



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

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :  
**Mohamed Aymen KETHIRI**

Le : mercredi 10 juillet 2019

## **Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation des palmiers dattiers dans la région de Biskra.**

---

### **Jury :**

M.	Milloud ZELLOUF	MAA	Université de Biskra	Président
Dr.	Kamel AOUES	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Chawki MAHBOUB	MCB	Université de Biskra	Examineur

# 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 mes frères, mes grands-parents, ma famille et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement soutenu et encouragé tout au long de mon parcours.

A tous mes amis, la QLF, EPTA team et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous ce que j'aime.

Merci !

*M.A.K*  
*KETHIRI*

# 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. chawki MAHOUB en étant président du jury et Dr. Kamel MEFTAH d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos remerciement s'adresse au Dr. Amar ROUAG, Prof. Adel BENCHABANE et Mr. Housseem DJAHARA 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

Dans ce travail, nous avons mené une étude numérique d'un écoulement convectif tridimensionnel dans des conditions liées par le problème traité. L'objectif de cette étude est de diminuer la température de l'eau pompée de puis la nappe Albienne (35°C). Ces eaux destinées à l'irrigation des forêts de palmiers dattiers dans la région de Biskra. Un problème dont souffre les agriculteurs ; qui influe négativement sur la fertilité de la terre, qualité/quantité de la récoltes et surconsommation d'eau. L'intervention des énergies renouvelables exactement la géothermie, disponible en abondance s'avère une solution prometteuse. En fonction des conditions de travail imposé par cette culture, nous avons pu concevoir et dimensionner des échangeurs géothermale eau/sol. Tout en variant la configuration, le matériau et le débit d'écoulement, nous avons modélisé et simulé via le logiciel Fluent, le comportement convectif de nos échangeurs. Les résultats obtenus satisfais le cahier de charge ; des températures d'eau à la sortie de l'échangeur entre (22 et 25°C). la configuration de forme **ZigZag** (forme proposée par cette étude) s'avère la mieux adapté pour satisfaire le compromis (quantité d'eau/température d'eau) destiné à l'irrigation agraire. Cette étude à fait l'objet d'un brevet intitulé **“Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source destinée principalement à l'irrigation.”**

## Mots clés :

Géothermie, énergie renouvelable, transfert de chaleur, échangeur enterrée, eau/sol, refroidissement d'eau, irrigation, palmier dattier, Biskra.

# Abstract

**I**N this work, we conducted a numerical study of a three-dimensional convective flow under conditions related to the problem. The objective is to reduce the temperature of the water pumped from the Albiennne aquifer ( $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). These waters are intended for irrigation of date palm forests in the Biskra region. A problem that affects farmers; which negatively affects the fertility of the land, quality/quantity of crops and overconsumption of water. The intervention of renewable energies exactly geothermal, available in abundance proves to be a promising solution. Depending on the working conditions imposed by this crop, we have been able to design and dimension geothermal water / soil heat exchangers. While varying the configuration, the material and the flow rate, we modeled and simulated via the Fluent software, the convective behavior of our exchangers. The results obtained satisfy the specifications; water temperatures at the outlet of the exchanger between ( $22$  and  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). the shape configuration ZigZag (form proposed by this study) is the best adapted to meet the compromise (quantity of water / water temperature) intended for agrarian irrigation. This study was the subject of a patent entitled Shallow geothermal system for the thermo-hydrodynamic control of the temperature of source water intended mainly for irrigation.

## **keywords :**

Geothermal energy, renewable energy, heat transfer, underground heat exchanger, water / soil, water cooling, irrigation, date palm, Biskra.

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>I</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des tables</b>	<b>IX</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction . . . . .	5
1.2 La géothermie . . . . .	5
1.2.1 Définition . . . . .	5
1.2.2 Différent type de géothermie et potentiels d'utilisation . . . . .	6
1.2.2.1 Géothermie haute énergie ( $T^{\circ}\text{C} < 150^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	6
1.2.2.2 Géothermie moyenne énergie ( $T^{\circ}\text{C} : 90 \text{ à } 150^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	6
1.2.2.3 Géothermie basse énergie ( $T^{\circ}\text{C} : 30 \text{ à } 90^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	6
1.2.2.4 Géothermie très basse énergie ( $T^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	7
1.2.3 Importance de la géothermie . . . . .	8
1.2.4 Les avantages et les inconvénients de la géothermie . . . . .	8
1.2.5 L'utilisation de l'énergie géothermie . . . . .	9
1.2.6 Les procédés de la géothermie . . . . .	10
1.2.6.1 Puits canadien . . . . .	10
1.2.6.2 Pompe à chaleur géothermique . . . . .	11
1.3 Température du sol . . . . .	12
1.4 Les échangeurs de chaleurs souterrain (eau/sol) . . . . .	15
1.4.1 Calassification . . . . .	15

1.4.1.1	Echangeur vertical . . . . .	15
1.4.1.2	Echangeur horizontal . . . . .	16
1.5	Généralité sur l'irrigation . . . . .	16
1.5.1	Définition de l'irrigation . . . . .	16
1.5.2	Périmètre d'irrigation . . . . .	17
1.5.3	Différents techniques d'irrigation . . . . .	18
1.5.3.1	L'irrigation de surface . . . . .	18
1.5.3.2	L'irrigation par aspersion . . . . .	21
1.5.3.3	L'irrigation localisée . . . . .	22
1.5.4	Choix des techniques d'irrigation . . . . .	22
1.5.5	Qualité d'eau d'irrigation . . . . .	25
1.5.6	Température d'eau d'irrigation . . . . .	26
1.5.7	Les besoins du Palmier Dattier . . . . .	26
1.5.7.1	Nécessités climatiques . . . . .	26
1.5.7.2	Nécessités en eau . . . . .	27
1.6	Conclusion . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Synthèse bibliographique</b>	<b>30</b>
2.1	Introduction . . . . .	30
2.2	Synthèse bibliographique . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Dimensionnement d'un échangeur et modélisation du problème.</b>	<b>44</b>
3.1	Introduction . . . . .	44
3.2	Problématique . . . . .	44
3.3	Les paramètres de dimensionnement . . . . .	45
3.3.1	Longueur des tubes . . . . .	45
3.3.2	Température de sortie . . . . .	45
3.3.3	Débit . . . . .	46
3.3.4	Diamètre des tubes . . . . .	46
3.3.5	Distance entre tube . . . . .	46
3.3.6	La profondeur d'enfouissement . . . . .	47
3.3.7	La qualité du sol et le taux d'humidité . . . . .	47
3.3.8	Les autres paramètres . . . . .	47

3.4	Introduction au CFD . . . . .	48
3.4.1	Définition du CFD . . . . .	48
3.4.2	Fonctionnement d'un code CFD . . . . .	49
3.5	Présentation du logiciel de simulation «ANSYS Fluent» . . . . .	49
3.5.1	Équations générales de l'outil Fluent (ANSYS) (Équations gouvernantes du problème étudié) . . . . .	50
3.5.2	Méthodes de résolution des équations régissantes . . . . .	51
3.5.3	Hypothèses et simplifications du cas . . . . .	51
3.5.4	Equation gouvernent après les hypothèses . . . . .	51
3.5.5	Les conditions initiales et aux limites . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Simulation, résultats et discussion</b>	<b>53</b>
4.1	Introduction . . . . .	53
4.2	Hypothèse et simplification pour la modélisation . . . . .	53
4.3	Les étapes de simulations . . . . .	54
4.4	Descriptions des trois cas étudiés . . . . .	55
4.4.1	Serpentin . . . . .	55
4.4.2	Collecteur . . . . .	56
4.4.3	ZigZag . . . . .	57
4.5	Résultats et Commentaires . . . . .	59
4.6	Validations des résultats . . . . .	89
4.6.1	Effet du débit . . . . .	89
4.6.2	Effet du matériau . . . . .	94
4.7	Comparaisons générales . . . . .	97
	<b>Conclusion générale</b>	<b>99</b>
	<b>AnnexeA</b>	<b>102</b>
	<b>AnnexeB</b>	<b>103</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>104</b>

# Liste des figures

1.1	Géothermie haute et moyenne énergie. . . . .	6
1.2	Géothermie basse énergie. . . . .	7
1.3	Géothermie très basse énergie. . . . .	8
1.4	Différents utilisation de la géothermie. . . . .	9
1.5	Description d'un puits canadien. . . . .	10
1.6	Schéma d'une pompe à chaleur. . . . .	11
1.7	Profile de la température du sol en fonction de la profondeur pour les mois : janvier, avril, juillet et octobre . . . . .	14
1.8	Température du sol en fonction de la profondeur et du temps. . . . .	14
1.9	Echangeur vertical . . . . .	15
1.10	Echangeur horizontal. . . . .	16
1.11	L'ancienne méthode d'irrigation. . . . .	17
1.12	L'irrigation par planche. . . . .	19
1.13	L'irrigation à la raie. . . . .	20
1.14	L'irrigation par bassin. . . . .	20
1.15	L'irrigation par aspiration. . . . .	21
1.16	L'irrigation localisé. . . . .	22
2.1	Batiment Perret à Satigny. . . . .	31
2.2	Schéma descriptif de l'instalation avec l'emplacement des sondes. . . . .	31
2.3	L'emplacement des tubes enterrées. . . . .	31
2.4	Vu de l'échangeur. . . . .	33
2.5	Variation de la température en fonction de la profondeur . . . . .	33
2.6	Variation des températures d'entrée et de sortie de l'échangeur . . . . .	34

2.7	Variation de la quantité de chaleur récupérée du sol en fonction du temps. . . . .	34
2.8	Variation du flux récupéré du sol en fonction du débit pour $T_e = 35^\circ C$ .	35
2.9	a) Profondeur de pénétration thermique en fonction de la nature du sol. b) Température moyenne à la surface du sol suivant la nature du sol. . . . .	36
2.10	c) Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol. d) Variation de température en fonction de la profondeur du sol. . . .	36
2.11	Schéma descriptif de l'installation. . . . .	37
2.12	Résultats de la simulation avec CFD. . . . .	38
2.13	L'échangeur sous forme de corbeille. . . . .	39
2.14	Dispositif expérimental. . . . .	39
2.15	Evolution de la température du sol à différentes profondeurs . . . . .	40
2.16	Variation analytique de la température d'entrée et de sortie du fluide en fonction du temps pour un débit du fluide de 0.08(Kg/s) . . . . .	40
2.17	Cycle de refroidissement des eaux d'irrigation . . . . .	41
2.18	Tour de refroidissement. . . . .	42
2.19	L'ancienne méthode de refroidissement des eaux par cascade. . . . .	42
2.20	Système de refroidissement des eaux par cascade. . . . .	43
2.21	Système de refroidissement des eaux par cascade. . . . .	43
3.1	Les étapes de fonctionnement d'un code CFD . . . . .	49
3.2	ANSYS Fluent . . . . .	50
4.1	Vu 3D de l'échangeur sous forme Serpentin. . . . .	56
4.2	Le maillage de l'échangeur. Zoom. . . . .	56
4.3	Les surfaces nommés. . . . .	56
4.4	Vu 3D de l'échangeur sous forme Collecteur. . . . .	57
4.5	Le maillage de l'échangeur. Zoom. . . . .	57
4.6	Les surfaces nommés. . . . .	57
4.7	Vu 3D de l'échangeur sous forme ZigZag. . . . .	58
4.8	Le maillage de l'échangeur. Zoom. . . . .	58
4.9	Les surfaces nommés. . . . .	58

4.10	Les iso-surfaces de Serpentin en PVC avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	59
4.11	Les iso-surfaces de Serpentin en Al avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	59
4.12	Les iso-surfaces de Serpentin en Cu avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	59
4.13	Les iso-surfaces de Collecteur en PVC avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	62
4.14	Les iso-surfaces de Collecteur en Al avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	62
4.15	Les iso-surfaces de Collecteur en Cu avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	62
4.16	Les iso-surfaces de ZigZag en PVC avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	65
4.17	Les iso-surfaces de ZigZag en Al avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	65
4.18	Les iso-surfaces de ZigZag en Cu avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.	65
4.19	Les iso-surfaces de Serpentin pour un débit de 0,1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	68
4.20	Les iso-surfaces de Serpentin pour un débit de 0,2 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	69
4.21	Les iso-surfaces de Serpentin pour un débit de 0,5 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	70
4.22	Les iso-surfaces de Serpentin pour un débit de 1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	71
4.23	Les iso-surfaces de Collecteur pour un débit de 0,1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	72
4.24	Les iso-surfaces de Collecteur pour un débit de 0,2 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	73
4.25	Les iso-surfaces de Collecteur pour un débit de 0,5 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	74
4.26	Les iso-surfaces de Collecteur pour un débit de 1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	75
4.27	Les iso-surfaces de ZigZag pour un débit de 0,1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	76
4.28	Les iso-surfaces de ZigZag pour un débit de 0,2 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	77
4.29	Les iso-surfaces de ZigZag pour un débit de 0,5 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.	78

4.30	Les iso-surfaces de ZigZag pour un débit de 1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu. . . . .	79
4.31	Température de sortie du Serpentin en fonction du débits. . . . .	80
4.32	Température de sortie du Collecteur en fonction du débits. . . . .	80
4.33	Température de sortie du ZigZag en fonction du débits. . . . .	80
4.34	Température de sortie en fonction du débits pour les configurations en PVC. . . . .	81
4.35	Température de sortie en fonction du débits pour les configurations en Al. . . . .	82
4.36	Température de sortie en fonction du débits pour les configurations en Cu. . . . .	82
4.37	L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour le Serpentin. . . . .	83
4.38	L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour le Collecteur. . . . .	83
4.39	L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour le ZigZag. . . . .	84
4.40	L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour des configurations en PVC. . . . .	85
4.41	L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour des configurations en Al. . . . .	85
4.42	L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour des configurations en Cu. . . . .	86
4.43	Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour le Serpentin. . . .	86
4.44	Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour le Collecteur. . . .	86
4.45	Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour le ZigZag. . . . .	87
4.46	Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour les configurations en PVC. . . . .	87
4.47	Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour les configurations en Al. . . . .	88
4.48	Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour les configurations en Cu. . . . .	88

# Liste des tables

1.1	Les avantages et les inconvénients des techniques d'irrigation. . . . .	23
1.2	Les avantages et les inconvénients des techniques d'irrigation (suite 1)	24
1.3	Les avantages et les inconvénients des techniques d'irrigation (suite 2). . . . .	25
2.1	Analyse de l'eau géothermale utilisée pour l'irrigation. . . . .	41
4.1	Température de sortie du Serpentin en PVC en fonction des débits. . .	60
4.2	Température de sortie du Serpentin en Al en fonction des débits. . . .	61
4.3	Température de sortie du Serpentin en Cu en fonction des débits. . . .	61
4.4	Température de sortie du Collecteur en PVC en fonction des débits. . .	63
4.5	Température de sortie du Collecteur en Al en fonction des débits. . . .	64
4.6	Température de sortie du Collecteur en Cu en fonction des débits. . . .	64
4.7	Température de sortie du ZigZag en PVC en fonction des débits. . . .	66
4.8	Température de sortie du ZigZag en Al en fonction des débits. . . . .	67
4.9	Température de sortie du ZigZag en Cu en fonction des débits. . . . .	67
4.10	Température de sortie du Serpentin pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	68
4.11	Température de sortie du Serpentin pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	69
4.12	Température de sortie du Serpentin pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	70
4.13	Température de sortie du Serpentin pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	71

4.14	Température de sortie du Collecteur pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	72
4.15	Température de sortie du Collecteur pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	73
4.16	Température de sortie du Collecteur pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	74
4.17	Température de sortie du Collecteur pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	75
4.18	Température de sortie du ZigZag pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	76
4.19	Température de sortie du ZigZag pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	77
4.20	Température de sortie du ZigZag pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	78
4.21	Température de sortie du ZigZag pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu. . . . .	79
..		

# Introduction générale

L'irrigation consiste à transporter l'eau de la source d'alimentation, à chaque plante avec un seau, un arrosoir ou avec un réseau de tuyauterie .[1]

L'eau de source se diffère selon la région, l'exploitation et la profondeur. Dans la zone de Biskra, on exploite pour l'irrigation des palmiers dattiers deux types de sources d'eau : la nappe de l'Albien et les nappes phréatiques.

Les nappes phréatiques sont les plus exploitées dans la région. Du fait du cout réduit de pompage à cause de leurs basses profondeurs (de 17 à 100 mètres), ses eaux se caractérisent par une température assez adéquate à cette culture des palmiers dattiers, d'une part. D'autre part, elle présente deux inconvénients majeurs ; i) ces nappes se trouve sous forme de poche qui emprisonne des quantités d'eau plus ou moins épuisable, ii) Une mauvaise qualité d'eau.

La nappe de l'Albien est caractérisée par son cout élevé de pompage dû au grande profondeur (de 500 à 2000 mètres). Ses points forts se matérialisent par le plus grand gisement d'eau douce au monde, ainsi que par une très bonne qualité de ses eaux. Néanmoins, elle présente des températures assez élevée de ses eaux d'où un inconvénient nuisible sur la fertilité de la terre, la qualité des dattes récoltées et une surconsommation d'eau (phénomène d'évaporation d'eau).

La floraison des dattes ne débute qu'avec une température spécifique, elle diffère suivant les régions : 17°C à Elche en Espagne, 18°C à Laghouat, 20°C à Oued Righ et 22°C dans le Sahel (Sud Sahara) [2] et 25°C dans la région de Biskra.

Les palmiers dattiers se trouvent dans les régions chaudes où la température dépasse les 40°C. La température ambiante de l'atmosphère influe directement sur la température des eaux d'irrigation (qui ne permet pas de la refroidir), pour cela on va essayer de baisser la température d'eau pour avoir une température optimale la

plus adéquate aux exigences des agriculteurs (aux allons tour de 25°C). Tout en exploitant les ressources d'énergie renouvelable telle que la géothermie dont est le but de cette étude [2].

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 [3].

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 [4].

L'objectif de cette étude est de chercher à obtenir une configuration d'échangeur permettant d'arriver à satisfaire le cahier de charge, c.-à-d., la plus faible surface d'échange avec un meilleur débit, autrement dit, au meilleur coût d'investissement et d'exploitation.

Cette étude valorise le premier sujet de projet de fin d'étude, PFE, master à l'université Mohamed Khider de Biskra qui traite le 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.

L'objectif principal traité par cette étude était la diminution de la température des eaux d'irrigation du palmier dattier. Par conséquent et en occurrence, l'investissement dans les ressources énergétiques renouvelables que dispose la région, ainsi, que les résultats parvenues des travaux de recherche antérieurs dans la géothermie par les chercheurs de l'université de Biskra [5-9] font implicitement partis des objectifs de ce travail. 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.

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, iii) une validation de la solution proposé par la voix expérimentales.

La démarche suivie pour aboutir à cet objectif est de décomposer le travail en deux parties. La première partie se distingue par une compréhension élargie des mots clés du sujet étudié (Géothermie, échangeur eau/sol, irrigation, palmier dattier, état de l'art). Par conséquent, nous avons décomposé cette partie en deux chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons donné une vue générale sur le thème (Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation des palmiers dattiers dans la zone Biskra), en faisant exposer des définitions sur l'énergie géothermique et les échangeurs de chaleurs enterrée d'une parte, et d'une autre sur les techniques d'irrigation, qualité d'eau et les besoins du palmier dattier dans la zone de Biskra.

Le deuxième chapitre expose la 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 d'irrigations par d'autres méthodes [4, 10-19]

La deuxième partie est consacrée à l'étude théorique, simulation et discussion des résultats obtenus. Pour cela, cette partie a été décomposée en deux chapitres :

Dans le troisième chapitre expose la problématique d'une façon détaillées, ensuite donne une bref présentation sur la méthode (CFD) choisisse pour la résolution du problème et le logiciel de calcul (ANSYS «Fluent »).

Dans le dernier chapitre en va exposer les 3 cas étudié et présenter le processus de simulation par Fluent et de mettre l'accent sur les modèles énergétique en montrant et justifiant le choix du modèle qui a été utilisé dans notre étude. En suite, on va

vous exposer les résultats obtenus avec des différents matériaux et débits pour qu'on puisse les comparer et aussi déterminer la configuration qui nous aide à résoudre le problème précité.

Cette étude, nous a permis de constater que la solution proposée est une idée innovante et nouvelle, qui a nécessité une protection par l'élaboration d'un brevet dont le titre " Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source destinée principalement à l'irrigation. ", annexe A.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale, qui résume les différentes étapes de l'étude, ainsi, que les résultats obtenus. Aussi, nous proposons quelques perspectives sur la continuité de la recherche sur le sujet.

# Chapitre 1

## Généralités

### 1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre notre objectif est de donner une vue générale sur le thème (**Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation dans les zones chaudes en particulier la zone Biskra**), en faisant exposer des définitions sur l'énergie géothermique et les échangeurs de chaleurs enterrée d'une part, et d'une autre sur les techniques d'irrigation, qualité d'eau et les besoins du palmier dattier dans la zone de Biskra.

### 1.2 La géothermie

#### 1.2.1 Définition

La Géothermie, du grec Géo (La terre) et thermie (la chaleur), est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité. [3]

## 1.2.2 Différent type de géothermie et potentiels d'utilisation

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

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à  $150^{\circ}\text{C}$ . Les réservoirs, généralement localisés au-delà de 1500 mètres de profondeur, se situent dans des zones de gradient géothermique anormalement élevé. Lorsqu'il existe un réservoir, le fluide peut être capté sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production d'électricité. [27]



FIGURE 1.1 – Géothermie haute et moyenne énergie.

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

La géothermie de moyenne température ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre  $90$  et  $150^{\circ}\text{C}$ . Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1000 mètres. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2000 à 4000 mètres. Pour produire de l'électricité, une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire est nécessaire. [27]

### 1.2.2.3 Géothermie basse énergie ( $T^{\circ}\text{C} : 30 \text{ à } 90^{\circ}\text{C}$ )

Elle consiste en l'utilisation de la chaleur, par extraction d'eau chaude contenue dans les aquifères profonds (1500 - 2000 mètres) des bassins sédimentaires et

d'utiliser cette eau directement (via un échangeur de chaleur) pour le chauffage. En France métropolitaine, plus de 30 réseaux de chaleur urbains sont alimentés par ce type de géothermie. Ils permettent d'économiser plus de 160000 TEP/an de combustibles fossiles. En région parisienne, l'eau de l'aquifère profond du Dogger est captée entre 1500 et 1800 mètres de profondeur, à des températures comprises entre 55 et 85°C.[27]

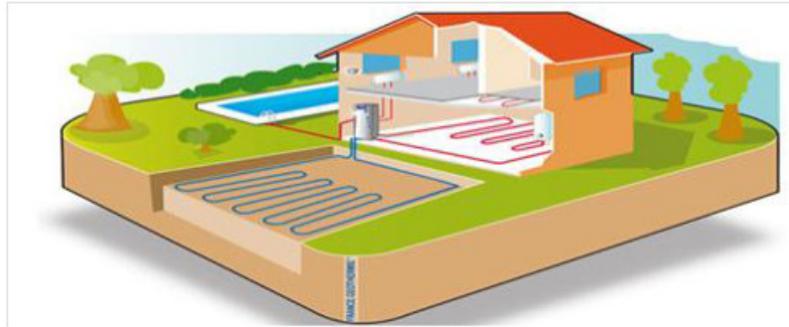


FIGURE 1.2 – Géothermie basse énergie.

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

Elle concerne la production de chaleur et/ou de froid contenue dans les terrains ou les aquifères peu profonds (en générale 100 mètres). La température exploitée est inférieure à 30°C (généralement comprise entre 9 et 15°C). Pour exploiter cette gamme de température, il est nécessaire de recourir à l'utilisation de pompes à chaleurs (PAC). Les PAC peuvent fonctionner sur des dispositifs d'échange et extraction d'énergie avec le sol (capteur horizontal, 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).[27]

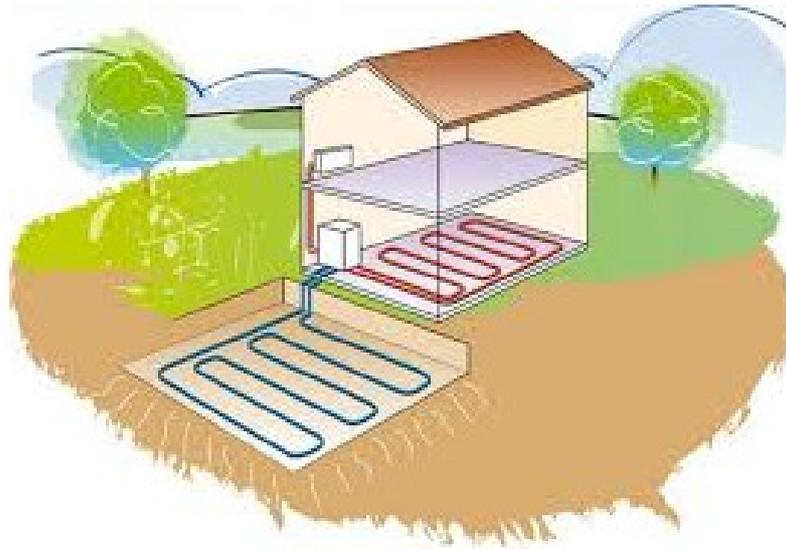


FIGURE 1.3 – Géothermie très basse énergie.

### 1.2.3 Importance de la géothermie

Son importance est issue de l'augmentation des prix de l'énergie et le besoin d'émettre moins de gaz à effet de serre. Tout Ceci la rend plus attrayante, une énergie d'avenir, renouvelable, constante et non-polluante.[3]

### 1.2.4 Les avantages et les inconvénients de la géothermie

#### 1. Les avantage

- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- C'est une source d'énergie quasi-continue.
- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne) et disponible dans tous les sous-sols de la planète.
- La géothermie est une énergie renouvelable et propre (pas de déchets à stocker, très peu d'émissions de CO<sub>2</sub>).

#### 2. Les inconvénients

- Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.

- Risque de réchauffement du site de forage.
- Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental [28].

## 1.2.5 L'utilisation 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.

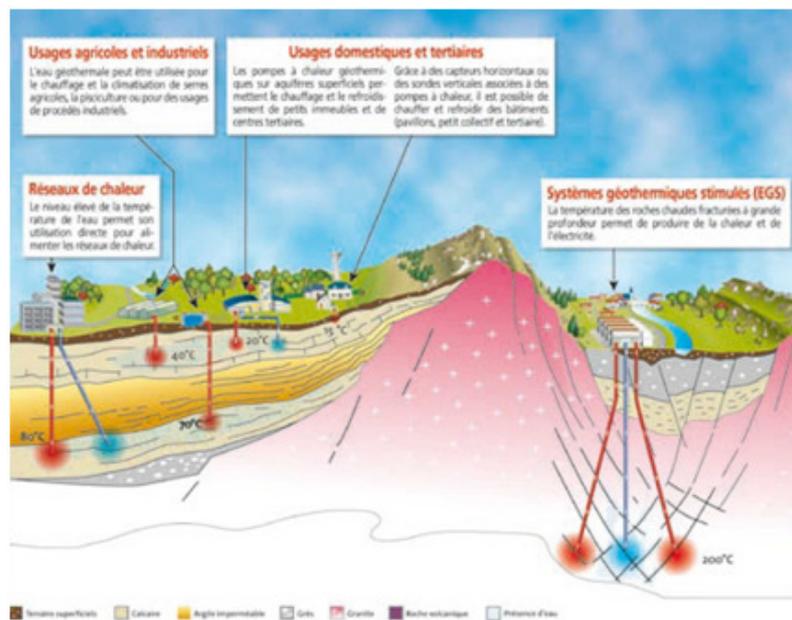


FIGURE 1.4 – Différents utilisation de la géothermie.

## 1.2.6 Les procédés de la géothermie

### 1.2.6.1 Puits canadien

#### Définition

Également appelé puits provençal, le puits canadien permet une gestion passive de la température d'un bâtiment tout au long de l'année. Excellente alternative à la climatisation mécanique en été, il permet aussi de préchauffer l'air neuf en hiver. Pour cela il utilise le potentiel thermique du sol dont la température à 2m de profondeur est d'environ 5°C l'hiver et 13° l'été. [29]

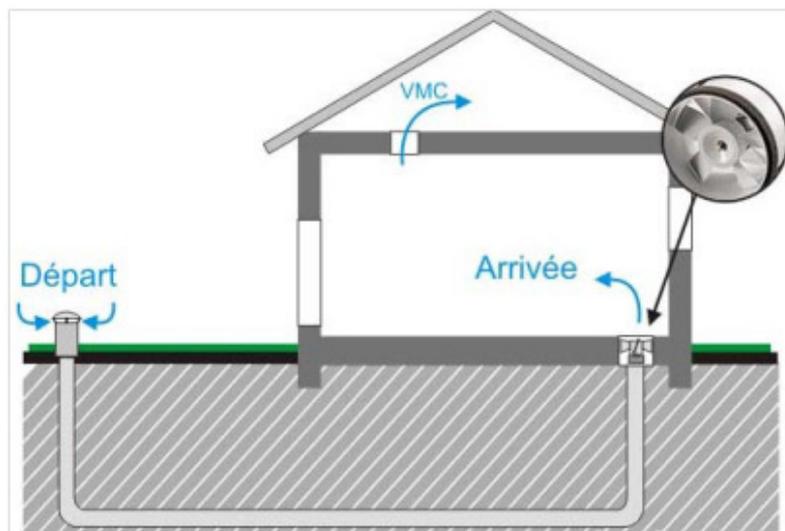


FIGURE 1.5 – Description d'un puits canadien.

#### Principe de fonctionnement

Le principe est simple : l'air extérieur circule, grâce à un ventilateur, dans des canalisations enterrées avant d'être insufflé dans le bâtiment. En saison froide, l'air extérieur se réchauffe au contact du sol pour atteindre une température de 2 à 5°C limitant ainsi les besoins de chauffage du bâtiment, tandis qu'en été l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour baisser en température et arriver dans le bâtiment entre 15 et 20°C. Cette technique est notamment intéressante dans des régions où le climat présente des températures estivales supérieures à 30°C. Consommant très peu d'énergie car seul le système de ventilation consomme de l'électricité, il demande très

peu d'entretien. Son prix, peu élevé, dépend essentiellement du coût de terrassement, c'est pourquoi cette installation est peu conseillée en rénovation [29]

### 1.2.6.2 Pompe à chaleur géothermique

#### Définition

La pompe à chaleur est un appareil capable de transférer de l'énergie d'un milieu « Froid » vers un milieu « Chaud ». Concrètement, cela consiste à prélever des calories du milieu naturel (air, sol ou eau) pour les injecter à l'intérieur du bâtiment que l'on souhaite chauffer. Même « froids », l'air, le sol et l'eau renferment de la chaleur qu'il est possible d'extraire moyennant une dépense énergétique initiale.[29]

1. Pompe à chaleur.
2. Echangeur de chaleur avec le sol.
3. Système de distribution intérieur de chaleur et de froid.

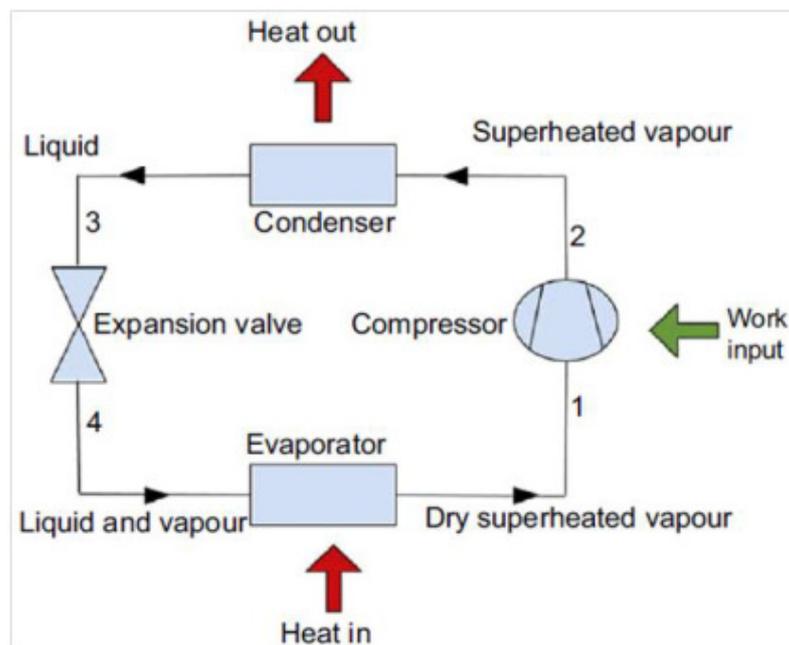


FIGURE 1.6 – Schéma d'une pompe à chaleur.

#### Principe de fonctionnement

De gauche à droite sur le schéma :

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

Le principe est similaire à celui du réfrigérateur : la chaleur est extraite du compartiment interne du réfrigérateur, d'où l'apparition de froid. La chaleur produite est évacuée par la grille derrière l'appareil et chauffe... la cuisine.[29]

### 1.3 Température du sol

Pour extraire l'énergie froide maximale contenue dans les premiers mètres du sous-sol à un coût financier fiable, nous devons étudier la profondeur de pénétration dans le sol pour l'emplacement idéal de l'échangeur air sol en sous-sol et cela signifie que là où la température reste invariante ou moins sensible aux conditions climatiques externes au cours du temps. [5]

La température du sol près de la surface du sol varie continuellement. On distingue deux types de variation : journalières et saisonnières. Dans l'étude des systèmes horizontaux, les variations thermiques quotidiennes peuvent être négligées puisque leurs effets ne dépassent pas quelques centimètres en profondeur [20].

On remarque que la température moyenne du sol diminue quand on pénètre d'avantage dans le sol. Ce comportement apparait clairement dans le sol ayant une faible diffusivité thermique que les autres natures des sols. La nature du sol joue un rôle très important dans l'enfouissement et le fonctionnement de l'échangeur air sol.[26]

Lamarche (2014) [21] présente l'équation 1.1 qui réagit la variation annuelle de la température du sol en fonction de la profondeur.

$$T_s(z, t) = T_0 - A \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha_s}}\right) \cos\left\{\omega(t_j - t_{shift} - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha_s}})\right\} \quad (1.1)$$

Belloufi (2017) présente les équations 1.2 1.3 1.4 1.5 :

La température à la surface du sol s'écrit comme suit :

$$T_p = \frac{\lambda}{\lambda - \delta.h} T_i - \frac{\delta.h}{\lambda - \delta.h} T_{ae} \quad (1.2)$$

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

$$T_{sol}(z) = \frac{T_i - T_p}{\delta} . z + T_p \quad (1.3)$$

L'équation 1.4 de la température à la surface du sol dans un régime transitoire ou le sol est variable s'écrit comme suit :

$$T(z, t) = T_i + A \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} . z\right) . \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \quad (1.4)$$

L'équation 1.5 de la température à la surface du sol dans un régime transitoire ou le sol est constante s'écrit comme suit :

$$T_{sol}(z) = (T_s - T_i)[1 - erf(\eta)] + T_i \quad (1.5)$$

Comme c'est déjà mentionné, on a négligé le gradient de température horizontal dans l'expression de puisqu'il n'a pas d'effet sur les systèmes géothermiques peu profond. Cette solution est très pratique et largement utilisée. D'autres approches existent dans la littérature plus complexe, mais donnent des résultats plus précis : Mihalakakou et al. (1997) [22], Chow(2011) [23] et Badache et al. (2015) [24] [26]. L'évolution annuelle de la température du sol à différentes profondeurs est telle que représentée à la figure 1.8. La température du sol non perturbée est estimée à 6,78 °C et la variation de température du sol pendant l'année est de 14,42 °C et une diffusivité du sol 's de 0,0414 m<sup>2</sup>/jour. Ces valeurs ont été déterminées à partir de la base de données climatique de la ville de Montréal. Les courbes montrent une diminution de la température du sol avec l'augmentation de la profondeur de pénétration. Le déphasage entre les ondes est dû à l'inertie thermique du sol (Philippe, 2010) [25] [26].

À cause des fluctuations thermiques surfaciques, il aura une variation annuelle du champ de température du sol autour de l'échangeur horizontal, qui se situe généralement à quelques mètres au-dessous de la surface du sol. Donc il est nécessaire de

ne pas négliger l'influence du comportement thermique du sol dû à la variation de la température ambiante. Les tracés de la figure 1.7 montrent le profil de pénétration de la température dans le sol en fonction de la profondeur pour les quatre saisons de l'année [26].

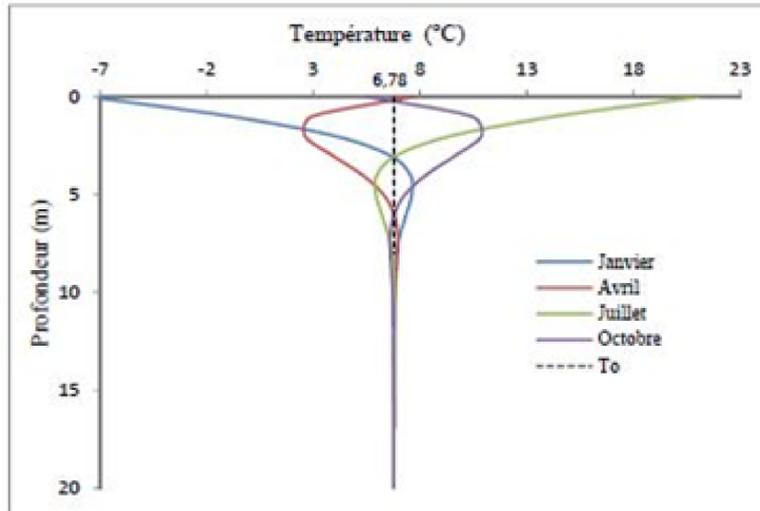


FIGURE 1.7 – Profil de la température du sol en fonction de la profondeur pour les mois : janvier, avril, juillet et octobre

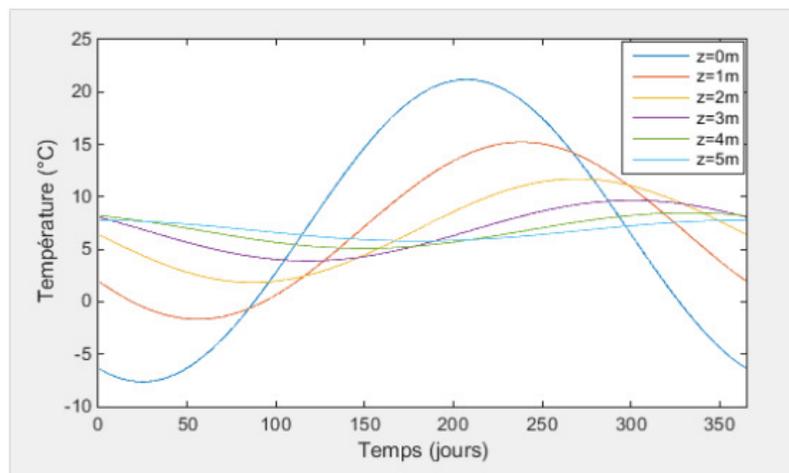


FIGURE 1.8 – Température du sol en fonction de la profondeur et du temps.

## 1.4 Les échangeurs de chaleurs souterrain (eau/sol)

### 1.4.1 Classification

Les circuits souterrains peuvent être classés selon leurs configurations. Une première classification peut être faite en fonction de la nature du circuit ouvert ou fermé. Dans le cas où on utilise directement l'eau souterraine comme source (ou puits) de chaleur on parlera de circuit ouvert. Dans le cas contraire si on utilise un fluide qui circule dans une boucle fermée (sans interaction avec eau souterraine) on parlera de circuit fermé. Une autre classification existe aussi selon la manière dont on enfouit les tuyaux dans le sol. Il existe deux configurations : verticale ou horizontale. Ces deux types d'échangeurs sont aussi classés comme des systèmes à boucle fermée.[30]

#### 1.4.1.1 Echangeur vertical

L'échangeur de chaleur souterrain de type vertical est le plus utilisé et nécessite une main d'œuvre spécialisée ; en effet il existe des formations dédiées au forage géothermique. C'est un ensemble de forages verticaux qui peuvent aller en profondeur jusqu'à 150m . Le fluide circule (faisant des allers-retours) dans la tuyauterie, placée dans les forages, souvent sous forme de tube en U ou coaxial comme le montre la figure 1.9 [30]

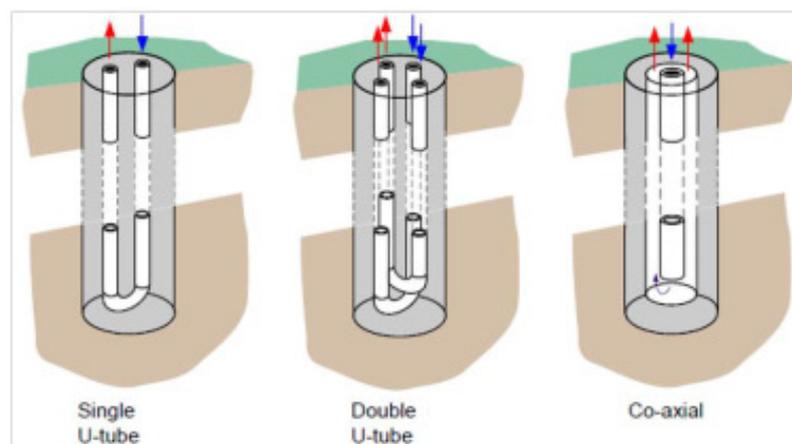


FIGURE 1.9 – Echangeur vertical

### 1.4.1.2 Echangeur horizontal

Le second type d'échangeur de chaleur souterrain consiste à enterrer un réseau de tuyauterie de façon horizontale. Cet échangeur nécessite une surface plus grande que le premier type, mais est moins cher . Pour répondre à un besoin donné nous avons deux possibilités, soit augmenter la surface utilisée pour l'échange, soit augmenter la longueur de la tuyauterie . Dans les deux cas, il faut essayer de trouver un compromis avec le côté économique. Plusieurs configurations de la tuyauterie sont possibles comme on peut le voir sur la figure 1.10. [30]



FIGURE 1.10 – Echangeur horizontal.

## 1.5 Généralité sur l'irrigation

### 1.5.1 Définition de l'irrigation

L'irrigation est l'application de l'eau au sol dans le but de rafraîchir le sol et l'atmosphère, par ce moyen réaliser les conditions les plus favorables pour la croissance des plantes. Mais quelque soit l'origine de l'eau (cours d'eau naturel, nappe souterraine, eau de barrage) et son mode de transport (canaux, conduite sous pression), le problème qui se pose est comment répartir cette eau sur le sol de façon que les plantes en tirent le maximum de profit. Cependant le moyen de répartition de l'eau sur le sol ne doit pas toujours répondre a ce critère d'une production maximale,

donc on doit essentiellement envisager un choix minutieusement détaillé du mode d'irrigation et de la technique d'arrosage et compatibilité avec les contraintes de la région d'étude [31] [32].



FIGURE 1.11 – L'ancienne méthode d'irrigation.

### 1.5.2 Périmètre d'irrigation

En irrigation, on appelait périmètre dominé toute la surface, quelque soit sa nature (terres, routes, villages, forêts, etc), dominée par le canal principal et susceptible, en conséquence, d'en recevoir de l'eau par gravité. En réalité ce terme a perdu son sens précis depuis que le développement du pompage et du recombages mécanique permet d'arroser des zones situées à des cotes plus élevées que le canal principal. Il vaudrait donc mieux parler maintenant de périmètre d'irrigation, quoique les termes périmètre dominé restant d'usage courant même dans leur sens élargi.[32] La partie du périmètre d'irrigation susceptible d'être arrosée avec profit s'appelle le périmètre irrigable; la fraction qui en est effectivement arrosée est le périmètre irrigué. Les rapports entre les dimensions de ces différents périmètres sont extrêmement variables selon les régions, l'importance et l'évolution des projets. [31]

### 1.5.3 Différents techniques d'irrigation

Les systèmes d'irrigation peuvent être classés en deux grandes catégories : L'irrigation gravitaire et l'irrigation sous pression. Cette dernière est classée en deux types l'irrigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion. [31] [32]

#### 1.5.3.1 L'irrigation de surface

L'irrigation de surface regroupe l'ensemble des techniques d'arrosage dans lesquelles la répartition de l'eau à la parcelle se fait entièrement à l'air libre, par simple écoulement à la surface du sol. La répartition de l'eau est assurée grâce à la topographie du terrain et aux propriétés hydriques du sol (ruissellement, infiltration et capillarité).

En irrigation de surface, la distinction entre les différentes techniques est essentiellement fondée sur la méthode d'application de l'eau : ruissellement, submersion ou techniques mixtes. [31] [32]

##### 1. L'irrigation par ruissellement

###### — L'irrigation par planches :

L'irrigation par planches aussi appelées calant est surtout réservée aux cultures céréalières ou fourragères. Les planches sont de longues bandes de terrain, aménagées en pente douce et séparées par des diguettes. L'alimentation en eau des planches sont réalisée de plusieurs façon : soit par des siphons ou une gaine souple ou encore par des travaux d'alimentation passant à travers les berges du canal. La lame d'eau introduite en descendant la pente de la planche, guidée par les diguettes des deux cotés de celle-ci. Pour obtenir une répartition régulière de l'irrigation, il faut absolument une parfaite horizontalité de la parcelle dans le sens de la largeur sinon l'eau s'écoulera en biais d'un seul coté. Un nivellement parfait est nécessaire après chaque labour et avant chaque semis. A l'origine le surplus d'eau s'écoulait en bout de parcelle dans une colature. Par souci d'économie, la plupart du temps on ferme la planche à l'aval avec une diguette la transformant ainsi en grand bassin allongé. Pour supprimer les diguettes latérales des planches et éviter le submerger tout la culture,

il est possible d'utiliser des semoirs-sillonneurs (ou corrugators).[31] [32]



FIGURE 1.12 – L'irrigation par planche.

— L'irrigation à la raie :

L'irrigation à la raie consiste à aménager des sillons ou petites rigoles de terre dans le sens de la pente du terrain pour transporter l'eau entre les rangées de cultures. L'eau s'infiltré dans le sol, principalement par les cotés du sillon, tout le long de son trajet dans le sens de la pente du terrain .généralement, les plantes sont cultivées sur des billons séparant les sillons. Cette technique est valable pour l'irrigation de toutes les cultures en lignes et pour toutes les cultures qui ne tolèrent pas la submersion par les eaux de leurs feuillage ou de leur collet pour une longue durée. les sillons sont alimentés par des prises d'eau aménagées sur les berges du canal d'amenée .Ces ouvrage de prises peuvent être de simple mais certainement pas la plus économe concernant l'utilisation de l'eau .Elle est très largement améliorée par l'utilisation de siphons (débit connu, dose maîtrisée) ou par des gaines souples équipées de manchons ou encore des rampes à vannettes .Sur les parcelles suffisamment grand aves des raies est possible par la transirrigation de surface oui enterrée qui consiste en un tuyau rigide posé en amont de la parcelle selon une pente régulière et percé d'orifices calibrés en face de chaque rai d'irrigation. [31] [32]



FIGURE 1.13 – L'irrigation à la raie.

## 2. L'irrigation par submersion :

Dans l'irrigation par submersion ou par bassins, ceux-ci sont constitués de cuvettes en terre, à fond plat, entourées de diguettes de faible hauteur. Ces diguettes sont conçues pour empêcher le passage de l'eau dans les champs adjacents. Cette technique est utilisée, d'une façon générale, pour l'irrigation des rizières sur terrain plat, ou des terrasses à flanc de coteau. Cette méthode est aussi utilisée pour l'irrigation des arbres fruitiers. Dans ce cas un bourrelet est aménagé autour de l'arbre pour le protéger de l'eau à cause des maladies comme la gombose par exemple. Cette méthode ou les canaux d'arrivée d'eau sont très nombreux, ou les pertes par infiltration sont importantes dans les canaux. La prise comprend un tuyau vertical sortant au-dessus du sol, le plus souvent muni d'un à vis permettant de régler le débit.[31] [32]



FIGURE 1.14 – L'irrigation par bassin.

### 3. L'irrigation mixte :

Il s'agit d'un ruissellement suivi d'une submersion. Les dispositions générales de ce mode d'irrigation sont identiques à celles que nous avons vu, mais lorsque l'eau atteint le niveau voulu dans le bassin, on continue à les alimenter en prenant soin d'évacuer les surplus. A cet effet, les compartiments sont munis d'un déversoir arasé au niveau fixé pour le plan maximal. L'eau en excès est évacuée dans les colatures ou dans un bassin contigu. L'avantages de ce système est que l'eau est plus aérée apport plus de matières nutritives et présente une température plus régulière ce qui peut être intéressant pour les cultures. [31] [32]

#### 1.5.3.2 L'irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion est un système d'arrosage qui consiste à distribuer l'eau sous forme de pluie sur le sol. Très employée par les jardiniers, les horticulteurs et les arboriculteurs pour les cultures maraichères, florales, fruitières, les pelouses. L'aspersion se fait soit par des instruments fixes soit par des installations mobiles et parfois mixtes, pour nos surfaces on peut concevoir les derniers qui comprennent des canalisations principales permanentes et des rampes mobiles. L'absorption de l'eau par le sol se fait rapidement puisque à celle adoptée au module d'arrosage.[31] [32]



FIGURE 1.15 – L'irrigation par aspiration.

### 1.5.3.3 L'irrigation localisée

L'irrigation goutte à goutte consiste à apporter régulièrement et de façon localisée au niveau des racines, la juste quantité d'eau dont la plante a besoin. Les plus utilisés sont les goutteurs intégrés, les boutons et de moins en moins les goutteurs en ligne. Ces trois types de goutteurs sont des organes de distribution, dont la conception particulière permet de délivrer l'eau à faible débit, dans des conditions de régime turbulent. Ces différents goutteurs existent sous une forme autorégulant présentant l'avantage de délivrer un débit homogène, même quand la pression varie à l'intérieur d'une gamme.[31]



FIGURE 1.16 – L'irrigation localisé.

### 1.5.4 Choix des techniques d'irrigation

La distribution continue est une distribution non économique ; l'eau est distribuée continuellement sans tenir compte des périodes successives du développement végétal et sa répartition est mal assurée sur les zones à irriguer. La distribution par rotation présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de la variation des besoins de la plante au cours de son cycle végétatif ce qui entraîne des rendements plus faibles. Plusieurs facteurs entrent en considération pour le choix des techniques d'irrigation et en particulier :

- La pente du terrain à irriguer.
- Le débit dont on dispose.
- Nature du sol (perméabilité).

- Nature des cultures.
- Facteurs économique.
- Rentabilité de l'opération.

La distribution à la demande offre l'avantage de fournir l'eau à la plante suivant ses besoins. Elle n'est pas contraignante asservie à l'humidité du sol, aux besoins instantanés des plantes et au temps d'arrosage ex : irriguer la nuit pour éviter des pertes importantes par évaporation[31] .

	Avantages	Inconvénients
I.S*	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Cout d'investissement faible à la parcelle pour l'agriculteur.</li> <li>— Pas d'apport énergétique extérieur.</li> <li>— Alimentation des nappes phréatiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Temps de main d'oeuvre pour la répartition et la surveillance importante.</li> <li>— Pertes d'eau importantes.</li> <li>— Faible efficience.</li> <li>— nécessite un terrain plat ou un nivellement.</li> <li>— pollution possible par déversement</li> </ul>

TABLE 1.1 – Les avantages et les inconvénients des techniques d'irrigation.

I.S\* : Irrigation de surface./ I.A\* : Irrigation par aspersion./ I.L\* : Irrigation localisée.

	Avantages	Inconvénients
I.A *	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Suppression de nivellement et de la préparation du sol.</li> <li>— S'adapte aux terrains perméables.</li> <li>— Economie de mains d'oeuvre.</li> <li>— Lavage du feuillage.</li> <li>— Lutte contre les gelées et parasites.</li> <li>— Utilisation de petits débits continus.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Dépenses élevés et entretien.</li> <li>— Encombrement des appareils.</li> <li>— Fonctionnement</li> <li>— Amortissement préparation de l'eau par grand vent.</li> <li>— Terres gorgée d'eau.</li> <li>— Risque d'accidents mécaniques.</li> </ul>
I.L*	<ul style="list-style-type: none"> <li>— L'économie en eau 50 à 70% par rapport au gravitaire et 30% par rapport à l'aspersion.</li> <li>— La réduction de la pollution de la nappe phréatique par les engrais ainsi qu'une économie en engrais.</li> <li>— Facilite l'exploitation des sols très légers filtrant à forte percolation et des sols lourds fissurant en été.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— La difficulté de la gestion de l'irrigation localisée, qui exige une technicité élevée.</li> <li>— Le risque d'un dessèchement rapide des plantes en cas d'arrêt spontané et prolongé de l'apport d'eau.</li> <li>— Le cout d'installation d'équipement et de matériel d'irrigation est plus élevé.</li> <li>— Le risque de colmatage ou de bouchage du distributeur constituant l'inconvénient majeur de ce système.</li> </ul>

TABLE 1.2 – Les avantages et les inconvénients des techniques d'irrigation (suite  
1)

	Avantages	Inconvénients
I.L*	<ul style="list-style-type: none"> <li>— La Possibilité d’exploitation des terrains à topographie et configuration irrégulières.</li> <li>— L’accès facile aux parcelles pour la réalisation des différentes opérations culturales.</li> <li>— L’augmentation du rendement de l’ordre de 20 à 40%, et une amélioration de la qualité des produits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Le risque de colmatage ou de bouchage du distributeur constituant l’inconvénient majeur de ce système.</li> </ul>

TABLE 1.3 – Les avantages et les inconvénients des techniques d’irrigation (suite 2).

### 1.5.5 Qualité d’eau d’irrigation

La qualité de l’eau est aussi un facteur à prendre en compte dans le choix de la méthode d’irrigation. Par exemple, l’irrigation par aspersion avec une eau renfermant des concentrations relativement élevées d’ions sodium ou chlorure peut endommager les feuilles de cultures sensibles, en particulier lorsque les conditions climatiques favorisent l’évaporation (températures élevées et faible degré d’humidité) (Ayers et Westcot, 1985) [33]. Les cultures subissent des dommages analogues lorsqu’on pulvérise directement sur leurs feuilles des eaux usées contenant de fortes teneurs en chlore résiduel ( $> 5$  mg/l) (Asano et Levine, 1998) [34].

L’eau d’irrigation doit être considérée selon sa nature, sa méthode d’irrigation, sa quantité et sa qualité, la ressource peut être souterraine exploitée à partir de puits ou de forages ou bien une source d’eau superficielle à partir des lâchées, d’un écoulement ou un captage de source. A ce propos, l’agriculteur doit s’assurer de sa disponibilité en période de pointe, qui lui permet de déterminer la superficie ou le périmètre à irriguer et doit en déterminer sa qualité (bonne, médiocre ou mauvaise) pour évaluer et prévoir le niveau de traitement et de filtration nécessaires à son utilisation [35].

Selon, Svendsen et al (1990) [36] , a proposé trois dimensions du service de livraison d'eau qui sont importants pour les agriculteurs. Il s'agit de la quantité d'approvisionnement en eau, sa qualité ainsi que son utilité :

- La quantité est traduite par trois indicateurs : l'adéquation, l'équité et la ponctualité
- La qualité : Température, salinité et composition de l'eau (sédiments, toxicité...)
- L'utilité est jugée par trois indicateurs : Traçabilité (accessibilité), convenance, prévisibilité [37].

### **1.5.6 Température d'eau d'irrigation**

La température optimale pour que les racines puissent absorber l'eau et les nutriments se situe aux environs de 20°C. À cette température, l'eau présente dans le substrat contient encore une grande quantité d'oxygène. C'est également la bonne température pour déclencher le mécanisme de pompage des racines. À des températures inférieures, le mécanisme de pompage n'est pas aussi efficace, alors qu'à des températures plus élevées, la plante est moins apte à absorber l'oxygène présent dans l'eau. Par ailleurs, les températures plus élevées et un manque d'oxygène peuvent entraîner une augmentation de la formation de moisissure (telle que le pythium) et des bactéries nuisibles, et tous les problèmes qui y sont liés. [38]

### **1.5.7 Les besoins du Palmier Dattier**

D'après les statistiques l'Algérie est parmi les grands pays en production des dattes avec 20 228 840 palmiers dattiers c'est parmi les produits les plus exportés. C'est pour cela il faut le préserver. Le palmier dattier est une culture comme toutes les cultures elle a besoin de :

#### **1.5.7.1 Nécessités climatiques**

Les facteurs limitant de la culture du palmier dattier sont une température élevée, une absence presque totale de pluies et un degré hygrométrique faible. La floraison ne débute qu'avec une température assez élevée, elle diffère suivant les régions : 17°C

à Elche en Espagne, 18°C à Laghouat, 20°C à Oued Righ et entre 22°C 25°C dans le sud de Sahara. Le froid au moment de la fécondation provoque des accidents divers tels que la mort des organes floraux, la maturation insuffisante des pollens, l'avortement des fleurs. La pluie a aussi une action néfaste et provoque la coulure, l'entraînement des pollens; elle favorise également le développement des maladies cryptogamiques. La datte demande pour mûrir une chaleur estivale prolongée et une hygrométrie relativement faible. De la floraison à la maturation, la somme des températures doit atteindre 5 000°C pour les variétés précoces et 6 000°C pour les tardives. La durée d'évolution des fruits est de 100 à 200 jours selon les variétés et les conditions de milieu. Un coup de froid peut saisir les dattes, mais à cette époque de l'année cet ennui est rare. Par contre, les accidents les plus fréquents sont dus à la pluie qui détermine sur les fruits des éclatements, des noircissements, le « nez noir » et des moisissures. Le palmier dattier s'accommode des grands écarts de température des climats du type saharien. Il résiste bien au froid en dehors de la période allant de la floraison à la maturation. A -5°C, ses palmes jaunissent quelque peu; à -9°C, certaines variétés ont les folioles gelées mais, la récolte suivante ne semble pas être trop éprouvée. Il tolère durant l'été les maxima les plus élevés (56°C) pendant plusieurs jours sans paraître en souffrir lorsqu'il est normalement alimenté en eau (irrigation ou nappe phréatique). Son activité végétative atteint son maximum d'intensité vers 32°C; dans l'ensemble, les températures permettant la végétation sont comprises entre 10 et 40°C.[2]

### 1.5.7.2 Nécessités en eau

#### A. Consommation en eau du palmier dattier

En Californie (U.S.A.), les doses d'irrigation utilisées en phéniculture sont de l'ordre de 27 000  $m^3$ /ha/an ( $Q = 0,86$  l./sec./ha), en Oued Righ (Algérie) 28000  $m^3$  ( $Q = 0,90$  l./sec./ha), dans les Zibans (Algérie) 15 000  $m^3$  ( $Q = 0,50$  l./sec./ha). En fonction de la nature du sol, du climat. De notre connaissance du milieu, nous estimons qu'au Tafilalt (Maroc) un volume annuel de 18 500  $m^3$  /ha/an ( $Q = 0,60$  l./sec./ha) doit suffire; dans le Bas-Draâ 22000  $m^3$ /ha/an ( $Q = 0,70$  l./sec./ha) seront nécessaires. Les différences entre les volumes d'eau utilisés dans ces zones phé-

nicicoles s'expliquent par la variation des conditions de milieu. Lorsque l'on compare les moyennes de température des différentes stations, on s'aperçoit que le climat californien se trouve être le plus chaud (moyenne des max 31°C) et qu'ensuite viennent l'Oued Righ et le Tafilalt (avec une moyenne des max de 28°C). On aurait tendance à donner moins d'eau pour l'irrigation en phéniciculture en Oued Righ, puisqu'il y fait moins chaud, mais les eaux d'irrigation de cette région sont fortement chargées en sels, ce qui explique l'augmentation du module. Par contre, au Tafilalt, les débits à employer sont plus faibles car d'autres facteurs interviennent (sol, situation géographique. altitude). Pour les Zibans qui reçoivent plus de 500 mm de pluie par an le problème est différent ; de plus les palmiers dattiers ont à portée de leurs racines des nappes phréatiques peu salées. Ce qui explique les débits relativement bas préconisés. Ainsi nous nous rendons compte que les doses d'irrigation à utiliser en phéniciculture ont certes des relations étroites avec le climat, mais que les autres facteurs du milieu tels que l'altitude, la nature du sol, la présence de nappes phréatiques, la nature de l'eau d'irrigation, la position géographique, etc... modifient l'importance des volumes à employer.[2]

## **B. Qualité de l'eau d'irrigation**

Dans bien des cas, les eaux d'irrigation en Afrique du Nord sont chargées en sels. Le palmier dattier admet bien les eaux d'irrigation salées. Ainsi, dans la région de l'Oued Righ, la plupart des palmeraies sont arrosées avec des eaux tirant de 4 à 7 g de sel par litre. Au-dessus de 9 g d'extrait sec par litre, il semble que la grosseur des fruits produits soit plus faible que la normale.[2]

## **C. Tolérance du palmier dattier aux nappes phréatiques proches de la surface**

Le palmier dattier continue à vivre et à produire malgré des nappes phréatiques ne lui laissant qu'une soixantaine de centimètres de terre aérée, mais dans ce cas, les eaux doivent circuler et se renouveler pour éviter une asphyxie des arbres.[2]

Il y a d'autre nécessité pour qui concerne le palmier dattier comme :

— Nécessités agrologiques

- Analyses chimiques du palmier dattier
- Nécessités nutritives du palmier dattier

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des définitions et des généralités sur les mots clés du sujet étudiés. On a basés sur la géothermie, température du sol, les échangeurs de chaleurs enterrés d'une parte, et d'une autre sur l'irrigation et sur les besoin du palmier dattier dans la zone de Biskra.

# Chapitre 2

## Synthèse bibliographique

### 2.1 Introduction

Après avoir essayé d'éclaircir le thème dans le chapitre précédent, il nous semble qu'il est indispensable de présenter ici une synthèse bibliographique.

Le deuxième chapitre expose la 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 d'irrigations par d'autres méthodes [4-14]

### 2.2 Synthèse bibliographique

Hollmuller et al. 2000 [10] 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.) [11] 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 voire la figure 2.1.



FIGURE 2.1 – Batiment Perret à Satigny.

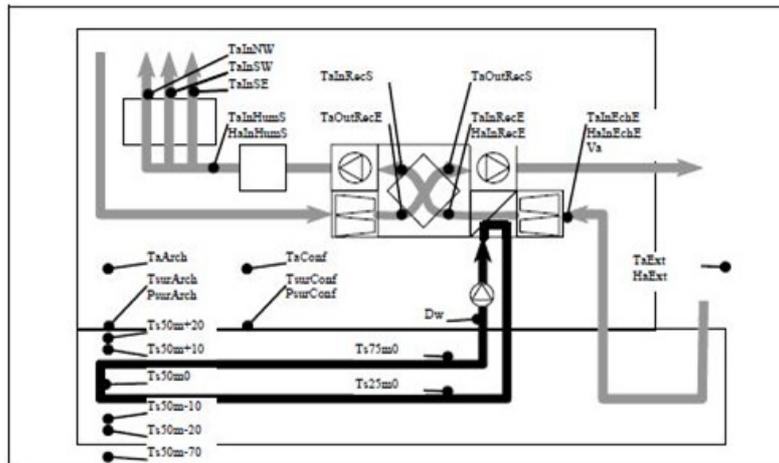


FIGURE 2.2 – Schéma descriptif de l'installation avec l'emplacement des sondes.

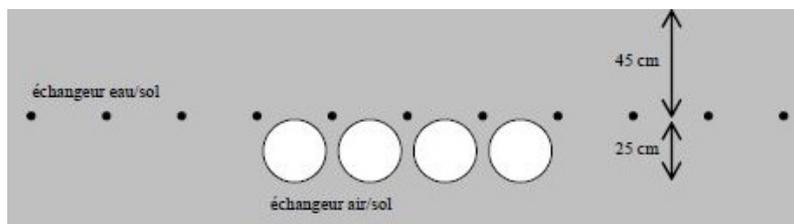


FIGURE 2.3 – L'emplacement des tubes enterrés.

Ce travail a été présenté sous forme d'un rapport bien détaillé sur : le lieu, le système d'acquisition des données, les méthodes et les approches utilisées dans le calcul, les résultats et les comparaisons effectués.

En 2005 (Hollmuller et al.) [11] ont appuyé sur l'ancien rapport comme une seule référence, pour qu'ils résument leur rapport et présenter les résultats les plus essentielles dans leur travail. Les deux travaux en but de vérifier le fonctionnement de cet échangeur air/eau/sol par une mesure in-situ d'une année, aussi bien pour le préchauffage de l'air en hiver que le potentiel de rafraîchissement en été, et de déterminer le coût de l'énergie (chaleur/froid) économisée.

En faisant appel à diverses méthodes d'analyse (mesure, calcul analytique, simulation numérique), il sera possible à la fois de caractériser l'installation particulière et de généraliser les conclusions pour l'utilisation future de ce genre de système. Ils ont présenté ici les résultats essentiels de cette étude, en se basant essentiellement sur le contrôle (surveillance). Les résultats détaillés des autres approches ainsi que l'évaluation technico-économique peuvent quant à eux être consultés dans le rapport de 2003 [10].

Onder Ozgener et Arif Hepbasli en 2005 [12] ont étudié un système constitué d'une pompe à chaleur géothermale couplée à un capteur solaire et ils l'ont utilisé pour le refroidissement à une base de 22°C.

En 2009 (N. Naili et al.) [13] ont réalisé un échangeur eau/sol en polyéthylène, de longueur 10 m et de diamètre interne 0.02 m, est disposé en serpent, voir la figure 2.4. La distance entre les tubes est de 0.3 m pour éviter au plus le déchargement du sol.

Ce travail a pour but de déterminer les différentes températures, voir la figure (2.5), au niveau d'enfouissement, à l'entrée et à la sortie de l'échangeur.

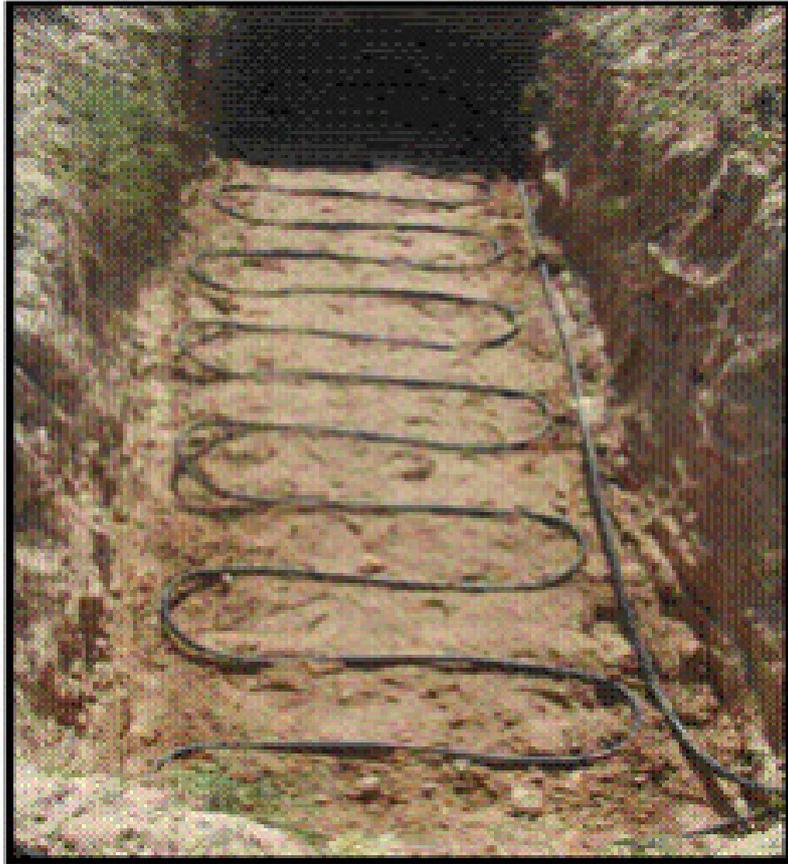


FIGURE 2.4 – Vu de l'échangeur.

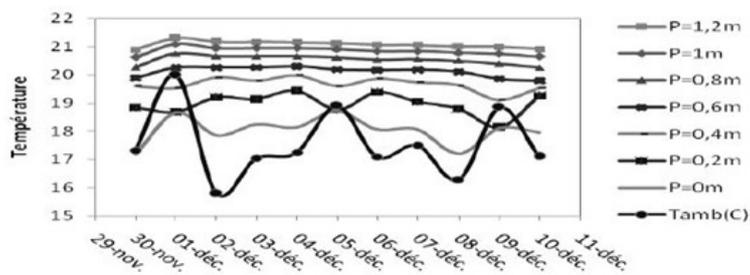


FIGURE 2.5 – Variation de la température en fonction de la profondeur

La présente étude est une contribution à l'exploitation de la géothermie de surface en Tunisie au moyen d'un échangeur enterré disposé horizontalement. L'étude expérimentale a permis de montrer que :

- La Tunisie présente un potentiel géothermique important, en effet, la température du sol est égale à 21 °C pour une température extérieure moyenne de 16 °C.
- La quantité de chaleur récupérée du sol est de l'ordre de 270 W (pour une

longueur de 10 m).

- Des longueurs de l'ordre de 100 m permettent une élévation plus importante de température et de la quantité de chaleur récupérée du sol. [13]

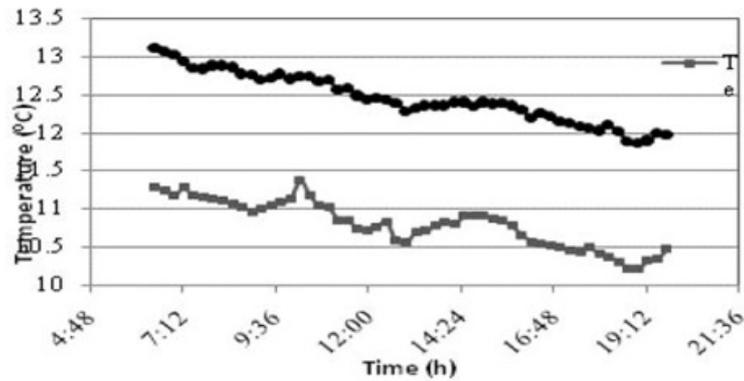


FIGURE 2.6 – Variation des températures d'entrée et de sortie de l'échangeur

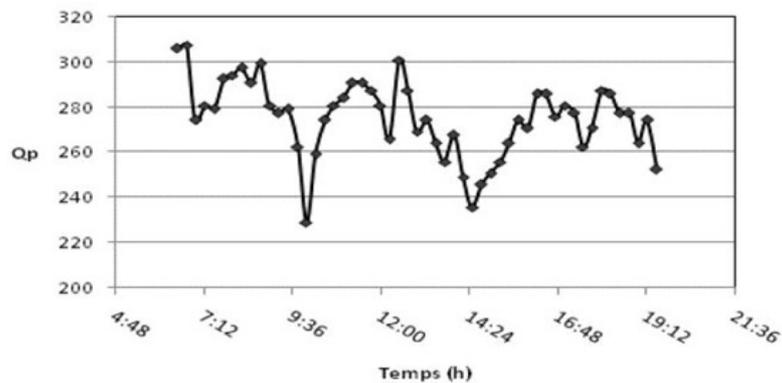


FIGURE 2.7 – Variation de la quantité de chaleur récupérée du sol en fonction du temps.

N. Naili et al. 2010 [14] ont proposé une étude analytique qui consiste à évaluer les performances thermiques et à optimiser les paramètres de fonctionnement de l'échangeur de chaleur eau/sol utilisé dans la récupération de l'énergie thermique du sol précité[13]. L'objectif de cette étude analytique est de chercher à obtenir une puissance d'échange donnée avec la plus faible surface d'échange et le meilleur débit d'eau, autrement dit, au meilleur coût d'investissement et d'exploitation[13].

Les résultats ont montré une bonne concordance, de l'ordre de 7 %, entre les résultats du modèle analytique et les points expérimentaux, voir la figure 2.8.

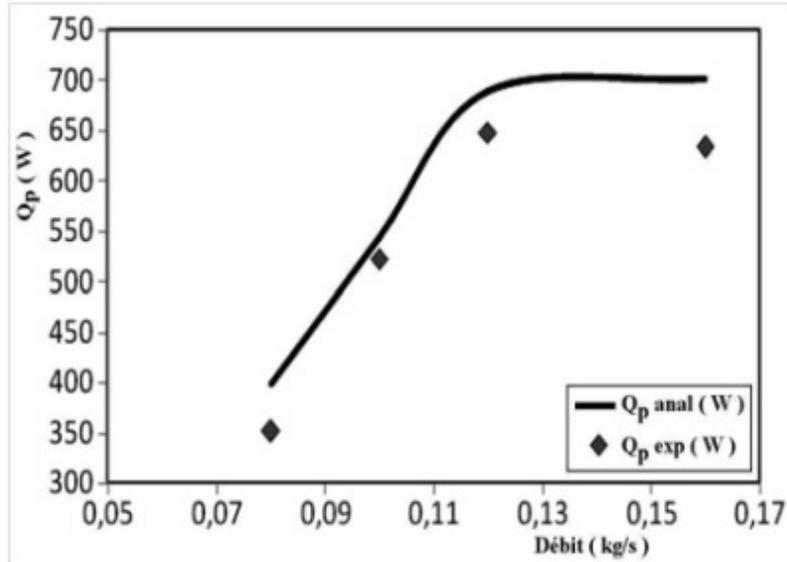


FIGURE 2.8 – Variation du flux récupéré du sol en fonction du débit pour  $T_e = 35^\circ C$ .

M. Benhammou et al. 2011 [?] ont étudié l'influence de la nature du sol sur la température en profondeur du sol pour la ville d'Adrar. Ils ont fait une modélisation de la température du sol (surface et profondeur). Ils ont introduit un nouveau coefficient d'échange équivalent et qui englobe le flux de chaleur perdu en échange radiatif avec le ciel et le flux de chaleur que la surface du sol reçoit en échange par convection avec l'air ambiant. Les résultats obtenus nous indiquent que ce paramètre qui est souvent pris par défaut influe beaucoup sur la profondeur de pénétration annuelle et sur le déphasage. Pour l'argile, on a trouvé que la profondeur de pénétration annuelle dépasse les trois mètres (3 m), tandis qu'elle est égale à peine deux mètres (2 m) pour le sable. De plus, pour une profondeur de 3 m, le déphasage est de trois mois pour le sable, alors qu'il est moins de deux mois pour l'argile. On a constaté également qu'une température du sol comprise entre  $17^\circ C$  et  $24^\circ C$  est obtenue pour une profondeur ( $z = (3/2) \times Profondeur$ ) de pénétration. Une telle profondeur correspond à une distance de 4,60 m dans le sol sableux et à 2,90 m dans le sol argileux, soit une différence de 1.7 m.

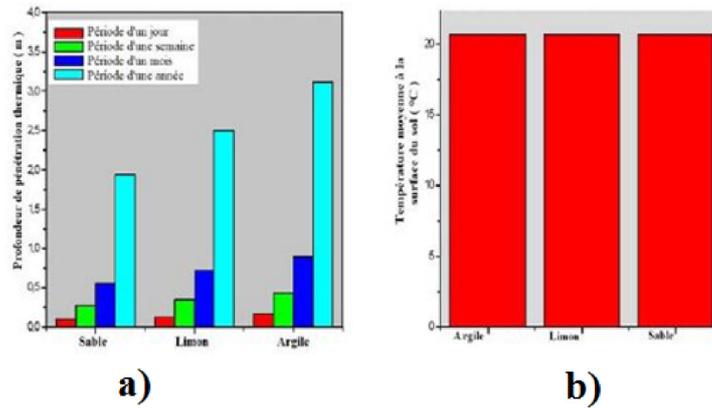


FIGURE 2.9 – a) Profondeur de pénétration thermique en fonction de la nature du sol. b) Température moyenne à la surface du sol suivant la nature du sol.

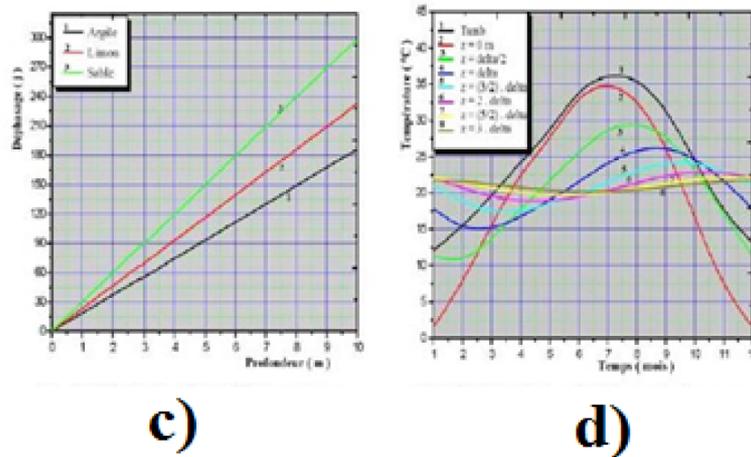


FIGURE 2.10 – c) Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol. d) Variation de température en fonction de la profondeur du sol.

Ahmet.Y et al [16] ont développé un système contenant un échangeur de chaleur sol-air (EAHE) pour le refroidissement d'une serre agricole[16].

R. Nebbali en 2013 [17]. Ce travail porte sur l'étude thermique d'un échangeur eau/sol. Ce dernier, contrairement aux échangeurs air/sol, améliore l'efficacité des échanges de chaleur et nécessite un espace réduit concomitant à un faible coût d'exploitation.

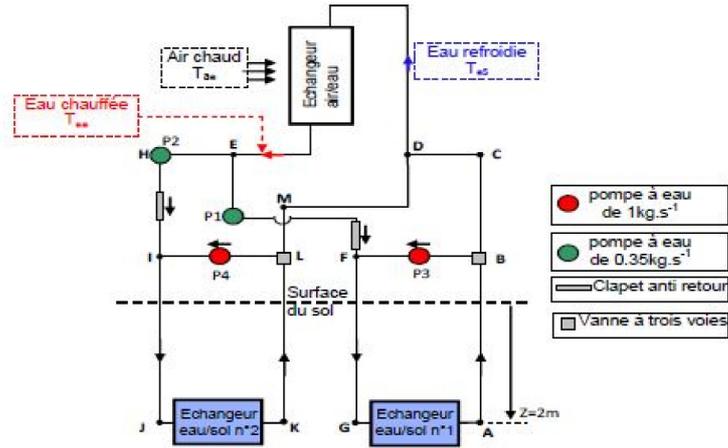
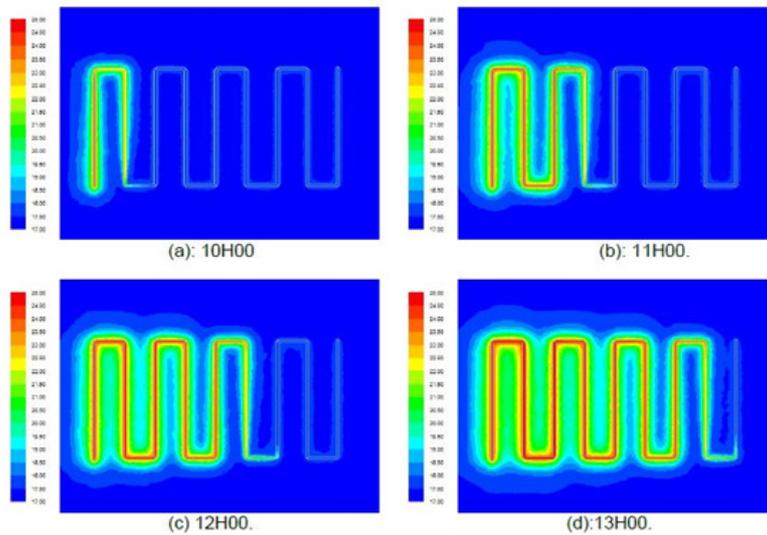


FIGURE 2.11 – Schéma descriptif de l'installation.

Parmi les résultats obtenus de cette étude : Afin d'assurer un bon fonctionnement continu de cette installation, Il faut utiliser deux échangeurs eau/sol placés 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.



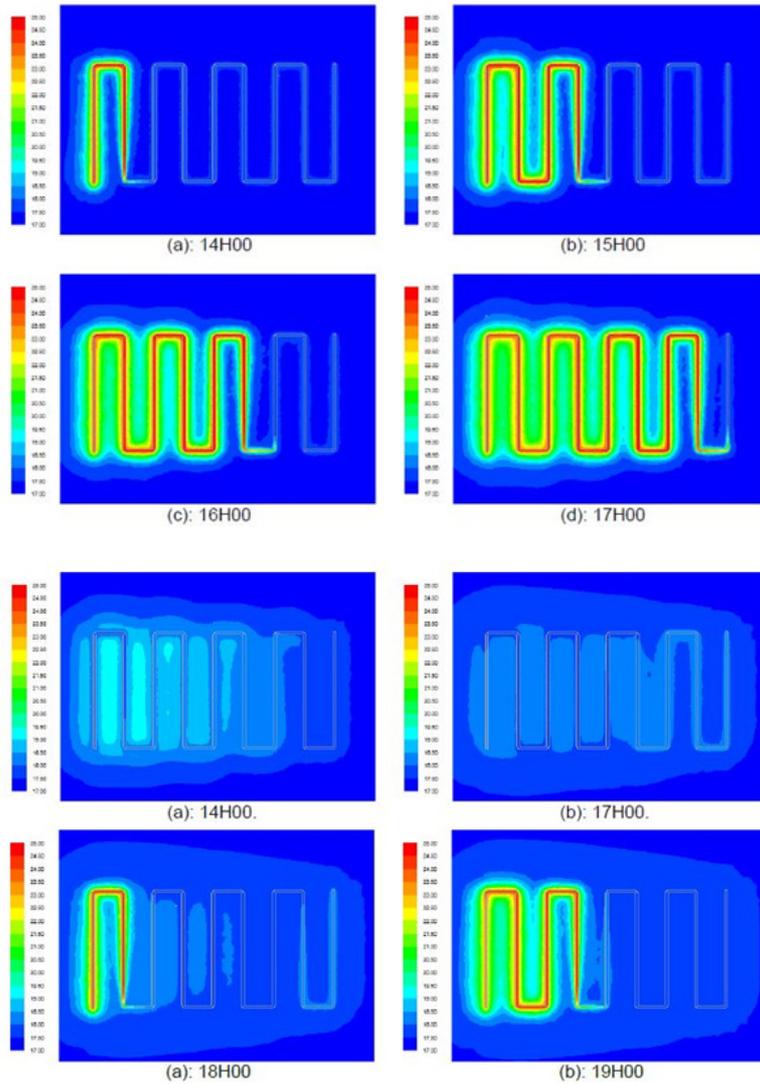


FIGURE 2.12 – Résultats de la simulation avec CFD.

H. Boughnmi et al., [18] en 2015 ont fait une étude expérimentale sur un système géothermique. Ce système est constitué d'un échangeur en polyéthylène de type corbeille enterré à 3 m de profondeur dans un puits de diamètre 150 cm, d'une serre de type Chapel de superficie  $3m^2$  et d'une pompe à chaleur réversible eau/eau de puissance frigorifique 16 kW.



FIGURE 2.13 – L'échangeur sous forme de corbeille.

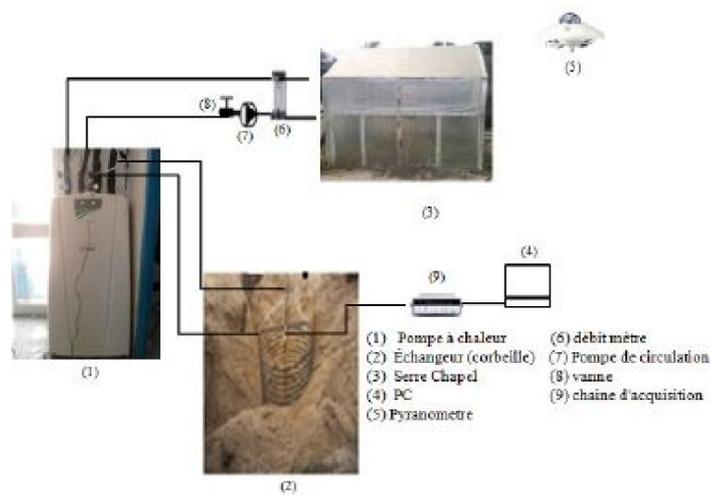


FIGURE 2.14 – Dispositif expérimental.

Les résultats ont montré que l'écart de température entre l'entrée et la sortie de la corbeille en cycle de refroidissement durant 6 heures, peut atteindre 30°C. Quant à la puissance maximale récupérée par cette corbeille, elle atteint 8 kW. Les résultats analytiques ont été comparés aux résultats expérimentaux ; Une concordance

acceptable a été remarquée. (une incertitude entre 3% et 5%).

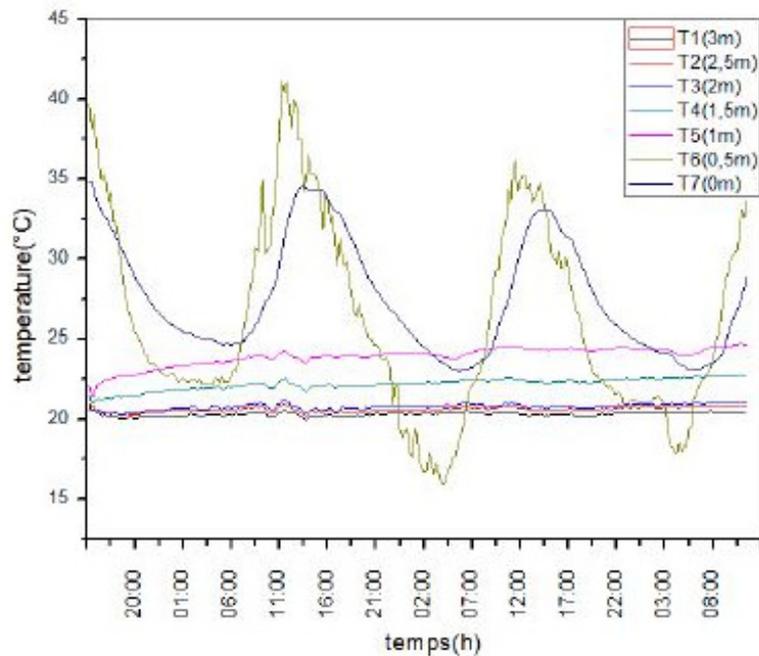


FIGURE 2.15 – Evolution de la température du sol à différentes profondeurs

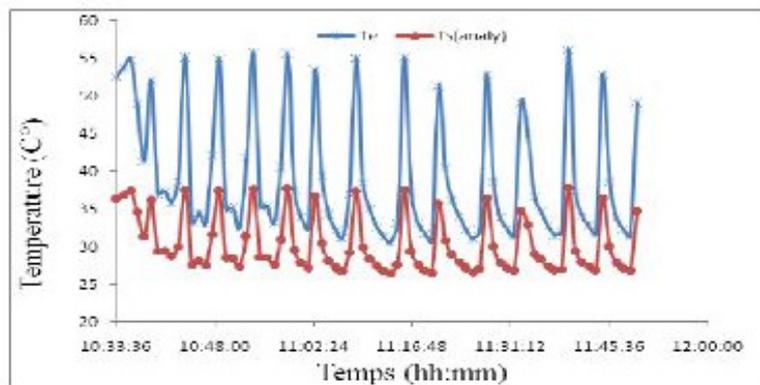


FIGURE 2.16 – Variation analytique de la température d'entrée et de sortie du fluide en fonction du temps pour un débit du fluide de 0.08(Kg/s)

Ce travail résume l'exploitation de la géothermie dans le domaine agricole. En 2008 Haddah, M. [19] à utiliser les eaux géothermales pour l'irrigation et le chauffage des serres en Tunisie. Il a profité des sources géothermales pour l'irrigation avec sa qualité d'eau, voir le tableau 2.1, pour une bonne irrigation et la chaleur de ses eaux pour chauffer le sol et les serres.

Sites	Ca	Mg	Na	K	SO4	Cl	HCO3	RS
Stifimi	250	95	312	39	613	674	107	2600
Kébili	270	85	345	33	670	650	615	2500
Limagues	276	93	342	36	822	639	120	2370
Douz	280	126	830	32	780	1435	110	4190
Tozeur	400	25	299	48	1355	355	93	2980
El Hamma	304	19	588	39	1516	390	114	2510
El Khebeyet	344	125	322	32	1018	604	631	2700

TABLE 2.1 – Analyse de l'eau géothermale utilisée pour l'irrigation.

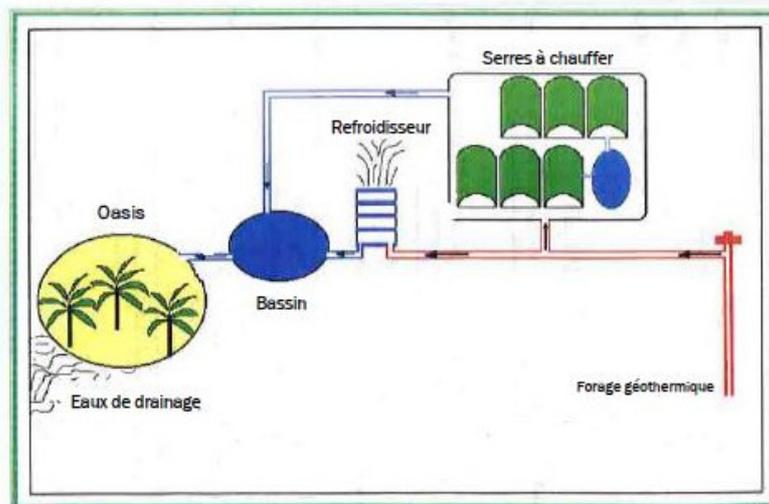


FIGURE 2.17 – Cycle de refroidissement des eaux d'irrigation

Lors de l'utilisation de ses eaux a trouve le problème de l'élévation de la température de ses eaux et pour cela a utilise les réfrigérateurs atmosphérique et les aéro-réfrigérant pour qu'il puisse baisses la température et la rendre adéquate a l'irrigation.



FIGURE 2.18 – Tour de refroidissement.



FIGURE 2.19 – L'ancienne méthode de refroidissement des eaux par cascade.



FIGURE 2.20 – Système de refroidissement des eaux par cascade.



FIGURE 2.21 – Système de refroidissement des eaux par cascade.

# Chapitre 3

## Dimensionnement d'un échangeur et modélisation du problème.

### 3.1 Introduction

Après avoir donné une vue générale sur le thème et présenter une synthèse bibliographique.

Dans ce chapitre nous exposons la problématique d'une façon détaillée, ensuite nous donnons une bref présentation sur la méthode (CFD) choisie pour la résolution du problème et le logiciel de calcul (ANSYS «Fluent »).

### 3.2 Problématique

Dans la zone de Biskra, et exactement dans les oasis, il existe un problème de l'élévation de la température des eaux d'irrigation des palmiers dattiers et cette élévation de température influe négativement sur la fertilité de la terre et la qualité et le rendements du palmier, d'un autre part on a le problème des eaux utilisées pour l'irrigation, elles viennent de deux sources de différentes caractéristiques ; l'une des nappes albiennes qui est de très bonne qualité et de grande température, et l'autre, celle des nappes phréatiques, a une mauvaise qualité et une basse température.

L'objectif de ce travail est de diminuer la température des eaux d'irrigations au environ de 25°C. Sachant, que la température des eaux de la nappe Albienne est

égale à 35°C dans la zone.

L'exploitation de l'énergie géothermique toute en profitons de l'inertie thermique du sol via un échangeur de chaleur eau/sol a travers l'échangeur et l'inertie thermique en refroidit l'eau d'irrigation, pour but d'utiliser la bonne qualité d'eau avec les bonnes conditions thermique exactement la température de l'eau.

Pour atteindre a cette température d'eau, il faut dimensionner un échangeur qui garantie cette température, et dans ce cas là il faut prendre en considération tous les paramètres de dimensionnement.

### **3.3 Les paramètres de dimensionnement**

L'analyse des paramètres de dimensionnement d'un échangeur de chaleur enterré permet d'évaluer l'influence des différents paramètres sur les performances et le comportement thermique de l'échangeur eau-sol et en distinguer les plus prépondérants. Ces paramètres sont à considérer pour le dimensionnement d'un échangeur eau-sol, et par conséquent pour sa modélisation.[39]

#### **3.3.1 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 (pour l'air), 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. [39]

#### **3.3.2 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. [39]

### 3.3.3 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 eau 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. [40]

### 3.3.4 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.[40]

### 3.3.5 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) [10] 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.[39]

### **3.3.6 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) [10] 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.[39]

### **3.3.7 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.[39] L'eau possédant une capacité et une conductivité thermique supérieure à celles des autres constituants du sol, un sol humide est plus inertielle qu'un sol sec et transmettra plus facilement sa chaleur ou sa fraîcheur à l'air dans les canalisations du puits. Cet effet peut être mis à profit pour augmenter la performance des échangeurs thermique air/sol. Il suffit alors d'humidifier le sol par arrosage pour accroître ses capacités de stockage thermique et les échanges avec l'air dans le puits.[?]

### **3.3.8 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.

## 3.4 Introduction au CFD

L'analyse des phénomènes complexes tels que le transfert de chaleur, les écoulements d'eau et d'air nécessitent une bonne compréhension du système analytique des mécaniques des fluides, et les champs d'application de ces systèmes, voire les différentes étapes de traitement du code CFD afin d'obtenir les résultats qui expliquent notre phénomène en question. Le choix du logiciel de simulation dépend de nos données d'entrée (inputs) et de la nature de notre expérience et les conditions dans lesquelles elle est inscrite. [41]

### 3.4.1 Définition du CFD

La dynamique des fluides computationnelle ou CFD (Computational Fluid Dynamics) est l'analyse des systèmes d'écoulement des fluides, le transfert de la chaleur et tous les phénomènes associés tels que les réactions chimiques en utilisant la simulation par ordinateur. La technique est très puissante et couvre un large champ d'applications industrielles et non industrielles tels que : l'aérodynamique, hydrodynamique, centrale électrique, turbomachines, de l'ingénierie de processus chimique, génie maritime, génie de l'environnement, de la métrologie, de l'ingénierie biomédicale, l'hydrologie et l'océanographie voire l'environnement externe et interne des bâtiments. [42]

### 3.4.2 Fonctionnement d'un code CFD

Selon Versteeg et Malalasekera [42], 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 3.1 passent par trois étapes essentielles : le prétraitement, le calcul et finalement le post-traitement et la visualisation des résultats.

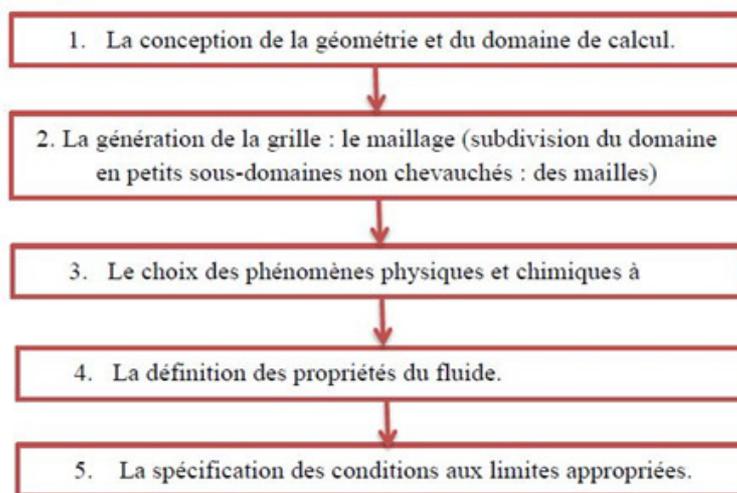


FIGURE 3.1 – Les étapes de fonctionnement d'un code CFD

## 3.5 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. [42][43]



FIGURE 3.2 – ANSYS Fluent

### 3.5.1 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 :**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho dv + \int_s \rho(\vec{q} \cdot \vec{n}) ds = 0 \quad (3.1)$$

**Forme différentielle :**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.2)$$

**Équations de quantité de mouvement :**

**Forme intégrale :**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho dv + \int_s \rho(\vec{q} \cdot \vec{n}) ds = - \int_s P \vec{n} ds + \int_v \rho \vec{f} dv \quad (3.3)$$

**Forme différentielle :**

$\vec{o}x :$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x \quad (3.4)$$

$$\vec{o}y : \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_y \quad (3.5)$$

$$\vec{o}z : \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + f_z \quad (3.6)$$

**Équation d'énergie :**

S'écrit comme suit :

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T + \Phi_s \quad (3.7)$$

Donc :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \nabla^2 T + \Phi_s \quad (3.8)$$

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

### 3.5.2 Méthodes de résolution des équations régissantes

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).

### 3.5.3 Hypothèses et simplifications du cas

Nous admettons ici les hypothèses suivantes :

- En considère que l'écoulement est tridimensionnel  $(x, y, z)$ .
- L'écoulement permanent  $\partial/\partial t = 0$ .
- Incompressible  $\rho = cst$ .
- Ecoulement laminaire.
- Sans source de chaleur.

### 3.5.4 Equation gouvernent après les hypothèses

En respectent les hypothèses précédentes les équations qui établie notre problème s'écrivant comme suit :

### Équation de continuité :

Comme  $\rho = cst \implies \text{div}\vec{\rho} = 0$

Donc :

$$u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

L'équation 3.2 devient :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.9)$$

Et comme on a  $\rho = cst \neq 0$  l'équation 3.9 sera :

$$\left( \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.10)$$

### Équations de quantité de mouvement :

Comme l'écoulement est permanent  $\partial/\partial t = 0$

Les équations 3.4 3.5 3.6 deviennent :

$\vec{o}x$  :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.11)$$

$\vec{o}y$  :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3.12)$$

$\vec{o}z$  :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (3.13)$$

### Équation d'énergie :

Comme on a  $\partial/\partial t = 0$  et sans source interne  $\Phi_s = 0$  l'équation 3.8 s'écrit comme suite :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \nabla^2 T \quad (3.14)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

### 3.5.5 Les conditions initiales et aux limites

— Température de la paroi constante.

$$T_p = cst = 22^\circ C$$

— Température d'entrée constante.

$$T_e = cst = 35^\circ C$$

# Chapitre 4

## Simulation, résultats et discussion

### 4.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre on va exposer les 3 cas étudiés et présenter le processus de simulation par Fluent et de mettre l'accent sur les modèles énergétiques en montrant et justifiant le choix du modèle qui a été utilisé dans notre étude.

En suite, on va vous exposer les résultats obtenus avec des différents matériaux et débits pour qu'on puisse les comparer et aussi déterminer la configuration qui nous aide à résoudre le problème précité.

### 4.2 Hypothèse et simplification pour la modélisation

Nous admettons ici les hypothèses suivantes :

- Le sol est considéré comme un milieu homogène et invariant, caractérisé par des propriétés constantes. Le sol garde une température constante pendant les échanges thermiques, c'est à dire que l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangées de l'air. A partir d'une certaine profondeur les températures restent constantes dans le sol.
- L'échange thermique se fait en régime stationnaire et la conduction longitudinale est négligeable.
- La variation temporelle du taux d'humidité du sol due à l'infiltration d'eau

est négligée et aucune nappe phréatique n'est prise en compte sous la zone d'implantation de l'échangeur.

- Le sol s'apparaît pas dans la modélisation parce qu'il est considéré comme un milieu infini et la température est constante à une profondeur définie.
- Difficultés du modélisation du sol (nombre d'élément  $> 7$  million).
- Les deux tubes verticaux ont été considérés isolés (il n'y a pas de transfert de chaleurs).

### 4.3 Les étapes de simulations

#### 1. Dessin de la géométrie.

Dans cette étape on utilise l'option Géométrie qui se trouve en Fluent. On a réalisé trois formes d'échangeur différents (Serpentin, Collecteur, Zig Zag), ces formes ont été réalisées à partir d'une esquisse (un cercle d'un diamètre constant pour toutes les formes  $d = 20$  cm), et après l'esquisse y a une série de fonction Extrusion, Révolution et Répétitions.

#### 2. Maillage.

Dans cette étape on fait le maillage et nomme les surfaces du corps. Comme on a des formes cylindriques le maillage a été fait avec les mêmes options et la même configuration pour les trois formes. Comme on a un fluide qui circule, on doit choisir CFD comme physique de préférence, on a augmenté le taux de pertinence à 100 pour un maillage fin. Pour le dimensionnement on a élevé le lissage, raffiné le centre de pertinence et utilisé la fonction de taille avancée pour mailler les courbures. Pour la même configuration on n'a pas eu les mêmes nombres de nœuds et d'éléments pour toutes les configurations. Après avoir terminé le maillage on passe à nommer les surfaces, on a l'entrée (Inlet = A), Sortie (Outlet = B) et la paroi extérieure des tubes (Wall = C). Il est nécessaire de nommer les surfaces pour la prochaine étape.

#### 3. Configurations (Fluent).

La 3<sup>ème</sup> étape de la modélisation, c'est l'étape critique, c'est l'étape où on doit définir et modéliser notre cas. Dans cette étape le solveur Fluent nous propose plusieurs modèles, selon notre cas on active les équations d'éner-

gie, comme on a un transfert de chaleur et considère que l'écoulement est laminaire (comme on a déjà cité dans les hypothèses). Ensuite, la phase du choix des matériaux ; ici pour la paroi (Wall) on a utilisé plusieurs matériaux (Aluminium, cuivre et PVC) et pour le fluide c'est toujours l'eau. Enfin, la méthode de résolution est comme la suite :

- Schéma : SIMPLE.
- Incrément de convergence  $10^{-6}$
- Nombre d'itération.

#### 4. Poste de traitement (Exposition des résultats).

Une fois que l'on estime que la convergence est atteinte, on peut visualiser les résultats grâce au post-traitement de **Fluent**. Principalement, on utilise le menu **DISPLAY** et les sous-menus **contours** et **velocity vectors**. Dans le premier, on observe les variations des variables (vitesse, température) avec les iso-surfaces. Dans le second, les valeurs sont traduites par des vecteurs ; ceci est surtout utile pour la visualisation des vecteurs de vitesses. Il est également possible dans ces menus d'observer les résultats sur les faces de la géométrie ou crée des surfaces à partir du plan, et pour les vecteurs de faire des projections.

## 4.4 Descriptions des trois cas étudiés

Les trois formes ont un diamètre de 20 cm et une longueur totale des tubes 77 m.

### 4.4.1 Serpentin

- 2 tubes de 4 m verticaux.
- 6 tubes de 9 m horizontaux.
- 5 tubes de 3 m horizontaux.

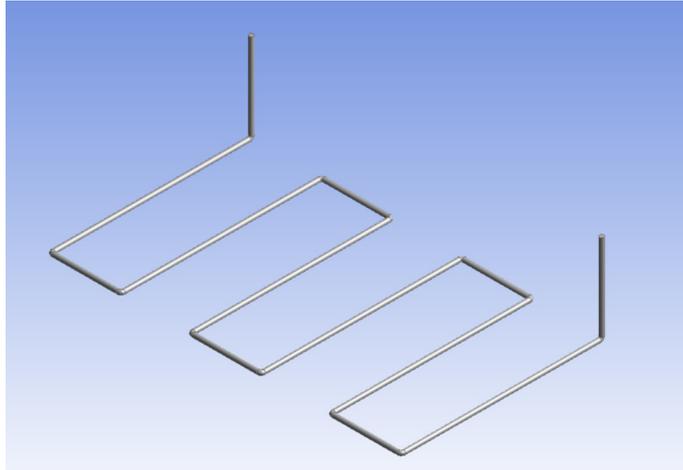


FIGURE 4.1 – Vu 3D de l'échangeur sous forme Serpentin.

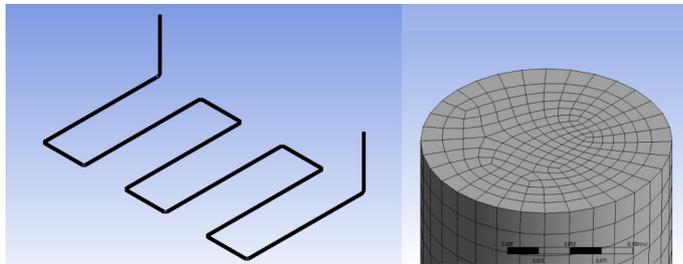


FIGURE 4.2 – Le maillage de l'échangeur. Zoom.

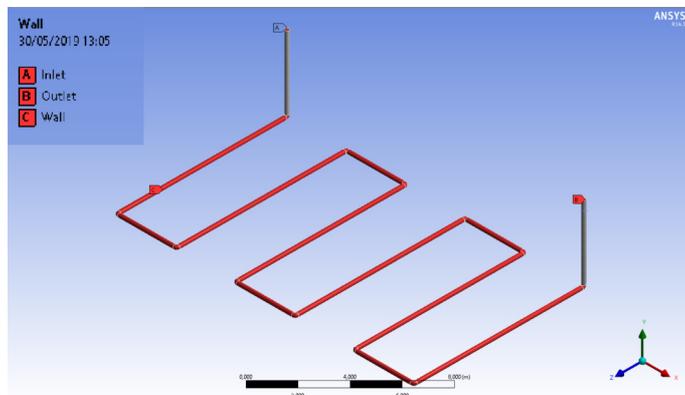


FIGURE 4.3 – Les surfaces nommés.

#### 4.4.2 Collecteur

- 2 tubes de 4 m verticaux.
- 5 tubes de 9 m horizontaux.
- 2 tubes de 12 m horizontaux.

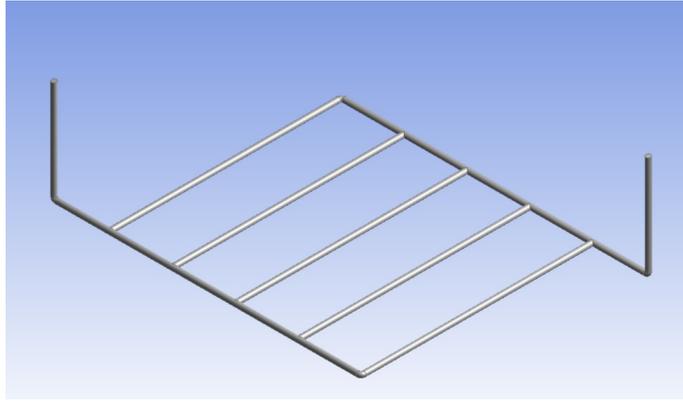


FIGURE 4.4 – Vu 3D de l'échangeur sous forme Collecteur.

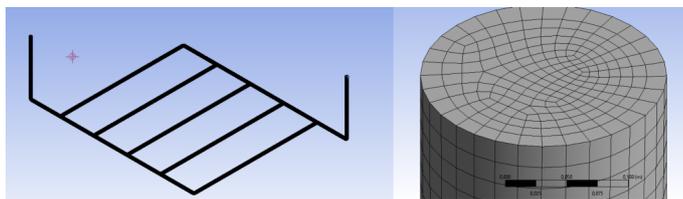


FIGURE 4.5 – Le maillage de l'échangeur. Zoom.

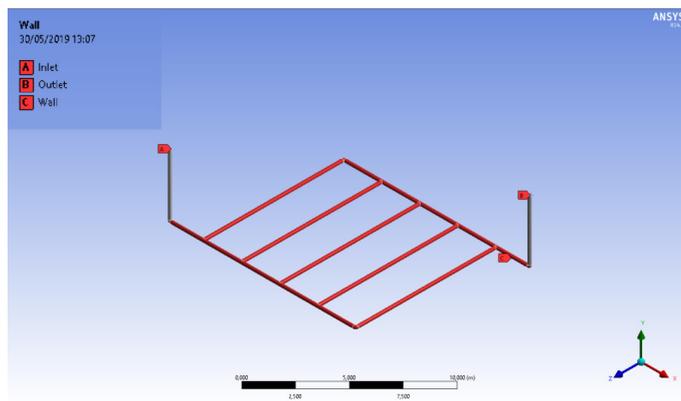


FIGURE 4.6 – Les surfaces nommés.

### 4.4.3 ZigZag

- 2 tubes de 4 m verticaux.
- 11 tubes de 5 m horizontaux.
- 8 tubes de 1 m horizontaux.
- 1 tube de 6 m horizontaux.

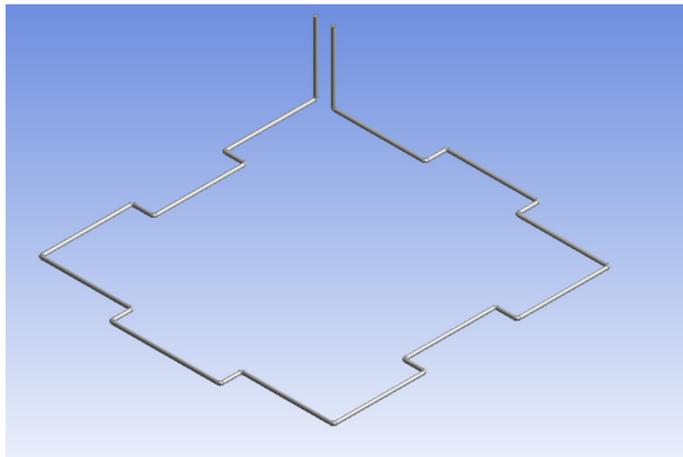


FIGURE 4.7 – Vu 3D de l'échangeur sous forme ZigZag.

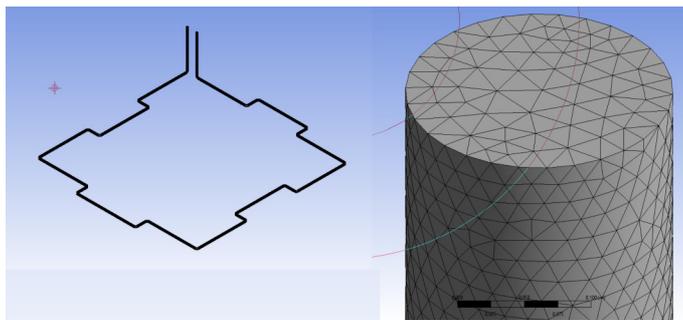


FIGURE 4.8 – Le maillage de l'échangeur. Zoom.

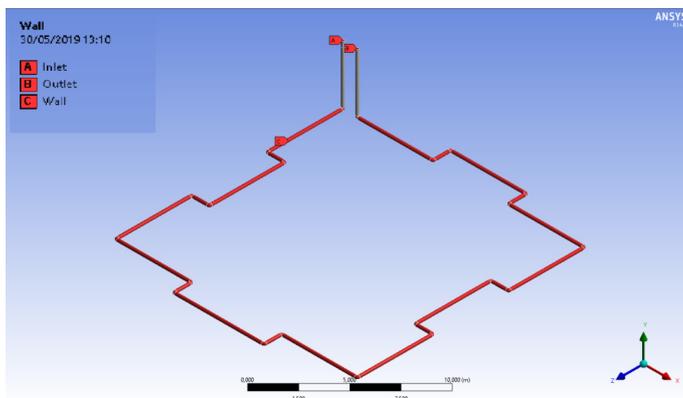


FIGURE 4.9 – Les surfaces nommés.

## 4.5 Résultats et Commentaires

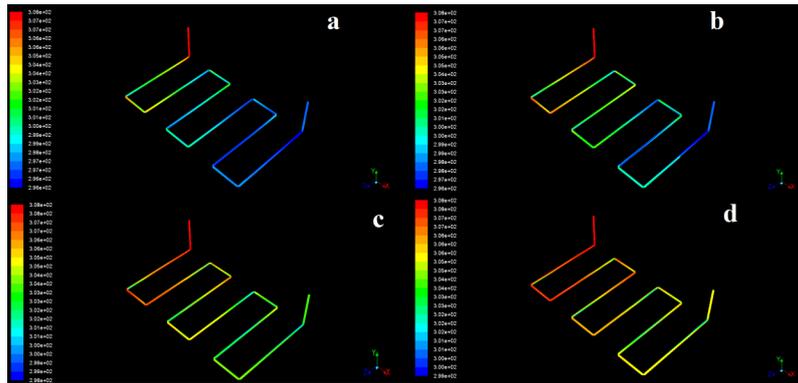


FIGURE 4.10 – Les iso-surfaces de Serpentin en PVC avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

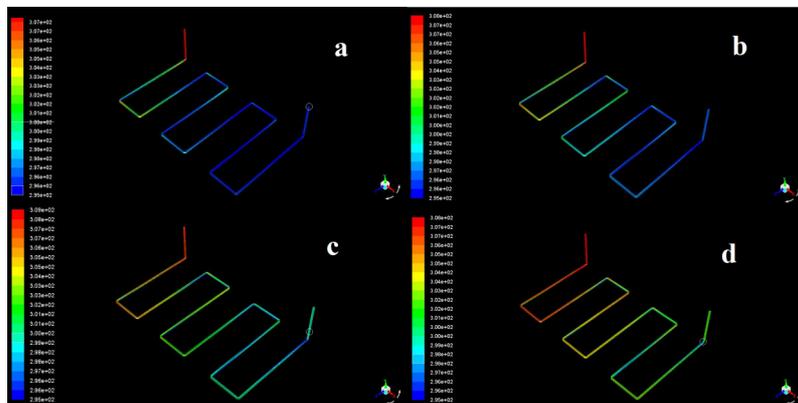


FIGURE 4.11 – Les iso-surfaces de Serpentin en Al avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

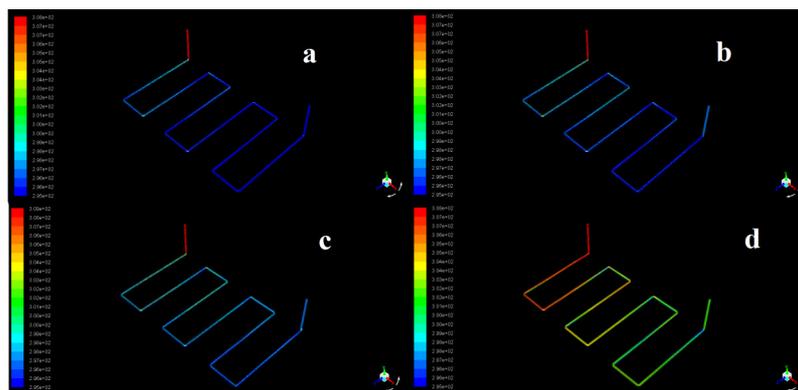


FIGURE 4.12 – Les iso-surfaces de Serpentin en Cu avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

La figure 4.10 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC. D'où on peut tirer les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.10.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,5911(K), cette dernière est obtenue à 56 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.10.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 297,4375(K), cette dernière est obtenue à 69 m de l'entrée de l'échangeur.
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure 4.10.c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 302,5486(K).
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure 4.10.d, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 304,6556(K).

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)	Longueur (m)
Serpentin	PVC	0.1	295,5911	56
		0.2	297,4375	69
		0.5	302,5486	77
		1	304,6556	77

TABLE 4.1 – Température de sortie du Serpentin en PVC en fonction des débits.

La figure 4.11 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en Al. D'où on peut tirer les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.11.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,0136(K), cette dernière est obtenue à 28 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.11.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 296,9862(K), cette dernière est obtenue à 49 m de l'entrée de l'échangeur.
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure 4.11.c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 299,5631(K).
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure 4.11.d, la température de l'eau à la sortie

de l'échangeur est de l'ordre de 300,5631 (K) .

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)	Longueur (m)
Serpentin	Al	0.1	295,0136	28
		0.2	296,9862	49
		0.5	299,5631	77
		1	300,5631	77

TABLE 4.2 – Température de sortie du Serpentin en Al en fonction des débits.

La figure 4.12 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en Cu. D'où on peut tirés les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.12.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295 (K), cette dernière est obtenue à 25 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.12.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,01 (K), cette dernière est obtenue à 40 m de l'entrée de l'échangeur.
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure 4.12.c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,04 (K), cette dernière est obtenue à 73 m de l'entrée de l'échangeur.
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure 4.12.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 296,4 (K), cette dernière est obtenue à 77 m de l'entrée de l'échangeur.

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)	Longueur (m)
Serpentin	Cu	0.1	295	25
		0.2	295,01	40
		0.5	295.04	73
		1	296.4	77

TABLE 4.3 – Température de sortie du Serpentin en Cu en fonction des débits.

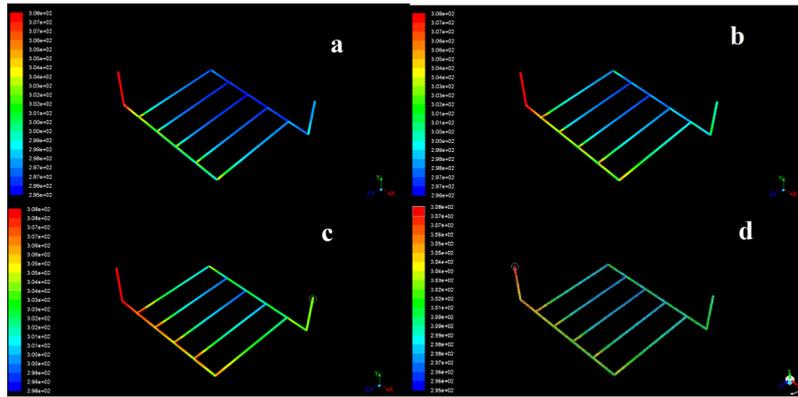


FIGURE 4.13 – Les iso-surfaces de Collecteur en PVC avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

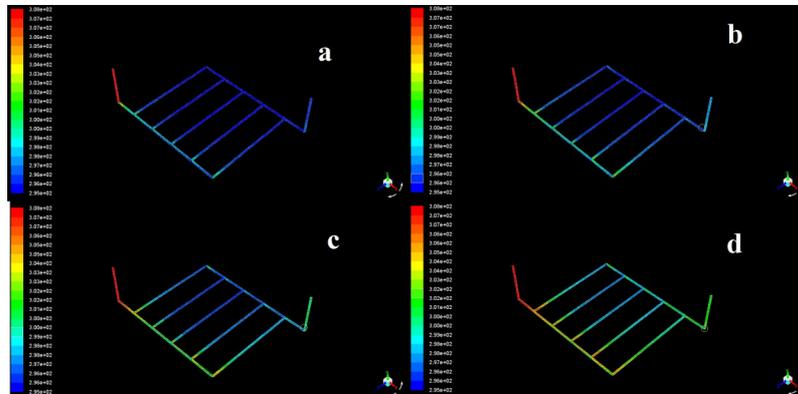


FIGURE 4.14 – Les iso-surfaces de Collecteur en Al avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

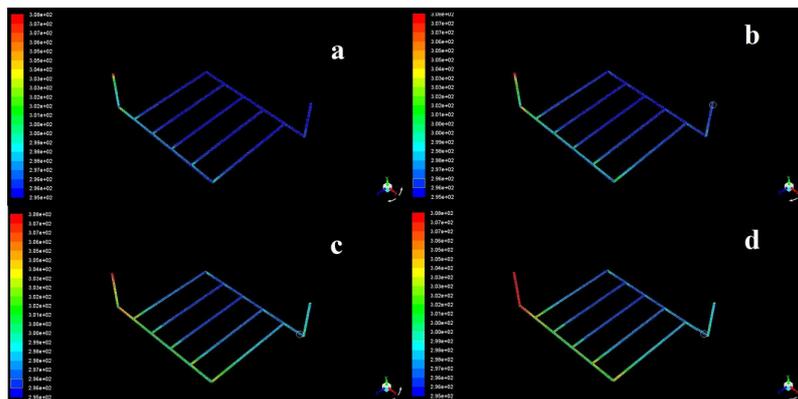


FIGURE 4.15 – Les iso-surfaces de Collecteur en Cu avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

La figure 4.13 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC. D'où on peut tirés les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.13.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,8058(K).
- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.13.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 298,4126(K).
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure ??c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 302,5094(K).
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure ??d, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 303,9317(K).

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)
Collecteur	PVC	0.1	295,8058
		0.2	298,4126
		0.5	302,5094
		1	303,9317

TABLE 4.4 – Température de sortie du Collecteur en PVC en fonction des débits.

La figure 4.14 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en Al. D'où on peut tirés les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.14.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,0029(K).
- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.14.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 296,311(K).
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure 4.14.c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 298,6397(K).
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure 4.14.d, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 301,6019(K).

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)
Collecteur	Al	0.1	295,0029
		0.2	296,311
		0.5	298,6397
		1	301,6019

TABLE 4.5 – Température de sortie du Collecteur en Al en fonction des débits.

La figure 4.15 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en Cu. D'où on peut tirer les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.15.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,0098 (K).
- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.15.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,0047(K).
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure 4.15.c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 296,0933(K).
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure 4.15.d, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 299,0845(K).

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)
Collecteur	Cu	0.1	295,0098
		0.2	295,0047
		0.5	296,0933
		1	299,0845

TABLE 4.6 – Température de sortie du Collecteur en Cu en fonction des débits.

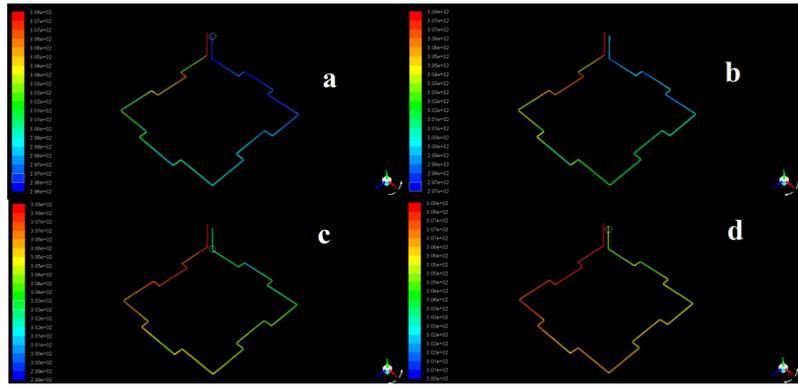


FIGURE 4.16 – Les iso-surfaces de ZigZag en PVC avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

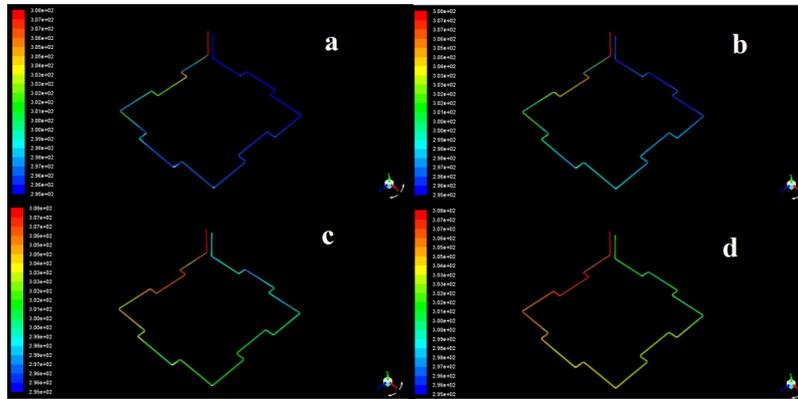


FIGURE 4.17 – Les iso-surfaces de ZigZag en Al avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

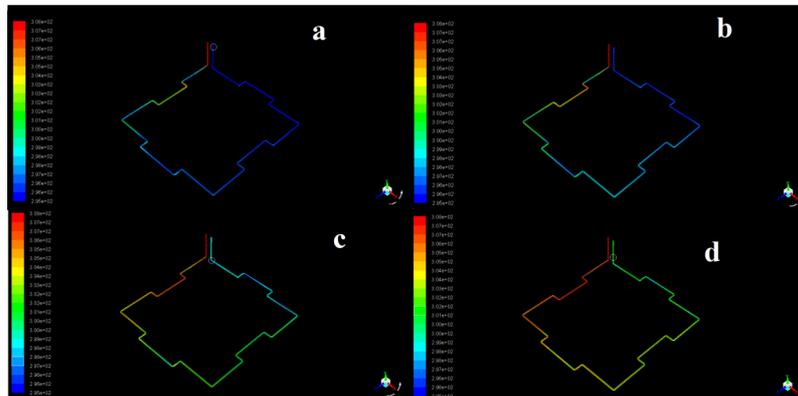


FIGURE 4.18 – Les iso-surfaces de ZigZag en Cu avec a)0,1 b)0,2 c)0,5 d)1 Kg/s.

La figure 4.16 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC. D'où on peut tirés les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.16.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,0236(K), cette dernière est obtenue à 56

m de l'entrée de l'échangeur.

- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.16.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 296,6907(K), cette dernière est obtenue à 68 m de l'entrée de l'échangeur.
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure 4.16.c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 299,9035(K).
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure 4.16.d, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 304,4044(K).

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)	Longueur (m)
ZigZag	PVC	0.1	295,0236	56
		0.2	296,6907	68
		0.5	299,9035	77
		1	304,4044	77

TABLE 4.7 – Température de sortie du ZigZag en PVC en fonction des débits.

La figure 4.17 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en Al. D'où on peut tirer les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.17.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,0098 (K), cette dernière est obtenue à 27 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.17.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 296,6875(K), cette dernière est obtenue à 56 m de l'entrée de l'échangeur.
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure 4.17.c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 299(K).
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure 4.17.d, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 301(K).

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)	Longueur (m)
ZigZag	Al	0.1	295,0098	27
		0.2	296,6875	56
		0.5	299	77
		1	301	77

TABLE 4.8 – Température de sortie du ZigZag en Al en fonction des débits.

La figure 4.18 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en Cu. D'où on peut tirer les remarques suivantes :

- a) Pour le débit de 0.1 kg/s, figure 4.18.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 295,0098 (K), cette dernière est obtenue à 22 m de l'entrée de l'échangeur.
- b) Pour le débit de 0.2 kg/s, figure 4.18.b, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 296,6875 (K), cette dernière est obtenue à 45 m de l'entrée de l'échangeur.
- c) Pour le débit de 0.5 kg/s, figure 4.18.c, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 297,5184 (K), cette dernière est obtenue à 73 m de l'entrée de l'échangeur.
- d) Pour le débit de 1 kg/s, figure 4.18.a, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 300,6082 (K).

Configurations	Matériaux	Débits	Température de sortie (K)	Longueur (m)
ZigZag	Cu	0.1	295,0098	22
		0.2	296,6875	45
		0.5	297,5184	73
		1	300,6082	77

TABLE 4.9 – Température de sortie du ZigZag en Cu en fonction des débits.

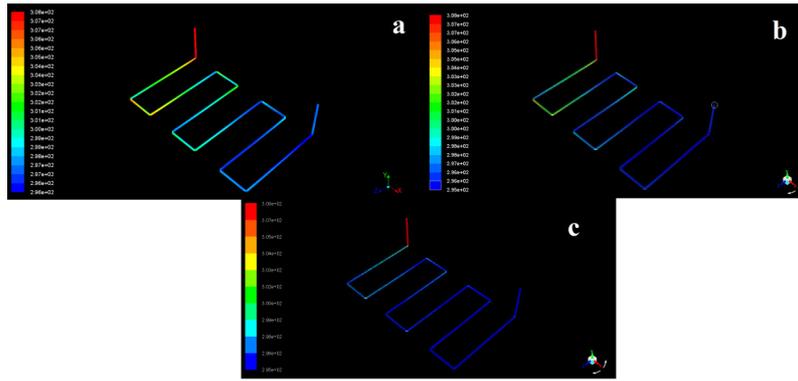


FIGURE 4.19 – Les iso-surfaces de Serpentin pour un débit de 0,1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.19 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.1 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 295,5911 (K), 295,01361 (K) et 295 (K). Ces températures sont atteintes sur des longueurs de l'échangeur en PVC, Al et Cu, respectivement, 56, 28 et 25 m.

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)	Longueur (m)
Serpentin	0,1	PVC	295,5911	56
		Al	295,01361	28
		Cu	295	25

TABLE 4.10 – Température de sortie du Serpentin pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

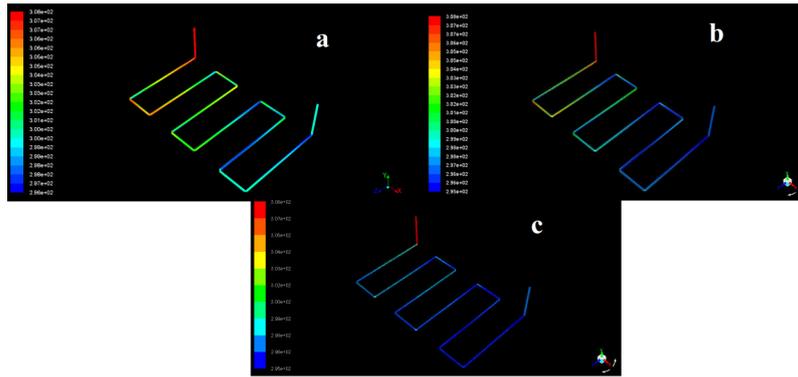


FIGURE 4.20 – Les iso-surfaces de Serpentin pour un débit de 0,2 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.20 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.2 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 297,4375 (K), 296,9862 (K) et 295,01 (K). Ces températures sont atteintes sur des longueurs de l'échangeur en PVC, Al et Cu, respectivement, 69, 49 et 40 m.

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)	Longueur (m)
Serpentin	0,2	PVC	297,4375	69
		Al	296,9862	49
		Cu	295,01	40

TABLE 4.11 – Température de sortie du Serpentin pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

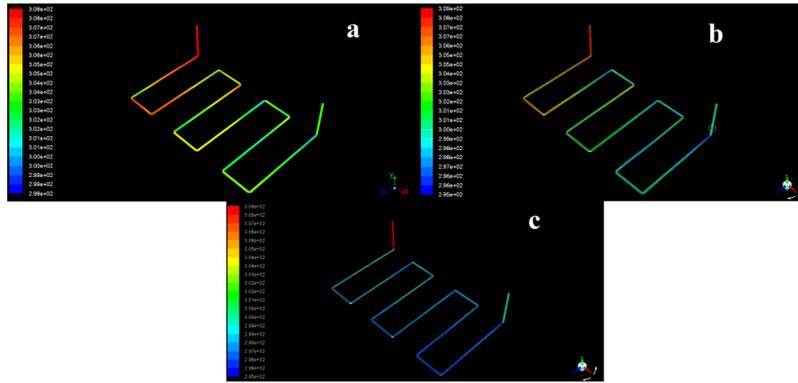


FIGURE 4.21 – Les iso-surfaces de Serpentin pour un débit de 0,5 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.21 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.1 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 302,5486 (K), 299,5631 (K) et 295,04 (K). Ces températures sont atteintes sur des longueurs de l'échangeur en PVC, Al et Cu, respectivement, 77, 77 et 73 m.

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)	Longueur (m)
Serpentin	0,5	PVC	302,5486	77
		Al	299,5631	77
		Cu	295,04	73

TABLE 4.12 – Température de sortie du Serpentin pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

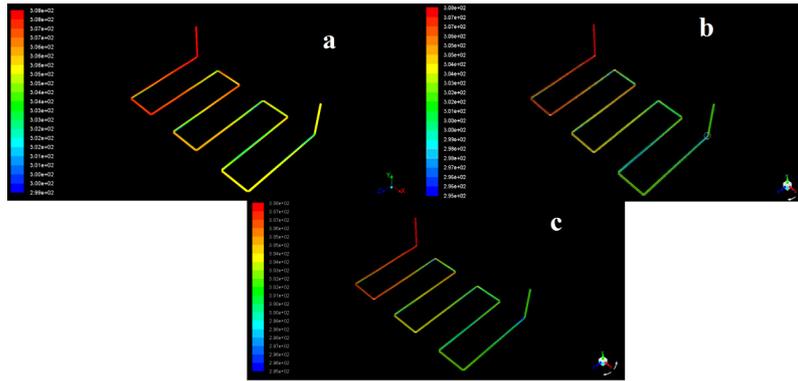


FIGURE 4.22 – Les iso-surfaces de Serpentin pour un débit de 1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.22 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.1 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 304,6556 (K), 300,5631 (K) et 296,4 (K). Ces températures sont atteintes sur le long de l'échangeur.

Configurations	Débits (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)	Longueur (m)
Serpentin	1	PVC	304,6556	77
		Al	300,5631	77
		Cu	296,4	77

TABLE 4.13 – Température de sortie du Serpentin pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

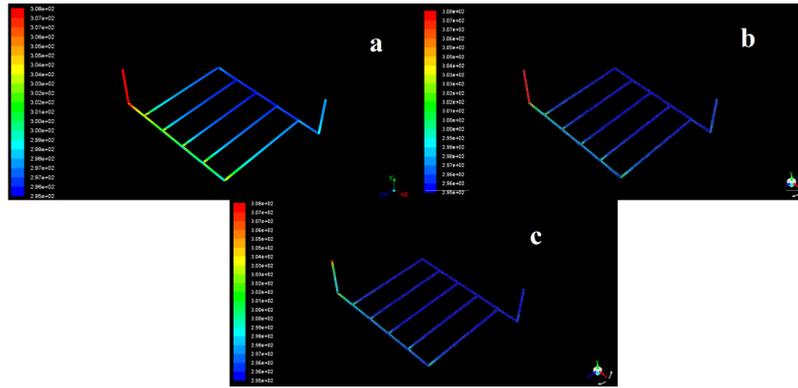


FIGURE 4.23 – Les iso-surfaces de Collecteur pour un débit de 0,1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.23 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.1 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 295,8058 (K), 295,0029 (K) et 295,0098 (K).

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)
Collecteur	0,1	PVC	295,8058
		Al	295,0029
		Cu	295,0098

TABLE 4.14 – Température de sortie du Collecteur pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

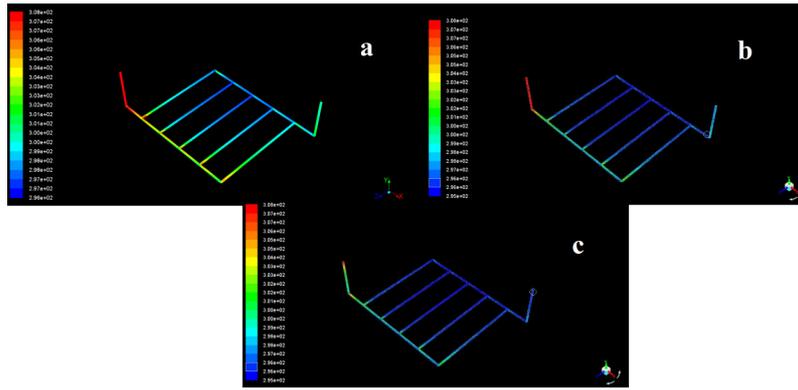


FIGURE 4.24 – Les iso-surfaces de Collecteur pour un débit de 0,2 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.24 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.2 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 298,4126 (K), 296,311 (K) et 295,0074 (K)

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)
Collecteur	0,2	PVC	298,4126 (K)
		Al	296,311
		Cu	295,0074

TABLE 4.15 – Température de sortie du Collecteur pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

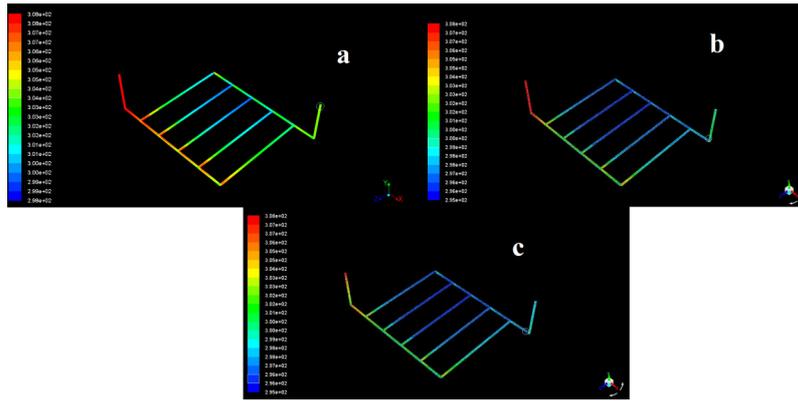


FIGURE 4.25 – Les iso-surfaces de Collecteur pour un débit de 0,5 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.25 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.5 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 302,5094 (K), 298,6397 (K) et 296,0933 (K)

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)
Collecteur	0,5	PVC	302,5094 (K)
		Al	298,6397
		Cu	296,0933

TABLE 4.16 – Température de sortie du Collecteur pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

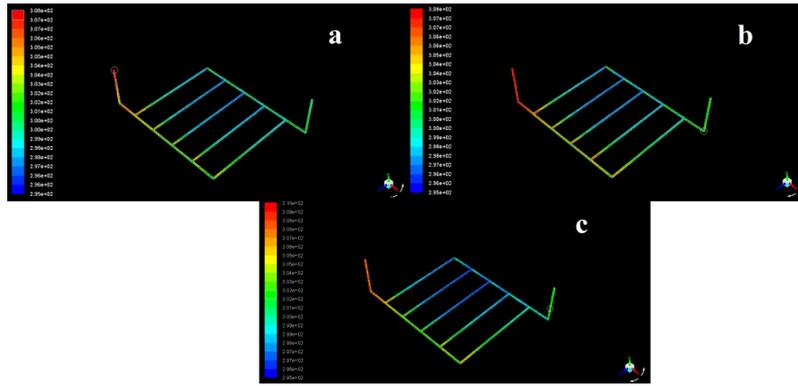


FIGURE 4.26 – Les iso-surfaces de Collecteur pour un débit de 1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.26 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 1 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 303,9317 (K), 301,6019 (K) et 299,0845 (K)

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)
Collecteur	1	PVC	303,9317 (K)
		Al	301,6019
		Cu	299,0845

TABLE 4.17 – Température de sortie du Collecteur pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

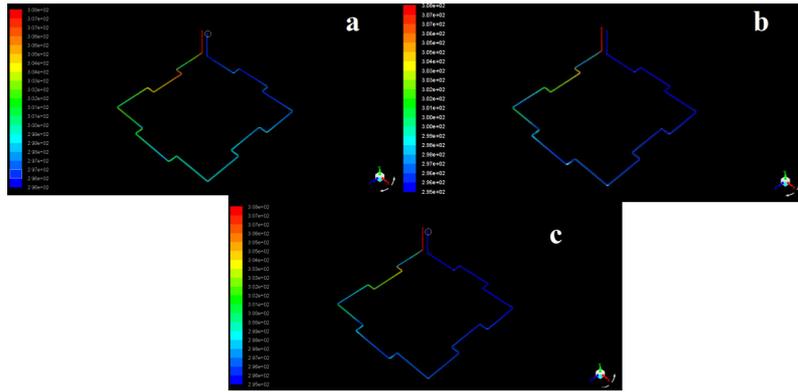


FIGURE 4.27 – Les iso-surfaces de ZigZag pour un débit de 0,1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.27 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.1 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 295,0236 (K), 295,0098 (K) et 295,0098 (K). Ces températures sont atteintes sur des longueurs de l'échangeur en PVC, Al et Cu, respectivement, 56, 27 et 22 m.

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)	Longueur (m)
ZigZag	0,1	PVC	295,0236	56
		Al	295,0098	27
		Cu	295,0098	22

TABLE 4.18 – Température de sortie du ZigZag pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

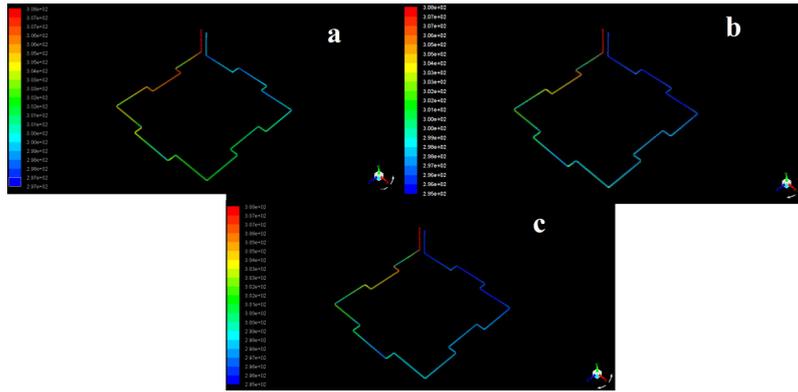


FIGURE 4.28 – Les iso-surfaces de ZigZag pour un débit de 0,2 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.28 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.2 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 296,6907 (K), 296,6875 (K) et 295,0423 (K). Ces températures sont atteintes sur des longueurs de l'échangeur en PVC, Al et Cu, respectivement, 68, 56 et 45 m.

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)	Longueur (m)
ZigZag	0,2	PVC	296,6907	68
		Al	296,6875	56
		Cu	295,0423	45

TABLE 4.19 – Température de sortie du ZigZag pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

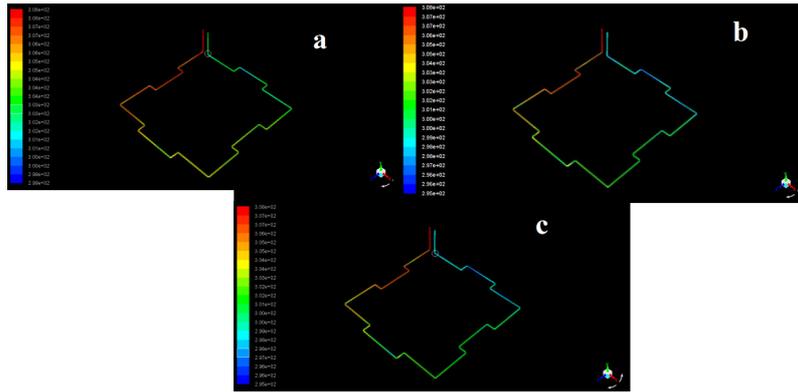


FIGURE 4.29 – Les iso-surfaces de ZigZag pour un débit de 0,5 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.29 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.5 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 299,9035 (K), 299 (K) et 297,5184 (K). Ces températures sont atteintes sur des longueurs de l'échangeur en PVC, Al et Cu, respectivement, 77, 77 et 73 m.

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)	Longueur (m)
ZigZag	0,5	PVC	299,9035	77
		Al	299	77
		Cu	297,5184	73

TABLE 4.20 – Température de sortie du ZigZag pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

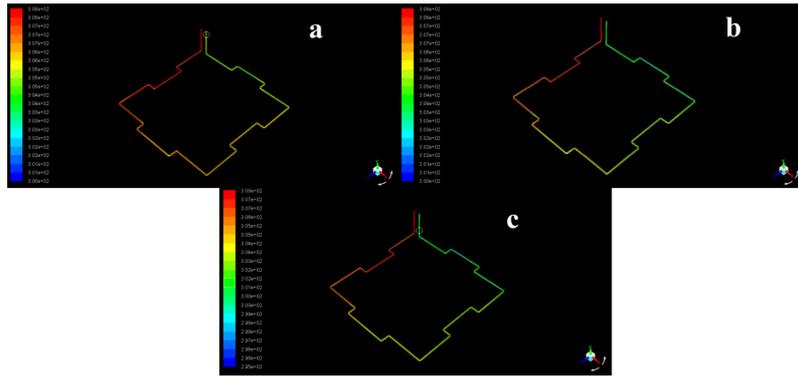


FIGURE 4.30 – Les iso-surfaces de ZigZag pour un débit de 1 kg/s avec a) PVC b) Al c) Cu.

La figure 4.30 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) de l'échangeur de forme serpentins pour un débit constant égal à 1 kg/s. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, Al et Cu sont respectivement, 304,4044 (K), 301 (K) et 300,6082 (K). Ces températures sont atteintes sur le long de l'échangeur.

Configurations	Débit (Kg/s)	Matériaux	Température de sortie (K)	Longueur (m)
ZigZag	1	PVC	304,4044	77
		Al	301	77
		Cu	300,6082	77

TABLE 4.21 – Température de sortie du ZigZag pour un débit fixe et en fonction du matériaux a)PVC b)Al c)Cu.

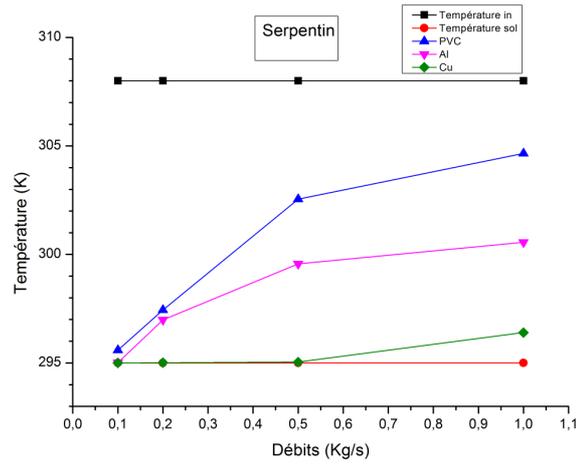


FIGURE 4.31 – Température de sortie du Serpentin en fonction du débits.

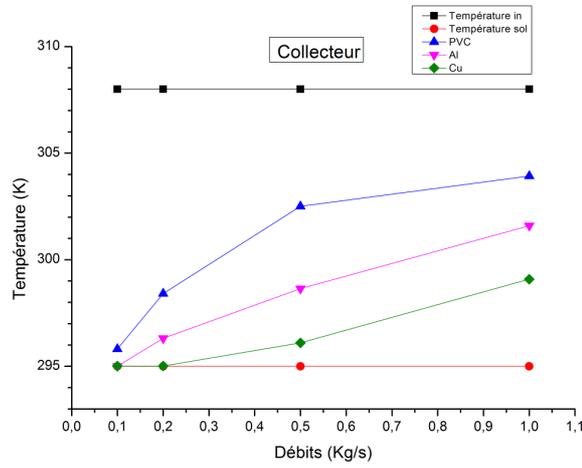


FIGURE 4.32 – Température de sortie du Collecteur en fonction du débits.

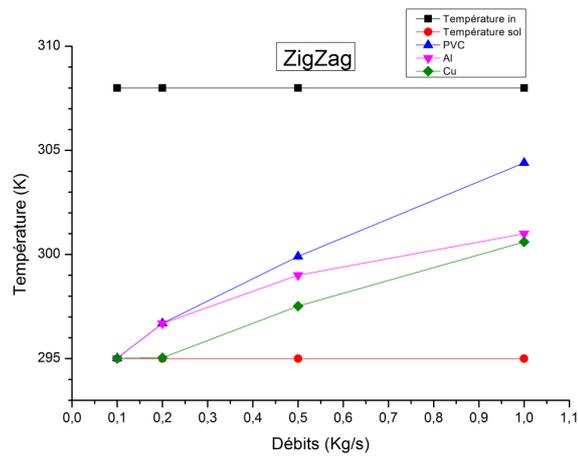


FIGURE 4.33 – Température de sortie du ZigZag en fonction du débits.

Dans les figures 4.31, 4.32 et 4.33 on trace les graphes des températures de l'eau à la sortie des échangeurs (Serpentin, Collecteur et Zigzag) obtenues à partir des calculs via le logiciel Fluent pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) en fonction du débit. On enregistre les remarques suivantes :

- a) Pour un débit faible de 0,1 kg/s, les températures de l'eau obtenues sont les mêmes pour les échangeurs en Cu, Al et l'échangeur en ZigZag PVC.
- b) Au-delà du débit 0,2 kg/s, les températures de l'eau commencent à se distinguer pour toutes les configurations et les différents matériaux de construction. On remarque aussi quelle garde le classement de diminution pour les différents matériaux c.-à-d., l'échangeur en Cu puis celui en Al puis celui en PVC.

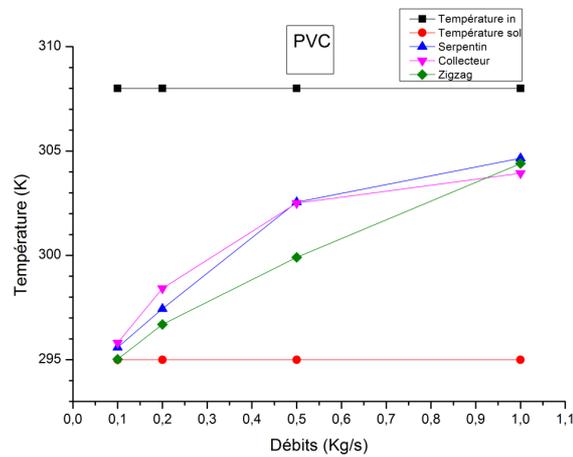


FIGURE 4.34 – Température de sortie en fonction du débits pour les configurations en PVC.

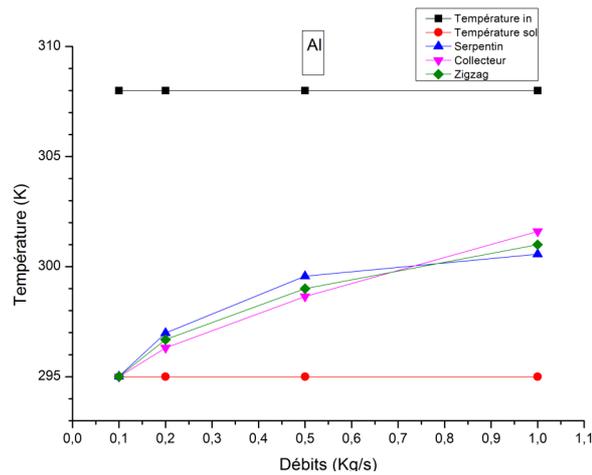


FIGURE 4.35 – Température de sortie en fonction du débits pour les configurations en Al.

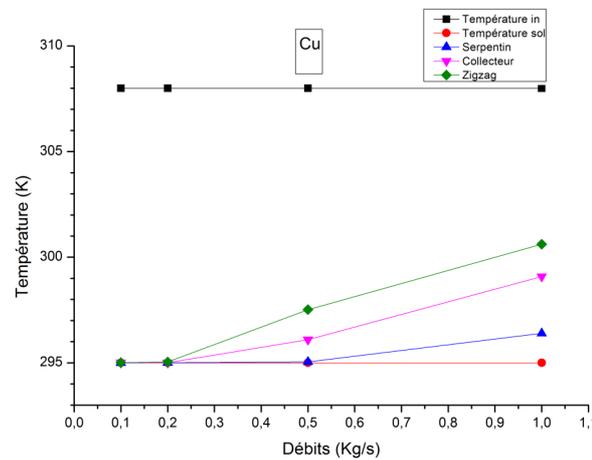


FIGURE 4.36 – Température de sortie en fonction du débits pour les configurations en Cu.

Dans la figure 4.34, 4.35 et 4.36 on trace les graphes des températures de l'eau à la sortie des échangeurs (Serpentin, Collecteur et Zigzag) obtenues à partir des calculs via le logiciel Fluent pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) en fonction du débit. On enregistre les remarques suivantes :

- a) Pour un débit faible de 0,1 kg/s, les températures de l'eau obtenues sont les mêmes pour toutes les configurations, sauf les échangeurs en serpentin en PVC et collecteur en PVC.
- b) Jusque au débit de 0,2 kg/s et pour le cuivre, les températures de l'eau obtenues sont les mêmes pour toutes les configurations. On remarque aussi quelle garde le

classement de diminution pour les différents configurations au-delà du débit 0.2 kg/s.

c) Au-delà du débit 0,5 kg/s et pour les échangeurs en PVC et Al, les températures de l'eau commencent à se distinguer pour toutes les configurations. On remarque aussi quelle change le classement de diminution.

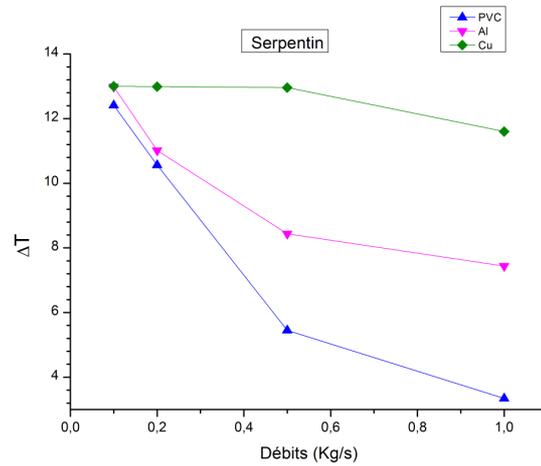


FIGURE 4.37 – L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour le Serpentin.

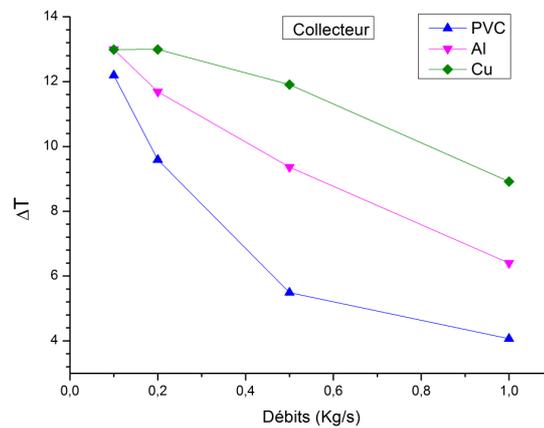


FIGURE 4.38 – L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour le Collecteur.

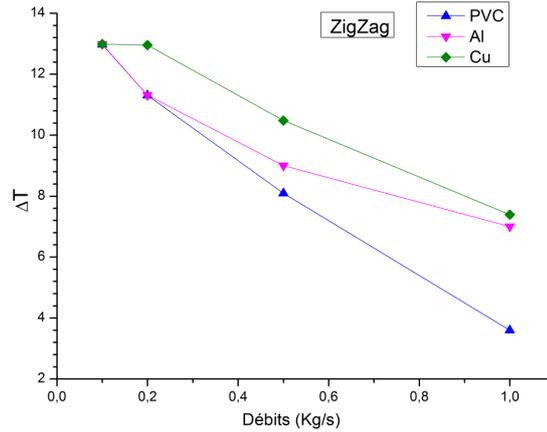


FIGURE 4.39 – L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour le ZigZag.

Dans la figure 4.37, 4.38 et 4.39, on trace les graphes des écarts de température de l'eau à la sortie des échangeurs (Serpentin, Collecteur et Zigzag) obtenues à partir des calculs via le logiciel Fluent pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) en fonction du débit. On enregistre les remarques suivantes : a) Pour un débit faible de 0,1 kg/s, les écarts de températures de l'eau obtenues sont les mêmes pour tous les échangeurs, sauf pour le collecteur en PVC et le serpentin en PVC. b) Au-delà du débit 0,2 kg/s, les écarts de température de l'eau commencent à se distinguer pour toutes les configurations et les différents matériaux de construction. On remarque aussi quelle garde le classement de diminution pour les différents matériaux c.-à-d., l'échangeur en Cu puis celui en Al puis celui en PVC.

Dans la figure 4.40, 4.41 et 4.42, on trace les graphes des écarts de température, DT, de l'eau à la sortie des échangeurs (Serpentin, Collecteur et Zigzag) obtenues à partir des calculs via le logiciel Fluent pour différents matériaux (PVC, Al et Cu) en fonction du débit. On enregistre les remarques suivantes : a) Pour un débit faible de 0,1 kg/s, les températures de l'eau obtenues sont les mêmes pour tous les matériaux, sauf les échangeurs en PVC. b) Au-delà du débit 0,1 kg/s et pour les échangeurs en PVC et Al, les écarts de température, DT, de l'eau commencent à se distinguer pour toutes les configurations. On remarque aussi quelle change le classement de diminution à partir de 0,7 kg/s pour les échangeurs en PVC et de 0,9 kg/s pour les échangeurs en Al. c) Jusqu'à'au débit de 0,2 kg/s et pour le cuivre, les écarts de

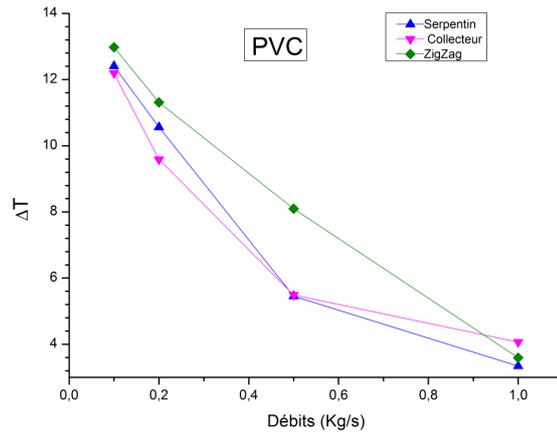


FIGURE 4.40 – L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour des configurations en PVC.

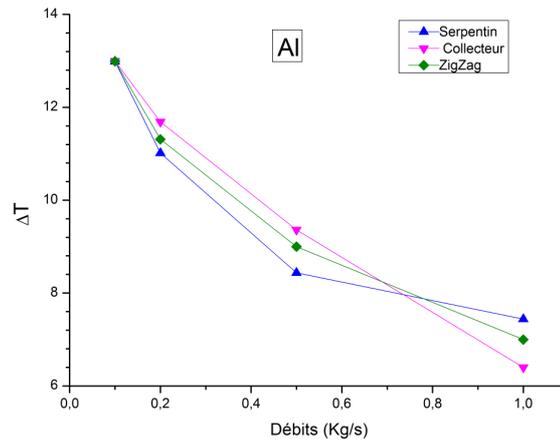


FIGURE 4.41 – L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour des configurations en Al.

température,  $DT$ , de l'eau obtenues sont les mêmes pour toutes les configurations. On remarque aussi quelle garde le classement de diminution pour les différentes configurations au-delà du débit 0,2 kg/s.

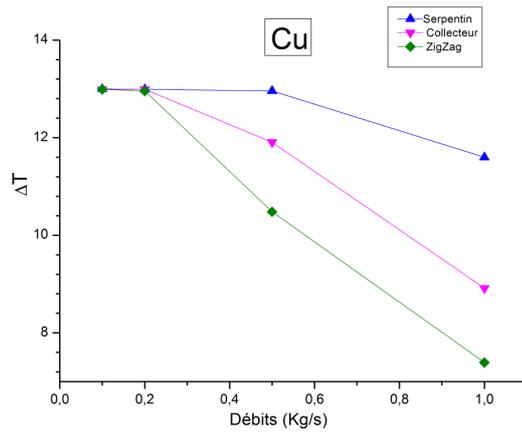


FIGURE 4.42 – L'écart de température entre sortie et entre en fonction des débits pour des configurations en Cu.

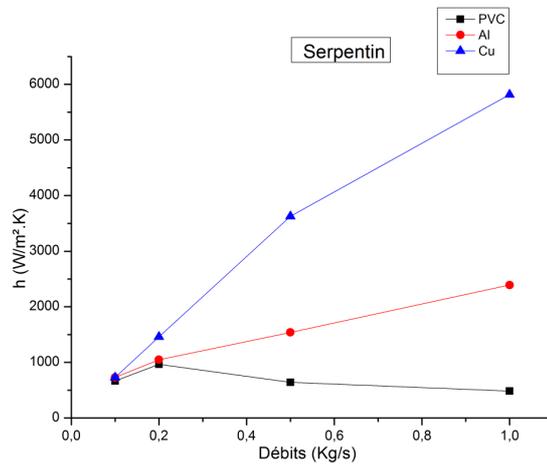


FIGURE 4.43 – Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour le Serpentin.

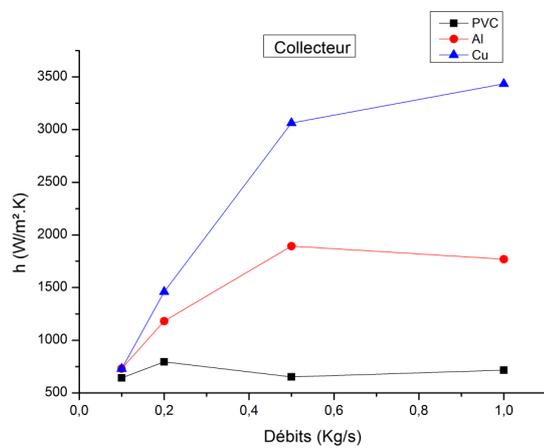


FIGURE 4.44 – Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour le Collecteur.

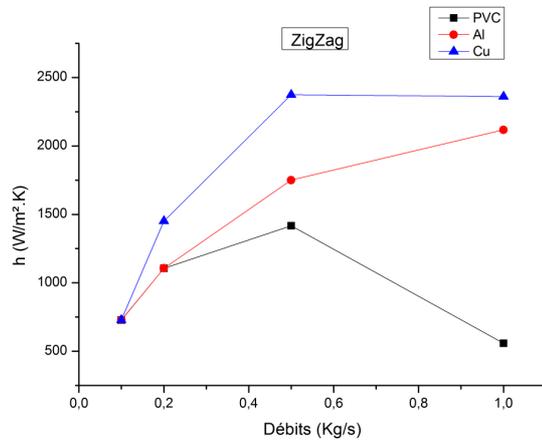


FIGURE 4.45 – Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour le ZigZag.

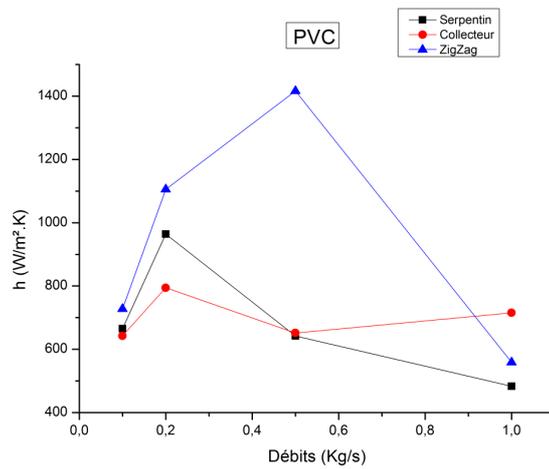


FIGURE 4.46 – Le coefficient d'échange h en fonction du débit pour les configurations en PVC.

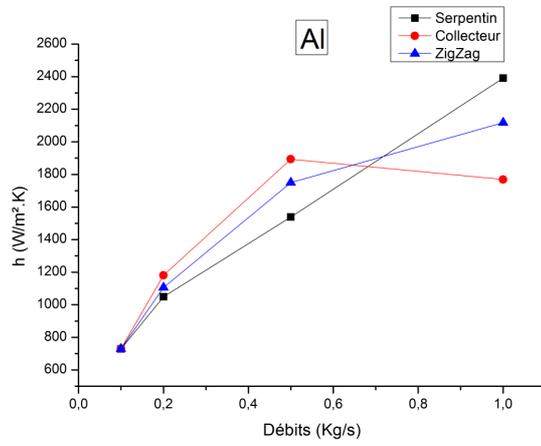


FIGURE 4.47 – Le coefficient d'échange  $h$  en fonction du débit pour les configurations en Al.

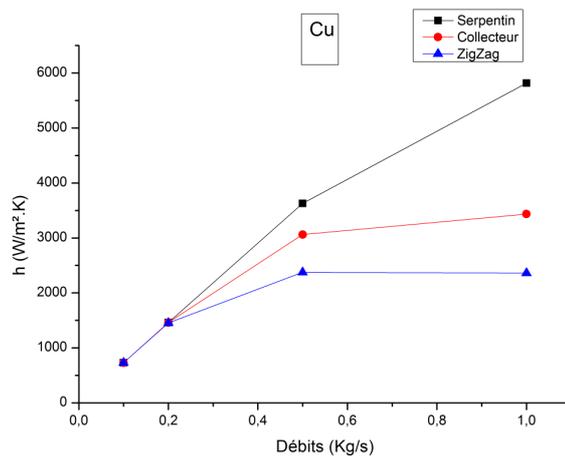


FIGURE 4.48 – Le coefficient d'échange  $h$  en fonction du débit pour les configurations en Cu.

## 4.6 Validations des résultats

### 4.6.1 Effet du débit

Dans cette section, nous allons voir l'un des paramètres les plus influent sur l'écoulements du fluide et celui de la chaleur. D'après les travaux de (Jakhar et al.) [44] et (Misra et al.) [45], l'augmentation du débit d'écoulement (augmentation de la vitesse de l'écoulement) entraine une diminution du taux de transfert de chaleur dans l'échangeur.

Pour un diamètre de 0,2 m des tubes de l'échangeur, quater débits différents à savoir 0,1, 0,2, 0,5 et 1 kg/s ont été pris en compte pour analyser l'effet du débit sur la température de sortie de l'échangeur.

### Serpentin en PVC

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.1 et la figure 4.31 et en comparaison avec l'intervalle de température de référence, ITR, entre 22 et 25°C (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente, la même chose pour la longueur des tubes.
- Au-delà de 0,25 kg/s, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C.
- 0,25 kg/s est le débit optimal pour cette configuration de 77 m de longueur en PVC qui nous aide à avoir une température adéquate et satisfait celle du cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.46, on remarque qu'au-delà de 0,2 kg/s le débit est inversement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois que le débit augment (la vitesse de l'écoulement augmente) le coefficient d'échange  $h$  diminue ; ce qui explique l'augmentation de la température de l'eau à la sortie de l'échangeur.

## Serpentin en Al

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.2 et la figure 4.31 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente, la même chose pour la longueur des tubes.
- Au-delà de 0,35 kg/s, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C.
- 0,35 kg/s est le débit optimal pour cette configuration de 77 m de longueur en Al qui nous aide à avoir une température adéquate et satisfait celle du cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.47 on remarque que le débit est directement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois, le débit augment, la vitesse de l'écoulement augmente le coefficient d'échange  $h$  augment.

## Serpentin en Cu

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.3 et la figure 4.31 et en comparaison avec ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente, la même chose pour la longueur des tubes.
- pour cette configuration de 77 m en Cu et avec un débit de 1 kg/s la température de l'eau à la sortie est adéquate et satisfait le cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.48 on remarque que le débit est directement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois que le débit augment (la vitesse

de l'écoulement augmente) le coefficient d'échange  $h$  augment.

## Collecteur en PVC

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.4 et la figure 4.32 et en comparaison avec ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente.
- Au-delà de 0,2kg/s, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C.
- 0,2 kg/s est le débit optimal pour cette configuration de 77 m de longueur en PVC qui nous aide à avoir une température adéquate et satisfait celle du cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.46 on remarque qu'au-delà de 0,2 kg/s, le débit est inversement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois, le débit augment, la vitesse de l'écoulement augment le coefficient d'échange  $h$  diminue (faible diminution); ce qui explique l'augmentation de la température de l'eau à la sortie.

## Collecteur en Al

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.5 et la figure 4.32 et en comparaison avec ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente.
- Au-delà de 0,35 kg/s, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C.
- 0,35 kg/s est le débit optimal pour cette configuration de 77 m de longueur en Al qui nous aide à avoir une température adéquate et satisfait celle du

cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.47 on remarque que le débit est directement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois, le débit augment, la vitesse de l'écoulement augment le coefficient d'échange  $h$  augment.

## Collecteur en Cu

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.6 et la figure 4.32 et en comparaison avec ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente.
- Au-delà de 0,75 kg/s, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C.
- 0,75 kg/s est le débit optimal pour cette configuration de 77 m de longueur en Cu qui nous aide à avoir une température adéquate et satisfait celle du cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.48 on remarque que le débit est directement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois, le débit augment, la vitesse de l'écoulement augment le coefficient d'échange  $h$  augment.

## ZigZag en PVC

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.7 et la figure 4.33 et en comparaison avec ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente, la même chose pour la longueur des tubes.

- Au-delà de 0,3 kg/s, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C.
- 0,3 kg/s est le débit optimal pour cette configuration de 77 m de longueur en PVC qui nous aide à avoir une température adéquate et satisfait celle du cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.46 on remarque qu'au-delà de 0,5 kg/s, le débit est inversement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois, le débit augment, la vitesse de l'écoulement augment le coefficient d'échange  $h$  diminue ; ce qui explique l'augmentation de la température de l'eau à la sortie.

## **ZigZag en Al**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.8 et la figure 4.33 et en comparaison avec ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente, la même chose pour la longueur des tubes.
- Au-delà de 0,35 kg/s, la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C.
- 0,35 kg/s est le débit optimal pour cette configuration de 77 m de longueur en Al qui nous aide à avoir une température adéquate et satisfait celle du cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.47 on remarque que le débit est directement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois, le débit augment, la vitesse de l'écoulement augment le coefficient d'échange  $h$  augment.

## ZigZag en Cu

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.9 et la figure 4.33 et en comparaison avec ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que :

- Le débit est directement proportionnel avec la température de sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augment la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente, la même chose pour la longueur des tubes.
- 0,6 kg/s est le débit optimal pour cette configuration de 77 m de longueur en Cu qui nous aide à avoir une température adéquate et satisfait celle du cahier de charge. Autrement dit, une surface d'échange minimale pour un maximum de débit.

D'après la figure 4.48 on remarque que le débit est directement proportionnel avec le coefficient d'échange  $h$ , c.-à-d., à chaque fois, le débit augment, la vitesse de l'écoulement augmente le coefficient d'échange  $h$  augment.

### 4.6.2 Effet du matériau

Dans cette section, nous allons voir l'influence du matériau de construction des tube de l'échangeur sur le transfert de la chaleur.

Pour un diamètre de 0,2 m des tubes de l'échangeur, trois matériaux différents à savoir PVC, Al et Cu ont été pris en compte pour analyser l'effet du matériaux sur la température de sortie de l'échangeur(le taux de transfert de chaleur).

#### Serpentin (0,1 kg/s)

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.10 et la figure 4.31 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour tous les matériaux, on a pu atteindre la température de l'ITR, mais pour des longueurs différentes ; à savoir pour celle en Cu est de 25 m, en Al est de 28 m et en PVC est de 56 m.

### **Serpentin (0,2 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.11 et la figure 4.31 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour tous les matériaux, on a pu atteindre la température de l'ITR, mais pour des longueurs différentes ; à savoir pour celle en Cu est de 40 m, en Al est de 49 m et en PVC est de 69 m.

### **Serpentin (0,5 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.12 et la figure 4.31 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour le cuivre on a pu atteindre la température de l'ITR après une longueur de 73 m. Contrairement, pour le PVC et l'Al la température à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C (condition non-satisfait).

### **Serpentin (1 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.13 et la figure 4.31 et en comparaison avec l'ITR entre 22 et 25°C (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour le cuivre on a pu atteindre la température de l'ITR après une longueur de 77 m. Contrairement, pour le PVC et l'Al la température à la sortie de l'échangeur est supérieur à 25°C (condition non-satisfaite).

### **Collecteur (0,1 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.14 et la figure 4.32 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour tous les matériaux, on a pu atteindre la température de l'ITR.

### **Collecteur (0,2 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.15 et la figure 4.32 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers),

on remarque que : Pour le collecteur en Cu et celui en Al, on a pu atteindre la température de l'ITR. Contrairement, la température à la sortie du collecteur en PVC est supérieur à 25°C (condition non-satisfaite).

### **Collecteur (0,5 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.16 et la figure 4.32 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour le collecteur en Cu et celui en Al, on a pu atteindre la température de l'ITR. Contrairement, la température à la sortie du collecteur en PVC est supérieur à 25°C (condition non-satisfaite).

### **Collecteur (1 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.17 et la figure 4.32 et en comparaison avec ITR entre 22 et 25°C (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour tous les matériaux on n'a pas pu atteindre à la température l'ITR (condition non-satisfaite).

### **ZigZag (0,1 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.18 et la figure 4.33 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour tous les matériaux, on a pu atteindre la température de l'ITR, mais pour des longueurs différentes ; à savoir pour celle en Cu est de 22 m, en Al est de 27 m et en PVC est de 56 m.

### **ZigZag (0,2 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.19 et la figure 4.33 et en comparaison avec l'ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour tous les matériaux, on a pu atteindre la température de l'ITR, mais pour des longueurs différentes ; à savoir pour celle en Cu est de 45 m, en Al est de 56 m et en PVC est de 68 m.

### **ZigZag (0,5 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.20 et la figure 4.33 et en comparaison avec ITR entre 22 et 25°C (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour tous les matériaux on pu atteinte à la température de références mais sur des longueurs différentes Cu 73 m, 77 m et PVC 77 m.

### **ZigZag (1 kg/s)**

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.21 et la figure 4.33 et en comparaison avec ITR (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Pour tous les matériaux on pu atteinte à la température de références mais sur des longueurs différentes Cu 77 m, 77 m et PVC 77 m.

## **4.7 Comparaisons générales**

Dans la partie discussions, nous avons exposé les résultats obtenus lors des calculs pour trois variantes à savoir ; la configuration de l'échangeur (Serpentin, Collecteur et ZigZag), le matériau de construction des tubes (PVC, Al et Cu) et les débits d'écoulement (0,1, 0,2, 0,5 et 1 kg/s).

A fin de déterminer la meilleure configuration de l'échangeur géothermal 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 matériau :**

les configurations construites en cuivre sont les plus efficaces que celles construites, respectivement, en l'Aluminium et en PVC. Mais de points de vue disponibilité et cout, il n'excite pas dans le marche un tube de diamètre 0,2 m en cuivre ou en aluminium, en plus de leurs coûts élevés. Contrairement, les tubes en PVC sont disponible et moins cher.

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

Pour les faibles débits ( $\geq 0,2$  kg/s), on obtient des résultats fiables et satisfaisantes pour toutes les configurations construites avec différents matériaux.

Au-delà de 0,2 kg/s, on obtient des résultats fiables et satisfaisantes que pour des échangeurs construits en cuivre.

### 3. Comparaison entre les configurations :

D'après les résultats obtenus, la comparaison précédentes (débits et matériaux) et pour les faibles débits, les meilleures configurations sont celles construites en PVC. Elles reflètent des écarts de température les plus satisfaisantes et qui répondent aux exigences du cahier de charge (les températures de l'ITR). Dans ces conditions, la meilleure configuration est celle de forme ZigZag, d'où on a enregistré pour un débit égal à 0,35 kg/s (débit max) un écart de température de 12°C, c.-à-d., une température de sortie de l'échangeur égale à 25°C (conforme à l'ITR).

En seconde classe vient la configuration de forme Serpentin, où on a enregistré pour un débit égal à 0,25 kg/s (débit max) un écart de température de 12°C, c.-à-d., une température de sortie de l'échangeur égale à 25°C (conforme à l'ITR).

Pour la configuration de forme Collecteur, on a enregistré pour un débit égal à 0,15 kg/s (débit max) un écart de température de 12°C, c.-à-d., une température de sortie de l'échangeur égale à 25°C (conforme à l'ITR).

### 4. Autres points de comparaisons :

Lors de la réalisation de l'échangeur géothermale eau/sol, les points essentielles à tenir en compte :

- Encombrement de la configuration de l'échangeur.
- La difficultés et le cout très élevé de la réalisation de la fosse destinée à enterrer l'échangeur.
- Le problème de saturation thermique du sol.
- Optimisation de la surface du sol occupé par l'échangeur ; possibilité d'exploiter cette surface.

En s'appuyant sur les points de comparaisons cité ci-dessus, la configuration de forme ZigZag (forme proposée par cette étude) s'avère la mieux adapté pour satisfaire le compromis (quantité d'eau/température d'eau) destiné à l'irrigation agraire.

# Conclusion générale

Ce travail constitue une contribution à l'étude de l'exploitation d'un échangeur géothermale eau/sol pour le refroidissement des eaux d'irrigations des palmiers dattier dans la zone de Biskra.

Cette étude valorise le premier sujet de projet de fin d'étude, PFE, master à l'université Mohamed Khider de Biskra qui traite le 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. L'objectif principal traité par cette étude était la diminution de la température des eaux d'irrigation du palmier dattier.

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 (Géothermie, échangeur eau/sol, irrigation, palmier dattier, état de l'art). 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 trois cas d'étude d'échangeur géothermale eau/sol, dont on a fait combiner la configuration (Serpentin, Collecteur et ZigZag), les matériaux de construction (PVC, Aluminium et Cuivre) et les débits d'écoulement (0.1, 0.2, 0.5 et 1 kg/s). Suite aux résultats obtenus et à la comparaison établie des différentes variantes d'étude selon les exigences du cahier de charge (les températures de l'ITR), nous avons pu conclure :

les meilleures configurations sont celles construites en PVC qui reflètent des écarts de température les plus satisfaisantes et pour les faibles débits d'écoulements.

Dans ces conditions et par ordre d'efficacité, pour la configuration de forme

ZigZag, on a enregistré pour un débit égal à 0,35 kg/s (débit max) un écart de température de 12°C, c.-à-d., une température de sortie de l'échangeur égale à 25°C (conforme à l'ITR).

Pour la configuration de forme Serpentin, on a enregistré pour un débit égal à 0,25 kg/s (débit max) un écart de température de 12°C, c.-à-d., une température de sortie de l'échangeur égale à 25°C (conforme à l'ITR).

Pour la configuration de forme Collecteur, on a enregistré pour un débit égal à 0,15 kg/s (débit max) un écart de température de 12°C, c.-à-d., une température de sortie de l'échangeur égale à 25°C (conforme à l'ITR).

En s'appuyant sur les points de comparaisons cités dans la section 4.7, la configuration de forme ZigZag (forme proposée par cette étude) s'avère la mieux adaptée pour satisfaire le compromis (quantité d'eau/température d'eau) destiné à l'irrigation agricole.

A travers cette étude, nous avons pu élaborer un brevet dont le titre **“Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source destinée principalement à l'irrigation.”**, annexe A.

A fin d'approfondir et de valider les propositions et les résultats numériques obtenus, nous pouvons citer quelques perspectives :

- Pour mieux comprendre le comportement transitoire du transfert de chaleur dans les échangeurs géothermiques eau/sol et du sous-sol, faut tenir en compte le paramètre temporelle.
- Travailler sur les trois axes tracés 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. et celle du sol qui entoure les tubes de l'échangeur.
- 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 technoéconomique sur l'installation complète.
- Valoriser le brevet par sa réalisation.

# Annexe A

# Annexe B

# Bibliographie

- [1] Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., & Heibloem, M. (1990). Méthodes d'irrigation. FAO, Italy
- [2] TourerN, G. "(1967)."Le palmier dattier culture et production. " Al awamia ".
- [3] Benfateh, H. (2009). Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- [4] Naili, N., S. Kooli, and A. Farhat. "Optimisation analytique et validation expérimentale d'un échangeur enterré." *Revue des Energies Renouvelables* 13.3 (2010) : 525-535.
- [5] Belloufi, Y.,(2017) Etude théorique et expérimentale de l'exploitation de la géothermie dans le réchauffement ou le refroidissement d'un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l'habitat. Diss. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [6] Nebbar, H., Hamdi, O., Moummi, N., & Brima, A. Etude de comportement thermique d'un échangeur enterré air/sol. Expérimentation de Biskra (Algérie).
- [7] Moummi, N., et al. "Le rafraîchissement par la géothermie : étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra." *Revue des Energies Renouvelables* 13.3 (2010) : 399-406.
- [8] Semmache, M. (2017). Etude des transferts de chaleur dans un échangeur enterré air/sol (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [9] Benhamza, M. E., Brima, A., Houda, S., et al. Étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur air/sol horizontal. Article, Le 3ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa, Algérie, 2014.

- [10] Hollmuller, P., Lachal, B., et Soutter, C., (2000) Serre avec Stockage de Chaleur par Tubes Enterrés : Analyse Energétique, Rapport Interne, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève.
- [11] Hollmuller, P., Lachal, B. M. (2005). Rafraîchissement par collecteur souterrain à eau, bâtiment Perret à Satigny (Ge).
- [12] Ozgener, O., et Arif H.(2005). "Analyse de performance expérimentale d'un système de chauffage à effet de serre avec pompe à chaleur géothermique à assistance solaire." *Énergie et bâtiments* 37.1 : 101-110.
- [13] Naili, N., Hazami, M., Lazaar, M., et al. En 2009 (Valorisation de la géothermie en Tunisie : utilisation d'un échangeur eau/sol).
- [14] Naili, N., Yejjer, O., Hazami, M., et al. En 2010. (Etude expérimentale de la performance d'un échangeur enterré.)
- [15] Benhamou, M. et Draoui, B., Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar-Effet de la nature du sol. *Revue des Energies Renouvelables*, 2011, vol. 14, no 2, p. 219-228.
- [16] Yildiz, A., Onder O., and Leyla O., "Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell (PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling : An experimental study for low nergy architecture in Aegean Region." *Renewable energy* 44 (2012) : 281-287.
- [17] Nebbali, R. Simulation Numérique Du Comportement Dynamique D'un Echangeur Eau-Sol CCTC 2013 Paper Number 87 (1569695069).
- [18] Boughanmi, H., Lazaar, M., et Farhat, A., Echangeur Géothermique de Type Panier Intégré dans Un Système Energétique Sous Le Climat Tunisien. 2015.
- [19] 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.
- [20] Fontaine, P., Modélisation des systèmes géothermiques à boucles horizontales pour chauffer les bâtiments et prévenir la fonte du pergélisol. Diss. École Polytechnique de Montréal, 2010.
- [21] Lamarche, L., and Benoit B., "A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes." *Energy and Buildings* 39.2 (2007) : 188-198.

- [22] Mihalakakou, G., et al. "On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles." *Solar Energy* 60.3-4 (1997) : 181-190.
- [23] Chow, Tin Tai et al. "Estimation du profil de température du sol à Hong Kong à partir de variables climatiques." *Énergie et bâtiments* 43.12 (2011) : 3568-3575.
- [24] Badache, M., et al. "A new modeling approach for improved ground temperature profile determination." *Renewable Energy* 85 (2016) : 436-444.
- [25] Philippe, M., Développement et validation expérimentale de modèles d'échangeurs géothermiques horizontaux et verticaux pour le chauffage de bâtiments résidentiels. Diss. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010.
- [26] Dalhoum, A. (2016). Développement d'une nouvelle solution analytique pour la modélisation d'un échangeur géothermique hélicoïdal à boucle horizontale (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [27] Ghyselinck-Bardeau, M., and Willeumier, A., "Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse à basse énergie (nappes alluviales et thermalisme) dans la région Midi-Pyrénées." BRGM Report BRGM/RP-55888-FR. 2007.
- [28] Benchemsa, I. (2017). L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique.(Mémoire de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA).
- [29] Louali, Z. (2017). Etude d'un échangeur de chaleur destiné au rafraîchissement des locaux par géothermie (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [30] Nahi, K., et al. Application de la simulation numérique dans l'étude technique de la géothermie par nappes horizontale de tuyauterie appliquée à un projet immobilier mixte de commerces, bureaux et hôtel. 2017.
- [31] Bensalem, I. and Bouhenna, N., Étude de faisabilité de l'extension du périmètre irrigué de Maghnia.
- [32] Chikh, H. A. (2013). Etude de possibilité de création d'un périmètre d'irrigation a AIN EL HOUTZ
- [33] Ayers, Robert S., and Dennis W., Water quality for agriculture. Vol. 29. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.

- [34] Asano, Takashi, and Levine, A., D., "Wastewater reclamation, recycling, and reuse : An introduction." Wastewater reclamation and reuse 10 (1998) : 1-56.
- [35] DIRECTIVES OMS POUR, "L'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères." Volume II (2006).
- [36] Ferchichi, A. (2012). Contribution à l'évaluation des performances du périmètre irrigué de Ras Jbel, Université de Carthage.
- [37] Svendsen, M., and Leslie E., "Farmer's perspective on irrigation performance." Irrigation and Drainage Systems 4.4 (1990) : 385-402.
- [38] Site internet : [[http://www.canna.fr/videos/temperature\\_de\\_eau\\_pour\\_vos\\_plantes](http://www.canna.fr/videos/temperature_de_eau_pour_vos_plantes)] Consulté le 16 /05/2019 à 12 :30.
- [39] 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).
- [40] 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)
- [41] Ben Ameer, O. K. B. A. (2016). ETUDE DE L'IMPACT DU RAFRAICHISSEMENT DES FONTAINES D'EAU DANS LES MAISONS A PATIO, CAS DES ZONES SAHARIENNES (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [42] Versteeg, H., and Weeratunge M., An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method. Pearson education, 2007.
- [43] MODELISATION NUMERIQUE EN MECANIQUE DES FLUIDES PRISE EN MAIN ANSYS/FLUENT
- [44] Jakhar, S., Misra, R., Soni, M. S., & Gakkhar, N. (2016). Parametric simulation and experimental analysis of earth air heat exchanger with solar air heating duct. Engineering Science and Technology, an International Journal, 19(2), 1059-1066.
- [45] Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G. D., Mathur, J., & Aseri, T. K. (2013). CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger. Applied Energy, 103, 266-277.

## **Titre de l'invention**

Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source destinée principalement à l'irrigation.

5

## **Domaine technique auquel se rapporte l'invention**

La présente invention se rapporte au domaine de l'agriculture ; plus précisément, la régulation de la température de l'eau d'irrigation agricole via l'exploitation de la géothermie peu profonde (énergie renouvelable) à l'aide d'un échangeur enterrés eau/sol.

10

## **Etat de la technique antérieure**

La nécessité vitale de l'eau et la sur demande, pousse l'homme à la recherche des meilleurs techniques pour exploiter toutes les ressources d'eau découvertes.

L'irrigation et l'alimentation en eau potable des collectivités sont les utilisations les plus dominantes. Globalement et suivant les informations collectées:

- les 2/3 des quantités d'eau prélevées dans le monde, au moins 500 km<sup>3</sup>/an, servent à l'irrigation.

L'ensemble des sources d'eau exploitables sont : l'eau libre de surface, l'eau souterraine, la neige, l'eau de mer...etc. Ces sources se caractérisent par la température, la qualité et le gisement de ses eaux, d'où et selon ces caractéristiques on peut déterminer à quel domaine serve cette source.

Il a été montré à travers une étude bibliographique que la qualité de la récolte dépend fortement de la température de l'eau utilisé dans l'irrigation.

Cependant, dans la nature, on trouve des sources d'eau caractérisées par des températures très élevées et d'autre très basses. Plusieurs techniques sont utilisées pour refroidir ou chauffer l'eau afin de l'adapter aux conditions favorables à l'irrigation. Parmi ces techniques, on cite ci-dessous celles les plus utilisées dans le refroidissement, par contre, on a rien trouvé sur les méthodes d'échauffement.

### **1. Refroidissement à l'air libre ou évaporatif :**

Le refroidissement à l'air libre ou par voie humide est la méthode classique, c'est un principe naturel simple basé sur le contact direct entre l'air et l'eau d'irrigation à refroidir. L'air, avide

d'humidité, évapore une partie de l'eau à refroidir en prélevant la chaleur latente de vaporisation, pour conduire finalement au refroidissement recherché. Cette chaleur latente de vaporisation constitue la majeure partie de l'échange thermique, complété par des échanges par convection entre l'eau et l'air. Cette technologie est particulièrement adaptée pour le

5 refroidissement d'eau d'irrigation nécessitant des températures comprises entre 25 et 50°C.

#### **Avantage**

- ✓ Coût (Prix faible).
- ✓ Pas de consommation d'électrique.
- ✓ Absence de vibration et de pollution sonore.
- 10 ✓ Facile à nettoyer.

#### **Inconvénient**

- ✓ Risque du développement des bactéries dans les systèmes de refroidissement évaporatif.
- ✓ Ecart de température compris entre 25 et 50°C.
- 15 ✓ Quantité d'eau considérable évaporée pour assurer le refroidissement.
- ✓ Quantité d'eau s'infiltré dans le sol (dans le cas du bassin).
- ✓ Concentration des solides augmente rapidement et peut atteindre des proportions inacceptables.
- ✓ Poids et encombrement importants.

20

## **2. Tour de refroidissement :**

Une tour de refroidissement ou une tour aéro-réfrigérante utilise le principe de refroidissement évaporatif afin de - quel que soit son type - refroidir un débit d'eau déterminé pour obtenir l'écart thermique souhaité entre la température de l'eau chaude entrante dans la

25 tour et la température de l'eau refroidie par la tour. L'efficacité de l'échange de la tour de refroidissement est conditionnée par l'approche, c'est-à-dire la différence entre la température d'eau froide et celle du bulbe humide de l'air.

Il y a plusieurs types de type de refroidissement :

- **Tour de refroidissement humide à cycle ouvert ou fermé :**

30 La technologie de refroidissement la plus répandue pour les groupes froids thermiques est le refroidissement humide, à l'aide de tours de refroidissement ouvertes. L'eau du circuit de refroidissement est envoyée en pulvérisation au sommet de la tour sur la zone d'échange

(matériau de garnissage). Le principal effet de refroidissement est obtenu par évaporation d'un faible pourcentage d'eau (typiquement <5%) ; cette perte doit être compensée par l'ajout d'eau neuve du réseau. L'eau refroidie retourne dans le circuit. Un ventilateur (horizontal en sommet de la tour pour les modèles hélicoïdaux ou en partie basse de la tour pour les modèles centrifuges) extrait l'air saturé pour assurer que l'évaporation continue. Cette technologie est très efficace dans les climats appropriés (dotés d'une hygrométrie raisonnable, soit moins de 80% en moyenne) et en principe la température limite de retour de l'eau refroidie est proche de la température de bulbe humide de l'air (3°C à 5°C au-dessus de la température humide).

#### **Avantage**

- 10 ✓ Efficacité.
- ✓ Faible consommation en électricité.

#### **Inconvénient**

- ✓ Consommation d'eau (environ 5 litres/kWh froid).
- ✓ Traitement et contrôle régulier de la qualité de l'eau sont obligatoires.
- 15 ✓ Volume du circuit d'eau plus important à traiter.
- ✓ Développement du tartre et des bactéries dans le circuit primaire.
- ✓ Difficulté du nettoyage et de désinfection du système.
- ✓ Pollution possible du fluide à refroidir.
- ✓ Pollution sonore.
- 20 ✓ Encombrant.

#### **• Tour de refroidissement Hybride :**

Une autre solution de refroidissement se situe entre la tour de refroidissement humide et le refroidisseur sec. Les systèmes hybrides mélangent ces deux technologies : Durant les périodes relativement fraîches que sont les intersaisons, le système fonctionne comme un simple aéro-réfrigérant sec, puis en été lorsque la température ambiante est trop élevée pour avoir un niveau de température du fluide de refroidissement suffisamment faible, le système passe alors en mode évaporatif similaire à une tour humide. Ce système peut, par exemple, être mis en place en ajoutant une rampe de pulvérisation d'eau en direction de l'échangeur air/eau d'un aéro-réfrigérant sec. La combinaison de ces deux modes permet de réaliser des économies d'eau tout au long de l'année et de limiter les risques de bactéries. De plus, un

niveau correct de la température retour de l'eau du circuit de refroidissement est toujours possible, même pendant les jours très chauds d'été.

### **Avantage**

- ✓ Faible consommation en eau.
- 5 ✓ Pas de traitement ni de contrôle de l'eau.
- ✓ Simple à mettre en oeuvre (pas de circuit d'alimentation d'eau de réseau à mettre en place).

### **Inconvénient**

- ✓ Efficacité moins élevée.
- 10 ✓ Impossibilité de tenir une consigne de refroidissement lorsque la température extérieure est trop élevée.
- ✓ Consommation en électricité toujours importante.
- ✓ Investissement très important.
- ✓ Difficulté du nettoyage et de désinfection du système.
- 15 ✓ Poids et encombrement importants.
- ✓ Pollution sonore.

### **But de l'invention**

L'invention est une solution technique (facile à réaliser) afin de remédier au problème de la température de l'eau de source utilisée dans l'irrigation agricole. 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.

25 Le principe de cette invention réside en l'exploitation de l'énergie géothermique par un échangeur de chaleur enterré eau/sol doté d'un régulateur thermo-hydrodynamique et d'un système de filtrage. Cette invention permet d'utiliser l'eau de source, souvent avec des températures non favorables à l'irrigation, après le passage dans le système. A la sortie de ce dernier, la température de l'eau est ainsi contrôlée permettant des conditions optimales à

30 l'irrigation.

## Enoncé des figures

Figure-1- : est un schéma d'échangeur géothermique à régulation thermo-hydrodynamique de l'eau d'irrigation. Elle schématise l'exploitation des ressources géothermales peu profondes pour réguler la température et le débit de l'eau à la sortie de l'échangeur, avec : (1) Source

5 d'eau, (2) filtre à eau, (3) entrée de l'échangeur, (4) sous-sol, (5) échangeur géothermique, (6) sortie de l'échangeur / entrée du système de contrôle, (7) système de régulation (Thermo-Hydrodynamique), (8) sortie du système de contrôle ; (9) sol.

## Présentation de l'essence de l'invention et son mode de réalisation

Les problèmes précités seront essentiellement présents lors de l'utilisation de l'eau de source

10 pour l'irrigation avec des températures inadéquates.

Le système géothermique pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source permet aux agriculteurs la possibilité d'utiliser toute les types de source d'eau qui sont destinés à l'irrigation, malgré leurs températures inadéquates (élevées ou basses). Grâce à ce système, on peut refroidir ou chauffer l'eau dans les zones chaudes ou froides par le fait de

15 dimensionner un échangeur géothermique équipé d'un système de régulation thermo-hydrodynamique, qui assure la marge des températures et des débits voulus.

L'invention a pour but de contrôler et réguler les températures d'eau pour l'irrigation, afin d'en éliminer les problèmes. Ce système est alimenté d'une source d'eau (1) (chaude ou froide), d'un filtre à eau (2) assurant le bon fonctionnement de l'échangeur, d'un échangeur

20 géothermique (enterré) (5) et d'un régulateur de température (7).

Ce système permet de refroidir ou chauffer l'eau grâce à l'exploitation de l'énergie géothermique peu profonde. Les études on prouvé que la température du sous-sol varie en fonction de la profondeur et se stabilise à environ 6 mètres de profondeur pour atteindre les 20 à 25°C.

25 Pour le refroidissement, la chaleur de l'eau se transfert au sous-sol par la conductivité de la paroi en profitant de la fraîcheur du sous-sol. Par contre, Pour le réchauffement, on profite de l'inertie thermique du sous-sol qui fait chauffer la paroi et ensuite l'eau.

Ce système géothermique est alimenté d'une source d'eau (1) (chaude ou froide) ; en faisant passant l'eau de source dans un filtre à eau (2) avant d'entrer (3) dans l'échangeur

géothermique (5). C'est dans l'échangeur qu'on refroidit ou chauffe l'eau, grâce à l'énergie géothermique peu profonde ; à la sortie de ce dernier (6) on trouve un système de régulation (7) qui donne la possibilité de régler la température et le débit à la sortie selon nos besoins.

5 Ce système convient particulièrement pour réguler la température de l'eau d'irrigation ; une température qui convient à la culture irriguée, et un débit d'eau qui couvre les besoins des plantes ou des champs.

Exemple :

10 Dans la zone de Biskra, il est préférable d'irriguer les palmiers dattiers avec une température de 25°C. L'eau de la nappe de l'Albien fait surface avec une température de 35°C. Cette source représente le grand gisement d'eau douce dans le monde (70% en Algérie). Cette source d'eau se caractérise par une bonne qualité d'eau et une température élevée ; les agriculteurs de la zone préfèrent utiliser cette source pour ses avantages. Cependant, l'inconvénient majeur est la température élevée de ses eaux.

15 On a dimensionné un échangeur géothermique de 77 m de longueur, sous forme de serpent, 0,2 m de diamètre placé à 3 m de profondeur, qui garanti une régulation de température d'une marge de 10°C comprise entre (22°C à 32°C) à la sortie. Sachant bien que la température de l'eau à l'entrée est de 35°C.

## Revendications

1. Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1) est composé de (i) un filtre à eau, (ii) un échangeur de chaleur eau/sol peu profond et (iii) un régulateur thermo-hydrodynamique pour contrôler la température de l'eau.
2. Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon la revendication 1, est utilisé notamment et non exclusivement pour l'irrigation agricole.
3. Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications 1 et 2, est proposé pour remédier aux problèmes liés aux dégâts causés par la perturbation de la température de l'eau de source utilisée entre-autre pour l'irrigation.
4. Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications 1, 4 et 6, est équipé d'un filtre à eau placé entre la source d'eau et l'entrée de l'échangeur pour séparer l'eau des particules solides et assurer ainsi le bon fonctionnement du système en prolongeant sa durée de vie.
5. Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications de 1 à 3, exploite l'énergie géothermique peu profonde par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur enterré eau/sol pour refroidir l'eau chaude ou chauffer l'eau froide provenant de la source.
6. Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications 1 et 4, recourir à la géothermie à air : i) n'influe pas sur l'environnement ; ii) ne demande pas une grande puissance électrique.
7. Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications 1 à 4, est alimenté en amont par une source d'eau chaude ou froide (souterraine, libre de surface, ...etc) destinée à l'irrigation.
8. Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications 1 à 6, dans le cas où

on utilise les sources d'eau chaudes, le refroidissement de ces eaux élimine les dégâts apportés par la température élevée.

- 5           **9.** Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications 1 à 6, dans le cas où on utilise les sources d'eau froides, le réchauffement de ces eaux élimine les dégâts apportés par la température basse.
- 10           **10.** Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications 1, 6 et 7, refroidit l'eau chaude ou chauffe l'eau froide respectivement pour (i) préserver la fertilité de la terre, améliorer la qualité des récoltes, rationaliser la consommation d'eau d'irrigation en réduisant le phénomène d'évaporation par rapport au refroidissement à l'air libre, réduire la puissance électrique consommée traditionnellement par des aéro-refroidisseurs, et (ii) favoriser la dissolution des sels minéraux, augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol en réduisant la consommation d'eau et par conséquent de
- 15           l'électricité.
- 11.** Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications 1, 4 et 5, est non-encombrant vue la préservation de la surface de la terre au-dessus de l'échangeur enterré pour d'éventuelles cultures.
- 20           **12.** Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon les revendications de 1 à 5, peut contrôler la température de l'eau notamment et non exclusivement par la variation du débit en tenant compte des paramètres de dimensionnement, à savoir : (i) disposition de(s) l'échangeur(s) (verticaux, horizontaux) préférentiellement horizontaux, (ii)
- 25           dimension de(s) l'échangeur(s) (longueur, diamètre et configuration), (iii) profondeur de l'échangeur enterré (iv) nombre et positionnement des échangeurs (superposés et/ou à coté) (v) mode de fonctionnement (continue ou en intermittence) (vi) matériau du tube.
- 30           **13.** Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon la revendication précédente, peut contrôler la température de l'eau à l'aide d'un régulateur thermo-hydrodynamique

basé notamment et non exclusivement sur la variation du débit à la sortie de l'échangeur enterré.

- 5 **14.** Système géothermique peu profond pour le contrôle thermo-hydrodynamique de la température de l'eau de source (figure 1), selon la revendication précédente, le régulateur est nommé thermo-hydrodynamique par son fonctionnement de contrôle de la température de l'eau d'irrigation par le contrôle du débit. Ainsi, les termes thermo, hydro et dynamique correspondent respectivement aux termes : température, eau et débit.

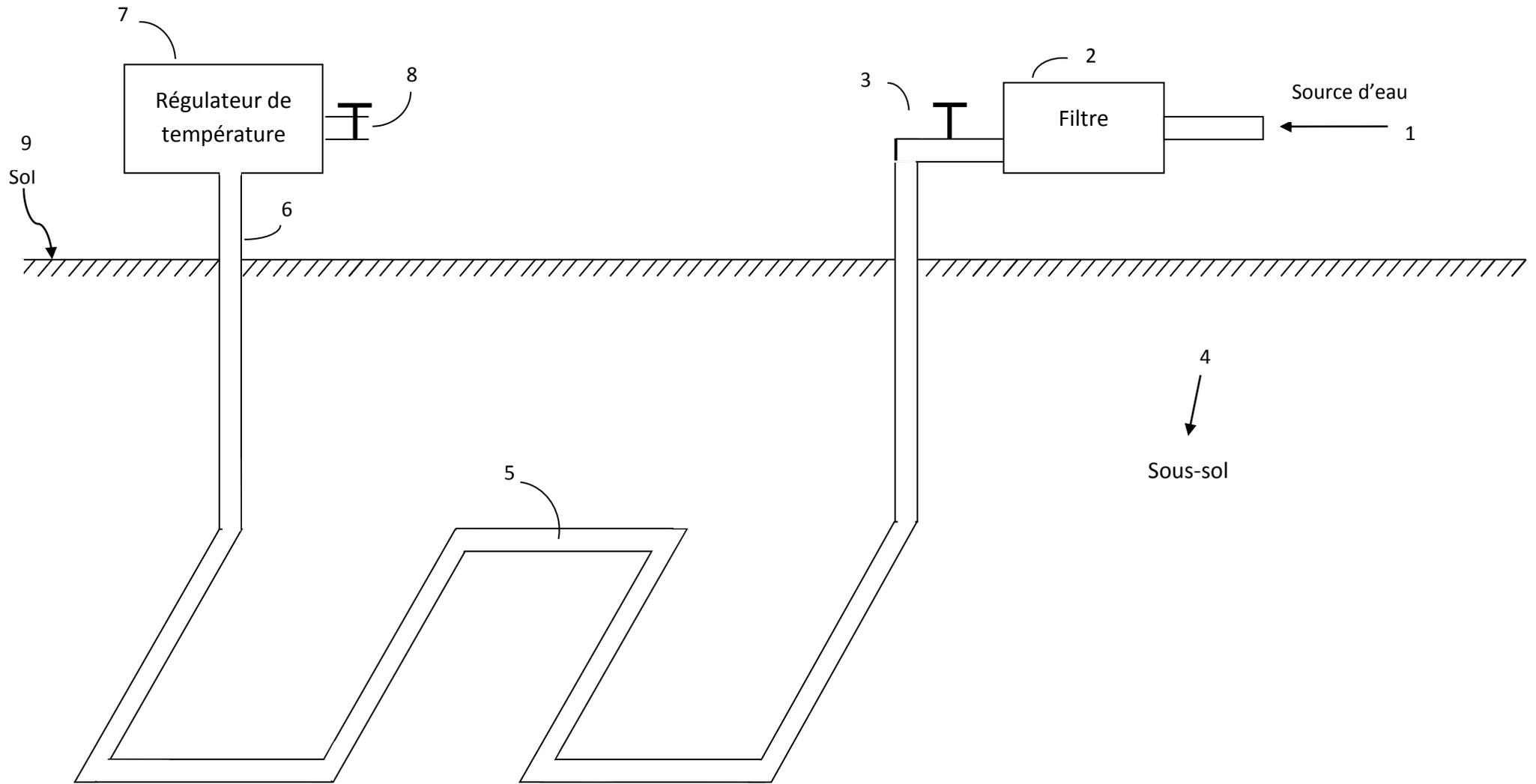


Figure-1-

## العنوان

نظام جيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه المخصصة أساسًا للري.

### 5 المجال التقني الذي يتعلق به الاختراع

يتعلق الاختراع الحالي بمجال الزراعة ؛ وبشكل أكثر تحديدًا ، تنظيم درجة حرارة مياه الري الزراعية من خلال استغلال الطاقة الجيوحرارية منخفضة العمق (الطاقة المتجددة) باستخدام مبادل جيوحراري مدفون من نوع ماء / ارض.

### 10 حالة التقنية الصناعية السابقة

إن الحاجة الحيوية للمياه وارتفاع الطلب عليها ، تدفع الانسان للبحث عن أفضل التقنيات لاستغلال جميع الموارد المائية المكتشفة. الري ومياه الشرب في العالم هي أكثر الاستخدامات المهيمنة. بشكل عام ووفقًا للمعلومات التي تم جمعها:

15 - يتم استخدام ثلثي كميات المياه المسحوبة في العالم، التي لا تقل عن 500 كيلومتر مكعب في السنة، لأغراض الري؛

جميع مصادر المياه القابلة للاستغلال هي: المياه المسطحة، المياه الجوفية، الثلج، مياه البحر... إلخ. تتميز هذه المصادر بدرجة حرارة مياه وجودتها و كمية المخزون ووفقًا لهذه الخصائص، يمكن تحديد مجال الاستعمال لهذا المصدر.

20 لقد تبين من خلال دراسة ببليوغرافية أن جودة الحصاد تعتمد بشدة على درجة حرارة المياه المستخدمة في الري.

في الطبيعة، هناك مصادر مياه مع درجات حرارة عالية جدًا، منخفضة جدًا. و يوجد العديد من التقنيات لتبريد هاته المياه أو تسخينها لتناسب مع الظروف الملائمة للري. من بين هذه التقنيات، المذكورة 25 أدناه التقنيات الأكثر استخدامًا في التبريد.

#### 1. التبريد المجاني أو التبخيري:

30 يعد التبريد المجاني الطريقة الكلاسيكية التي تعتمد على الهواء الطلق أو الرطب وذلك بالاتصال المباشر بين الهواء ومياه الري (تبريد طبيعي) ،حيث يتبخر جزء من الماء في الهواء المتعش

للرطوبة ليتم تبريده بواسطة الطاقة الحرارية الكامنة للتبخر ما يسمح في النهاية للوصول إلى التبريد المطلوب.

تشكل الطاقة الحرارية الكامنة للتبخر الجزء الرئيسي من التبادل الحراري بين الماء والهواء.

5 هذه التكنولوجيا تسمح بتبريد مياه الري التي تتطلب درجات حرارة ما بين 25 و 50 درجة مئوية.

المحاسن :

تكلفة ضئيلة إن لم نقل معدومة.

عدم وجود استهلاك للكهرباء.

10 عدم وجود اهتزازات و ضجيج.

سهولة التنظيف.

المساوئ:

خطر انتشار البكتيريا في نظام التبريد التبخيري.

يعمل في درجة حرارة محصورة بين 25 و 50 درجة مئوية.

15 ضياع كمية هائلة من الماء (في حالة الحوض).

زيادة سريعة في تركيز المواد الصلبة قد تصل إلى نسب غير مقبولة.

وزن ثقيل و يشغل مساحة كبيرة.

2. برج التبريد:

20 يستخدم برج تبريد الهواء مبدأ التبريد التبخيري (بشتى أنواعه)

،تعتمد كفاءة برج التبريد على المقاربة وذلك من خلال الحصول على

الفرق بين درجة حرارة الماء الساخن المتدفق عند دخوله البرج

ودرجة الماء المبردة من قبل هذا الأخير، أي الفرق بين درجة حرارة

الماء البارد ودرجة حرارة الهواء الرطب.

25 توجد عدة أنواع من أبراج التبريد نذكر منها :

• برج التبريد الرطب المفتوح أو المغلق:

إن تقنية التبريد الأكثر شيوعًا للوحدات الحرارية الباردة هي

التبريد الرطب باستخدام أبراج التبريد المفتوحة. يتم رش أعلى

30 البرج بمياه نظام التبريد في منطقة التبادل. تتبخر نسبة صغيرة من

الماء (عادة أقل من 5 %)؛ وذلك للحصول على تأثير التبريد الرئيسي

والتي تستوجب تعويض هذه الخسارة بإضافة مياه جديدة من الشبكة.

عند عودة الماء المبرد إلى دائرة التبريد تقوم المروحة (تكون أفقية في الجزء العلوي من البرج للنماذج الحلزونية أو أسفل البرج للنماذج ذات الطرد المركزي) باستخراج الهواء المشبع لضمان استمرار التبخر.

5 هذه التكنولوجيا فعالة للغاية في المناخات ذات الرطوبة المعقولة (أي أقل من 80 ٪ في المتوسط) ، حيث تكون درجة حرارة الماء المبرد قريبة من درجة حرارة الهواء الرطب (من 3 إلى 5 درجة مئوية فوق درجة الحرارة الرطبة).

المحاسن :

10 الفعالية.

استهلاك قليل للكهرباء.

المساوئ :

استهلاك كبير للمياه (حوالي 5 لترات / كيلوواط ساعي).

وجوب المعالجة والمراقبة المنتظمة لنوعية المياه.

15 اتساع حجم كمية المياه المطلوب معالجتها.

تكون رواسب وتطور البكتيريا داخل النظام الأولي.

صعوبة تنظيف وتعقيم النظام.

وجود اهتزازات و ضجيج.

مزدحم.

20

• برج التبريد الهجين:

هو عبارة عن نظام مختلط بين تقنية برج التبريد الرطب والمبرد

الجاف، تستعمل عادة خلال الفترات الباردة نسبيا والتي تكون بين

الفصول، حيث يعمل النظام كمبرد جاف بسيط، أما في درجات الحرارة

25 المرتفعة جدا ( فصل الصيف) ينتقل النظام إلى الوضع التبخيري (

البرج الرطب).

يسمح هذا النظام بتوفير المياه على مدار السنة بالإضافة إلى تحقيق

مستوى معتدل لدرجة حرارة الماء العائد إلى دائرة التبريد حتى في

أيام الصيف الحارة جدا والحد من خطر البكتيريا.

30 يعمل هذا الأخير عن طريق إضافة ذراع لرش الماء المبرد إلى مبادل

الهواء.

المحاسن:

استهلاك قليل للمياه.

عدم معالجة أو مراقبة المياه .  
سهل التنفيذ .  
عدم وجود دائرة لإمداد المياه للشبكة .  
مستوى درجة حرارة المياه المبردة منخفضة ومضمونة دائما .

5 المساوي : :

فعالية ضعيفة .  
استهلاك كبير للكهرباء .  
استثمار مكلف .  
صعوبة تنظيف وتعقيم النظام .  
وزن ثقيل و يشغل مساحة كبيرة .  
وجود اهتزازات و ضجيج .

10

في المقابل لم يتم العثور على طرق تسخين للمياه .

## 15 الهدف من الاختراع

يعتبر هذا الاختراع حل تقني سهل التنفيذ لمعالجة مشكلة عدم استتقرار درجة حرارة مصادر المياه المستخدمة في عمليات الري الزراعي. تؤثر درجة حرارة مياه المصادر سلبيا على : خصوبة التربة ، نوعية المحاصيل ، استهلاك كبير للكهرباء بالنسبة للمبردات الهوائية ، مشكلة انحلال الأملاح المعدنية و فضلا تغلغل المياه في التربة .

20

يكمن مبدأ هذا الاختراع في استغلال الطاقة الجيوحرارية بواسطة مبادل حراري مدفون من نوع ماء / ارض و مجهز بمرشح و نظام تحكم هيدروديناميكي حراري. يسمح هذا الاختراع بضبط درجة حرارة مياه الري الزراعي (والتي غالبا ما تكون درجات حرارتها غير ملائمة للري) و بحيث تكون مناسبة لنوع النباتات المسقية .

25

## قائمة الأشكال

الشكل-1- :

عبارة عن رسم بياني للتنظيم الهيدروديناميكي الحراري لمبادل جيوحراري لمياه الري. إنه يوضح استغلال الموارد الحرارية الجوفية

30

ذات عمق منخفض للتحكم في درجة حرارة وتدفق المياه عند مخرج المبادل ، مع: (1) مصدر المياه ، (2) مرشح المياه ، (3) مدخل المبادل ، (4) الطابق السفلي ، (5) مبادل جيوحراري ، (6) مدخل نظام التحكم / مخرج المبادل ، (7) نظام تحكم (الحرارية الهيدروديناميكية) ، (8) مخرج نظام التحكم (9) التربة. 5

## عرض جوهر الاختراع وطريقة تجسيدها

تظهر المساوي المذكورة أعلاه بشكل رئيسي عند استخدام مصادر مياه بغية الري. وذلك بمياه ذات درجات حرارة غير ملائمة، لذا يضمن نظام الطاقة الجيوحراري للتحكم الهيدروديناميكي الحراري فرصة لاستخدام جميع أنواع مصادر المياه المخصصة للري، حيث يعمل هذا الأخير على تبريد أو تسخين المياه في المناطق الحارة أو الباردة. وذلك عن طريق تغيير حجم المبادل الجيوحراري المجهز بنظام تحكم هيدروديناميكي حراري ، والذي يضمن هامش درجات حرارة ومعدلات تدفق حسب الطلب. 10 15

يهدف الاختراع إلى تنظيم درجات حرارة المياه استعمالها للري ، للقضاء على المشاكل. يتم تغذية هذا النظام بمصدر مياه (1) (ساخن أو بارد) ، ومرشح مياه (2) يضمن حسن تشغيل المبادل ، ومبادل جيوحراري (مدفون) (5) و نظام تحكم في درجة الحرارة (7).

يسمح هذا النظام بتبريد الماء أو تسخينه من خلال استغلال الطاقة الجيوحرارية ذات عمق منخفض. أظهرت الدراسات أن درجة حرارة باطن الأرض تختلف مع العمق وتستقر على عمق حوالي 6 أمتار لتصل من 20 إلى 25 درجة مئوية. 20

في حالة التبريد، وبالاعتماد على برودة التربة - في أسفل الحفرة -المحيطة بالمبادل الجيوحراري' يتم خفض درجة حرارة الماء بنقلها للتربة. و في حالة التسخين ، نستفيد من العطالة الحرارية للتربة التي ترفع من درجة حرارة المبادل الجيوحراري و بالتالي درجة حرارة الماء المار به. 25

يتم تغذية هذا النظام الجيوحراري من اي مصدر للمياه (1) (ساخن أو بارد)؛ عن طريق تمريرالمياه من خلال مرشح (2) قبل مدخل (3) المبادل الجيوحراري (5). في المبادل الجيوحراري يتم تبريد أو تسخين الماء عن طريق الطاقة الجيوحرارية ذات عمق منخفض. يوجد عند مخرج الأخير (6) نظام تحكم (7) يعطي إمكانية ضبط درجة حرارة ومعدل تدفق الماء في المخرج حسب احتياجاتنا.

هذا النظام مناسب بشكل خاص لتنظيم درجة حرارة مياه الري. حيث من جهة يضمن لنا توفير درجة حرارة مياه مناسبة للري كما يمكننا من التحكم في تدفق ماء يغطي احتياجات النباتات أو الحقول.

10 على سبيل المثال:

في منطقة بسكرة، تعتبر درجة الحرارة المثلى لري حقول النخيل تعادل 25 درجة مئوية. تصلنا المياه الجوفية لـ Albién بدرجة حرارة تعادل 35 درجة مئوية حيث يمثل هذا المصدر أكبر مخزون للمياه العذبة في العالم (70% منها في الجزائر). يتميز هذا المصدر بمياه ذات نوعية جيدة ودرجة حرارة مرتفعة. يفضل مزارعو المنطقة استخدام هذا المصدر لفوائده. ومع ذلك، فأن العيب الرئيسي هو ارتفاع درجة حرارة مياهه.

تم تحديد أبعاد مبادل جيوحراري بطول 77 متر، في شكل أفعواني ، قطره 0.2 متر وضعت على عمق 3 متر، مما يضمن تنظيم درجة حرارة الماء ضمن مجال محصور بين 22 درجة مئوية إلى 32 درجة مئوية عند المخرج. مع العلم أن درجة حرارة مدخل المياه هي 35 درجة مئوية.

## مطالب

1. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) يتكون من: (1) مرشح المياه (2) مبادل حراري ماء / ارض منخفض العمق (3) منظم حراري هيدروديناميكي لمراقبة درجة حرارة المياه. 5
2. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطلب (1) يستخدم بشكل خاص وليس حصرياً للري الزراعي.
3. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطلبين (1 و 2) اقترح لمعالجة المشاكل الناجمة عن اضطراب درجة حرارة مصدر المياه المستخدم في الري 10
4. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطالب (1، 4 و 6) مجهز بمرشح ماء يوضع بين مصدر المياه ومدخل المبادل لتصفية الماء من الجزيئات الصلبة وبالتالي ضمان حسن سير النظام عن طريق إطالة عمره. 15
5. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطالب (من 1 إلى 3) يستغل الطاقة الجيوحرارية منخفضة العمق من خلال مبادل حراري ماء / ارض لتبريد الماء الساخن أو تسخين الماء البارد من المصدر. 20
6. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطلبين (1 و 4) : (1) لا تؤثر على البيئة ؛ (2) لا تتطلب طاقة كهربائية كبيرة.
7. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطلب (من 1 إلى 4) مزود عند المدخل بمصدر مياه ساخنة أو باردة (تحت الأرض ، مياه الاسطح... إلخ) مخصصة للري. 25
8. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطالب (من 1 إلى 6)

تبريد المياه الساخنة يزيل الضرر الناجم عن ارتفاع درجة الحرارة (في حالة استخدام مصادر المياه الساخن).

9. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطالب (من 1 إلى 6) تسخين المياه الباردة يزيل الضرر الناجم عن انخفاض درجة الحرارة (في حالة استخدام مصادر المياه الباردة).

10. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1) وفقاً للمطالب (1، 6 و 7) : يقوم بتبريد الماء الساخن أو تسخين الماء البارد على التوالي من أجل:

10 - الحفاظ على خصوبة الأرض.

- تحسين جودة المحاصيل.

- حسن استهلاك مياه الري عن طريق الحد من ظاهرة التبخر مقارنة بالتبريد في الهواء الطلق.

- التقليل من استهلاك الطاقة الكهربائية المستهلكة عادة من قبل المبردات الهوائية.

15 - تعزيز انحلال الأملاح المعدنية.

- زيادة تسرب المياه إلى التربة عن طريق تقليل استهلاك المياه وبالتالي الكهرباء.

11. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1)، وفقاً للمطالب (4، 1 و 5) يسمح لنا باستغلال سطح الأرض في الزراعة من خلال دفن المبادل الحراري تحتها.

12. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1)، وفقاً للمطالب (من 1 إلى 5) : يسمح بمراقبة درجة حرارة المياه بشكل خاص غير حصري عن طريق استغلال تغيير حجم التدفق مع الأخذ بعين الاعتبار إعدادات التصميم والمتمثلة في:

1- ترتيب المبادل الحراري (عمودي، أفقي) ويفضل أن يكون أفقياً.

- ب- ابعاد المبادل الحراري (الطول، القطر و الشكل).
- ج- عمق المبادل الحراري مع مراعاة العدد و الوضعية (متراكبة و/ أو جانبية).
- د- وضع التشغيل ( مستمر أو متقطعا).
- هـ- مادة الأنابيب.

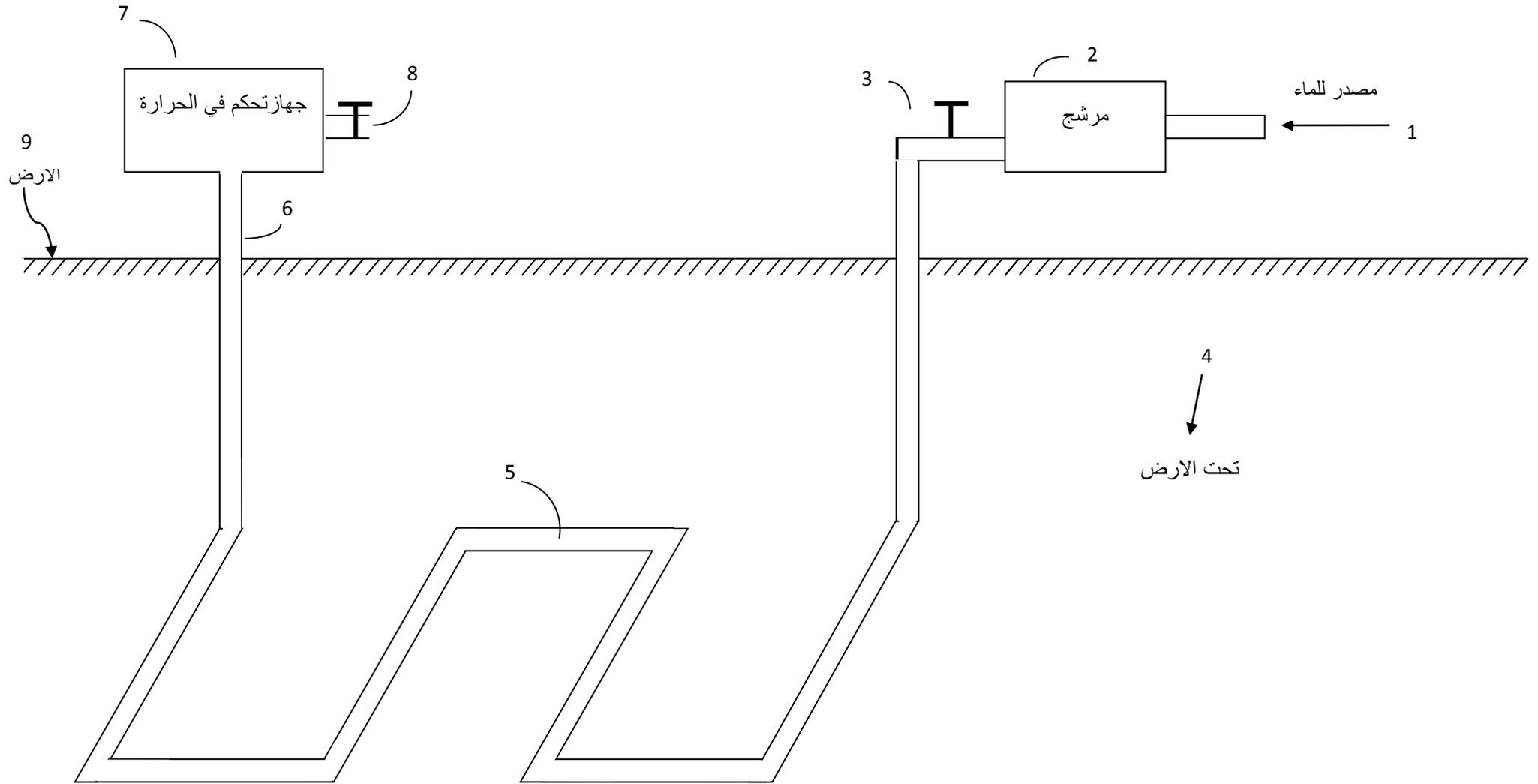
5

13. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1)، وفقاً للمطلب السابق يسمح التحكم في درجة حرارة الماء باستخدام منظم هيدرودينامي حراري قائم بشكل خاص غير حصري على تغير التدفق عند مخرج المبادل المدفون.

14. النظام الجيوحراري منخفض العمق للتحكم الهيدروديناميكي الحراري لدرجة حرارة مصادر المياه (الشكل 1)، وفقاً للمطلب السابق يطلق على المنظم اسم الهيدروديناميكي الحراري و ذلك من خلال دوره المتمثل في التحكم في درجة حرارة ماء الري عن طريق التحكم في التدفق. وبالتالي، فإن المصطلحات الحرارية، المائية والديناميكية تتوافق على التوالي مع المصطلحات: درجة الحرارة والماء والتدفق.

10

15



الشكل -1-