1.6	Cycle de refroidissement des eaux d'irrigation [7]. . . . .	9
1.7	Exemple de distribution 3D de température [K] simulée pour des échangeurs de chaleur au sol :( (a) échangeurs de chaleur linéaires au sol, (b) échangeurs de chaleur hélicoïdaux au sol, (c) échangeurs de chaleur slinky). . . . .	10
1.8	Résultats de la simulation avec CFD pour déférentes débits [9]. . . . .	11
1.9	des résultats CFD avec des résultats expérimentaux [10] . . . . .	12
1.10	évolution de la température de l'air de sortie prévue à temps pour les modes de fonctionnement (a) refroidissement et (b) chauffage. Débits d'air moyens de 210 m <sup>3</sup> /h et 453 m <sup>3</sup> /h pour le refroidissement et le chauffage, respectivement (à 1,9 m de profondeur) [12] . . . . .	13
1.11	Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique pour t = 17 h - mode de fonctionnement en refroidissement - et pour certains cas paramétriques : a) vitesse de l'air de 1 m/s, b) vitesse de l'air de 3 m/s, (c) vitesse de l'air de 3 m/s. . . . .	13
1.12	Simulation domaine for the EAHE [13] . . . . .	14
1.13	a) Spirally corrugated pipe, b) Plain pipe . . . . .	15
2.1	Processus du fonctionnement d'un code CFD. . . . .	20
2.2	Les étapes du prétraitement d'un code CFD. . . . .	21



2.3	ANSYS Fluent . . . . .	22
3.1	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un type de sol argile et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits. . . . .	28
3.2	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un type de sol sable humide et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits. . . . .	30
3.3	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un type de sol limon argilo-sableux et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits. . . . .	31
3.4	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PVC avec un débit 0,05Kg/s. . . . .	34
3.5	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PE-HD avec un débit 0,05Kg/s. . . . .	35
3.6	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PVC avec un débit 0,1Kg/s. . . . .	36
3.7	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PE-HD avec un débit 0,1Kg/s. . . . .	37
3.8	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PVC avec un débit 0,5Kg/s. . . . .	38
3.9	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableau) et un tube en PE-HD avec un débit 0,5Kg/s. . . . .	39
3.10	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableau) et un tube en PVC avec un débit 1Kg/s. . . . .	40

3.11	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableau) et un tube en PE-HD avec un débit 1Kg/s. . . . .	41
3.12	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 0,05 Kg/s pour les 3 types de sol ((a) sable humide, (b) argile, (c) limon argilo-sableux) avec de type de matériaux (PVC et PE-HD). . . . .	43
3.13	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 0,1 Kg/s pour les 3 types de sol ((a) sable humide, (b) argile, (c) limon argilo-sableux) avec de type de matériaux (PVC et PE-HD). . . . .	44
3.14	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 0,5 Kg/s pour les 3 types de sol ((a) sable humide, (b) argile, (c) limon argilo-sableux) avec de type de matériaux (PVC et PE-HD). . . . .	45
3.15	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 1 Kg/s pour les 3 types de sol ((a) sable humide, (b) argile, (c) limon argilo-sableux) avec de type de matériaux (PVC et PE-HD). . . . .	47
3.16	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 0,05Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement.	49
3.17	Contours de température de l'eau pour un débit 0,05 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement ((a) 2h, (b) 4h, (c) 6h et (d) 8h).	50
3.18	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 0,1 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement.	51
3.19	Contours de température de l'eau pour un débit 0,1 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement ((a) 2h, (b) 4h, (c) 6h et (d) 8h). . . . .	51

3.20	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement.	53
3.21	Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 2h de fonctionnement. . . . .	53
3.22	Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 4h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur). .	54
3.23	Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 6h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur). .	54
3.24	Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 8h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur). .	55
3.25	Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 1Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement.	56
3.26	Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 2h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur). .	56
3.27	Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 4h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur). .	57
3.28	Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 6h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur). .	57
3.29	Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 8h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur). .	58

# Liste des tables

2.1	Température ambiante en fonction du temps. . . . .	25
3.1	Les cas étudiés . . . . .	27
3.2	Propriétés des matériaux des tubes . . . . .	28
3.3	Propriétés thermo-physiques des différentes nature du sol. . . . .	28
3.4	Température de sortie en fonction de la longueur pour un type de sol argile et un tube en PVC avec les 4 débits. . . . .	29
3.5	Température de sortie en fonction de la longueur pour un type de sol sable humide et un tube en PVC avec les 4 débits. . . . .	31
3.6	Température de sortie en fonction de la longueur pour un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PVC avec les 4 débits. . . . .	32
3.7	Température de sortie en fonction de la longueur pour les 3 types de sol et un tube en PVC avec un débit 0,5Kg/s . . . . .	38
3.8	Température de sortie en fonction de la longueur pour les 3 types de sol et un tube en PE-HD avec un débit 0,5Kg/s . . . . .	39
3.9	Température de sortie en fonction de la longueur pour les 3 types de sol et un tube en PE-HD avec un débit 1 Kg/s . . . . .	40
3.10	Température de sortie en fonction de la longueur pour les 3 types de sol et un tube en PE-HD avec un débit 1 Kg/s . . . . .	41
3.11	Température de sortie en fonction de la longueur pour un débit de 0,5 Kg/s, pour les 3 types de sol , Avec différents matériaux de tube (PVC et PE-HD). . . . .	46
3.12	Température de sortie en fonction de la longueur pour un débit de 1 Kg/s, pour les 3 types de sol , Avec différents matériaux de tube (PVC et PE-HD). . . . .	48

3.13 L'efficacité de l'échangeur pour les 4 débits (0,05 Kg/s, 0,1 Kg/s, 0.5 Kg/s, 1 Kg/s), avec différents intervalle du temps de fonctionnement (2h, 4h, 6h et 8h). . . . .	60
---	----

..

# Introduction générale

La surendemande de l'énergie et la facture énergétiques augmentent de jour en jour à travers le monde et les réserves des combustibles fossiles ne seront pas suffisantes pour satisfaire dans l'avenir la sur demande énergétiques mondial. Les systèmes renouvelables peuvent réduire la demande donc, les chercheurs travaillent sur le développement de ces énergies pour l'utilisation dans des systèmes à grande échelle. Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique et énergie géothermique). L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et les moins chères du monde entier. Le nom Géothermie, vient 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 [1].

Le principe consiste à exploiter l'énergie géothermique contenue dans le sol via un échangeur de chaleur et de profiter de l'écart de température entre celle de l'ambiance et du sol dans une profondeur définie, pour chauffer en hiver ou refroidir en été. Lors de la conception d'un échangeur de chaleur, on cherche souvent à déterminer les dimensions de cet échangeur en fonction des paramètres de fonctionnement (conditions aux limites et débit). Répondant aux conditions imposées, qui est une tâche assez délicate à réaliser, est étroitement lié à la configuration géométrique de l'échangeur (longueur, diamètre et configuration) et aux phénomènes de pertes de charges [2].

Les utilisations de cette énergie sont multiples. Elles vont des utilisations telles que, la production de l'électricité, le stockage de la chaleur, le chauffage jusqu'à la climatisation des locaux qui connaît un développement important depuis quelques

années.

Autrement, l'énergie géothermique a été utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture tel que le chauffage des serres agricoles utilisant l'eau comme fluide caloporteur.

Dans la zone de Biskra, on exploite pour l'irrigation des palmiers dattiers deux types de sources d'eau qui se diffère selon la région, l'exploitation et la profondeur : la nappe de l'Albien et les nappes phréatiques. Les nappes phréatiques se constituent d'eau de mauvaise qualité et des quantités assez réduites. D'autre part, la nappe de l'Albien peuvent la meilleure solution dans le temps en raison, de la bonne qualité ainsi que la disponibilité d'un gisement immense de réserve de ses eaux. Mais cette dernière se trouve à des températures élevées (qui influent négativement sur cette culture) et représente un coût d'exploitation élevé (des profondeurs de l'ordre de 2000 mètres) [3].

Lors de discussions menées avec des agriculteurs des palmiers dattiers de la région et d'autres témoignages enregistrés, on a pu soulever le problème de la température élevée des eaux d'irrigation de la nappe Albienne (favoriser par ces agriculteurs). D'où on s'est lancé sur la base de la formation théorique acquise et à travers le potentiel énergétique renouvelable disponible dans le secteur, à monter un projet de recherche qui s'appuie sur trois axes : i) une recherche bibliographique approfondie sur la thématique, ii) une étude théorique et simulation du problème, ii) une validation de la solution proposée par les voix expérimentales [3].

Cette étude représente la suite du travail lancé durant l'année universitaire 2018-2019 par Mr. Mohamed Aymen Kethiri et le travail de Mr. Yacine KESSAI, Mr. Khaled CHEBAH et Mr. Mohamed Arezki MERABT durant l'année universitaire 2019-2020 sous la direction du Dr. Kamel AOUES. Donc le but est d'approfondir les deux axes commencés l'année dernière qui sont la recherche de travaux antérieurs et le dimensionnement d'un échangeur enterré eau/sol.

L'objectif traité par cette étude était de dimensionnés un échangeur de chaleur géothermal eau/sol pour but de diminuée la température des eaux d'irrigation du palmier dattier dans la région de Biskra. Par conséquent et en occurrence, l'investissement dans les ressources énergétiques renouvelables que dispose la région. La température de cette eau influe négativement sur la fertilité de la terre, la qualité

des récoltes, la consommation d'eau d'irrigation en présence du phénomène d'évaporation, la consommation d'électricité dans les aéro-refroidisseurs, les problèmes de la dissolution des sels minéraux et celui de l'infiltration de l'eau dans le sol [4].

Lors et durant cette troisième année d'étude sur ce projet et afin d'aboutir à cet objectif, nous avons décomposé le travail en deux parties. La première partie se base sur la compréhension élargie des mots clés du sujet étudié et une synthèse bibliographique [4, 17] établie sur le sujet, par la présentation de quelques travaux menés dans le domaine de l'échauffement et/ou du refroidissement des eaux par la géothermie, et sur le refroidissement des eaux.

Dans la deuxième partie qui enveloppe deux chapitres, on trouve le deuxième chapitre, où nous donnons un exposé de la problématique d'une façon détaillée, ensuite donne une brève présentation sur la méthode (CFD) choisie pour la résolution du problème et le logiciel de calcul (ANSYS « Fluent »).

Dans le troisième chapitre, on présente le cas étudié, le processus de simulation par Fluent et les résultats obtenus lors du calcul. Dans ce calcul, nous avons testé différents temps de fonctionnement, la conductivité du sol, plusieurs matériaux de construction et débits pour qu'on puisse les comparer et par conséquent, dimensionner la meilleure configuration qui soulève notre problème.

En fin, nous clôturons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.



# Chapitre 1

## Généralités

### 1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre notre objectif est de donner une vue générale sur le thème (**Etude numérique d'un échangeur géothermal eau/sol pour le refroidissement des eaux.**), au départ nous avons exposé une définition sur le thème du sujet.

Enfin nous allons expose une synthèse bibliographique établie sur le sujet, par la présentation de quelques travaux menés dans le domaine de l'échauffement et/ou du refroidissement des eaux par la géothermie, et sur le refroidissement des eaux [4, 17].

### 1.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables, souvent appelées énergies propres, proviennent de sources ou de processus naturels qui se renouvellent constamment. Par exemple, la lumière du soleil ou le vent continuent de briller et de souffler, même si leur disponibilité dépend du temps et de la météo. On définit généralement les énergie renouvelables par opposition aux énergie tirés des ressources limité ou non renouvelables, tel que : charbon, pétrole, gaz naturel..Etc. L'appellation « énergies propres » provient du fait que l'impact environnementale de ces dernières est très faible par rapport à l'énergie fossile ou non renouvelable. Le faible impact environnemental de

leur exploitation en fait un élément majeur des stratégies RSE des entreprises en matière de développement durable [18].

## **1.3 La géothermie**

### **1.3.1 Définition**

L'énergie géothermique est l'énergie thermique générée et stockée dans la Terre. L'énergie géothermique de la croûte terrestre provient de la formation initiale de la planète et de la désintégration radioactive des matériaux. Elle désigne également la science qui étudie les phénomènes thermiques internes de la terre, ainsi que le savoir du comment l'exploiter. L'adjectif géothermique provient des racines grecques (geo), qui signifie Terre, et (thermós), qui signifie chaud [17].

### **1.3.2 Différents types de géothermie et potentiels d'utilisation**

#### **1.3.2.1 Géothermie haute énergie ( $T^{\circ}\text{C} < 150^{\circ}\text{C}$ )**

La géothermie haute enthalpie ou haute température englobe les fluides qui ont comme caractéristique une température au-delà des  $150^{\circ}\text{C}$ . Généralement, Les réservoirs situés à des profondeurs dépassant les 1500 mètres, subissent des gradients géothermiques anormalement élevés. L'existence d'un tel réservoir, nous donne la possibilité de produire l'électricité en captant le fluide sous forme de vapeur sèche ou humide [3].

#### **1.3.2.2 Géothermie moyenne énergie ( $T^{\circ}\text{C} : 90 \text{ à } 150^{\circ}\text{C}$ )**

La géothermie de moyenne température ou moyenne enthalpie peut avoir deux formes. Elle peut être sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre  $90$  et  $150^{\circ}\text{C}$ . Il est vrai que ce type de géothermie peut se trouver dans les zones propices à la géothermie haute énergie, cependant, il se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2000 à 4000 mètres. Dans ce cas l'électricité peut être produite avec une technologie basée sur l'utilisation d'un fluide intermédiaire est nécessaire [3].

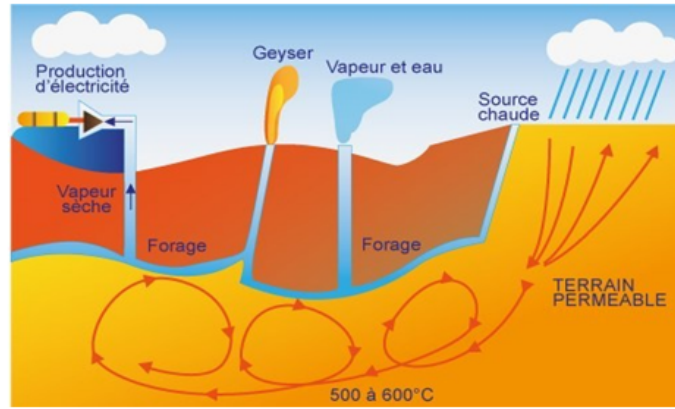


FIGURE 1.1 – Géothermie haute énergie [3].

### 1.3.2.3 Géothermie basse énergie (T°C : 30 à 90 °C)

Elle est constituée de la chaleur extraite de l'eau chaude existant dans les aquifères profonds (1500 - 2000 mètres) des bassins sédimentaires. Ainsi, on l'utilise pour le chauffage. On prend l'exemple de la France, en France métropolitaine, plus de 30 réseaux de chaleur urbains sont alimentés par ce type de géothermie. Cette technologie permet d'économiser plus de 160000 TEP/an de combustibles fossiles. Précisément, En région parisienne, l'eau de l'aquifère profond du Dogger est captée entre 1500 et 1800 mètres de profondeur, à des températures comprises entre 55 et 85°C [3].

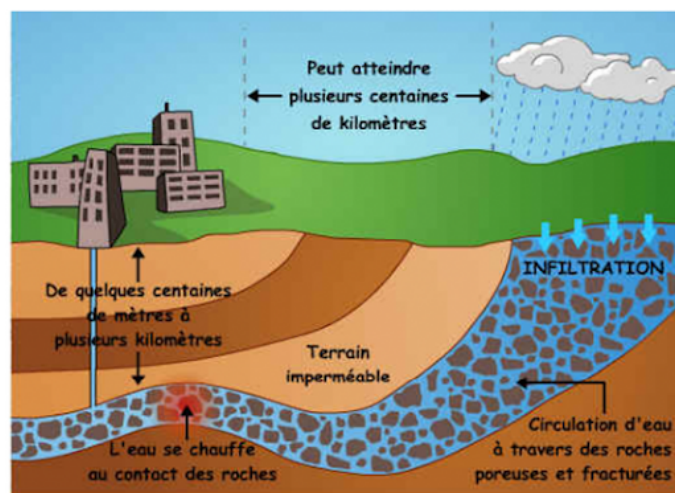


FIGURE 1.2 – Géothermie à basse énergie.

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

Ce type concerne la chaleur ainsi que le froid dans les terrains ou les aquifères sont peu profonds (en générale 100 mètres). Par ailleurs La température lors de l'exploitation est inférieure à  $30^{\circ}\text{C}$  (généralement comprise entre  $9$  et  $15^{\circ}\text{C}$ ). Il est nécessaire de d'utiliser de pompes à chaleurs (PAC) afin de exploiter cette gamme de température. Le fonctionnement de ces PAC touche les dispositifs d'échange et d'extraction d'énergie avec le sol (capteur horizontaux, profondeur  $<$  à  $2.0$  m), le sous-sol (capteur verticaux, profondeur généralement inférieure à  $100$  m), l'eau souterraine des aquifères peu profonds (puits de pompage) ou l'air (intérieur ou extérieur de l'habitat) [3].

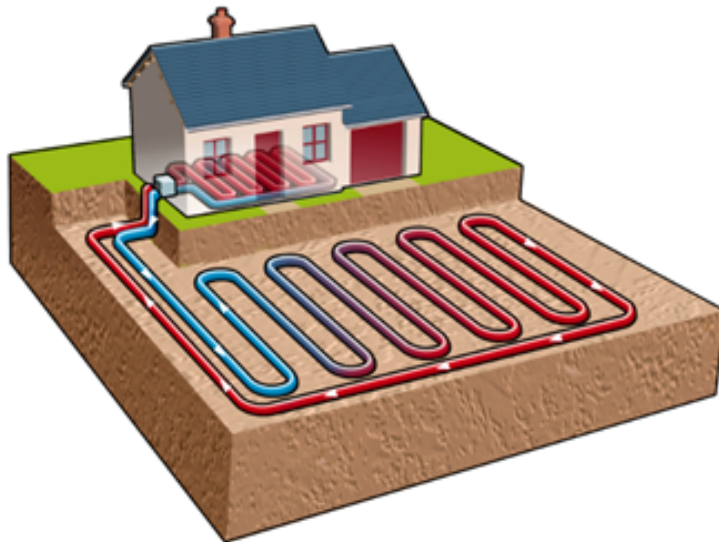


FIGURE 1.3 – Géothermie très basse énergie.

#### 1.3.3 Applications de l'énergie géothermie

- Rafraîchir par géocooling.
- Produire du chauffage.
- Produire de l'eau chaude sanitaire (ECS).
- Produire du chaud et du froid.
- Produire de l'électricité.
- Stocker de la chaleur [17].

## 1.4 Synthèses Bibliographiques

Hollmuller et al., 2000, [5] ont opté pour un stockage direct de la chaleur dans le sol de la serre. Ils ont mis au point un système de récupération de l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible. Ce système est constitué d'un échangeur eau/air couplé avec des échangeurs en PVC enterrés dans le sol à 30 cm de profondeur. Cette technique permet d'économiser 12 % de l'énergie annuelle destinée au chauffage des serres par des systèmes conventionnels fonctionnant avec le fuel.

En 2003, Hollmuller et al. [6] ont présenté une étude expérimentale sur les échangeurs de chaleurs eau/sol sous forme d'un collecteur destiné pour le préchauffage et le rafraîchissement des locaux. Ils ont pris le Bâtiment Perret à Satigny, (GE) comme un cas d'étude site expérimental, figure 2.1.

En 2005, Hollmuller et al. [7] ont appuyé sur l'ancien rapport (2003). Ils résument leur rapport et présentent les résultats les plus essentielles dans leur travail. Ce travail délimite le potentiel de préchauffage et rafraîchissement de bâtiments par échangeur air/eau/sol (collecteur souterrain à eau couplé sur la ventilation). En prenant soin de caractériser les prestations par rapport à l'ensemble du système de ventilation et au bâtiment.



FIGURE 1.4 – Bâtiment Perret à Satigny [6].

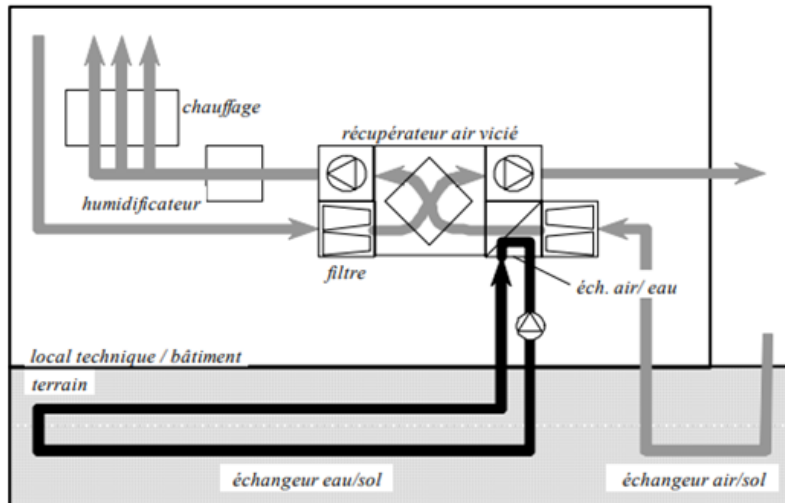


FIGURE 1.5 – Schéma de principe du système de ventilation [6].

Haddad 2008 [8] a utilisé les eaux géothermales pour l'irrigation et le chauffage des serres en Tunisie. Ce travail résume l'exploitation de la géothermie dans le domaine agricole. Il a profité des sources géothermales pour l'irrigation avec sa qualité d'eau. Pour une bonne irrigation et la chaleur de ses eaux pour chauffer le sol et les serres.

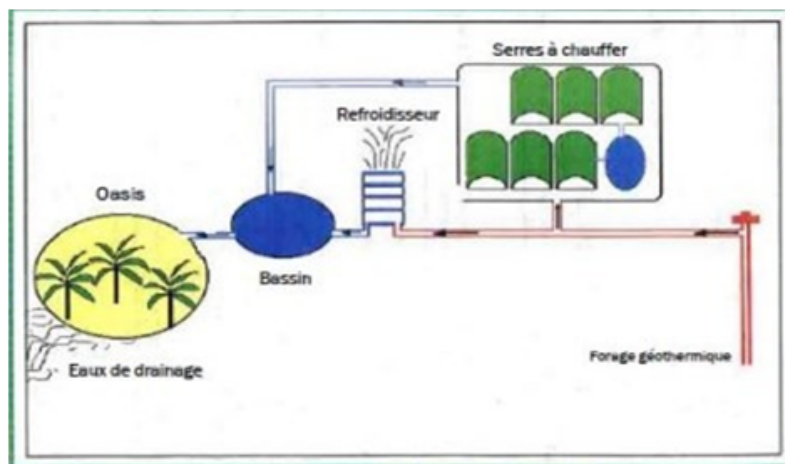


FIGURE 1.6 – Cycle de refroidissement des eaux d'irrigation [7].

Lors de l'utilisation de ses eaux, Haddad, M. a trouvé le problème de l'élévation de la température de ses eaux et pour cela, il a utilisé les réfrigérateurs atmosphériques et les aéroréfrigérants pour qu'il puisse baisser la température et la rendre adéquate à l'irrigation.

Congedo et al., 2012 [9] ont montré, au cours d'une étude de calcul par CDF

fluent les performances des échangeurs de chaleur au sol horizontaux qui ont été analysées par Simulations CFD. En particulier trois configurations géométriques différentes (monotube linéaire, hélicoïdal et slinky) ont été analysés pour différentes conditions de travail (hiver et été) et variables : profondeur d'enfouissement de l'échangeur à l'intérieur du sol (de 1,5 à 2,5 m) ; vitesses des fluides caloporteurs (de 0,25 à 1 m / s) ; conductivités thermiques du sol autour des échangeurs de chaleur (de 1 à 3 W / m K).

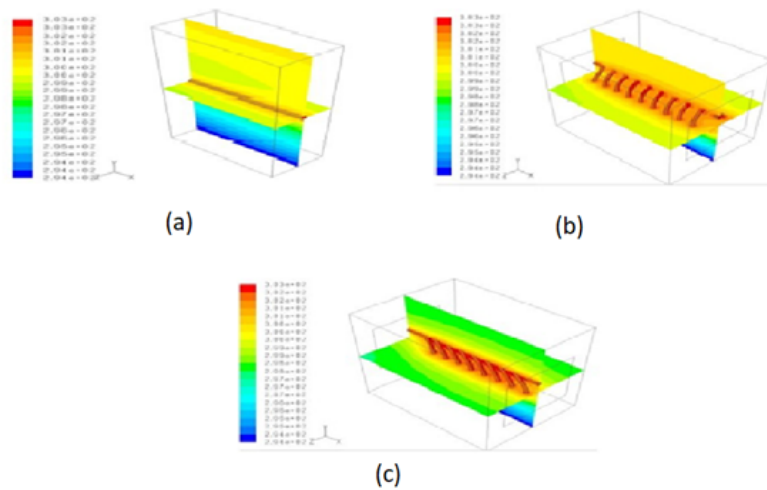


FIGURE 1.7 – Exemple de distribution 3D de température [K] simulée pour des échangeurs de chaleur au sol : (a) échangeurs de chaleur linéaires au sol, (b) échangeurs de chaleur hélicoïdaux au sol, (c) échangeurs de chaleur slinky).

En 2013, Nebbali [10] a mené un travail qui sur l'étude thermique d'un échangeur eau/sol. Ce dernier, contrairement aux échangeurs air/sol, améliore l'efficacité des changes de chaleur et nécessite un espace réduit concomitant à un faible coût d'exploitation.

Parmi les résultats obtenus de cette étude et afin d'assurer un bon fonctionnement continu de cette installation, Il faut utiliser deux échangeurs eau/sol placé à la même profondeur de préférence. Cette installation proposée, assez simple à réaliser, permet d'extraire à l'air chaud une puissance importante, de l'ordre de 14kW, moyennant une faible consommation énergétique nécessaire au fonctionnement des pompes à eau et au soufflage de l'air.

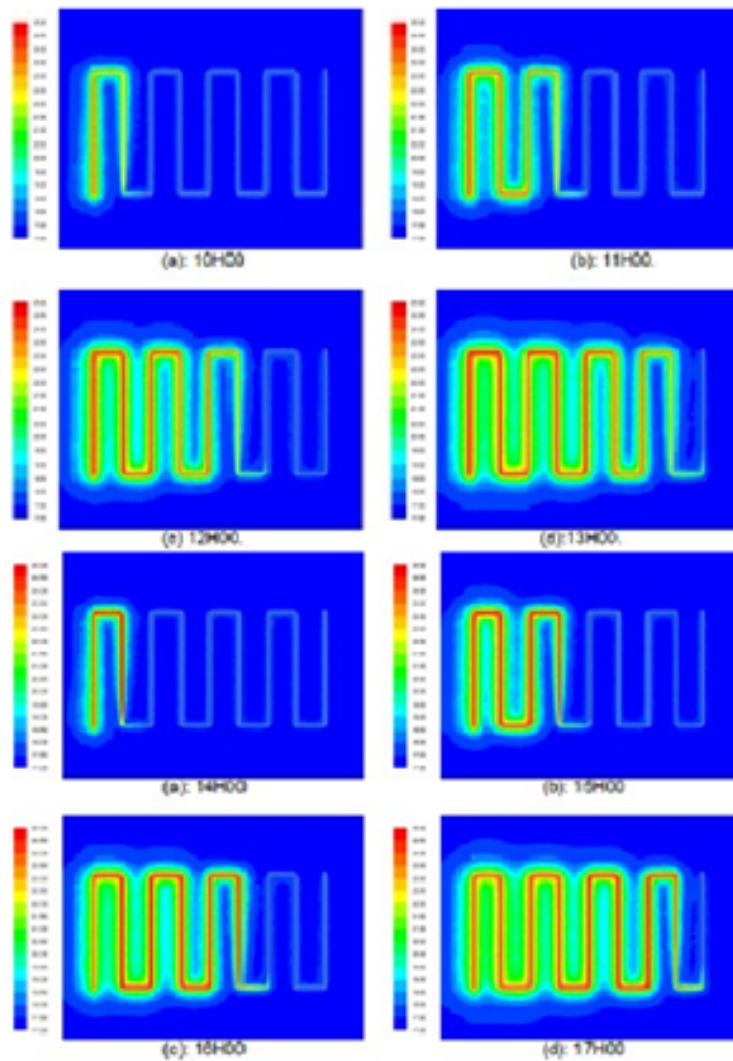


FIGURE 1.8 – Résultats de la simulation avec CFD pour différents débits [9].

Misra et al. 2013 [11] ont réalisé une modélisation CFD pour étudier l'influence de la durée de fonctionnement et de la conductivité thermique du sol sur la performance thermique du système EATHE pour le chauffage hivernal. Il a été observé que les performances thermiques d'EATHE sont significativement affectées par la durée de son fonctionnement continu et la conductivité thermique du sol.



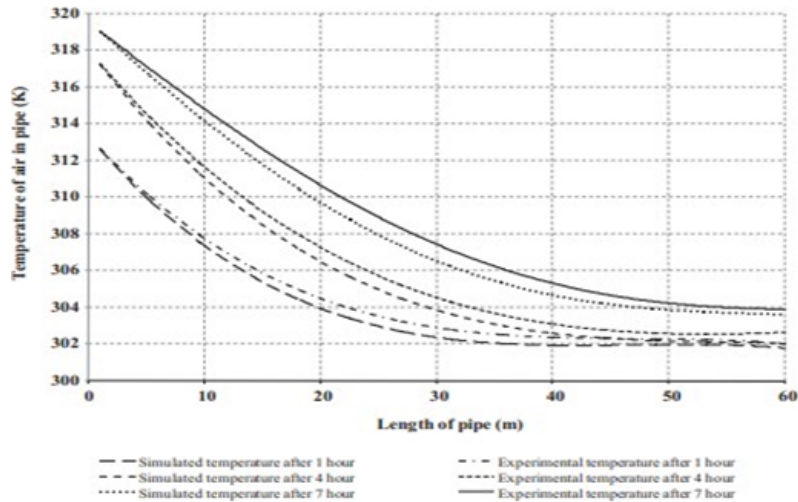


FIGURE 1.9 – des résultats CFD avec des résultats expérimentaux [10]

Rouag et al. 2018 [12] ont développé un modèle semi-analytique transitoire pour prévoir la détérioration des performances thermiques du système EAHE due à la durée de l'opération. Ils ont également observé que le rayon du sol (épaisseur de terre autour du tuyau EAHE) ne dépend pas seulement de la durée de fonctionnement, mais cela dépend aussi de la diffusivité thermique du sol, diamètre du tuyau et température de l'air d'admission.

En 2020, Rosa et al. [13] ont évalué numériquement l'influence de trois paramètres sur la performance thermique globale d'un Système EAHE pour les bâtiments résidentiels dans le climat méditerranéen chaud-été. ANSYS a été utilisé pour simuler le comportement transitoire EAHE pendant modes de fonctionnement de chauffage et de refroidissement, et d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur la température de l'air de sortie et le taux de transfert de chaleur sol-air. Les résultats numériques ont été validés par rapport aux données expérimentales et par rapport aux résultats analytiques. Cette dernière a également montré que pour une certaine vitesse de l'air et un certain diamètre de tuyau, la distance entre les tuyaux peuvent être réduits de 1,0 m à 0,5 m sans compromettre les performances EAHE, permettant ainsi une réduction de la superficie nécessaire pour les tuyaux EAHE jusqu'à 50%, et pour un certain diamètre de tuyau et distance entre les tuyaux adjacents, plus la vitesse de l'air est élevée, plus les performances thermiques du système sont faibles, principalement pour le refroidissement.

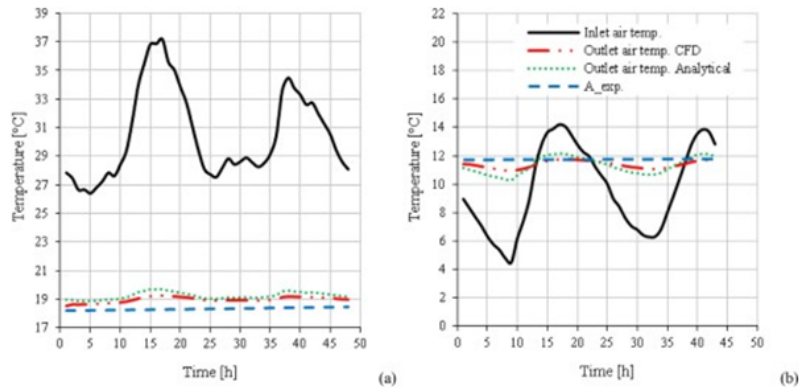


FIGURE 1.10 – évolution de la température de l’air de sortie prévue à temps pour les modes de fonctionnement (a) refroidissement et (b) chauffage. Débits d’air moyens de 210 m<sup>3</sup>/h et 453 m<sup>3</sup>/h pour le refroidissement et le chauffage, respectivement (à 1,9 m de profondeur) [12] .

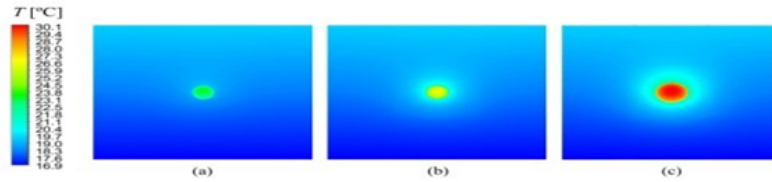


FIGURE 1.11 – Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique pour  $t = 17$  h - mode de fonctionnement en refroidissement - et pour certains cas paramétriques : a) vitesse de l’air de 1 m/s, b) vitesse de l’air de 3 m/s, (c) vitesse de l’air de 3 m/s.

En 2020, Hermes et al. [14] ont analysé le comportement thermique d’un EAHE en tenant compte de données réalistes relatives à une ville côtière du sud du Brésil, i) les profils géotechniques du sol ont été obtenus grâce à des tests de pénétration standard (SPT), ii) la variation annuelle de la température de la surface du sol et de l’air dans la région. Les simulations ont été effectuées avec un modèle de calcul de volume fins vérifié et validé. Comme le montrent les résultats globaux, 2 m est la profondeur idéale pour placer les conduits localement, ce qui augmente les potentiels thermiques EAHE en été et en hiver.

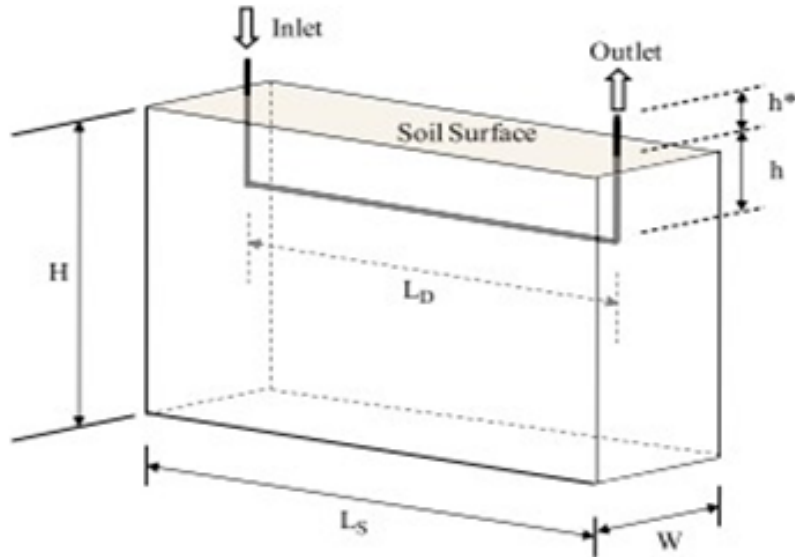


FIGURE 1.12 – Simulation domaine for the EAHE [13] .

Hanin Atwany et al. En 2020, [15] ont fait une étude sur un modèle tridimensionnel avec ANSYS Fluent pour étudier la performance d'un échangeur de chaleur à tubes de terre horizontal. Les résultats ont indiqué une relation directe entre la conductivité thermique du sol et le taux de transfert de chaleur. D'autre part, une relation inverse a été observée entre la température de surface du sol et le taux de transfert de chaleur.

Aashish Sharma et al 2020, [16] Cette étude vise à étudier l'effet de la géométrie du tuyau sur la température de sortie pour atteindre confort thermique. Trois (deux) géométries de tuyaux différentes, c'est-à-dire des tuyaux circulaires et ondulés en spirale, étaient enquêtés. On observe que sur deux géométries, un tuyau ondulé en spirale a montré la meilleure température réduction pendant les étés ainsi que la saison d'hiver. Une baisse de température de  $0,110^{\circ}\text{C}$  pour les étés et une température une élévation de  $0,0840^{\circ}\text{C}$  a été observée dans le tuyau en spirale par rapport au tuyau circulaire simple de 1 m de longueur chacun. Plus loin le dénombrement a également montré que les systèmes de pompes à chaleur géothermiques sont adaptés aux conditions climatiques indiennes.

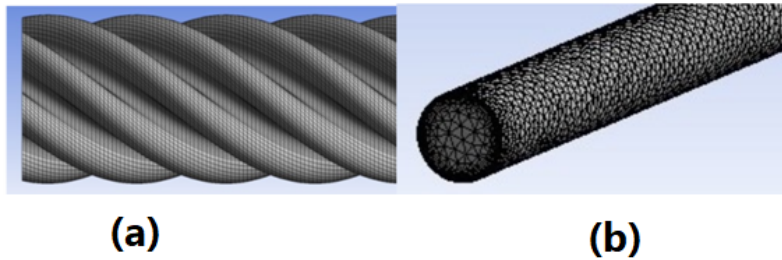


FIGURE 1.13 – a) Spirally corrugated pipe, b) Plain pipe

Mohamed Aymen KETHIRI, en 2019 [3] à fait sa thèse de fin d'étude sur les échangeurs de chaleur enterrée eau/sol pour but de refroidir les eaux destinés à l'irrigation des palmiers dattier dans la zone de Biskra. Cette étude a été accomplie par un brevet d'invention protégé au niveau de l'INAPI d'Alger sous le numéro (10530) intitulé par **(Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source destinée principalement à l'irrigation.)**[4].

En 2020, Yacine KESSAI, Khaled CHEBAH et Merabt ARZEKI encadrés par monsieur Kamel AOUES, cette étude est une continuité de la précédente étude pour but de valoriser le brevet et de se rapprocher à le cas réel. Ont fait une étude de comparaison entre les 3 travaux [17].

## 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une définition sur le thème, ensuite nous avons exposé une synthèse bibliographique établie sur le sujet, par la présentation de quelques travaux menés dans le domaine de l'échauffement et/ou du refroidissement des eaux par la géothermie, et sur le refroidissement des eaux.

# Chapitre 2

## problématique

### 2.1 Introduction

Dans notre cas d'étude, nous allons aborder un problème de dimensionnement des échangeurs géothermales eau / sol, pour but de refroidir les eaux. Ce problème de dimensionnement est issu de la complexité de l'étude et le nombre des paramètres.

### 2.2 Problématique

Dans notre cas d'étude, nous allons aborder un problème de dimensionnement des échangeurs géothermales eau / sol, pour but de refroidir les eaux. Ce problème de dimensionnement est issu de la complexité de l'étude et le nombre des paramètres.

Pour cela, l'objectif de ce travail consiste à dimensionner un échangeur géothermique eau / sol (enterrée). Sachant que la température de ces eaux est égale à 40°C (313 K).

Pour atteindre a notre objectif, il faut dimensionner un échangeur qui assure le refroidissement des eaux. Pour cela, il faut prendre en considération tous les paramètres de dimensionnement.

### 2.3 Les paramètres de dimensionnement

L'analyse des paramètres de dimensionnement d'un puits canadien permet d'évaluer l'influence des différents paramètres sur les performances et le comportement

thermique de l'échangeur eau sol et d'en distinguer les plus prépondérants. Ces paramètres sont à considérer pour le dimensionnement d'un échangeur eau-sol, et par conséquent pour sa modélisation [19, 20].

### **2.3.1 Longueur des tubes**

La longueur des tubes du puits canadien détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'eau ou de l'air dans les tubes. Il a été démontré par plusieurs études qu'en dessous de 25 mètres de longueur, le puits canadien ne permet pas d'obtenir une température de sortie proche de celle du sol, car le rendement de l'échange est moyen. En revanche au-delà de 40 mètres le rendement n'augmente plus de manière significative. Il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un tube de longueur importante [19, 20].

### **2.3.2 Température de sortie**

La température de sortie d'un tube enterré est directement liée à la température du sol. Son amplitude diminue fortement avec la profondeur. Le tube doit donc être enterré assez profondément de manière à profiter au mieux de l'inertie du sol. Le type de sol n'influe pas de manière importante sur la température de sortie dans le cas d'un échangeur air-sol constitué d'un seul tube, à condition que, le débit ne soit pas trop élevé [19, 20].

### **2.3.3 Débit**

Le débit du fluide dans les tubes intervient simultanément sur l'échange convectif entre le fluide et la canalisation. Un optimum est à déterminer, le débit global devant surtout correspondre aux besoins de renouvellement d'air de la pièce ou de la zone à ventiler, dans le cas où le fluide est l'air. Lors du rafraîchissement d'été, ou les besoins en eaux lors de l'utilisation des échangeurs eau-sol pour le chauffage d'eau dans les maisons, le débit doit être plus élevé que lors du préchauffage d'hiver où seul le débit hygiénique est nécessaire [19, 20].

### 2.3.4 Diamètre des tubes

Une augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais d'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au-delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement, le coefficient d'échange convectif chute. Ceci est dû au fait que l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite, où va être échangée la chaleur. La circulation au coeur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol. Cet optimum est indépendant de la longueur de la canalisation. On obtiendra donc une relation directe entre le débit et le diamètre optimal. En général, pour les débits utilisés, cet optimum se situe autour des 20 cm de diamètre [19, 20].

### 2.3.5 Distance entre tube

La distance entre les tubes est aussi très importante, parce qu'elle influe sur la température de la portion du sol située entre ces tubes, ce qui réduit localement la capacité de stockage du sol. D'après (Hollmuller 2002) [6] 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. En tout cas, si plusieurs tubes sont placés à proximité il faut les espacer suffisamment pour que le sol puisse se régénérer [19, 20].

### 2.3.6 La profondeur d'enfouissement

La profondeur d'enfouissement influe sur la qualité de l'isolation entre l'atmosphère et les tubes enterrés. Le calcul de la profondeur d'enfouissement dépend de la nature du sol (conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité thermique) et de l'échange thermique entre la surface du sol et l'entourage : par radiation avec le soleil et le ciel et par convection avec l'air ambiant. (Hollmuller 2002) [6] montre que les variations de température de l'air extérieur sont d'autant plus amorties et déphasées par le sol que la profondeur est grande [19, 20].

### 2.3.7 La qualité du sol et le taux d'humidité

La capacité calorifique et conductivité du sol ont un impact important sur l'efficacité du système. Ces caractéristiques 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 calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau.[19, 20].

### 2.3.8 Les autres paramètres

Certains paramètres sont peu ou pas cités par les articles qui ont été consultés. Il s'agit par exemple de la rugosité intérieure des canalisations, les propriétés physiques des canalisations, la géométrie globale du puits canadien, l'impact du rayonnement solaire sur la température du sol, le régime de fonctionnement du puits canadien.

- La rugosité intérieure des canalisations.
- Les propriétés physiques des canalisations.
- La géométrie de l'échangeur.
- Le rayonnement solaire et la surface du sol.
- Le régime de fonctionnement du puits canadien.

Le dimensionnement d'un échangeur est assez délicat du fait du nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de tubes, profondeur d'enfouissement, nature du sol, distance entre les tubes, débit de ventilation et la température d'entrée [21].

## 2.4 Introduction au CFD

L'analyse des phénomènes complexes tels que le transfert de chaleur et les écoulements des fluides comme l'eau et l'air nécessitent une bonne compréhension du modèle analytique du système, les champs d'application de ce système, ainsi que les différentes étapes de traitement du code CFD afin d'obtenir des résultats justes et cohérent qui expliquent le phénomène en question.

Aussi, Le choix du logiciel de simulation dépend de nos données d'entrée (inputs) et de la nature de notre expérience et des conditions dans lesquelles elle est inscrite



[22].

### 2.4.1 Définition du CFD

La dynamique des fluides numérique (CFD) est une science qui, à l'aide du calcul numérique à travers d'ordinateurs, produit des prédictions quantitatives des phénomènes d'écoulement des fluides sur la base des lois de conservation (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) régissant le mouvement des fluides. 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 [22].

### 2.4.2 Fonctionnement d'un code CFD

Selon Versteeg et Malalasekera [22, 23], les codes CDF sont structurés, autour des algorithmes numériques qui peuvent résoudre les problèmes d'écoulement des fluides. Afin de résoudre cette complexité des algorithmes les packages commerciaux CFD proposent des interfaces utilisateur sophistiquées aux paramètres du problème d'entrée (les inputs) afin d'examiner les résultats. Ces codes comme l'illustre la figure 2.2 passent par trois étapes essentielles : le prétraitement, le calcul et finalement le post-traitement et la visualisation des résultats.

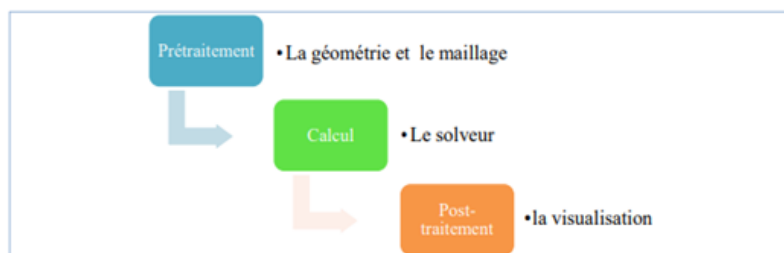


FIGURE 2.1 – Processus du fonctionnement d'un code CFD.

## Prétraitement

Le prétraitement permet de transformer les entrées (inputs) en forme appropriée pour une utilisation ultérieure par le solveur, et cela se réalise en plusieurs étapes, comme le montre le diagramme suivant [23] :

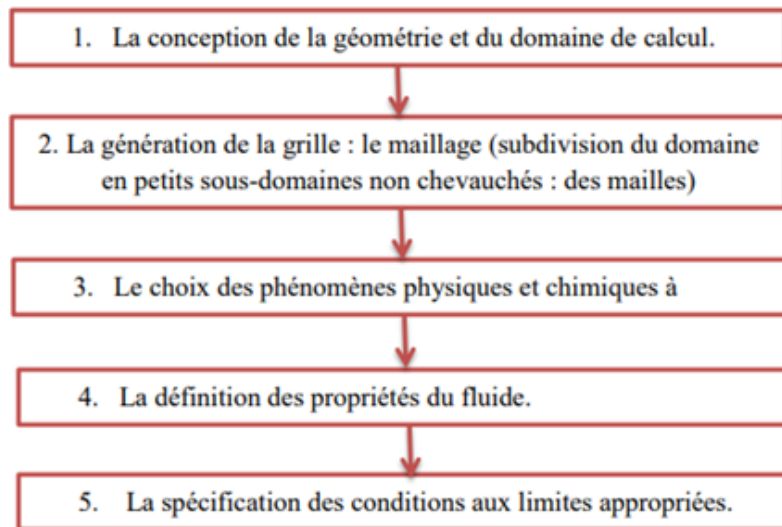


FIGURE 2.2 – Les étapes du prétraitement d'un code CFD.

## Calcul

Le solveur utilise trois techniques numériques distinctes : les différences finies, les éléments finis et les méthodes spectrales. Généralement les méthodes numériques qui forment la base du solveur effectué les étapes suivantes [23] :

- Approximation des variables inconnues découlement à travers des fonctions simples.
- La discrétisation par la substitution des approximations dans les équations d'écoulement avec des manipulations mathématiques
- Résolution des équations algébriques

## Post-traitement

Le post traitement c'est l'étape de la visualisation de données en utilisant des outils et des extensions intégrées aux logiciels de simulation CFD. Ceux-ci comprennent :

- L’affichage de la géométrie de domaine et la grille de maillage
- Les tracés de vecteurs
- Les lignes et les tracés de contours ombrés
- Le trajet des particules [23].

## 2.5 Présentation du logiciel de simulation «ANSYS Fluent»

ANSYS FLUENT est un logiciel de simulation CFD qui permet de modéliser l’écoulement du fluide, le transfert de chaleur, et les réactions chimiques dans des géométries complexes. Ce programme est écrit dans le langage C de programmation et permet d’utiliser pleinement la flexibilité et la puissance offerte par cette langue. ANSYS FLUENT utilise une architecture client- serveur, ce qui lui permet d’exécuter des processus simultanés distinctes sur plusieurs postes de travail client et serveurs de calcul puissants. Cette architecture est essentielle pour une exécution efficace, un contrôle interactif, et une flexibilité totale entre les différents types de machines ou de systèmes d’exploitation [23]



FIGURE 2.3 – ANSYS Fluent

### 2.5.1 Méthodes de résolution des équations régissantes

Plusieurs méthodes numériques sont disponibles pour la résolution de ces équations. On peut distinguer les méthodes suivantes :

- Méthodes des différences finies (MDF).

- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des volumes finis (MVF).

## 2.5.2 Hypothèses et simplifications du cas

Nous admettons ici les hypothèses suivantes :

- Sans source de chaleur.
- En considère que l'écoulement est bidimensionnel (x,y).
- En considère que le transfert de chaleur et de masse est transitoire.
- En considère que le régime est turbulent K-epsilon (2qn).
- Sans source de chaleur.

## 2.5.3 Équations générales de l'outil Fluent (ANSYS) (Équations gouvernantes du problème étudié)

La modélisation mathématique d'un écoulement de fluide ; est fondée sur les lois de la conservation de masse, de la quantité de mouvement et d'énergie. Dans les coordonnées 3D cartésiennes et dans un écoulement incompressible et stationnaire ; les équations de transfert de la chaleur et de la masse sont données comme suit :

**Équation de continuité :**

**Forme intégrale :**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho dv + \int_s \rho(\vec{q} \cdot \vec{n}) ds = 0 \quad (2.1)$$

**Forme différentielle :**

$$u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.2)$$

**Équations de quantité de mouvement : Forme intégrale :**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho dv + \int_s \rho(\vec{q} \cdot \vec{n}) ds = - \int_s P \vec{n} ds + \int_v \rho \vec{f} dv \quad (2.3)$$

**Forme différentielle :**

$\vec{o}x :$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x \quad (2.4)$$

$\vec{o}y :$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_y \quad (2.5)$$

### Équation d'énergie :

S'écrit comme suit :

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T + \Phi_s \quad (2.6)$$

Donc :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \nabla^2 T + \Phi_s \quad (2.7)$$

$$\text{Avec : } \alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

## 2.5.4 Les conditions initiales et les conditions aux limites

### Les conditions initiales

— Température de sol.

$$T_s = cst = 295K$$

— Température de entrée de l'eau.

$$T_e = cst = 313K$$

— Pression de l'entrée est 1 bar.

$$P_e = cst = 1bar$$

### Les conditions aux limites

— Les conditions au sol sont variables par rapport au temps

Temps (h)	Température ambiante (K)
09 :00	24,2
10 :00	30,2
11 :00	35,5
12 :00	41
13 :00	42
14 :00	41,2
15 :00	38
16 :00	37,3
17 :00	31,3

TABLE 2.1 – Température ambiante en fonction du temps.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les paramètres de dimensionnement des échangeurs géothermales eau / sol, Nous avons également faire une présentation sur le CFD et logiciel ANSYS,

# Chapitre 3

## Résultats et discussion

### 3.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, on va exposer, présenter et discuter les résultats issus de la simulation de notre problème via ANSYS 17.1 Fluent. A travers une recherche bibliographique approfondie et une modélisation de notre échangeur géothermale eau/sol, nous avons pu mettre en évidence les choix et l'étude des effets des paramètres thermo-hydrauliques, nature des matériaux de construction, les données géologiques et celle du temps de fonctionnements.

Les paramètres thermo-hydrauliques se traduisent par le choix de quatre différents débits (0,05 kg/s, 0,1 kg/s, 0,5kg/s, 1 kg/s) qui représentent la plage de fonctionnement de notre échangeur géothermal dans la plupart de ces applications. Deux types de matériaux (PVC, PE-HD), les plus courants, choisis pour la construction des tubes de notre échangeur. Trois nature du sol (argile, sable humide, Limon argilo-sableux) qui existent dans la région.

### 3.2 Les cas étudiés

Temps (h)	Débits (Kg/s)	Type de sol	Matériaux
Pendant 8h de fonctionnement	0.05	Argile	PVC
			PE-HD
		Sable humide	PVC
			PE-HD
		Limon argilo-sableau	PVC
			PE-HD
	0.1	Argile	PVC
			PE-HD
		Sable humide	PVC
			PE-HD
		Limon argilo-sableau	PVC
			PE-HD
	0.5	Argile	PVC
			PE-HD
		Sable humide	PVC
			PE-HD
		Limon argilo-sableau	PVC
			PE-HD
	1	Argile	PVC
			PE-HD
Sable humide		PVC	
		PE-HD	
Limon argilo-sableau		PVC	
		PE-HD	

TABLE 3.1 – Les cas étudiés



Nature des matériaux	Conductivité thermique	Chaleur Spécifique	Masse volumique
PVC	0,16	900	1380
PE-HD	0,52	2100	980

TABLE 3.2 – Propriétés des matériaux des tubes

Nature des matériaux	Conductivité thermique	Chaleur Spécifique	Masse volumique
Argile	1,25	880	1450
Sable humide	0,58	1000	1750
Limon argilo-sableux	1,5	1340	1800

TABLE 3.3 – Propriétés thermo-physiques des différentes nature du sol.

### 3.3 Résultats et discussion

#### 3.3.1 Effet du débit

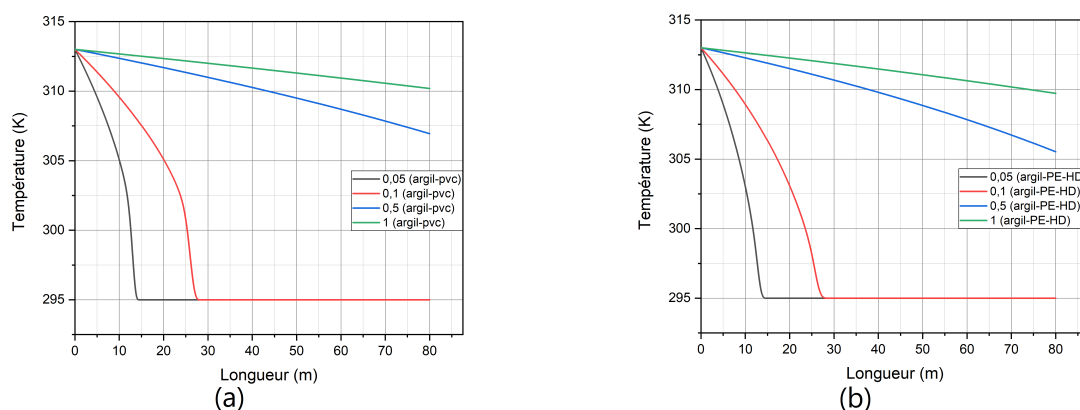


FIGURE 3.1 – Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un type de sol argile et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits.

Cette figure 3.1 représente distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un type de sol argile et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits. (0,05 Kg/s, 0,1 Kg/s, 0,5 Kg/s, 1 Kg/s). En remarque que :

**Pour un débit de 0,05 Kg/s,**

- (a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 15 m de l'entrée de l'échangeur.

- (b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 15 m de l'entrée de l'échangeur

**Pour un débit de 0,1 Kg/s,**

- (a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 28 m de l'entrée de l'échangeur.
- (b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 28 m de l'entrée de l'échangeur.

**Pour un débit de 0,5 Kg/s,**

- (a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 307 K soit une différence de 6°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.
- (b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 306 K soit une différence de 7°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.

**Pour un débit de 1 Kg/s,**

- (a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 310 K soit une différence de 3°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.
- (b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 309,7 K soit une différence de 3,3°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.

Nature du sol	Matériaux	Débits	$T_e(K)$	$T_s(K)$	DT	Longueur (m)
Argile	PVC	0,05	313	295	18	15
		0,1	313	295	18	28
		0,5	313	307	6	80
		1	313	310	3	80
	PE-HD	0,05	313	295	18	15
		0,1	313	295	18	28
		0,5	313	306	7	80
		1	313	309,7	3,3	80

TABLE 3.4 – Température de sortie en fonction de la longueur pour un type de sol argile et un tube en PVC avec les 4 débits.

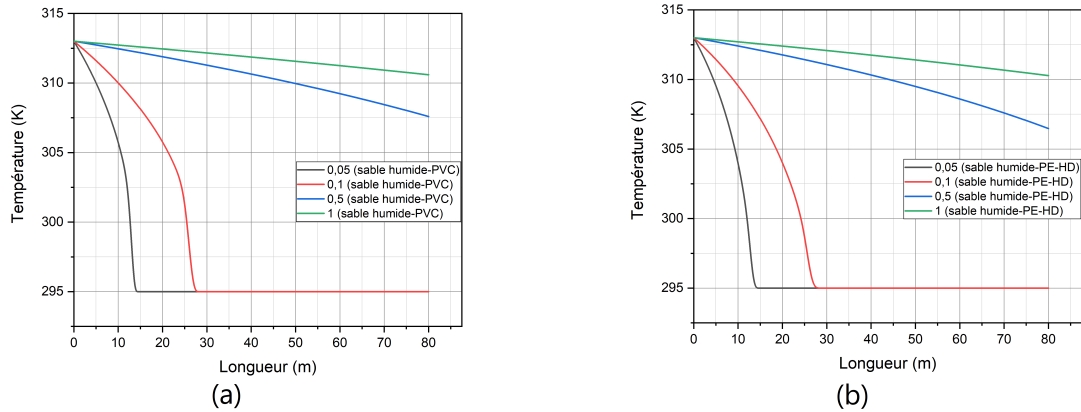


FIGURE 3.2 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un type de sol sable humide et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits.

Cette figure 3.2 représente distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un type de sol sable humide et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits. (0,05 Kg/s, 0,1 Kg/s, 0,5 Kg/s, 1 Kg/s). En remarque que :

**Pour un débit de 0,05 Kg/s,**

- a) La température de l’eau à la sortie de l’échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 15 m de l’entrée de l’échangeur.
- b) La température de l’eau à la sortie de l’échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 15 m de l’entrée de l’échangeur.

**Pour un débit de 0,1 Kg/s,**

- a) La température de l’eau à la sortie de l’échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 28 m de l’entrée de l’échangeur.
- b) La température de l’eau à la sortie de l’échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 28 m de l’entrée de l’échangeur.

**Pour un débit de 0,5 Kg/s,**

- a) La température de l’eau à la sortie de l’échangeur atteint 307,5 K soit une différence de 5,5°C est cela à 80 m de l’entrée de l’échangeur.
- b) La température de l’eau à la sortie de l’échangeur atteint 306 K soit une différence de 7°C est cela à 80 m de l’entrée de l’échangeur.

**Pour un débit de 1 Kg/s,**

- a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 311 K soit une différence de 2°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 310,5 K soit une différence de 2,5°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.

Nature du sol	Matériaux	Débits	$T_e(K)$	$T_s(K)$	DT	Longueur (m)
Sable humide	PVC	0,05	313	295	18	15
		0,1	313	295	18	28
		0,5	313	307,5	5,5	80
		1	313	311	2	80
	PE-HD	0,05	313	295	18	15
		0,1	313	295	18	28
		0,5	313	306	7	80
		1	313	310,5	2,5	80

TABLE 3.5 – Température de sortie en fonction de la longueur pour un type de sol sable humide et un tube en PVC avec les 4 débits.

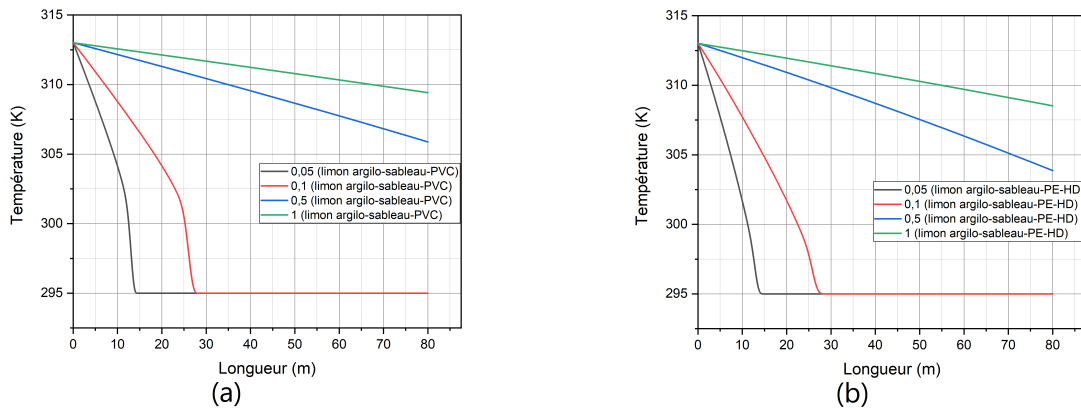


FIGURE 3.3 – Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un type de sol limon argilo-sableux et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits.

Cette figure 3.3 représente distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un type de sol limon argilo-sableux et un tube ((a). en PVC, (b). en PE-HD) avec les 4 débits. (0,05 Kg/s, 0,1 Kg/s, 0,5 Kg/s, 1 Kg/s). En remarque que :

**Pour un débit de 0,05 Kg/s,**

- a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 15 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 15 m de l'entrée de l'échangeur.

**Pour un débit de 0,1 Kg/s,**

- a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 28 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 295 K soit une différence de 18°C est cela à 28 m de l'entrée de l'échangeur.

**Pour un débit de 0,5 Kg/s,**

- a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 305, K soit une différence de 7,3°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 303,5 K soit une différence de 9,5°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.

**Pour un débit de 1 Kg/s,**

- a) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 309 K soit une différence de 4°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) La température de l'eau à la sortie de l'échangeur atteint 308 K soit une différence de 5°C est cela à 80 m de l'entrée de l'échangeur.

Nature du sol	Matériaux	Débits	$T_e(K)$	$T_s(K)$	DT	Longueur (m)
limon argilo-sableux	PVC	0,05	313	295	18	15
		0,1	313	295	18	28
		0,5	313	305,7	7,3	80
		1	313	309	4	80
	PE-HD	0,05	313	295	18	15
		0,1	313	295	18	28
		0,5	313	303,5	9,5	80
		1	313	308	5	80

TABLE 3.6 – Température de sortie en fonction de la longueur pour un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PVC avec les 4 débits.

## Effet du débit

Dans cette section, nous allons voir l'un des paramètres les plus influents sur l'écoulement du fluide et celui de la chaleur. Quatre débits d'écoulement d'eau (0,05 Kg/s, 0,1 Kg/s, 0,5 Kg/s et 1 Kg/s) sont considérés pour l'analyse de l'effet du mode de fonctionnement continu sur la performance thermique. Après, l'observation des figures de 3.1 à 3.3 on remarque que l'effet du changement du débit influe directement sur le taux de transfert de chaleur.

L'augmentation du débit implique la hausse de la vitesse d'écoulement de l'eau et par conséquent, une réduction du temps de séjour de l'eau à l'intérieur du tube. D'une part, cet abaissement du temps de maintien implique directement une diminution dans l'écart de température (entre celle de la sortie et de l'entrée de l'échangeur), d'autre part, il engendre une extension dans la longueur du tube pour pouvoir atteindre la température de l'eau minimale (c.-à-d. la température du sol). Autrement dit, le fluide n'aura pas suffisamment de temps pour échanger sa chaleur avec le sol.

### 3.3.2 Effet de la conductivité thermique du sol

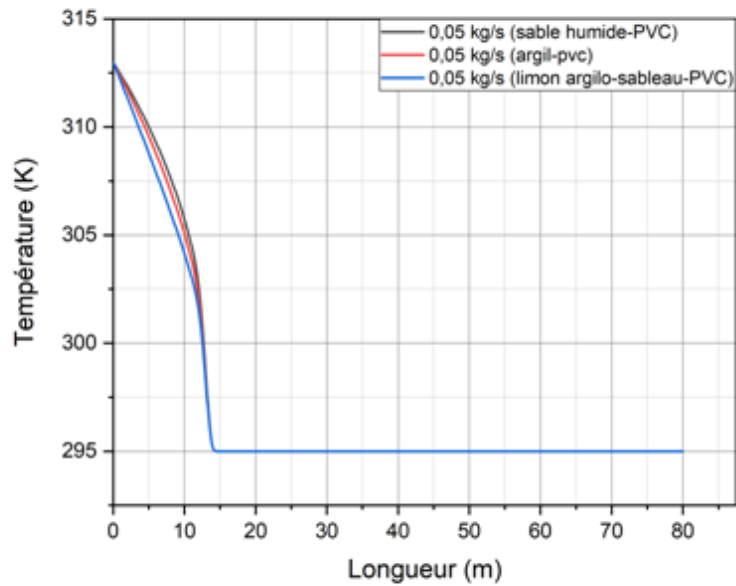


FIGURE 3.4 – Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PVC avec un débit 0,05Kg/s.

Cette figure 3.4 représente la distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,05 Kg/s et un tube en PVC pour 3 types de sol différents (Argile, Sable humide et limon argilo-sableux). En remarque que pour les 3 types de sol la température de l'eau à la sortie atteint 295 K à 15 m de l'entrée de l'eau.

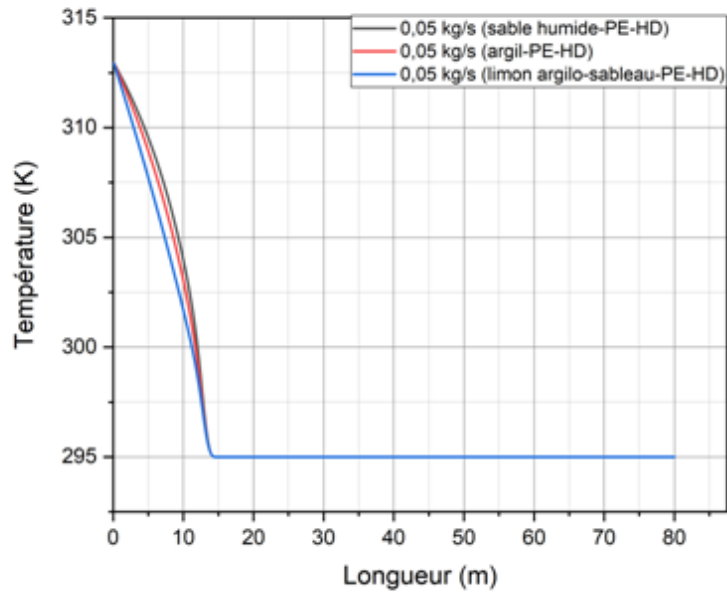


FIGURE 3.5 – Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PE-HD avec un débit 0,05Kg/s.

Cette figure 3.5 représente la distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,05 Kg/s et un tube en PE-HD pour 3 types de sol différents (Argile, Sable humide et limon argilo-sableux). En remarque que pour les 3 types de sol la température de l'eau à la sortie atteindrent 295 K à 15 m de l'entrée de l'eau.



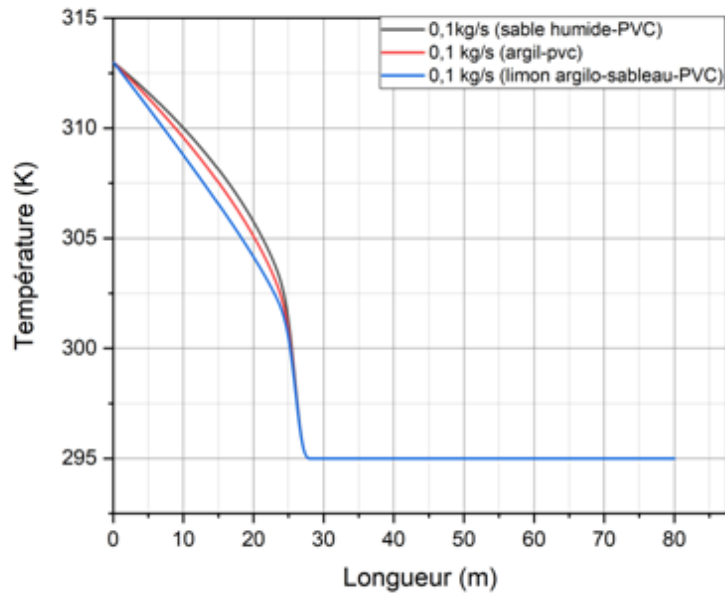


FIGURE 3.6 – Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PVC avec un débit 0,1Kg/s.

Cette figure 3.6 représente la distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,1 Kg/s et un tube en PVC pour 3 types de sol différents (Argile, Sable humide et limon argilo-sableux). En remarque que pour les 3 types de sol la température de l'eau à la sortie atteind 295 K à 28 m de l'entrée de l'eau.

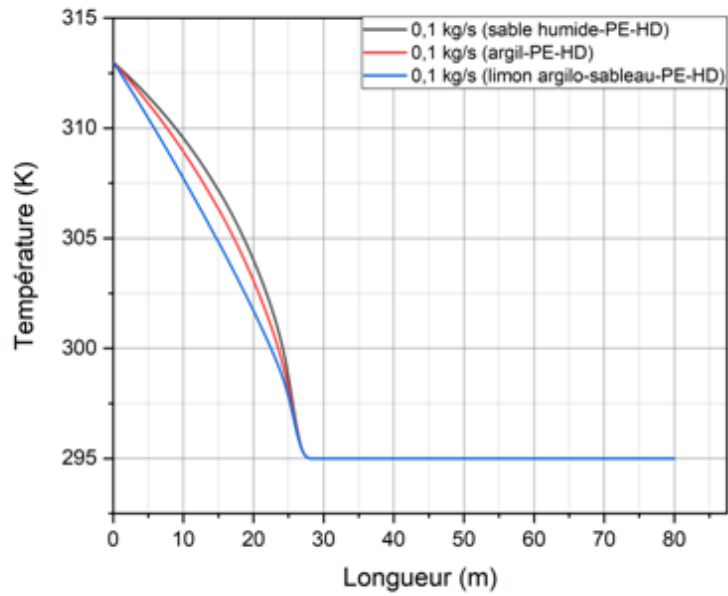


FIGURE 3.7 – Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PE-HD avec un débit 0,1Kg/s.

Cette figure 3.7 représente la distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,1 Kg/s et un tube en PE-HD pour 3 types de sol différents (Argile, Sable humide et limon argilo-sableau). En remarque que pour les 3 types de sol la température de l'eau à la sortie atteind 295 K à 28 m de l'entrée de l'eau.

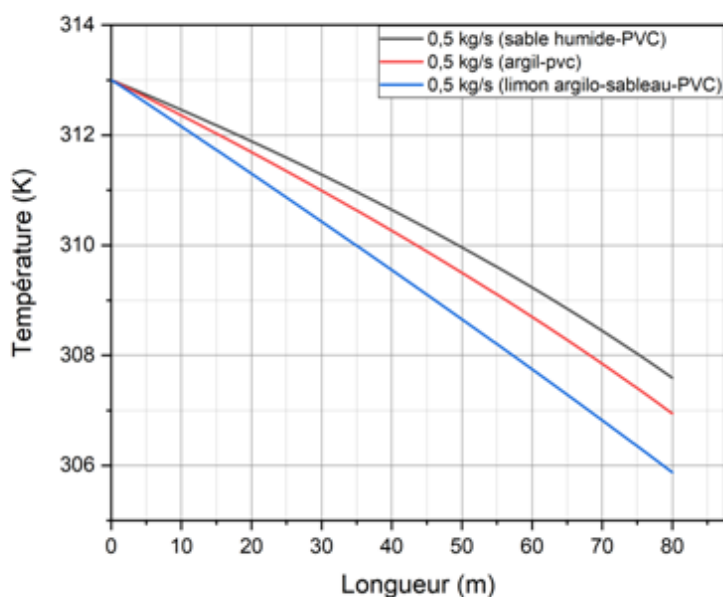


FIGURE 3.8 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableux) et un tube en PVC avec un débit 0,5Kg/s.

Cette figure 3.6 représente la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,5 Kg/s et un tube en PVC pour 3 types de sol différents (Argile, Sable humide et limon argilo-sableau). En remarque que :

- Pour limon argilo-sableau, la température de l’eau à la sortie atteindre 306 K à la sortie.
- Pour l’argile, la température de l’eau à la sortie atteindre 307 K à la sortie.
- Pour sable humide, la température de l’eau à la sortie atteindre 307,8 K à la sortie.

Débits (Kg/s)	matériau	Nature du sol	$T_e(K)$	Longueur (m)
0,5	PVC	Limon argilo-sableux	306	80
		Argile	307	80
		Sable humide	307,8	80

TABLE 3.7 – Température de sortie en fonction de la longueur pour les 3 types de sol et un tube en PVC avec un débit 0,5Kg/s

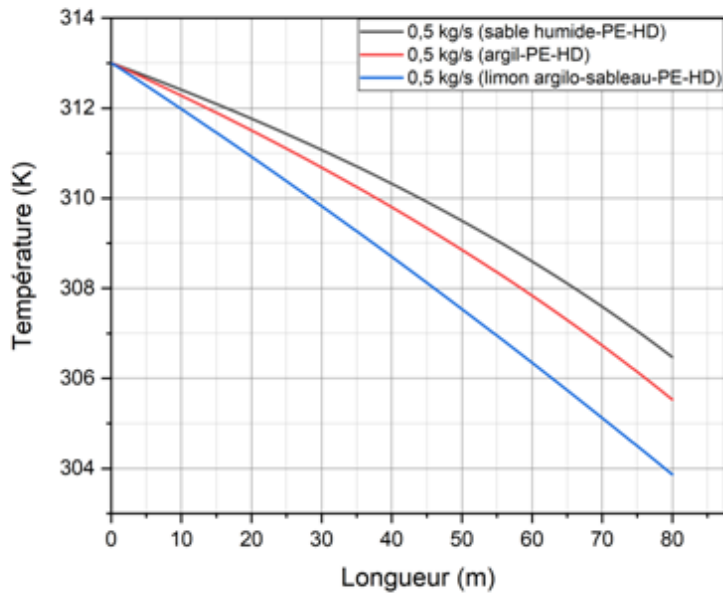


FIGURE 3.9 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableau) et un tube en PE-HD avec un débit 0,5Kg/s.

Cette figure 3.9 représente la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,5 Kg/s et un tube en PE-HD pour 3 types de sol différents (Argile, Sable humide et limon argilo-sableau). En remarque que :

- Pour limon argilo-sableau, la température de l’eau à la sortie atteindre 304 K à la sortie.
- Pour l’argile, la température de l’eau à la sortie atteindre 305,5 K à la sortie.
- Pour sable humide, la température de l’eau à la sortie atteindre 306,3 K à la sortie.

Débits (Kg/s)	matériau	Nature du sol	$T_e(K)$	Longueur (m)
0,5	PE-HD	Limon argilo-sableux	304	80
		Argile	305,5	80
		Sable humide	306,3	80

TABLE 3.8 – Température de sortie en fonction de la longueur pour les 3 types de sol et un tube en PE-HD avec un débit 0,5Kg/s

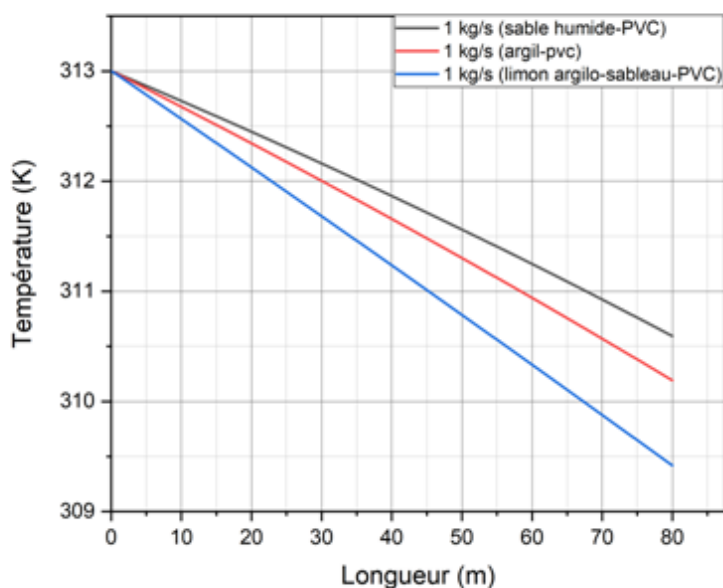


FIGURE 3.10 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableau) et un tube en PVC avec un débit 1Kg/s.

Cette figure 3.10 représente la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit de 1 Kg/s et un tube en PVC pour 3 types de sol différents (Argile, Sable humide et limon argilo-sableau). En remarque que :

- Pour limon argilo-sableau, la température de l’eau à la sortie atteindre 309,4 K à la sortie.
- Pour l’argile, la température de l’eau à la sortie atteindre 310,2 K à la sortie.
- Pour sable humide, la température de l’eau à la sortie atteindre 310,6 K à la sortie.

Débits (Kg/s)	matériau	Nature du sol	$T_e(K)$	Longueur (m)
1	PVC	Limon argilo-sableux	309,4	80
		Argile	310,2	80
		Sable humide	310,6	80

TABLE 3.9 – Température de sortie en fonction de la longueur pour les 3 types de sol et un tube en PE-HD avec un débit 1 Kg/s

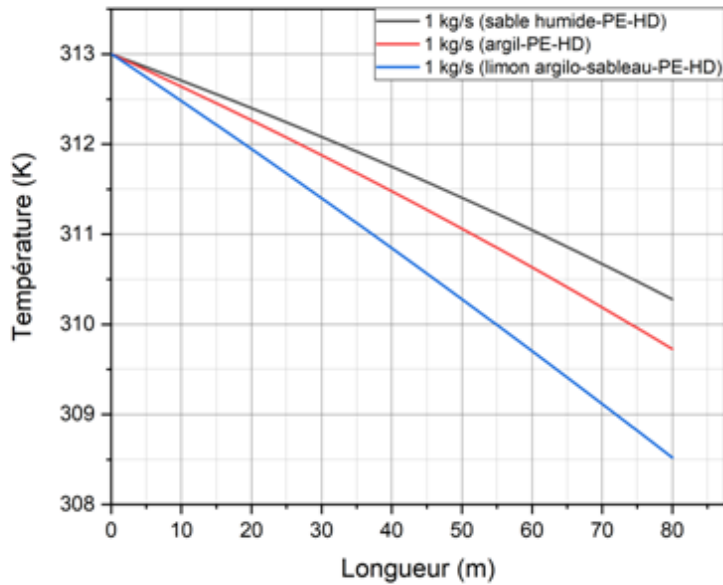


FIGURE 3.11 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour les 3 types de sol (sable humide, argile, limon argilo-sableau) et un tube en PE-HD avec un débit 1Kg/s.

Cette figure 3.11 représente la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit de 1 Kg/s et un tube en PE-HD pour 3 types de sol différents (Argile, Sable humide et limon argilo-sableau). En remarque que :

- Pour limon argilo-sableau, la température de l’eau à la sortie atteindre 308,5 K à la sortie.
- Pour l’argile, la température de l’eau à la sortie atteindre 309,8 K à la sortie.
- Pour sable humide, la température de l’eau à la sortie atteindre 310,3 K à la sortie.

Débits (Kg/s)	matériau	Nature du sol	$T_e(K)$	Longueur (m)
1	PE-HD	Limon argilo-sableux	308,5	80
		Argile	309,8	80
		Sable humide	310,3	80

TABLE 3.10 – Température de sortie en fonction de la longueur pour les 3 types de sol et un tube en PE-HD avec un débit 1 Kg/s

## **Effet de la conductivité thermique du sol**

Dans cette section, nous avons pu montrer l'influence de la conductivité thermique du sol sur le transfert de chaleur. Trois différentes conductivités thermiques du sol ont été étudiées à savoir ; sable humide, argile et limon argilo-sableux, respectivement,  $0,58 \text{ W/m.K}$ ,  $1,25 \text{ W/m.K}$  et  $1,5 \text{ W/m.K}$ . Ces trois types de sol sont considérés pour l'analyse de l'effet de la conductivité thermique du sol sur la performance thermique de l'échangeur.

Après observation des figures de 3.4 à 3.11, on constate un accroissement dans la température de l'eau à la sortie de l'échangeur pour des conductivités thermiques de  $0,58 \text{ W/m.K}$ ,  $1,25 \text{ W/m.K}$  et  $1,5 \text{ W/m.K}$  respectivement. Donc la performance thermique est fortement affectée par le sol ayant une faible conductivité thermique. Une forte conductivité thermique du sol facilite l'évacuation de la chaleur accumulée vers les couches du sol plus loin de l'échangeur.

### 3.3.3 Effet de la conductivité thermique du tube

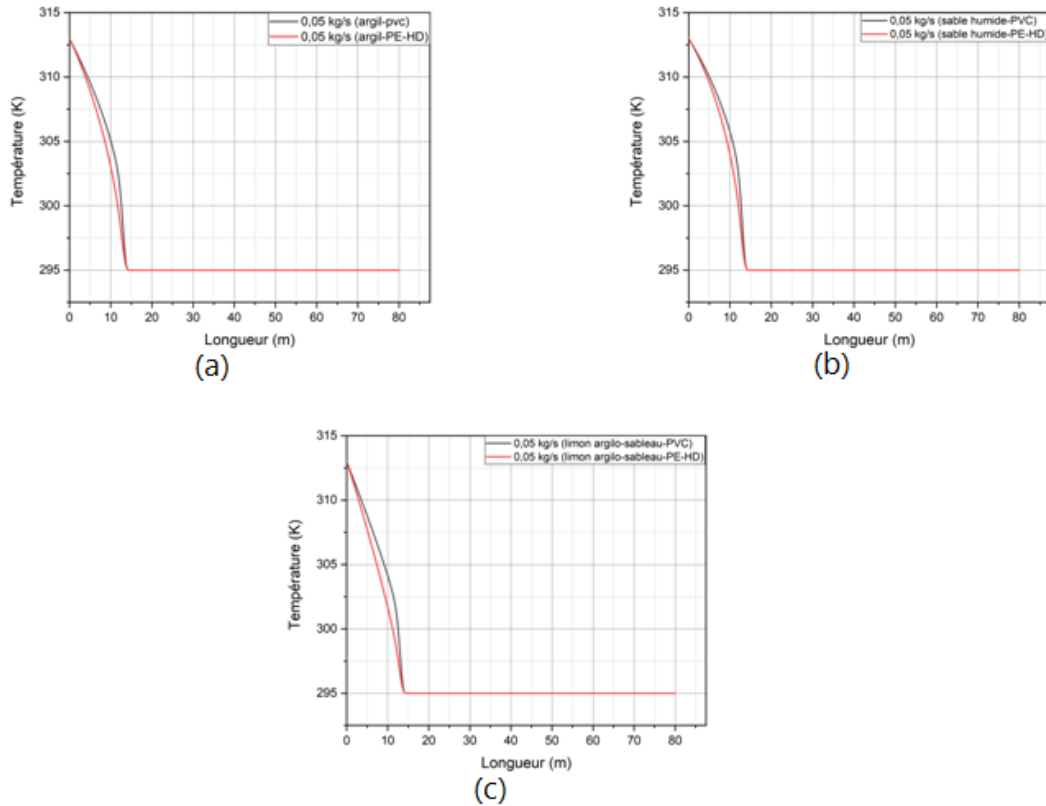


FIGURE 3.12 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit 0,05 Kg/s pour les 3 types de sol ((a) sable humide, (b) argile, (c) limon argilo-sableux) avec de type de matériaux (PVC et PE-HD).

Cette figure 3.12, représente la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,05 Kg/s, pour un type de sol argile, sable humide et limon argilo-sableux respectivement. Avec différents matériaux de construction des tubes (PVC et PE-HD). En remarque que la température de l’eau à la sortie de l’échangeur atteint 295 K à 15 m de son entrée dans tous les cas.



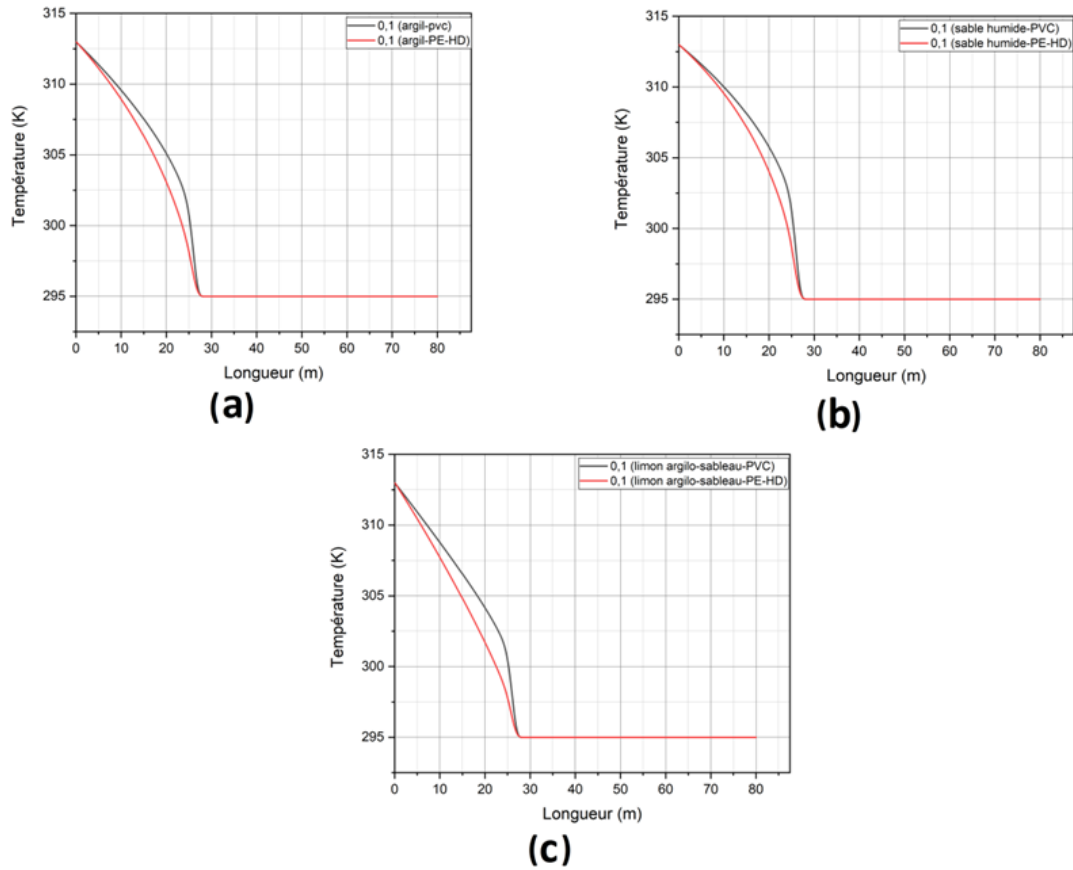


FIGURE 3.13 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit 0,1 Kg/s pour les 3 types de sol ((a) sable humide, (b) argile, (c) limon argilo-sableux) avec de type de matériaux (PVC et PE-HD).

Cette figure 3.13 représentent la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,1 Kg/s, pour un type de sol argile, sable humide et limon argilo-sableux respectivement. Avec différents matériaux de tube (PVC et PE-HD). En remarque que la température de l’eau à la sortie atteindre 295 K à 28 m dans tous les cas.

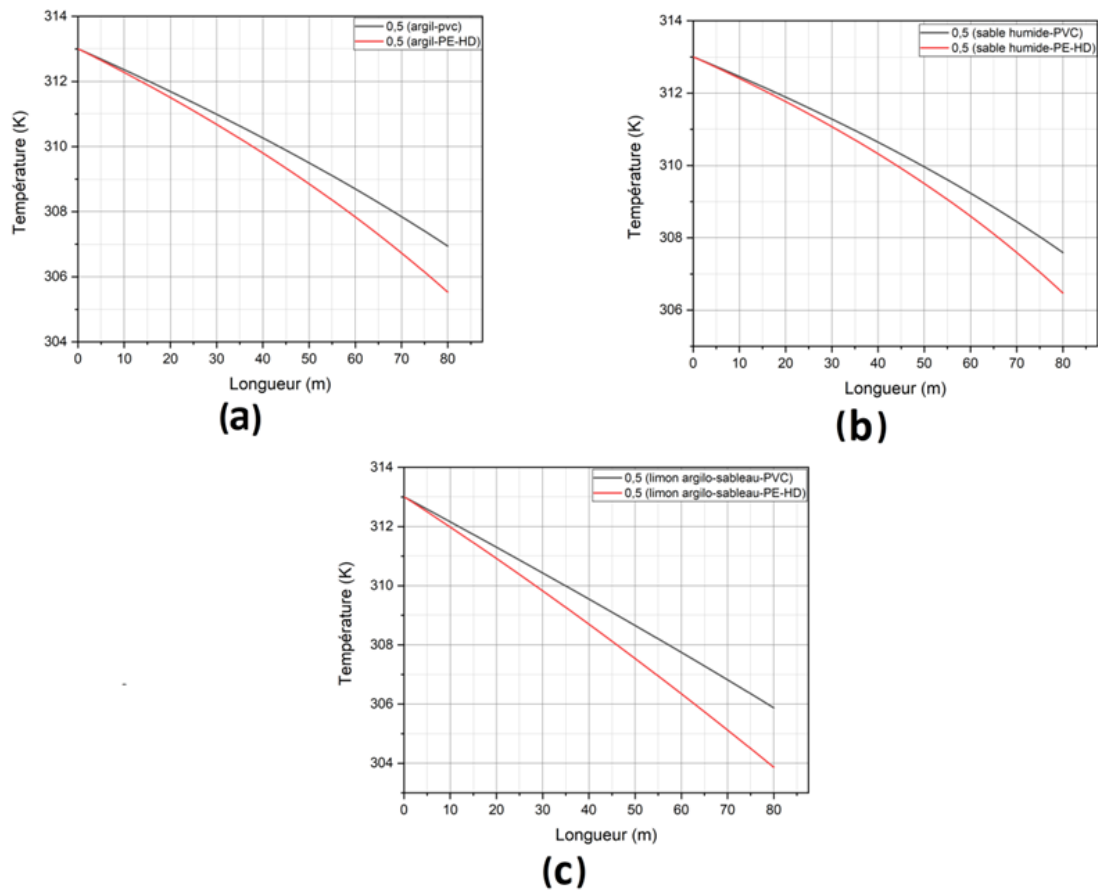


FIGURE 3.14 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit 0,5 Kg/s pour les 3 types de sol ((a) sable humide, (b) argile, (c) limon argilo-sableux) avec de type de matériaux (PVC et PE-HD).

Cette figure 3.14 représentent la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit de 0,5 Kg/s, pour un type de sol argile, sable humide et limon argilo-sableau respectivement. Avec différents matériaux de tube(PVC et PE-HD). En remarque que :

**Pour (a),**

- la température de l’eau à la sortie atteindre 307 K à la sortie pour le tube en PVC.
- la température de l’eau à la sortie atteindre 305,5 K à la sortie pour le tube en PE-HD.

**Pour (b),**

— la température de l'eau à la sortie atteindre 307,7 K à la sortie pour le tube en PVC.

— la température de l'eau à la sortie atteindre 306,5 K à la sortie pour le tube en PE-HD.

**Pour (c),**

— la température de l'eau à la sortie atteindre 306 K à la sortie pour le tube en PVC.

— la température de l'eau à la sortie atteindre 304 K à la sortie pour le tube en PE-HD.

Débit (Kg/s)	Nature du sol	matériaux	$T_e(K)$	$T_s(K)$	DT	Longueur (m)
0,5	Limon argilo-sableux	PVC	313	306	7	80
		PE-HD	313	304	9	80
	Argile	PVC	313	307	6	80
		PE-HD	313	305,5	7,5	80
	Sable humide	PVC	313	307,7	5,3	80
		PE-HD	313	306,5	6,5	80

TABLE 3.11 – Température de sortie en fonction de la longueur pour un débit de 0,5 Kg/s, pour les 3 types de sol , Avec différents matériaux de tube (PVC et PE-HD).

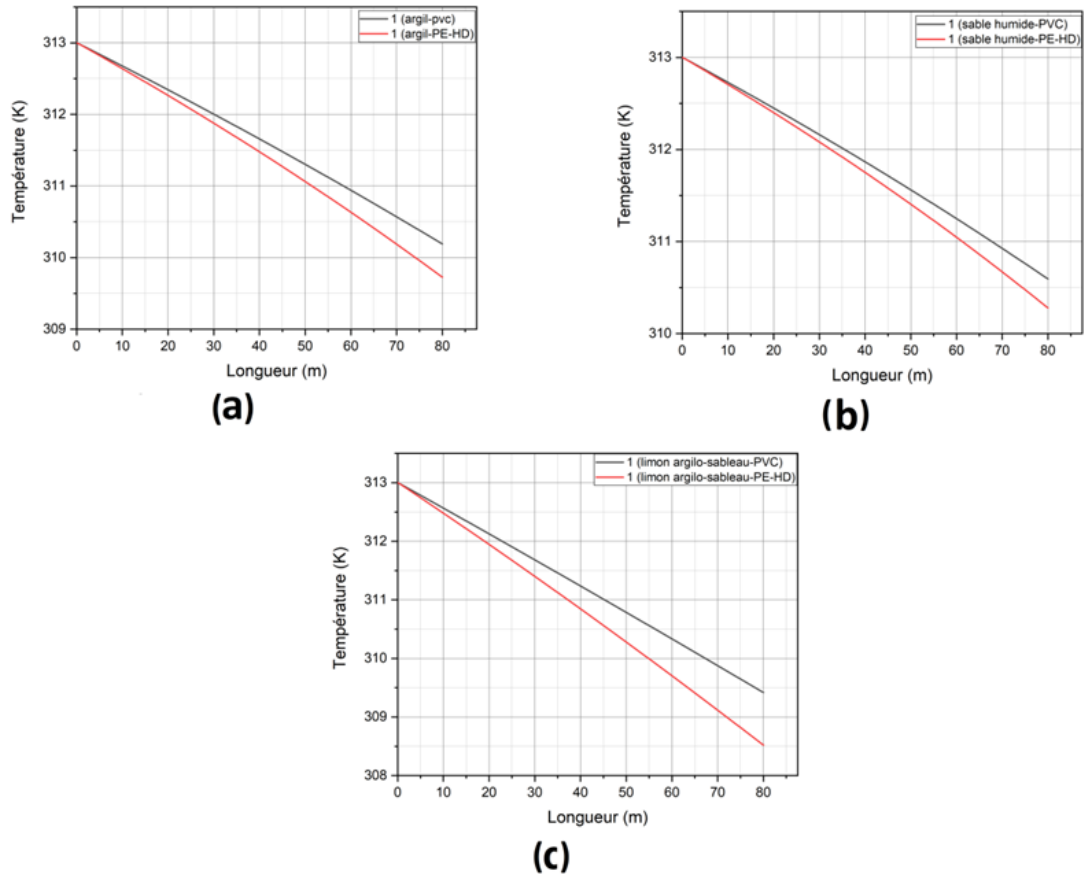


FIGURE 3.15 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit 1 Kg/s pour les 3 types de sol ((a) sable humide, (b) argile, (c) limon argilo-sableux) avec de type de matériaux (PVC et PE-HD).

Cette figure 3.15, représentent la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit de 1 Kg/s, pour un type de sol argile, sable humide et limon argilo-sableau respectivement. Avec différents matériaux de tube (PVC et PE-HD). En remarque que :

**Pour (a),**

- la température de l’eau à la sortie atteindre 310,3 K à la sortie pour le tube en PVC.
- la température de l’eau à la sortie atteindre 309,8 K à la sortie pour le tube en PE-HD.

**Pour (b),**

- la température de l’eau à la sortie atteindre 310,6 K à la sortie pour le tube

en PVC.

- la température de l'eau à la sortie atteindre 310,3 K à la sortie pour le tube en PE-HD.

**Pour (c),**

- la température de l'eau à la sortie atteindre 309,5 K à la sortie pour le tube en PVC.
- la température de l'eau à la sortie atteindre 308,5 K à la sortie pour le tube en PE-HD.

Débit (Kg/s)	Nature du sol	matériaux	$T_e(K)$	$T_s(K)$	DT	Longueur (m)
1	Limon argilo-sableux	PVC	313	309,5	3,5	80
		PE-HD	313	308,5	4,5	80
	Argile	PVC	313	310,3	2,7	80
		PE-HD	313	309,8	3,2	80
	Sable humide	PVC	313	310,6	2,4	80
		PE-HD	313	310,3	2,7	80

TABLE 3.12 – Température de sortie en fonction de la longueur pour un débit de 1 Kg/s, pour les 3 types de sol , Avec différents matériaux de tube (PVC et PE-HD).

## Effet de la conductivité thermique du tube

Dans cette section, nous pu déterminer l'effet de la conductivité thermique du tube sur l'évolution de la température de l'eau le long du tube pour différents débits et différents type de sol. On obtient des températures différentes à la sortie de l'échangeur pour des conductivités des tubes égale à 0.17 et 0.5 W/m.K pour le PVC et le PE-HD, respectivement.

Nous ne constatons aucun effet remarquable de la conductivité thermique du tube sur la température de l'eau à la sortie de l'échangeur représentés sur les figures de 3.12 à 3.15. La nature des matériaux de construction des tubes utilisés n'influe pas sur la performance thermique de l'échangeur. Par conséquent, un matériau moins coûteux et disponible sur le marché peut être utilisé pour la fabrication de l'échangeur.

### 3.3.4 Effet du temps

Sur la base des résultats enregistrés précédemment, en ce qui concerne l'effet de matériaux de construction des tubes de l'échangeur et celle de la nature du sol dont il est enterré, nous avons pu conclure que les meilleurs résultats sont ceux en PE-HD et le sol en Limon-argilo-sableux. Par conséquent dans cette section, nous allons tester l'effet du temps sur la température de l'eau à la sortie de l'échangeur seulement pour un échangeur en PE-HD et un sol en Limon-argilo-sableux.

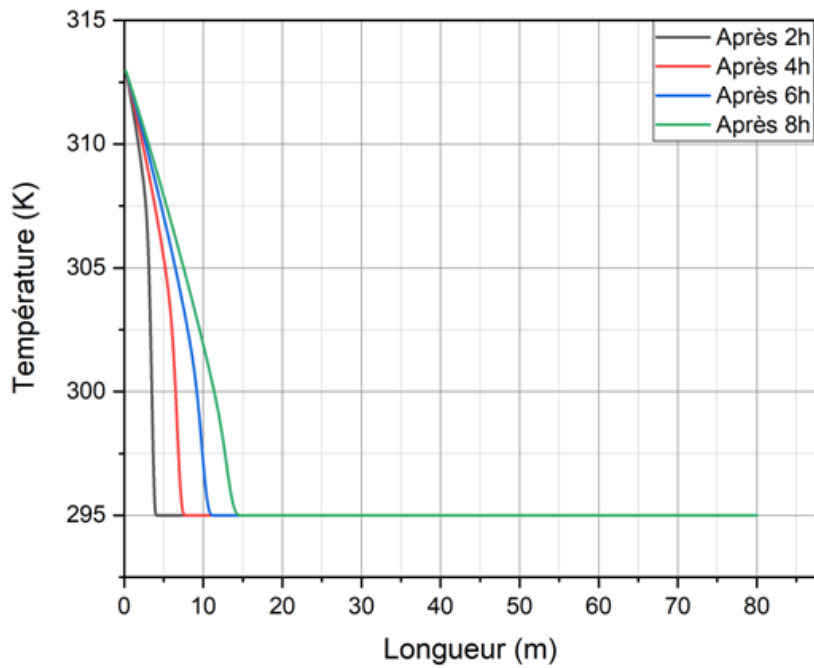


FIGURE 3.16 – Distribution de la température de l'eau en fonction de la longueur pour un débit 0,05Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement.

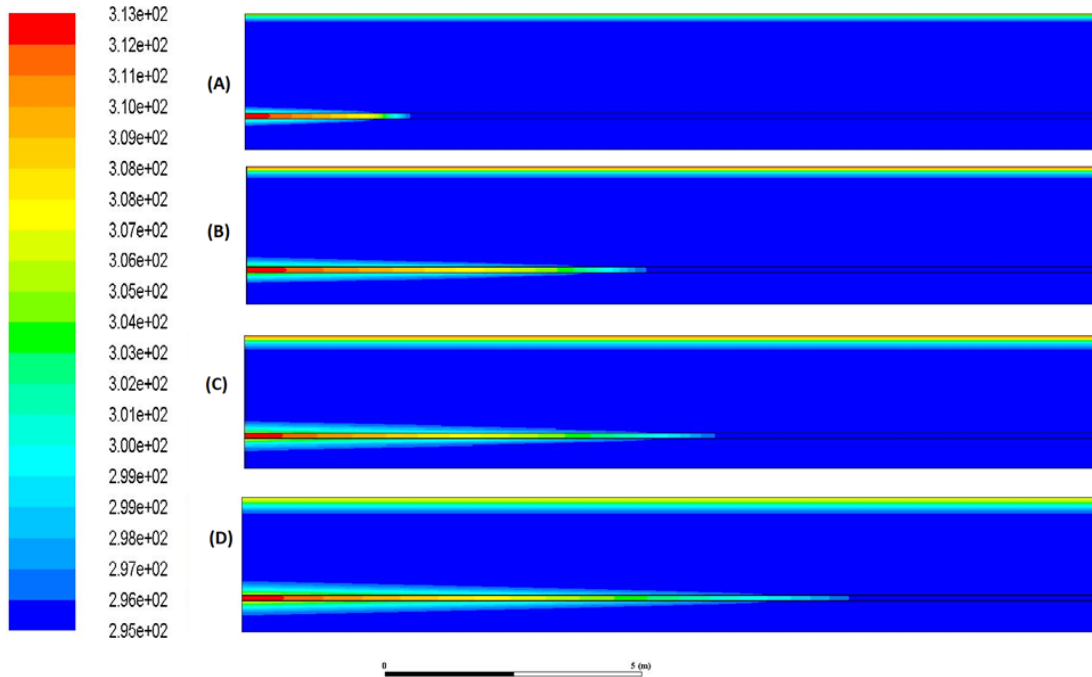


FIGURE 3.17 – Contours de température de l’eau pour un débit 0,05 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement ((a) 2h, (b) 4h, (c) 6h et (d) 8h).

Les figures 3.16 et 3.17 illustrent la distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit 0,05Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec des intervalles de temps de fonctionnement égal à 2, 4, 6 et 8h.

**En remarque que pour un débit de 0.05 kg/s,**

- Pour 2h de fonctionnement, la température de l’eau à la sortie de l’échangeur a atteint 295 K à 4 m de l’entrée de l’échangeur,
- Pour 4h de fonctionnement, la température de l’eau à la sortie de l’échangeur a atteint 295 K à 8 m de l’entrée de l’échangeur,
- Pour 6h de fonctionnement, la température de l’eau à la sortie de l’échangeur a atteint 295 K à 11 m de l’entrée de l’échangeur,
- Pour 8h de fonctionnement, la température de l’eau à la sortie de l’échangeur a atteint 295 K à 14,5 m de l’entrée de l’échangeur.

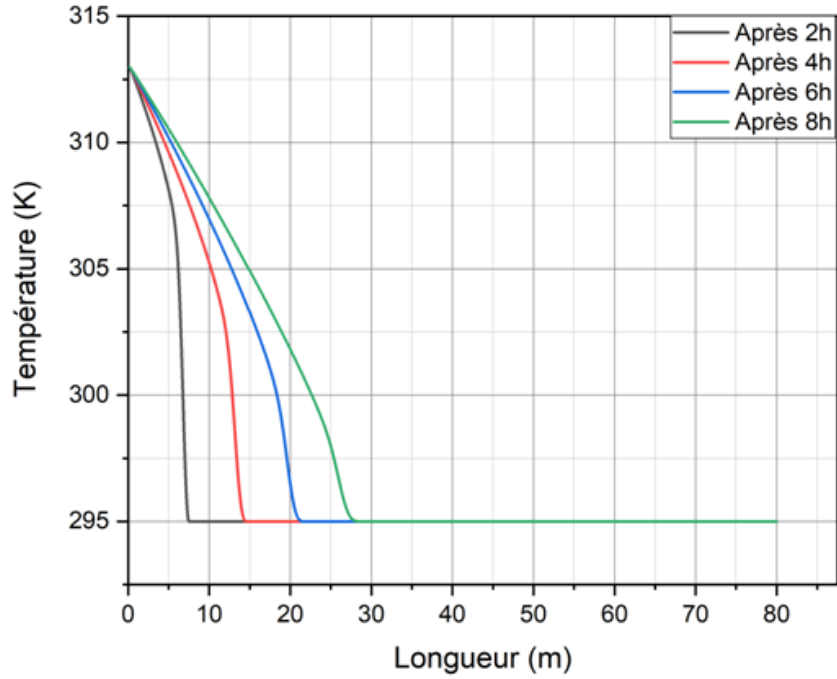


FIGURE 3.18 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit 0,1 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement.

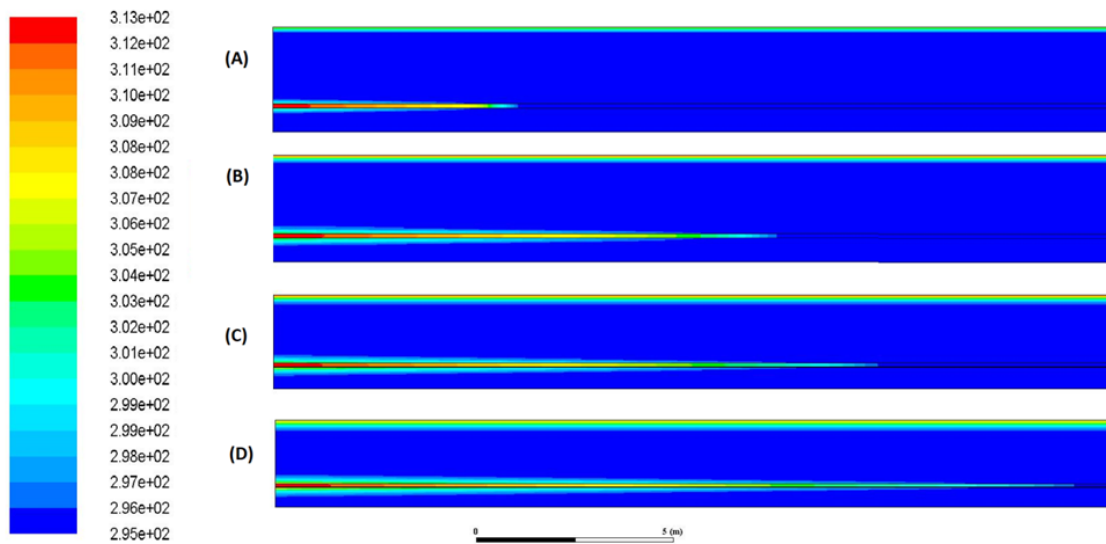


FIGURE 3.19 – Contours de température de l’eau pour un débit 0,1 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement ((a) 2h, (b) 4h, (c) 6h et (d) 8h).

**En remarque que pour un débit de 0.1 kg/s,**



- Pour 2h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 295 K à 8 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 4h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 295 K à 14,5 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 6h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 295 K à 21 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 8h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 295 K à 28 m de l'entrée de l'échangeur

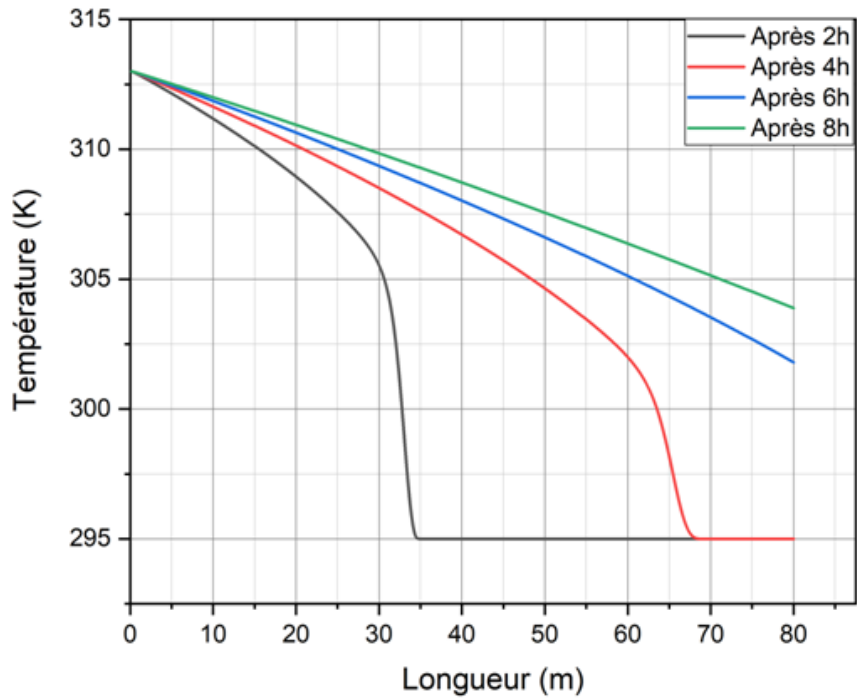


FIGURE 3.20 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement.

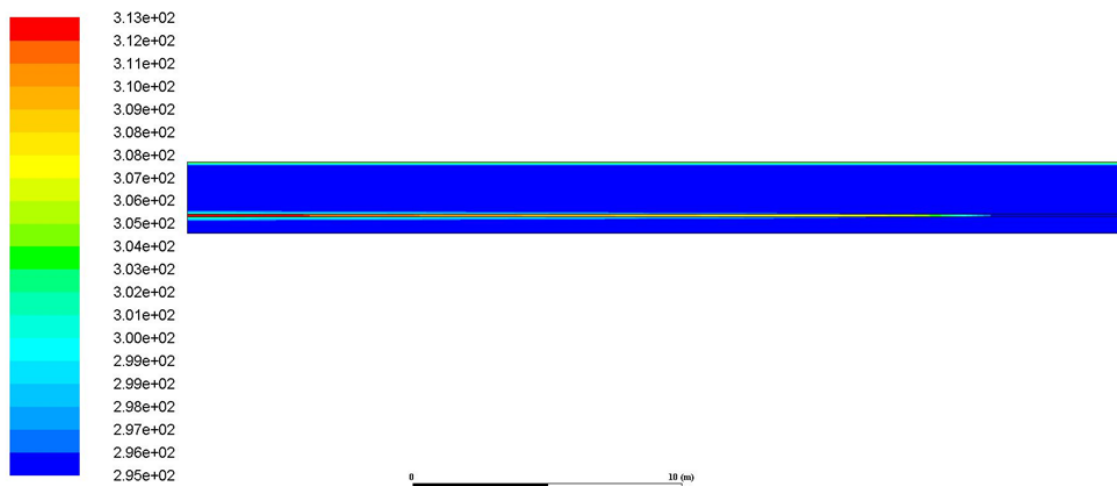


FIGURE 3.21 – Contours de température de l’eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 2h de fonctionnement.

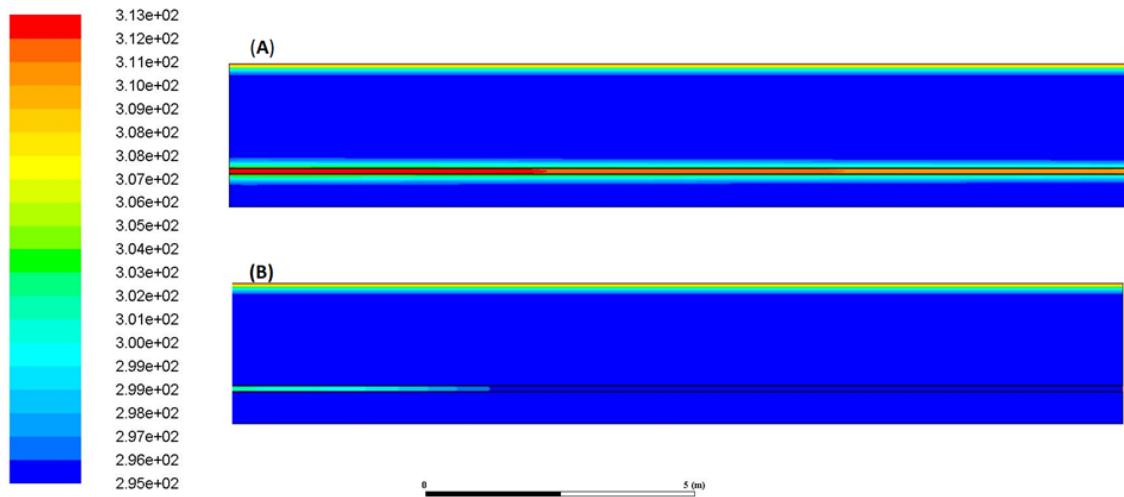


FIGURE 3.22 – Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 4h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur).

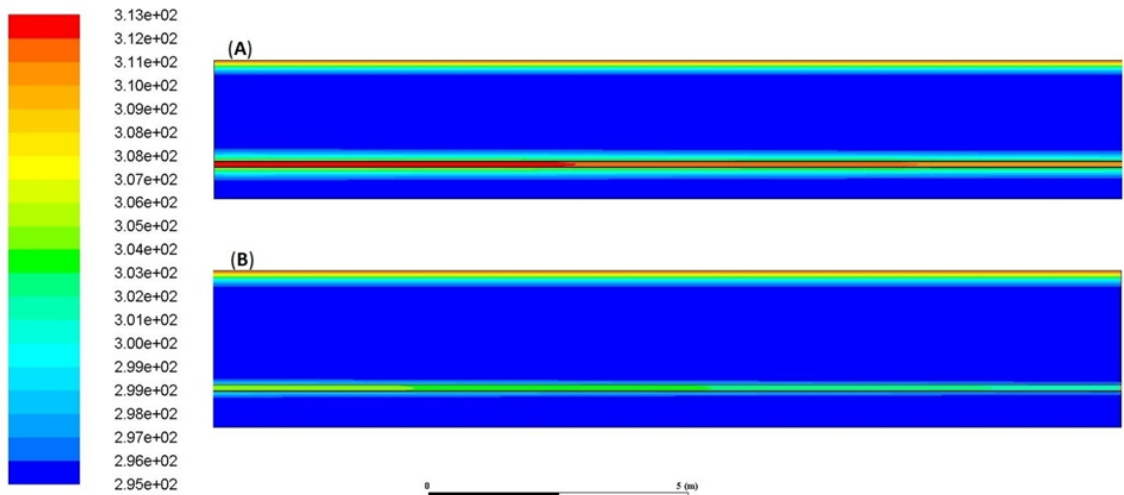


FIGURE 3.23 – Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 6h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur).

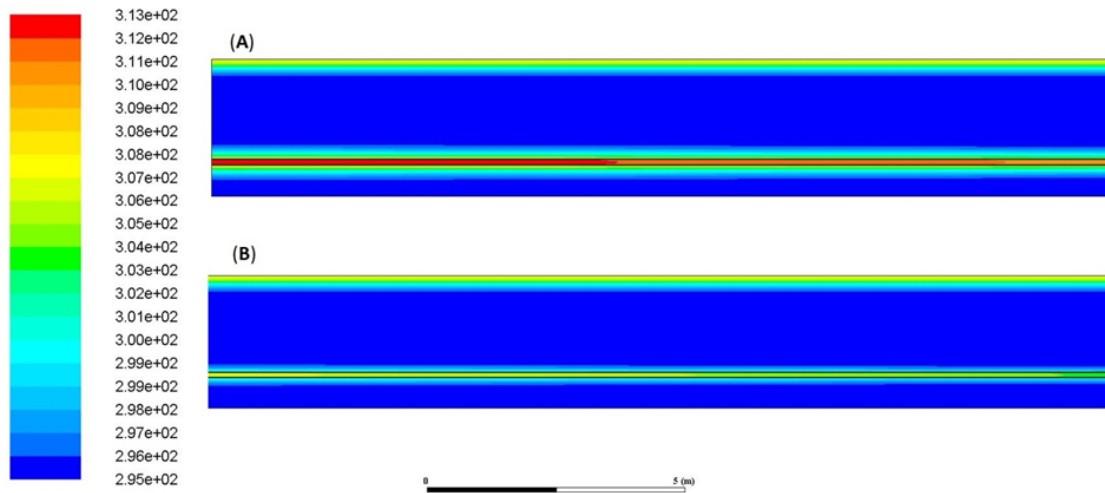


FIGURE 3.24 – Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 8h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur).

**En remarque que pour un débit de 0.1 kg/s,**

- Pour 2h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 295 K à 35 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 4h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 295 K à 69 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 6h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 302 K à 80 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 8h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 304 K à 80 m de l'entrée de l'échangeur.

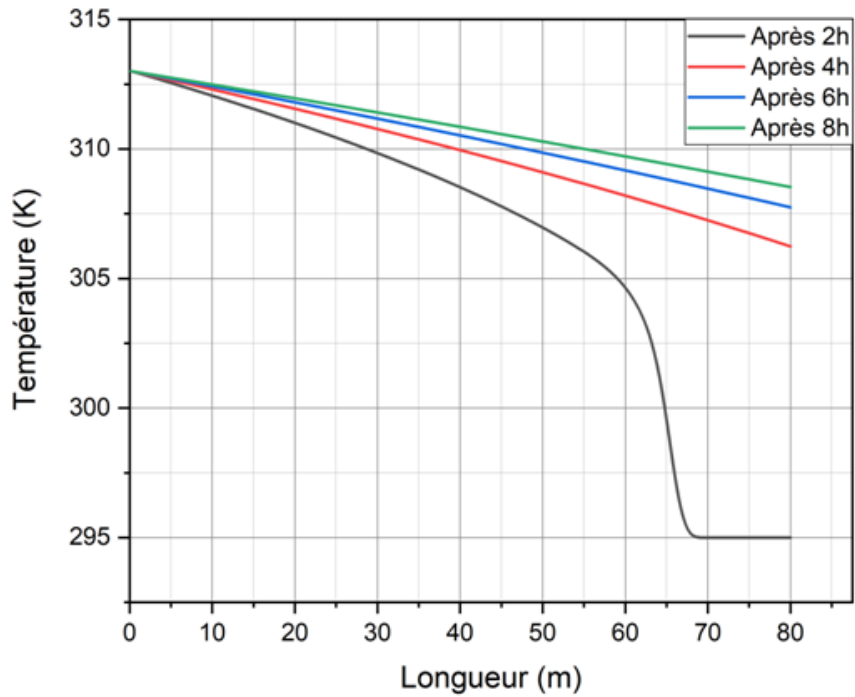


FIGURE 3.25 – Distribution de la température de l’eau en fonction de la longueur pour un débit 1Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD avec différents intervalle de temps de fonctionnement.

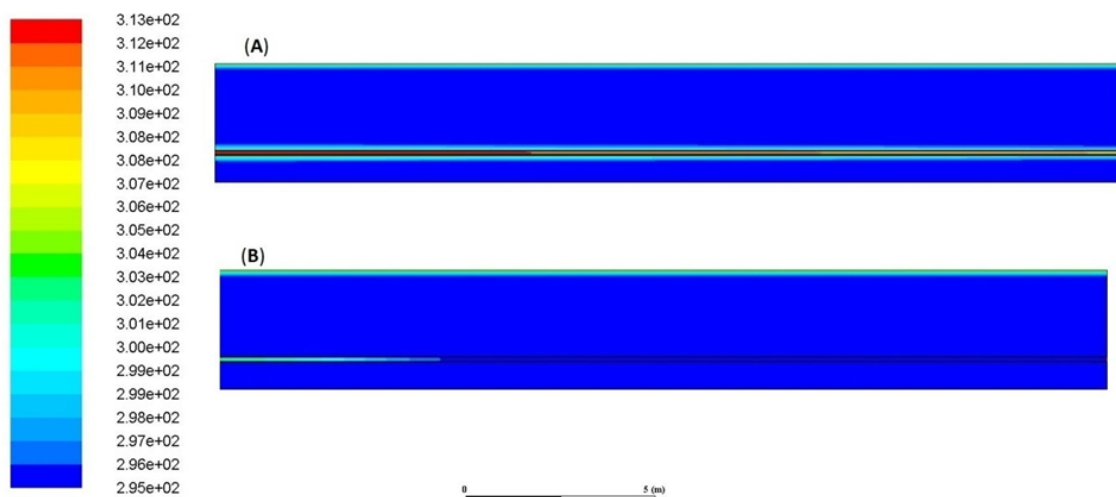


FIGURE 3.26 – Contours de température de l’eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 2h de fonctionnement ((a) l’entrée de l’échangeur, (b) la sortie de l’échangeur).

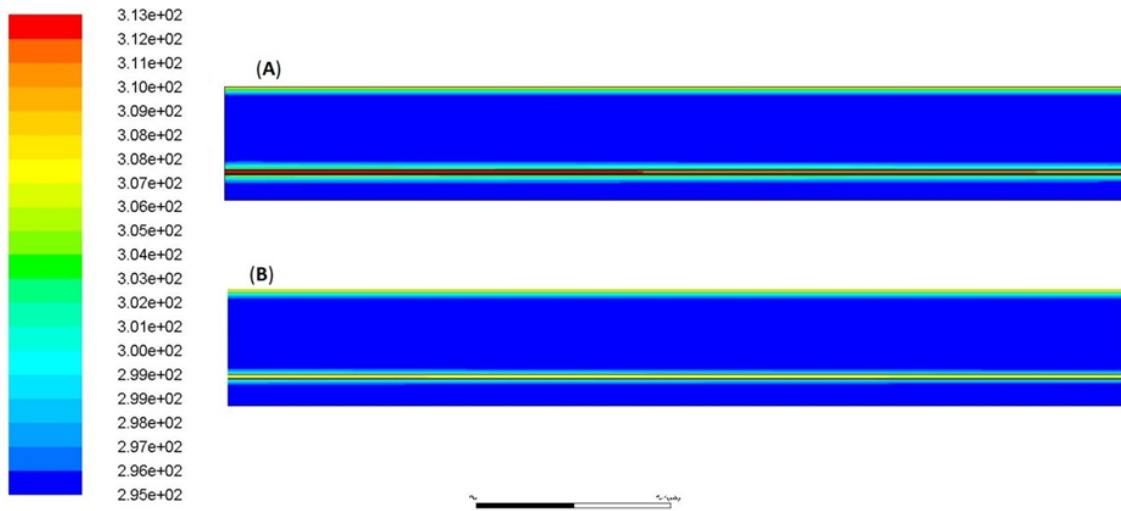


FIGURE 3.27 – Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 4h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur).

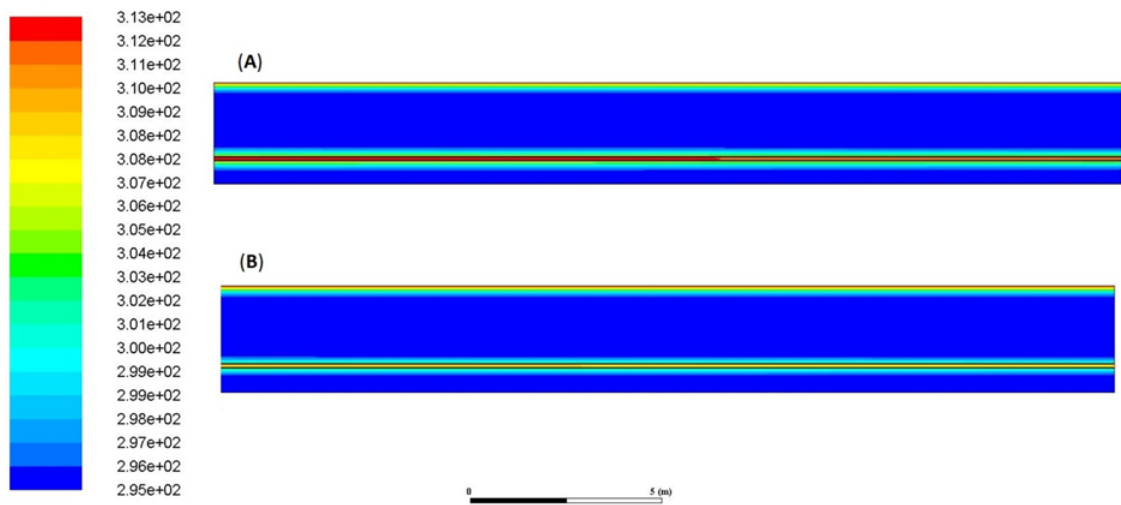


FIGURE 3.28 – Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 6h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur).

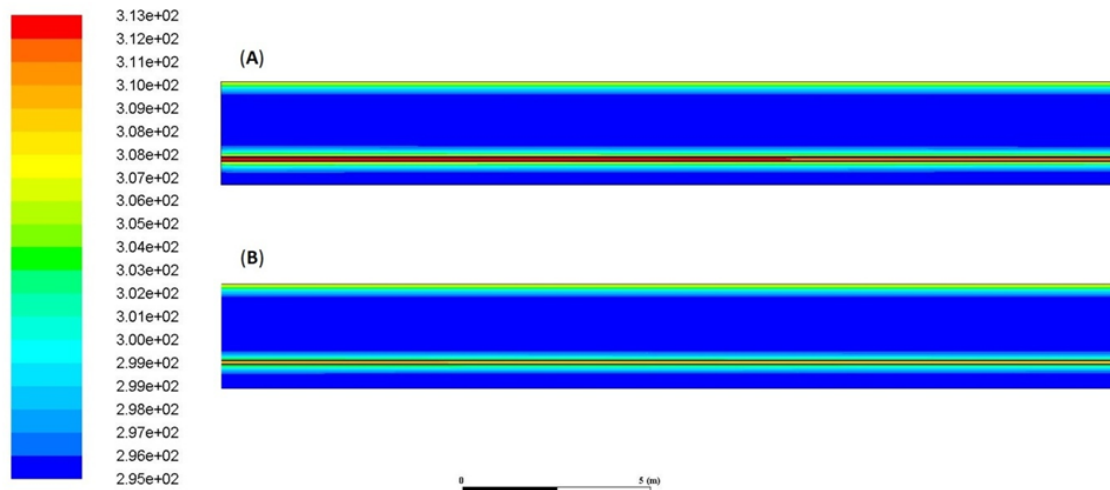


FIGURE 3.29 – Contours de température de l'eau pour un débit 0,5 Kg/s et un type de sol limon argilo-sableux et un tube en PE-HD après 8h de fonctionnement ((a) l'entrée de l'échangeur, (b) la sortie de l'échangeur).

**En remarque que pour un débit de 1 kg/s,**

- Pour 2h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 295 K à 69 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 4h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 306 K à 80 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 6h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 307,5 K à 80 m de l'entrée de l'échangeur,
- Pour 8h de fonctionnement, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur a atteint 308 K à 80 m de l'entrée de l'échangeur

**Effet du temps**

Dans cette section, nous pu déterminer l'effet du temps sur l'évolution de la température de l'eau le long de l'échangeur pour différents débits, un tube en PE-HD et un sol en Limon argilo-sableux. On obtient des températures différentes à la sortie de l'échangeur pour différentes d'heur de fonctionnement (2h, 4h, 6h et 8h).

Après observation des figures de 3.16 à 3.29, Nous constatons que la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente par l'augmentation des heurs de fonctionnement.

### 3.3.5 L'efficacité de l'échangeur

L'efficacité de l'échangeur est le rapport de l'écart de température de l'eau entre l'entrée et la sortie de l'échangeur sur l'écart de température du sol et celle de l'eau à l'entrée de l'échangeur.

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{sortie}} - T_{\text{entre}}}{T_{\text{sol}} - T_{\text{entre}}} \quad (3.1)$$



Débits (Kg/s)	Temps de fonctionnement	$T_{sol}(K)$	$T_e(K)$	$T_s(K)$	L'efficacité $\varepsilon$
0,05	2h	295	313	295	1
	4h			295	1
	6h			295	1
	8h			295	1
0,1	2h			295	1
	4h			295	1
	6h			295	1
	8h			295	1
0,5	2h			295	1
	4h			295	1
	6h			302	0,61
	8h			304	0,5
1	2h			295	1
	4h			306,5	0,36
	6h			307,5	0,305
	8h			308	0,277

TABLE 3.13 – L'efficacité de l'échangeur pour les 4 débits (0,05 Kg/s, 0,1 Kg/s, 0,5 Kg/s, 1 Kg/s), avec différents intervalle du temps de fonctionnement (2h, 4h, 6h et 8h).

En remarque que :

- pour les faibles débits inférieurs à 0,1 kg/s allant jusqu'à 8h de fonctionnement, pour le débit de 0.5 kg/s allant jusqu'à 4h de fonctionnement et pour le débit de 1 kg/s allant jusqu'à 2h de fonctionnement, l'efficacité enregistrée est de l'ordre de 1.

### 3.4 Comparaisons générales

Dans la partie discussions, nous avons exposé les résultats obtenus lors des calculs pour quatre variantes à savoir ; les débits d'écoulement (0,05 kg/s, 0,1 kg/s, 0,5kg/s, 1 kg/s), le matériau de construction des tubes (PVC et PE-HD), trois nature du

sol (argile, sable humide, Limon argilo-sableux) et différents intervalle de temps de fonctionnement.

A fin de déterminer la meilleure configuration de l'échangeur géothermle eau/sol satisfaisant la relation quantité d'eau / température de sortie en fonction des conditions de travail, nous avons établis une comparaison entre les différentes variantes étudiées :

#### 1. **Comparaison en fonction du débit :**

Pour les faibles débits ( $\geq 0,1$  kg/s), on obtient des résultats fiables et satisfaisantes pour toutes les configurations.

Au-delà de ( $\leq 0,5$  kg/s), on obtient des résultats fiables et satisfaisantes que dans le cas du fonctionnement de 2h.

#### 2. **Comparaison en fonction de la conductivité thermique du sol**

On remarquons que le sol limon argilo-sableux donne des résultats fiables et satisfaisantes par rapport au sol argile ensuite le sol sable humide, cela revient à leur propriétés thermo-physique qu'est la conductivité thermique (1,5, 1,25, 0,58 W/m.K) respectivement.

#### 3. **Comparaison en fonction de la conductivité thermique du tube**

On ne remarquons aucun effet remarquable de la conductivité thermique du tube sur la température de l'eau à la sortie du échangeur.

La nature des matériaux de construction des tubes utilisés n'influe pas sur la performance thermique des échangeurs géothermles eau/sol. Par conséquent, un matériau moins coûteux et disponible sur le marché peut être utilisé pour la fabrication des échangeurs.

#### 4. **Comparaison en fonction des nombres d'heur de fonctionnement :**

On remarquons que pour les faibles débits inférieurs à 0,1 kg/s allant jusqu'à 8h de fonctionnement, pour le débit de 0.5 kg/s allant jusqu'à 4h de fonctionnement et pour le débit de 1 kg/s allant jusqu'à 2h de fonctionnement

En s'appuyant sur les points de comparaisons cité ci-dessus, la configuration en tube PE-HD, dans un sol limon argilo-sableux, pour un débit 0,5 Kg/s avec un temps de fonctionnement de 4h, s'avère la mieux adapté pour satisfaire le compromis (quantité d'eau/température d'eau) destiné à l'irrigation agraire.

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une simulation numérique d'un système d'échanges de chaleur géothermale eau/sol. Il constitue une contribution dans le projet de recherche PRFU agréé le 01/01/2019, intitulé du projet : « Refroidissement des eaux d'irrigation des forêts du palmier-dattier par la géothermie dans la région ouest de la wilaya de Biskra ».

L'objectif principal fixé est le dimensionnement d'un échangeur de chaleur géothermale eau/sol pour le refroidissement des eaux d'irrigations des palmiers dattier qui répond aux exigences du cahier de charges établie par le projet, et plus précisément, la valorisation du brevet N° **10530** [4].

Cette étude représente la suite du travail lancé durant l'année universitaire 2018-2019 par Mr. Mohamed Aymen KETHIRI et le travail de Mr. Yacine KESSAI, Mr. Khaled CHEBAH et Mr. Mohamed Arezki MERABT durant l'année universitaire 2019-2020 sous la direction du Dr. Kamel AOUES. Donc le but est d'approfondir les deux axes commencés l'année dernière qui sont la recherche de travaux antérieurs et le dimensionnement d'un échangeur enterré eau/sol.

La résolution du problème de la température de l'eau des sources chaudes destinée à l'irrigation agricole. Ce problème à une grande importance et un impact socio-économique sur la culture des palmiers dattiers dans la région.

La démarche suivie pour aboutir à ces objectifs a divisé ce travail en deux parties. D'une part, la première partie a été consacrée pour une compréhension élargie des axes formant le sujet étudié et une synthèse bibliographique. D'autre part, la deuxième partie concrétise la solution proposée à travers une étude théorique, une simulation numérique et une discussion des résultats obtenus.

Nous avons proposé un cas d'étude d'échangeur géothermale eau/sol (forme li-

naire), varié les paramètres thermo-hydrauliques telque les débits (0,05 kg/s, 0,1 kg/s, 0,5kg/s, 1 kg/s) qui représentent la plage de fonctionnement de notre échangeur géothermal dans la plupart de ces applications. Deux types de matériaux (PVC, PE-HD), les plus courants, choisis pour la construction des tubes de notre échangeur. Trois nature du sol (argile, sable humide, Limon argilo-sableux) qui existent dans la région., on a conclu que :

Que la meilleur configuration est celle qui est en tube PE-HD, dans un sol limon argilo-sableux, pour un débit 0,5 Kg/s avec un temps de fonctionnement de 4h, s'avère la mieux adapté pour satisfaire le compromis (quantité d'eau/température d'eau) destiné à l'irrigation agraire.

Afin d'approfondir et de valider les propositions et les résultats numériques obtenus, nous pouvons cités quelques perspectives :

- Travailler sur le troisième axe tracé pour ce projet ; la partie expérimentale pour tester la configuration proposée et valider les résultats obtenus.
- Faire un prélèvement de la température du sous-sol afin de déterminer sa distribution en fonction de la profondeur.
- Voir la nature physicochimie du sol de la région de Biskra et son influence sur nos résultats
- Déterminer la distribution expérimentale de la température de l'eau à l'intérieur de l'échangeur pour valider les dimensions.
- Déterminer la distribution expérimentale de la température du sous-sol qui entoure les tubes de l'échangeur pour mieux discuter sur le phénomène de saturation thermique.
- Faire une étude technoeconomique.
- La valorisation de l'étude et passer à la phase commerciale du projet.

# Bibliographie

- [1] BENFATAH, H., MOUMMI, N., HATRAF, N., MOUMMI, A., & ALI, S. Y. (2010). Etude théorique et expérimentale du rafraîchissement par la géothermie, application à l'habitat. Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Énergétique, SIGCLE, Constantine.
- [2] Naili, N., Yejjer, O., Hazami, M., et al. En 2010. (Etude expérimentale de la performance d'un échangeur enterré.)
- [3] Mohamed Aymen KETHIRI (2019). Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation dans la zone de Biskra. (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [4] Mohamed Aymen KETHIRI et Kamel AOUES, DZ\_Patent Brevet N° : 10530, date de dépôt : 28/05/2019, intitulé : Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source destinée principalement à l'irrigation.
- [5] P. Hollmuller, B. Lachal et C. Soutter, 'Serre avec Stockage de Chaleur par Tubes Enterrés : Analyse Énergétique', Rapport Interne, Centre Universitaire d'Étude des Problèmes de l'Énergie, Université de Genève, 2000.
- [6] Hollmuller, P., Lachal, B. M. (2002). Rafraîchissement par collecteur souterrain à eau, bâtiment Perret à Satigny (Ge).
- [7] Hollmuller, P., Lachal, B. M. (2005). Rafraîchissement par collecteur souterrain à eau, bâtiment Perret à Satigny (Ge).
- [8] Haddad, M. (2008). "Utilisation des eaux géothermiques pour la production des légumes de contre saison dans le Sud tunisien." Revue des régions arides(21) : 628-637.

- [9] Congedo, P. M., Colangelo, G., & Starace, G. (2012). CFD simulations of horizontal ground heat exchangers : A comparison among different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 33, 24-32.
- [10] Nebbali, R. Simulation Numérique Du Comportement Dynamique D'un Echangeur Eau-Sol CCTC 2013 Paper Number 87 (1569695069).
- [11] Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G.D., Mathur, J., Aseri, T., 2013b. Transient analysis based determination of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger in winter. *Energy Build.* 58, 76'85.
- [12] Rouag, A., Benchabane, A., Mehdid, C., 2018. Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I A new transient semi-analytical model for determining soil temperature. *J. Clean. Prod.*
- [13] Rosa, N., Soares, N., Costa, J. J., Santos, P., & Gervásio, H. (2020). Assessment of an earth- air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100649.
- [14] Hermes, V. F., Ramalho, J. V. A., Rocha, L. A. O., dos Santos, E. D., Marques, W. C., Costi, J., ... & Isoldi, L. A. (2020). Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100603.
- [15] Atwany, H., Hamdan, M. O., Abu-Nabah, B. A., Attom, M., Alami, A. H., & Thibault, J. Transient 3D Numerical Simulation of Horizontal Earth Water Heat Exchanger (EWHE).
- [16] Sharma, A., Jilte, R. D., & Dogra, S. (2020, October). Performance evaluation of ground heat exchanger using novel spirally corrugated pipe geometry'A CFD approach. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2281, No. 1, p. 020020). AIP Publishing LLC.
- [17] Yacine KESSAI (2020). refroidissement par la géothermie des eaux d'irrigation échangeur eau/sol forme serpent. (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [18] [www.youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/](http://www.youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/) consulté le 14/06/2021, à 20 :30.

- [19] Salomon, Thierry, et al. "Dimensionnement du puits climatique." Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits canadiens ou provençaux, Rapport Adème, Région Languedoc Roissillon (2003).
- [20] Khabbaz, M. (2016). Contribution à l'étude d'un échangeur de chaleur air sol (puits canadien) pour le rafraîchissement de l'air sous le climat chaud et semi-aride de Marrakech (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- [21] Naili, N., Hazami, M., Lazaar, M., et al. En 2009 (Valorisation de la géothermie en Tunisie : utilisation d'un échangeur eau/sol).
- [22] Versteeg, H., and Weeratunge M., An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method. Pearson education, 2007.
- [23] MODELISATION NUMERIQUE EN MECANIQUE DES FLUIDES PRISE EN MAIN ANSYS/FLUENT