



**Université Mohamed Khider de Biskra**  
**Faculté des sciences et de la technologie**  
**Géniemécanique**

# **MÉMOIRE DE MASTER**

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : énergétique**

---

**Présenté et soutenu par :**

**KABOT ALI**  
**BAAISSA DJEMOUI**

## **Etude expérimentale d'un échangeur de chaleur eau-air immergé dans l'eau chaude: exploitation thermique des forages Albiens**

---

**Jury :**

Pr. Foued Chabane	Pr. Université de Biskra	Président
Pr. Adnane LABED	Pr. Université de Biskra	Rapporteur
Dr. Fouzi Guellai	MCB . Université de Biskra	Membre

Année universitaire : 2023 - 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Sommaire

<b>DEDICACES.....</b>	<b>I</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>III</b>
<b>Liste des figures et des tableaux .....</b>	<b>IV</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>VI</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Généralités sur la géothermie</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les différents types de géothermie.....	4
I.2.1. La géothermie haute énergie .....	4
I.2.2. La géothermie moyenne énergie .....	5
I.2.3. La géothermie basse énergie.....	5
I.3. Exploitation de la chaleur géothermique dans le monde.....	6
I.4. La géothermie en Algérie. . . . .	6
I.5. Les avantages et les inconvénients de la géothermie.....	7
I.6. Nappe albienne et Les zones géothermiques en Algérie.....	8
I.7. Conclusion.....	12
<b>Chapitre 2 : Echangeurs de chaleur</b>	
II.1. Introduction.....	13
II.2. Définition.....	14
II.3. Critères de classement des échangeurs.....	14
II.3. 1. Classement technologique.....	14
II.3. 3. Classement suivant le mode de transfert de chaleur.....	14
II.3. 2. Classement fonctionnel .....	15
II .4. Les différents types d'échangeurs thermiques.....	15
II .4.1. Les principales technologies utilisées.....	15
II .4.2. L'échangeur thermique à plaques.....	16
II .4.2. 1. Utilisation des échangeurs à plaques.....	17
II .4.2. L'échangeur thermique tubulaire.....	18

II .4.3.1 Utilisation des échangeurs tubulaires .....	19
II .4.4. L'échangeur thermique en forme de serpentins .....	20
II .4 .5. Echangeurs de chaleurs spiralées .....	20
II .4 .6. Échangeur à bloc .....	21
II.4.7. Echangeur tubes à ailettes .....	22
II.4.7.1. Ailettes plain (Batterie à ailettes) : .....	22
II.4.7.2. Ailettes annulaires .....	23
II .4.8. Les autres types d'échangeurs thermiques .....	23
II.5. Le principe de fonctionnement .....	24
II.5.1 Rôle de l'échangeur thermique .....	24
II.5.2. Son principe de fonctionnement .....	25
II .6. Efficacité d'un échangeur thermique .....	25
II .6.1. Le Rendement .....	25
II .6.2. La température .....	26
II .6.3. L'efficacité de l'échangeur thermique .....	26
II .7. Critères généraux de performance d'un échangeur .....	26
II .7-1. Exigences d'étanchéité de l'échangeur et les risques de fuite des fluides .....	27
II .7. 2. Critère associé à la nécessité d'inspection des équipements techniques.....	27
II .7. 3. Critère d'encombrement compacité .....	27
II .7. 4. Critère de coût de l'échangeur .....	27
II.8. Coefficient de performance .....	27
II .9 .Conclusion.....	28

### **Chapitre 3 : résultats et discussion**

III.1. Introduction .....	29
III.2. Description de l'échangeur .....	30
III.3. Dimensions de l'échangeur .....	31
III.4. Résultats et discussions .....	32
III.4.1. Effet du Débit d'air sur la température de l'air .....	32
III.4.2. Effet de la longueur sur la température de l'air .....	36

III.4.3. Rendement de l'échangeur .....	36
III.4.4. Coefficient de Performance .....	38
III.5. Conclusion .....	39
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>40</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>41</b>

# DEDICACES

*Je dédie ce mémoire*

*Mon père et ces conseils exceptionnels.*

*Ma mère qui m'a soutenu et encouragé durant ces années*

*D'études,*

*Ma mère et mon père pour leur patience et leur amour*

*Mes frères et sœurs et toute la famille de **Baïssa**.*

*Je dédie également ce travail à tous mes amis avec qui j'ai partagé*

*Beaucoup de souvenirs inoubliables.*

*Et je dédie ce mémoire particulièrement à mon encadreur (**Adnane Labed**)*

*A tous mes enseignants par son nom*

*A chaque personne qui m'a aidée*

*A tous ce que j'aime.*

*Merci !*

Baïssa Djemoui

# DEDICACES

*Je dédie cet humble travail de mes années d'étudiant en signe de respect et d'appréciation. A ceux qui ont cherché et cherchent encore Pour moi : **mon cher père..** À celle qui m'a appris le sens de la vie, ma première maîtresse : **ma chère maman...** A **mes frères et sœurs***

*...Je dédie cette recherche à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu sur ce chemin. A tous les membres de ma famille et chers amis qui sont comme mes frères ( **Ilyas Hmídi , Djemouí Baaíssa , Nabil Ben Younis...**) et un merci tout spécial à mon cousin (**Hossam DJamel EDdine**) Surtout mon superviseur **Adnane Labed** , Et aussi à tous mes professeurs, et à toutes les personnes qui m'ont aidé à accomplir cet humble travail qui était un rêve pour moi, et avec votre soutien et vos conseils, nous y sommes aujourd'hui, grâce à Dieu et à votre grâce. Je vous dédie cette réalisation et le fruit de ma réussite que j'ai toujours souhaité.*

Kabot Ali

# Remerciements

*Louange à Allah celui qui nous donné la force d'achever ce travail.*

*Nous sommes honorés d'adresser nos sincères*

*Remerciements et notre gratitude à tous ceux qui ont contribué à l'achèvement de ce modeste travail, en particulier au docteur **Adnane LABED**, encadreur attentif pour nous malgré ses préoccupations.*

*Il nous a guidé et nous a conseillé de développer ce travail.*

*Nous remercions également les professeurs et toute la famille de la section de Génie Mécanique.*

*Nous remercions les membres du jury de leur intérêt à regarder ce travail modeste et à le corriger.*

*Nous remercions M. Chettir Abderrahmane pour le soutien et ces conseils durant la réalisation des expériences.*

*Enfin, nous voudrions également remercier nos chers amis et collègues et tous ceux qui nous ont aidés de près et de loin afin de réaliser ce travail.*

# Liste des figures et des tableaux

## Chapitre I

### Les figures

Figure I. 1: Les différentes couches de la surface du globe .....	4
Figure I.2: Géothermie haute énergie . .....	5
Figure I.3: Schéma expliquant la géothermie basse énergie.....	6
Figure I.4: Carte géothermique du Sud algérien .....	12

### Les tableaux

Tableau I.1 : Principales Caractéristiques chimiques de quelques sources thermales dula région de Biskra .....	8
Tableau I.2: Principales Caractéristiques chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie. ....	11

## Chapitre II

### Les figures

Figure II.1 : Principe de travail d'un échangeur .....	16
Figure II.2 : Composition d'un échangeur à plaques.....	17
Figure II.3: Principe de l'échangeur tubulaire. ....	18
Figure II.4 : Différents types d'échangeurs tubulaires.....	19
Figure II.5 : Echangeur Serpentins .....	20
Figure II.6 : Les échangeurs de chaleur spiralée.....	21
Figure II.7: Échangeur à bloc.....	22
Figure II.8 : Echangeurs de chaleur tubes à ailettes plain.....	23
Figure II.9: Diffèrent types des échangeurs de chaleur tube à ailettes annulaire . ....	23

Figure II.10: Schéma expliquant Rôle de l'échangeur thermique .	24
---	----

## **Chapitre III**

### **Les figures**

Figure III.1 : Échangeur de chaleur monotube de 21,5 m de long (première expérience de chauffage de l'air 09 /02 /2024 ).	29
Figure III.2: Échangeur de chaleur monotube de 22 m de long (deuxième expérience de chauffage de l'air 19/ 03 /2024)	30
Figure III.3: Photo de l'Echangeur utilisé dans l'Expérience.	30
Figure III.4 : Schémas de l'échangeur utilisé (Veritcal slinky).	31
Figure III.5 : Capteurs de mesure de température à l'intérieure de l'échangeur	31
Figure III.6: Échangeur de chaleur monotube (Verical Slinky):(long= 21,5 m, 24/03/2024).	32
Figure III.7 : Variation de température en fonction du débit d'air (L=3,5 m).	33
Figure III.8 :variation de température en fonction du débit d'air (L=8,5 m).	33
Figure III.9: Variation de température en fonction du débit d'air (L=14,5 m).	34
Figure III.10: Variation de température en fonction du débitd'air (L=18,5 m).	34
Figure III.11 : Variation de température en fonction du débit d'air (L=21,5m).	35
Figure III.12 : Evolution de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour différents débits d'air.	36
Figure III.13: Variation du rendement en fonction de la longueur de l'échangeur	37
Figure III.14 : Variation du rendement en fonction du débit d'air.	38
Figure III.15: Variation du COP en fonction du débit d'air dans l'échangeur.	38

### **Les tableaux**

Tableau III.1 : Tableau montrant la distance entre les capteurs repartis le long de l'échangeur.	31
--	----

## الملخص

هذا العمل يهدف لإيجاد حل تكنولوجي جديد لاستغلال واحد من اهم المصادر الطاقوية في شرق و جنوب الجزائر والتي تتمثل في الحوض الألبيني و المياه الجوفية الساخنة التي تكاد تكون غير مستغلة لا سيما في الجانب الطاقوي. و لهذا اقترحنا استعمال مبادل حراري مغمور داخل خزان من المياه الساخنة لتسخين الهواء داخل البنايات أو المنشآت السكنية.حيث تسمح لنا هذه التقنية بتقليل استهلاك الطاقة لا سيما المستعملة في التدفئة. لذلك قمنا بإعداد مبادل حراري من أنبوب واحد على شكل نابض و قمنا بغطسه في حوض مياه ساخنة متجددة من منقب ألبيني عالي التدفق، كما قمنا بقياس درجات حرارة الهواء في نقاط مختلفة من المبادل مع تغيير تدفق الهواء. أثبتت النتائج فعالية الحل المقترح و إمكانية رفع درجة حرارة الهواء بما يزيد عن 40° ما يسمح بتدفئة المنشآت و المركبات الحموية و تقليل فاتورة استهلاك الطاقة.

## Résumé

Ce travail consiste à étudier la faisabilité d'une nouvelle solution technologique pour l'exploitation de l'un des plus importants gisements énergétique dans l'East et le sud Algérien ; il s'agit de la nappe Albienne dont les eaux chaude des forages, des sources chaudes et des stations thermales sont peu exploitées. Pour cela nous avons proposé d'utiliser un échangeur immergé dans un réservoir et de faire souffler l'air ambient à travers cet échangeur dans un habitat pour le chauffer. Nous avons donc installé un échangeur de chaleur monotube de type « Slinky » (forme de ressort) et l'avons immergé dans un bain d'eau chaude régénératif provenant d'un forage Albien à haut débit, et nous avons mesuré la température de l'air en différents points de l'échangeur en fonction de la variation du débit d'air. Les résultats ont démontré l'efficacité de la solution proposée et la possibilité d'augmenter la température de l'air de plus de 40°, permettant de chauffer les bâtiments et les complexes thermale et de réduire la facture de consommation électrique du chauffage des habitats et surtout ceux des stations thermale.

## Abstract:

This work consists of studying the feasibility of a new technological solution for the exploitation of one of the largest energy deposits in East and South Algeria ; this is the Albian aquifer whose hot water from boreholes, hot springs and spas is little exploited. For this we proposed using an exchanger immersed in a tank and blowing ambient air through

this exchanger into a habitat to heat it. We therefore installed a single-tube “ Slinky ” heat exchanger (spring shape) and immersed it in a regenerative hot water bath coming from a high-flow Albian borehole, and we measured the temperature of the air at different points of the exchanger depending on the variation in air flow. The results demonstrated the effectiveness of the proposed solution and the possibility of increasing the air temperature by more than 40°, making it possible to heat buildings and thermal complexes and reduce the electricity consumption bill for heating premise.

# Introduction générale

*Le* Sud de l'Algérie représente un grand potentiel géothermique, contenu dans les bassins sédimentaires des zones continentales stables, principalement de basse énergie. Les forages pétroliers et hydrauliques dans le Sahara révèlent la présence d'eaux chaudes, ce qui suggère un potentiel pour l'énergie géothermique. Les températures les plus élevées enregistrées sont de 98 °C à Guelma et de 118 °C à Biskra, située dans la partie Sud-Est du pays. En ce qui concerne la production d'énergie, le CDER estime que l'énergie géothermique interne pourrait fournir un potentiel de 700 MW, en plus du flux provenant de l'exploitation de la plate-forme albienne et du débit total des sources d'eau chaude. Malheureusement, ces sources d'eau chaude ne sont pas actuellement exploitées à des fins industrielles [1].

Il existe un grand nombre de puits et de sources chaudes dans la région de Biskra, en particulier dans l'ouest de la wilaya, qui ne sont pas exploitées. Ces puits et sources pourraient être utilisés pour chauffer les habitations environnantes et même pour les refroidir en été, en utilisant des solutions technologiques tel que le système de refroidissement par dessiccation (desiccant cooling system).

Ce travail est la continuité d'une série de travaux qui s'intègre dans le projet PRFU « Etude de faisabilité et valorisation des systèmes énergétiques innovants de production de froid au climat Saharien ».

Dans ce mémoire, nous proposons une nouvelle solution technologique pour exploiter cette énergie géothermique provenant des eaux profondes, afin de chauffer les habitations ; il s'agit d'un échangeur eau-air immergé dans un réservoir d'eau alimenté continuellement par un forage Albien. L'air chauffé est ensuite évacué vers les habitations et les complexes thermales.

L'étude expérimentale concerne la mesure et l'évaluation des performances d'un échangeur thermique eau-air immergé dans de l'eau chaude en termes d'évolutions de température à différentes longueurs.

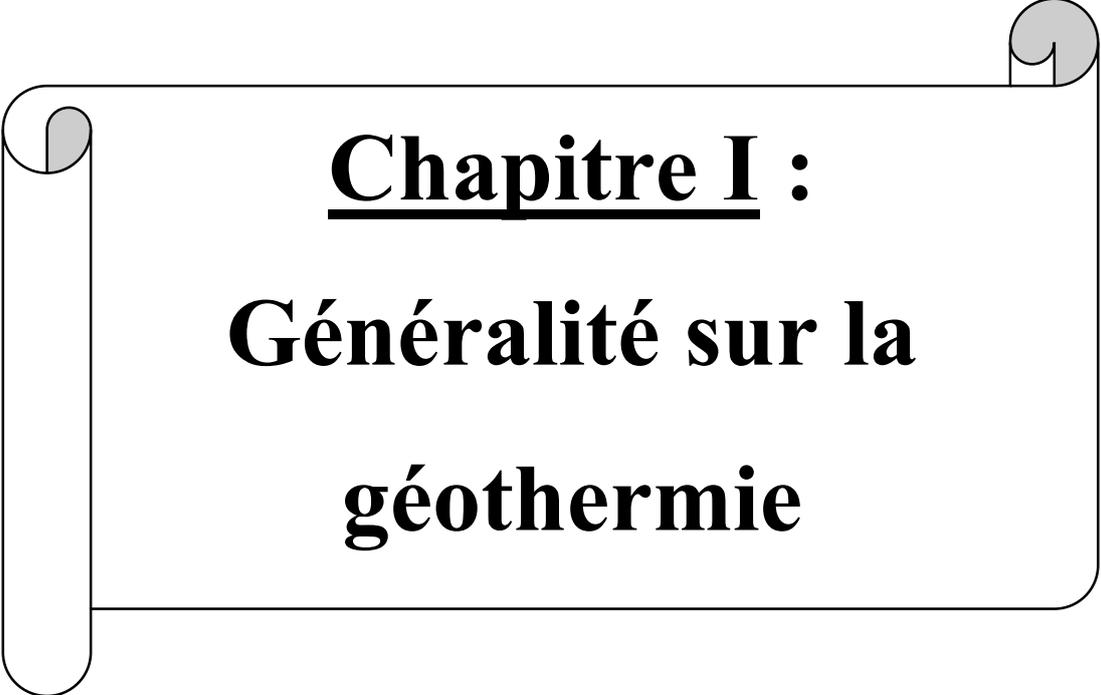
Le manuscrit est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons donné une idée générale sur la géothermie, ses différents types et la distribution de cette énergie dans le territoire Algérien.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des différents types d'échangeurs de chaleur et leurs applications.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation de la faisabilité de notre solution technologique ; les résultats expérimentaux sont présentés et interprétés dans ce chapitre.

Enfin, nous terminons ce modeste travail par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des résultats et des conclusions de cette étude.



**Chapitre I :**  
**Généralité sur la**  
**géothermie**

## I.1. Introduction

La géothermie, dérivée des termes grecs "géo" (la terre) et "thermie" (la chaleur), englobe à la fois l'étude des processus thermiques internes de la planète et les méthodes pour exploiter cette énergie. Elle désigne également l'énergie thermique extraite de la chaleur terrestre et convertie en source d'énergie. Pour capter cette énergie, on fait circuler un liquide à travers les profondeurs de la Terre. Ce liquide peut être celui d'une nappe d'eau chaude naturelle ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le liquide se réchauffe en absorbant la chaleur et remonte chargé de calories, soit de l'énergie thermique, qui peut être utilisée directement ou convertie en électricité [2].

La chaleur provenant de la terre est une ressource énergétique durable pour produire de la chaleur et de l'électricité, indépendamment des conditions météorologiques, des saisons ou des heures du jour. Avec une variété de températures et de profondeurs, elle offre de nombreuses possibilités d'utilisation.

La géothermie tire parti de la chaleur emmagasinée sous la surface de la terre, principalement générée par la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, ainsi que par les échanges thermiques avec les couches plus profondes de la Terre.

Les températures des roches varient, avec environ 25-30°C à 500 mètres de profondeur dans la plupart des régions, et de 35-45°C à 1000 mètres.

Dans certaines zones, comme celles avec une activité géologique particulière, les températures peuvent dépasser les 100°C, voire 200°C ou plus.

La chaleur terrestre est une source d'énergie pratiquement inépuisable, ce qui renforce l'intérêt croissant pour la géothermie dans le domaine de l'approvisionnement énergétique. Son rôle dans les politiques énergétiques futures ne cesse de prendre de l'importance [3].

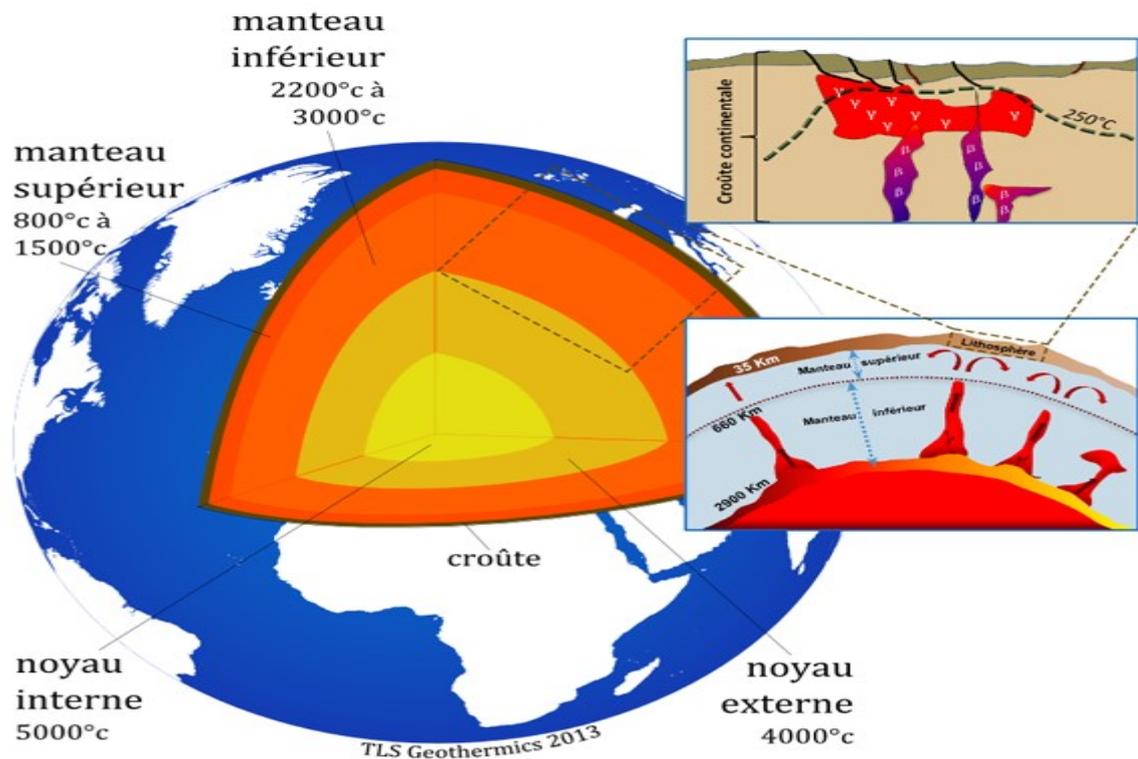


Figure I.1 : Les différentes couches de la surface du globe [4].

## I.2. Les différents types de géothermie :

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui utilise la chaleur naturelle des Sous-sols pour produire de l'électricité et de la chaleur. De faible profondeur, profonde et de grande profondeur.

Voici les trois grands types de géothermie actuellement exploités dans le monde

### I 2.1. La géothermie haute énergie :

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à °150 C (BRGM, 1978).

On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques (volcans) et sismiques (frontières de plaques) ou le gradient géothermique est particulièrement élevé. La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité.

La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur [5].



Figure I.2: Géothermie haute énergie [6].

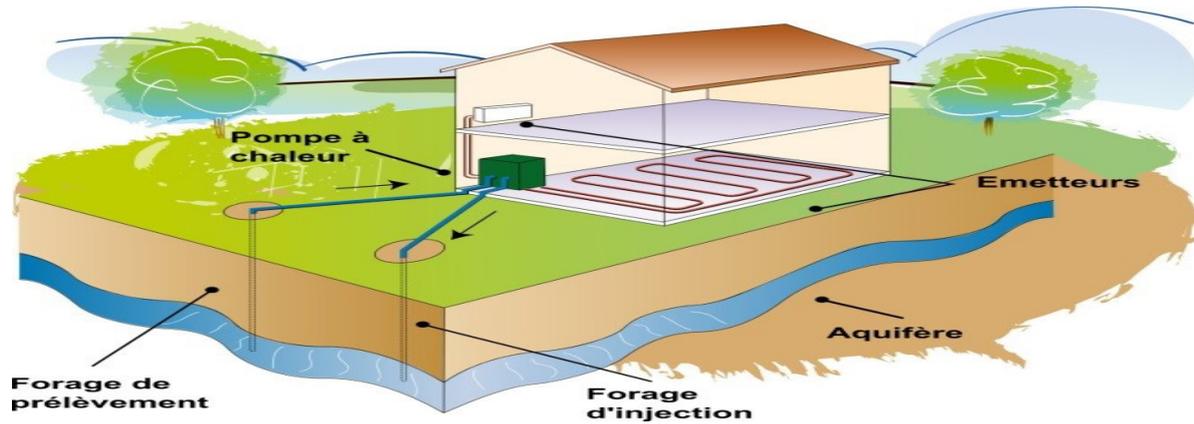
### I.2.2. La géothermie moyenne énergie :

La géothermie de moyenne énergie concerne des projets plus profonds et des températures généralement supérieures à 90 °C. Le but de cette géothermie est d'utiliser la forte température des profondeurs pour produire de la chaleur, ou de l'électricité (dans une moindre mesure), voire les deux en même temps. Les usages principaux de ce type de géothermie sont industriels et comprennent l'extraction de produits chimiques, le séchage de produits industriels ou encore la récupération de métaux [7].

### I.2.3. La géothermie de basse énergie :

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30 °C et 150 °C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions.

Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage des serres [8].



**Figure I.3 :** Schéma expliquant la géothermie basse énergie [9].

### **I.3. Exploitation de la chaleur géothermique dans le monde :**

La géothermie donne possibilité a plusieurs utilisations telles que :

- 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 [10].

### **I.4. La géothermie en Algérie :**

L'Algérie possède une richesse en eaux thermo-minérales, avec des nappes et des sources d'eau chaude dont les températures varient entre 20°C et 98°C. Au Nord, environ 200 sources thermales offrent des températures de 22°C à 90°C, tandis que le bassin sédimentaire du bas Sahara regorge de réserves d'eau chaude variant de 50°C à 56°C. Des sources à très haute température, telles qu'à Ain Ouelmen et Biskra, peuvent atteindre respectivement 118°C et 119°C. Ce potentiel géothermique offre des opportunités d'exploitation et de valorisation, notamment dans le sud algérien, où plusieurs sources sont accessibles à des profondeurs allant jusqu'à 80 mètres dans la région d'El Menia [16].

### I.5. Les avantages et les inconvénients de la géothermie :

#### Avantage :

Les avantages de la géothermie résident dans sa disponibilité et son respect pour l'environnement :

- Proximité de la ressource énergétique, réduisant ainsi les besoins en transport.
- Utilisation d'une source d'énergie renouvelable favorisant la préservation de l'environnement.
- Capacités de production significatives par rapport à d'autres énergies renouvelables.
- Stabilité de l'énergie de base, généralement peu affectée par les conditions climatiques [14].
- C'est un mode de chauffage économique. La chaleur du sous-sol est disponible en continu.
- Il est performant. Peu de perte d'énergie constatée entre les capteurs et la PAC.
- Il fonctionne partout dans le monde. Même si les zones volcaniques produisent plus de chaleur.
- Le chauffage géothermique est écologique. La production de chaleur génère peu de gaz à effet de serre [15].

#### Inconvénients :

- Coûts élevés d'investissement et de maintenance.
- Spécialisation nécessaire dans les zones géographiquement proches des phénomènes volcaniques.
- Risque potentiel de glissements de terrain [1].
- Certains terrains trop rocailloux ne sont pas éligibles à la géothermie.

#### **Le coût des installations nécessaires au chauffage géothermique est élevé.**

- La rentabilité du dispositif ne se constate qu'à partir de la 5<sup>e</sup> année.
- La géothermie horizontale nécessite un grand terrain tandis que le captage vertical de l'énergie a besoin de forage profond. [15].

### I.6. Nappe albienne et Les zones géothermiques en Algérie :

Le réservoir albien dans la zone saharienne s'étend sur la majeure partie du nord-est du Sahara algérien et une partie considérable de son ouest.

Les sources thermales sont rares dans cette région. La nappe albienne est exploitée par les puits principalement à des fins domestiques et agricoles. La température de l'eau varie respectivement de 30 °C à 80 °C d'Ouest en Est.

Le Continental Intercalaire constitue le réservoir de l'aquifère albien, couvrant une superficie de 600 000 km<sup>2</sup> [11]. Ce réservoir affleure dans sa partie sud et plonge vers le nord pour atteindre une profondeur de 2600 m dans la région de Biskra. Ce réservoir est recouvert de formations calcaires qui présentent les caractéristiques chimiques du type eau (CaNa-SO<sub>4</sub>Cl) avec un TDS moyen de 1,5 g/L.

Les forages profonds dans la région de Biskra (Algérie) sont caractérisés par des débits importants (35 à 120 l/s) compte tenu des conditions hydro-climatiques sévères de ces zones désertiques (Tableau 1. I). Malgré cette situation, il nous semble décevant de constater que ces forages n'ont fait l'objet d'aucun suivi ni du point de vue hydro-géologique (sondage du tubage, variation des débits, variation de la charge ...), ni du point de vue hydrochimique. (Variation temporelle des caractéristiques physico-chimiques de l'eau) [12].

Bien que la zone autour de Biskra abrite des sources à haute température, les plus de deux cents sources enregistrées dans la partie nord du pays sont à basse température. Ils sont principalement utilisés à des fins balnéologiques, bien qu'il existe également une petite quantité de chauffage par serre.

L'utilisation la plus largement reconnue des sources géothermiques est la balnéothérapie. Ces sources chaudes sont principalement situées dans la partie nord du pays, utilisées par une dizaine de stations publiques.

Au cours des dernières années, un intérêt considérable a été manifesté pour les utilisations alternatives de l'énergie géothermique. Trois sites ont été sélectionnés pour des projets d'aquaculture géothermique.

Actuellement, les fermes piscicoles de Ghardaïa et de Ouargla utilisent l'eau géothermique albienne du Sahara pour produire environ 1 500 tonnes/an de poisson tilapia. Un troisième site à Ain Skhouana, situé près de Saida, a produit 200 tonnes de tilapia en 2008.

## Chapitre I: Généralités sur la géothermie

Un petit projet de pompe à chaleur géothermique a également été lancé dans cette région. La pompe à chaleur est une pompe inversée, utilisée pour chauffer et refroidir 12 salles de classe, la bibliothèque et le restaurant d'une école primaire. L'eau géothermique du Hammam Sidi Aïssa (46°C) est utilisée à cet effet [13].

**Tableau I.1** : Principales Caractéristiques chimiques de quelques sources thermales  
la région de Biskra

Ville (village)	Nomination de Forage	Date de fin du forage	Profondeur (m)	Débit (l/s)
<b>Ras El Miaad</b>	<b>Ras El Miaad</b>	<b>1983</b>	<b>1741</b>	<b>60</b>
	<b>Hassi Berkher</b>	<b>1984</b>	<b>1641</b>	<b>60</b>
	<b>Hassi Samra</b>	<b>1983</b>	<b>1740</b>	<b>50</b>
<b>Besbes</b>	<b>Elhouba</b>	<b>1984</b>	<b>1912</b>	<b>60</b>
	<b>Besbes</b>	<b>1982</b>	<b>1933</b>	<b>50</b>
	<b>Ras Eldjader</b>	<b>1981</b>	<b>2729</b>	<b>70</b>
<b>Sidi Khaled</b>	<b>Sidi Khaled n°1</b>	<b>1956</b>	<b>2500</b>	<b>100</b>
	<b>Sidi Khaled n°2</b>	<b>1982</b>	<b>2150</b>	<b>80</b>
	<b>Sidi Khaled n°3</b>	<b>1983+</b>	<b>2040</b>	<b>80</b>
<b>Ouled Djellal</b>	<b>Ouled Djellal</b>	<b>1983</b>	<b>2170</b>	<b>80</b>
	<b>Ouled Djellal</b>	<b>1974</b>	<b>2138</b>	<b>80</b>
	<b>Ouled Djellal</b>	<b>1982</b>	<b>2200</b>	<b>80</b>
<b>Daoucen</b>	<b>Daoucen</b>	<b>1979</b>	<b>2200</b>	<b>80</b>
<b>El Ghrous</b>	<b>El Ghrous</b>	<b>1981</b>	<b>2309</b>	<b>60</b>
<b>Foughala</b>	<b>Foughala</b>	<b>1989</b>	<b>2250</b>	<b>80</b>
<b>Tolga</b>	<b>Tolga</b>	<b>1984</b>	<b>2081</b>	<b>120</b>
<b>Bouchagroun</b>	<b>Bouchagroun</b>	<b>1988</b>	<b>2381</b>	<b>120</b>
<b>El Hadjeb</b>	<b>El Hadjeb</b>	<b>1986</b>	<b>2333</b>	<b>120</b>

## Chapitre I: Généralités sur la géothermie

<b>M'Lili</b>	<b>M'Lili</b>	<b>1987</b>	<b>2413</b>	<b>35</b>
---------------	---------------	-------------	-------------	-----------

Les recherches démontrent qu'il existe un nombre significatif de sources thermales dans le Nord de l'Algérie. Environ 200 sources ont été répertoriées, réparties dans tout le territoire nord algérien, avec une concentration majeure dans le Nord-Est (voir tableau 2). Parmi les plus remarquables, citons Hammam Maskoutaine (98°C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52°C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Ces sources thermales émergent principalement des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie.

Trois zones à fort gradient géothermique sont identifiées : au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre-Nord de l'Algérie, en particulier dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine.

En outre, outre les nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, le Sahara septentrional abrite une importante réserve en eau thermale, notamment la nappe du Continental Intercalaire.

## Chapitre I: Généralités sur la géothermie

**Tableau I. 2:** Principales Caractéristiques chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie [1].

Sources Thermales	Région	Faciès chimique	Résidus Secs(mg/l)	Température (C°)	Débit (L/s)
H. chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H. BouHadjar	Ain-	Chloruré sodique	3210	66.5	
H. Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	
H. Boutaleb	Setif	Chloruré sodique	3416	52	-
H. Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
H. Salhine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
H. Sidi Bou Abdallah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H. Delaa	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	-
H. Rabi	Saida	Chloruré sodique	1524	47	-
H. Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
H. Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

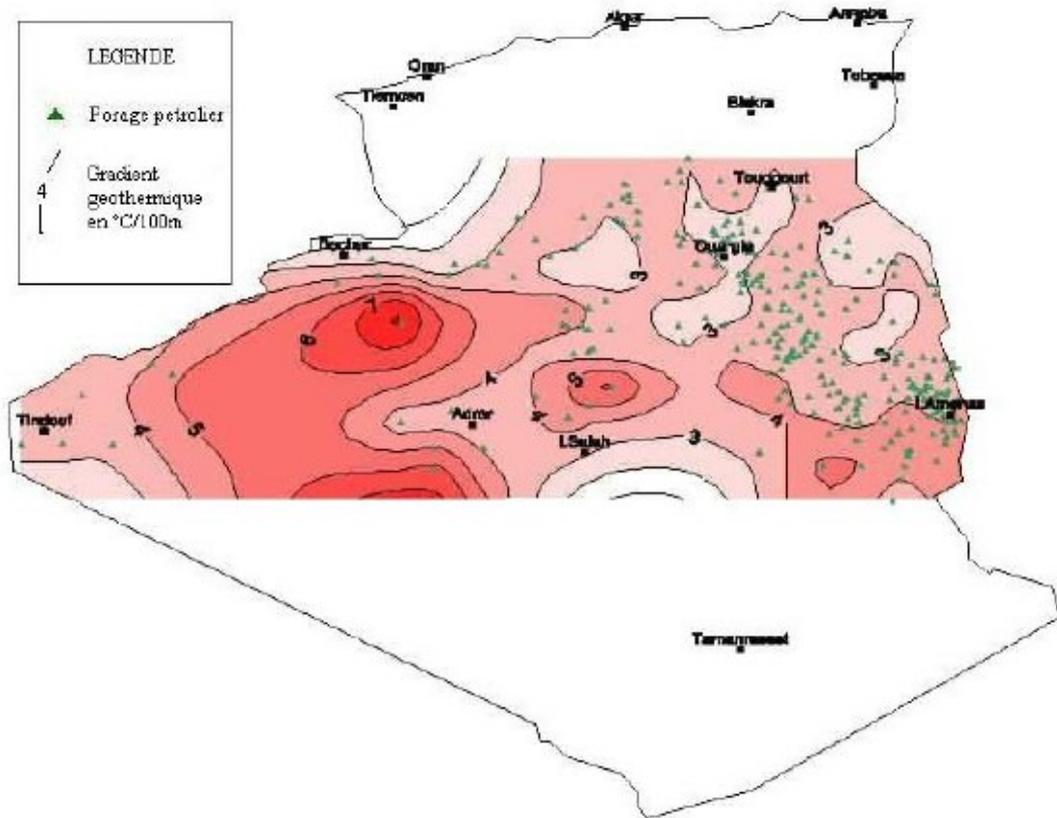
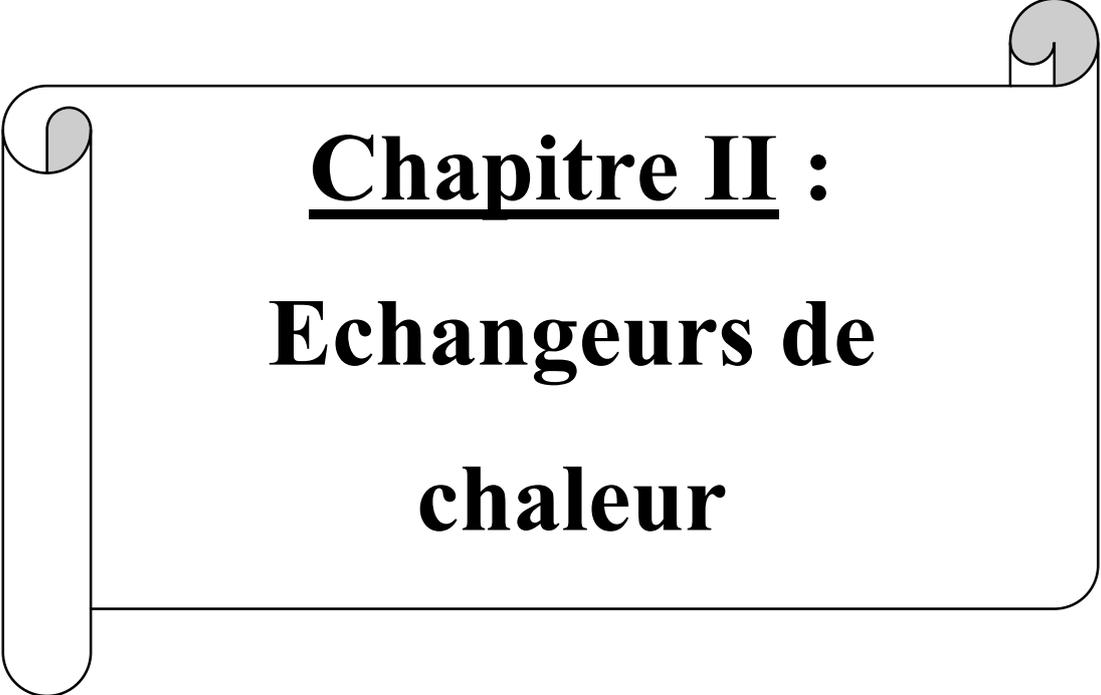


Figure I.2: Carte géothermique du Sud algérien [1].

### I.7.Conclusion :

En conclusion, la géothermie offre une diversité de types d'exploitation selon l'intensité de l'énergie récupérée : haute, moyenne et basse énergie. À l'échelle mondiale, cette source d'énergie renouvelable est largement exploitée, notamment à travers des nappes albiennes et des sources chaudes. Ses avantages incluent la durabilité et la faible émission de gaz à effet de serre, mais elle présente également des défis comme la localisation spécifique des ressources et les coûts initiaux élevés. En Algérie, les zones géothermiques offrent un potentiel prometteur pour répondre aux besoins énergétiques nationaux tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles.



**Chapitre II :**  
**Echangeurs de**  
**chaleur**

### II.1. Introduction

Les échangeurs de chaleur sont des appareils qui fournissent l'énergie thermique d'écoulement entre deux ou plusieurs fluides à des températures différentes. Ils sont utilisés dans une large variété d'applications, ceux-ci incluent la production d'énergie ; les industries alimentaires, de produit chimique ; dans le domaine d'électronique ; technologie environnementale ; rétablissement de chaleur résiduelle ; industrie ; et climatisation, réfrigération, et applications de l'espace [17].

Parmi ces multiples applications, on peut citer par exemple son utilisation dans les opérations de raffinerie où l'élaboration des produits commerciaux à partir du pétrole brut. Les unités de séparation, telles que distillation, extraction par solvant et cristallisation, nécessitent des quantités importantes d'énergie calorifique pour obtenir le gradient de température qui permettra le fractionnement, de même, les unités mettant en jeu des réactions de transformations, telles que le craquage ou la synthèse, exigent la fourniture d'énormes quantités de chaleur pour atteindre le seuil de la température au-delà duquel les réactions sont possibles.

L'emploi de ces échangeurs de chaleur varie d'une application à une autre ; L'étude de leur choix du type d'échangeur de chaleur dans une application de conditionnement d'air reste l'une des étapes primordiales lors de la réalisation d'une installation de climatisation solaire.

Les phénomènes de changement de phase à savoir condensation et évaporation sont utilisés dans plusieurs domaines d'applications industriels. Par exemple, le transfert de chaleur par condensation se produit dans des applications de technologie [18]. L'évaporation est un processus industriel très fréquent : tel que le dissolvant dans une solution vaporisée pour donner une solution concentrée. Cette vapeur concentrée peut être un produit ou un déchet de vapeur. Si, comme c'est très souvent le cas, le dissolvant est l'eau alors la vapeur produite peut être rejeté, ou plus économiquement, la chaleur dans la vapeur peut être réutilisé [19].

Tout système de réfrigération et de conditionnement sont basés sur un cycle de compression de vapeur contenant un évaporateur et un condenseur qui sont dans la plupart des cas des échangeurs à faisceau tubulaires [20].

### II.2. Définition :

Les échangeurs de chaleur sont des appareils conçus pour transférer l'énergie thermique d'un fluide à un autre sans les mélanger. Habituellement, ces fluides sont séparés par une paroi solide à haute conductivité thermique pour éviter tout mélange, bien qu'ils puissent aussi être en contact direct. Par exemple, dans un moteur à combustion interne, le liquide de refroidissement passe à travers des serpentins de radiateur tandis que l'air les traverse, refroidissant ainsi le liquide et réchauffant l'air. En génie électrique, on trouve également des échangeurs de chaleur dans les générateurs de vapeur, les ventilateurs, les systèmes de refroidissement à eau et les condenseurs. Par exemple, un générateur de vapeur convertit l'eau en vapeur à partir de la chaleur produite dans le cœur d'un réacteur nucléaire, qui entraîne ensuite une turbine. Le transfert de chaleur implique généralement la convection dans chaque fluide et la conduction à travers la paroi. Pour analyser ces échangeurs, les ingénieurs utilisent souvent un coefficient global de transfert de chaleur, le facteur U, similaire à la loi de Newton sur le refroidissement. De plus, la différence de température moyenne logarithmique (LMTD) est utilisée pour évaluer la force motrice de la température dans le transfert de chaleur [21].

### II.3. Critères de classement des échangeurs :

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs de chaleur, ces derniers peuvent être classés comme suit :

#### II.3. 1. Classement technologique :

Les principaux types d'échangeurs, sont les suivants [22] :

- Les échangeurs à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- Les échangeurs à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire.
- Les échangeurs d'autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

#### II.3. 2. Classement suivant le mode de transfert de chaleur :

Dans la plupart des applications (chambres de combustion, récupération des fumées, etc.) sont couplés avec les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement), et il existe généralement un mode de transfert de chaleur dominant. Pour tout échangeur qui transfère la chaleur à travers les parois, la conduction se produit [22].

### II.3. 3. Classement fonctionnel :

Le passage du fluide à travers l'échangeur peut se faire avec ou sans changement de phase, selon les cas, on dit qu'on a un écoulement monophasique ou un écoulement diphasique. On a alors les différentes situations suivantes [22] :

Les deux fluides ont un écoulement monophasique.

Un seul fluide a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs.

Les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapo-condenseurs.

### II .4. Les différents types d'échangeurs thermiques :

#### II .4.1. Les principales technologies utilisées :

Le fonctionnement d'un échangeur thermique se fait grâce à deux principaux dispositifs [23]:

- Les plaques
- Les tubes

Il en existe d'autres, comme les échangeurs thermiques à ailettes, à bloc ou encore à spirales. Cependant, pour les systèmes de chauffage ou d'eau chaude des logements, ce sont surtout ceux à plaques et ceux munis de tubes qui sont principalement employés.

De plus, les échangeurs thermiques ne fonctionnent pas tous avec la même nature de fluide. Ils peuvent donc être de type [23] :

- Eau/eau
- Vapeur d'eau/eau
- Huile/eau
- Eau/air
- Huile/air
- Air/air



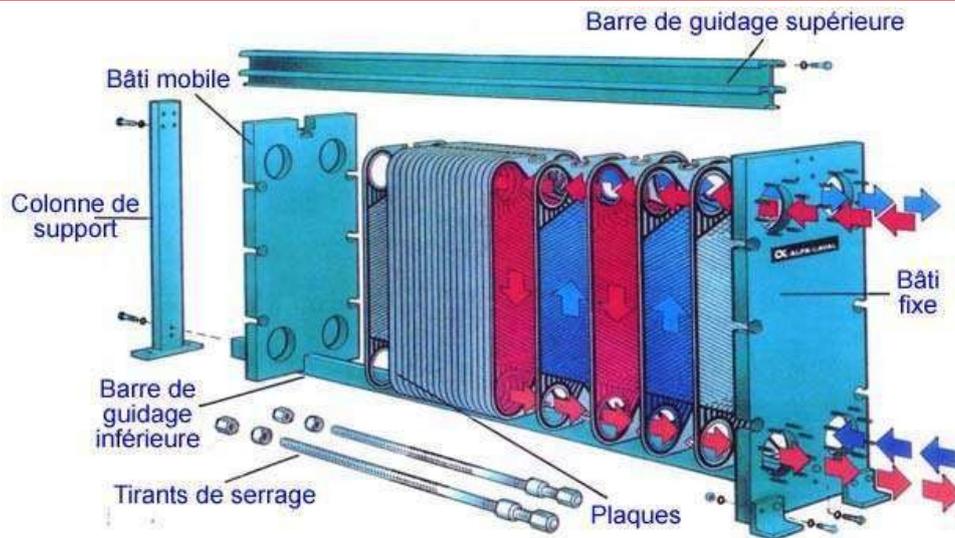
**Figure II.1:** Principe de travail d'un échangeur

### II .4.2. L'échangeur thermique à plaques

Un échangeur de chaleur à plaques est constitué d'un ensemble de plaques métalliques embouties à travers lesquelles la chaleur est transférée entre les deux fluides. Il est constitué de (Figure 6) :

- **Les plaques :** sont serrées entre un bâti fixe et un bâti mobile. Elles sont positionnées et guidées par deux barres support inférieure et supérieure.
- **Les bâtis :** maintiennent les plaques serrées au moyen de tirants. Les deux barres guides sont-elles mêmes supportées par un pied support.
- **Un joint :** par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par les deux plaques.

Le raccordement des fluides s'effectue généralement sur le bâti fixe de l'appareil.



**Figure II.2 :** Composition d'un échangeur à plaques.

On distingue, selon la géométrie du canal utilisé, les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire.

### ➤ **Échangeurs à surface primaire :**

Les échangeurs de chaleur à surface primaire sont constitués de plaques, qui peuvent être lisses ou ondulées (rainures ondulées ou en chevron), nervurées ou alvéolées. La conception du profil de la plaque peut être variée, mais elle a toujours la double fonction d'améliorer le transfert de chaleur et la résistance à la compression.

### ➤ **Échangeurs à surface secondaire :**

Ces échangeurs sont réalisés en Aluminium ou en Acier inoxydable ; ils sont constitués par un empilage de tôles ondulées formant des ailettes séparées par des tôles planes.

#### **II .4.2. 1. Utilisation des échangeurs à plaques :**

Ils sont couramment utilisés pour certaines applications liquide-liquide (en particulier l'industrie alimentaire). Pour les échangeurs gaz-liquide ou air-air, la faible densité du gaz implique que le gaz doit traverser à un débit inférieur à celui des liquides si l'on veut maintenir la perte de charge à un niveau acceptable.

Une diminution de la vitesse signifie également une diminution du coefficient de convection de la paroi liquide. Cela nécessite une augmentation de surface d'échange d'un même volume.

Les surfaces d'échange utilisées dans les échangeurs gaz-gaz sont souvent constituées de plaques planes séparées par des ailettes fixées aux plaques, les deux fluides circulants alternativement entre les plaques. Les ailettes permettent d'augmenter la surface d'échange, et les ailettes peuvent être placées n'importe où pour créer des discontinuités dans l'écoulement qui favorisent la turbulence et améliorent l'échange de chaleur.

Les échangeurs gaz-liquide nécessitent des surfaces d'échange de tailles différentes en contact avec les deux fluides. Pour cette raison, les voitures utilisent des batteries ou des refroidisseurs à tubes à ailettes [24].

### II .4.2. L'échangeur thermique tubulaire :

Pour des raisons économiques, les échangeurs de chaleur à tubes (Figure 7) comme composant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus dans l'industrie.

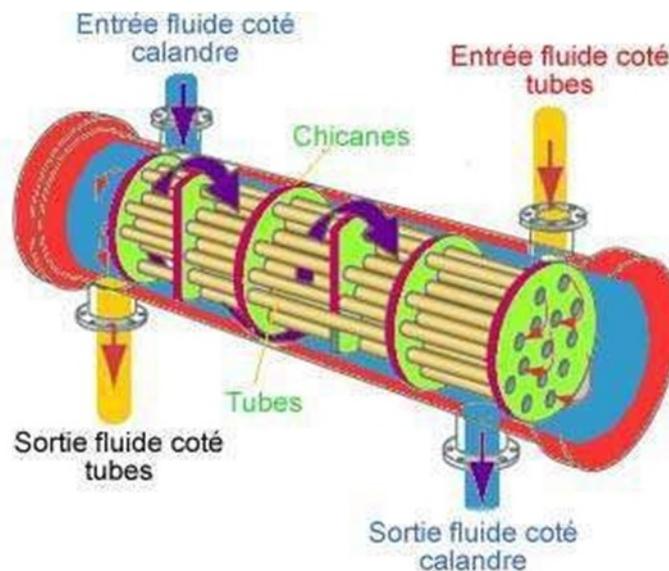


Figure II.3: Principe de l'échangeur tubulaire.

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes, et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

- **Échangeur monotube** : (figure 8.a), dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et possède, généralement la forme d'un serpent.
- **Échangeur coaxial** : (figure 8.b), dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés. En général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.

➤ **Échangeur à tubes séparés** : (figure 8. c) : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant, se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

➤ **Échangeur à tubes rapprochés** : (figure 8. d) : pour maintenir les tubes et

Obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.

➤ **Échangeur à tubes ailettes** : (figure 8. e) : ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.

➤ **Échangeur à tubes et calandre** : (figure 8. f) : c'est l'échangeur le plus répandu actuellement.

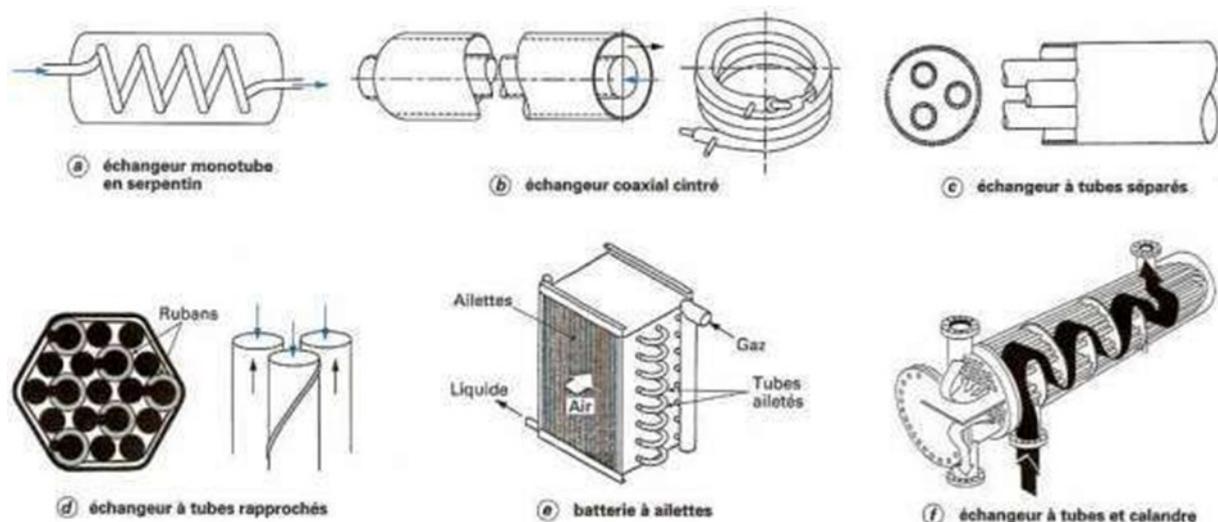


Figure II.4: Différents types d'échangeurs tubulaires. [25]

### II .4.3.1 Utilisation des échangeurs tubulaires :

L'échangeur de chaleur le plus simple qu'on puisse imaginer est constitué de deux tubes coaxiaux : l'un fait circuler le fluide dans le tube central et l'autre circule dans l'espace annulaire, tous deux dans le même sens ou dans des sens différents. Même en soudant les tubes, il est difficile d'obtenir une grande surface d'échange avec cette configuration sans aboutir à un dispositif très encombrant. Par ailleurs, on préfère placer un faisceau de tubes dans un logement unique, typiquement de forme cylindrique, dit logement, avec un fluide circulant dans les tubes et l'autre fluide circulant dans le logement entourant les tubes. Dans

ce type d'échangeur, des chicanes de formes diverses, disposées principalement perpendiculairement à l'axe de la grille, allongent et courbent le trajet du fluide à travers celle-ci, elles favorisent les turbulences et ont ainsi pour effet d'améliorer l'échange (mais malheureusement, c'est l'augmentation la chute de pression) [24].

### II .4.4. L'échangeur thermique en forme de serpentins :

Les nappes de tubes (serpentins) sont enterrées sur un plan horizontal jusqu'à une profondeur maximale de 3 m dans le sol et en soutirent ou ajoutent de la chaleur. Comme les nappes de tubes ne sont normalement disposées qu'à une profondeur de 0,5 à 3 m, le climat joue un rôle pour ce genre d'exploitation de la chaleur. Dans ce cas précis, le sol sert d'accumulateur d'énergie solaire, l'énergie géothermique proprement dite ne revêt alors qu'un rôle secondaire. Selon l'altitude topographique, les nappes de tubes permettent de retirer 20 à 30 W.m<sup>-2</sup> d'énergie thermique, Comme nous le notons sur l'image Fig 9 [26].



Figure II.5: Echangeur Serpentins [26]

### II. 4 .5. Echangeurs de chaleurs spiralées :

Ils présentent des caractéristiques d'échange thermique et de gestion des fluides idéales pour un large éventail d'applications industrielles dites « difficiles ». Ces échangeurs de chaleurs sont adaptés aux produits visqueux et aux produits contenant des particules solides susceptibles de causer un encrassement ou une corrosion importante sur d'autres types d'échangeurs de chaleur [28].



Figure II.6: Les échangeurs de chaleur spiralée [29].

### II. 4 .6. Échangeur à bloc :

L'échangeur à bloc est un type d'échangeur de chaleur réservé à des applications particulières. Il consiste en un bloc d'une matière thermiquement conductrice percé de multiples canaux dans lesquels circulent les 2 fluides. Le bloc est le plus souvent composé de graphite additionné parfois de polymères pour améliorer les propriétés mécaniques de l'échangeur. Le bloc est placé dans une structure qui assure la distribution des liquides dans les canaux.

Le bloc peut avoir différentes formes : cylindrique ou cubique. Il peut encore être composé d'un seul bloc ou de plusieurs parties empilées de manière à permettre les fluides de passer d'une partie à l'autre. L'intérêt de ce type d'échangeur de chaleur est principalement sa résistance chimique aux liquides corrosifs ainsi que sa capacité modulaire : le bloc peut facilement être remplacé en cas de fuites. Le fait que le rapport volume libre pour passage des fluides/volume du bloc est très petit crée une grande inertie dans les cas de changements de température : le bloc agit comme un réservoir et peut lisser les différences de température.

Les blocs sont cependant fragiles tant aux chocs qu'aux grands écarts de température (problème de dilatation non-uniforme pouvant conduire à des fissurations du bloc). Le prix est relativement élevé par rapport aux autres types d'échangeurs et le transfert de chaleur est en général moyen : l'épaisseur de la paroi d'échange est plus grande que pour une surface d'échange en métal pour cause de fragilité, ce qui augmente la résistance au transfert [16].



**Figure II.7:** Échangeur à bloc [16].

### **II.4.7. Echangeur tubes à ailettes :**

Les échangeurs de chaleur tubes à ailettes sont généralement utilisés pour refroidir ou chauffer des fluides au moyen de gaz ou l'inverse (l'eau, la saumure, la vapeur saturée, l'huile hydraulique, l'huile lubrifiante, l'huile thermique, les agents réfrigérants qui condensent ou s'évaporent, etc.). Il y a deux types :

#### **II.4.7.1. Ailettes plain (Batterie à ailettes) :**

Dans ce type d'échangeur (figure 12), les ailettes et les tubes sont généralement construits avec des matériaux de très bonnes conductivités thermiques (Cuivre, Aluminium, etc.). Les ailettes contiennent plusieurs trous par lesquels passent les tubes (circulaire, rectangulaire, ovale, etc.), et les ailettes peuvent être de différents types (plain, ondulé, etc.).[33]



**Figure II.8:** Echangeurs de chaleur tubes à ailettes plain. [28].

### II.4.7.2. Ailettes annulaires :

Les ailettes dans ce type des échangeurs de chaleur (figure (13)) sont généralement uniques pour un seul tube. La forme des ailettes et tubes se diffère selon l'utilisation (circulaire, rectangulaire, ovale, etc.) [33].



**Figure II.9:** Différent types des échangeurs de chaleur tube à ailettes annulaire [28].

### II .4.8. Les autres types d'échangeurs thermiques :

Les types d'échangeurs thermiques présentés ci-dessus ne sont pas les seuls disponibles. En effet, il en existe d'autres qui sont quant à eux destinés à des utilisations bien spécifiques, souvent dédiés au milieu de l'industrie. On peut citer:

- L'échangeur à bloc ou à micro canaux, utilisé dans les unités extérieures des pompes à chaleur
- L'échangeur à ailettes, que l'on trouve dans les radiateurs des véhicules [23].

### II.5. Le principe de fonctionnement :

#### II.5.1 Rôle de l'échangeur thermique :

L'échangeur thermique a pour rôle de transférer l'énergie calorifique d'un fluide vers un autre, ceci sans les mélanger. Dans le cas d'un système de chauffage ou de production d'eau chaude, un premier fluide dit « chauffant », considéré comme le fluide primaire, sert à chauffer le fluide secondaire. Pour un bon échange, les deux fluides doivent être de température différente, c'est pour cela que l'un est chaud et l'autre froid.

Pour effectuer le transfert de chaleur, l'échangeur thermique a besoin d'un matériau qui soit assez conducteur afin d'optimiser l'échange, tout en limitant le plus possible les déperditions de chaleur. Dès lors que le transfert de chaleur s'effectue entre les deux fluides, alors l'échangeur thermique a pleinement accompli sa mission. Il faut en outre savoir que l'échangeur thermique ne sert pas seulement à réchauffer un fluide. Selon le système pour lequel il est utilisé, son rôle est d'assurer la réfrigération du fluide, c'est le cas pour les climatiseurs ou encore les réfrigérateurs [23].

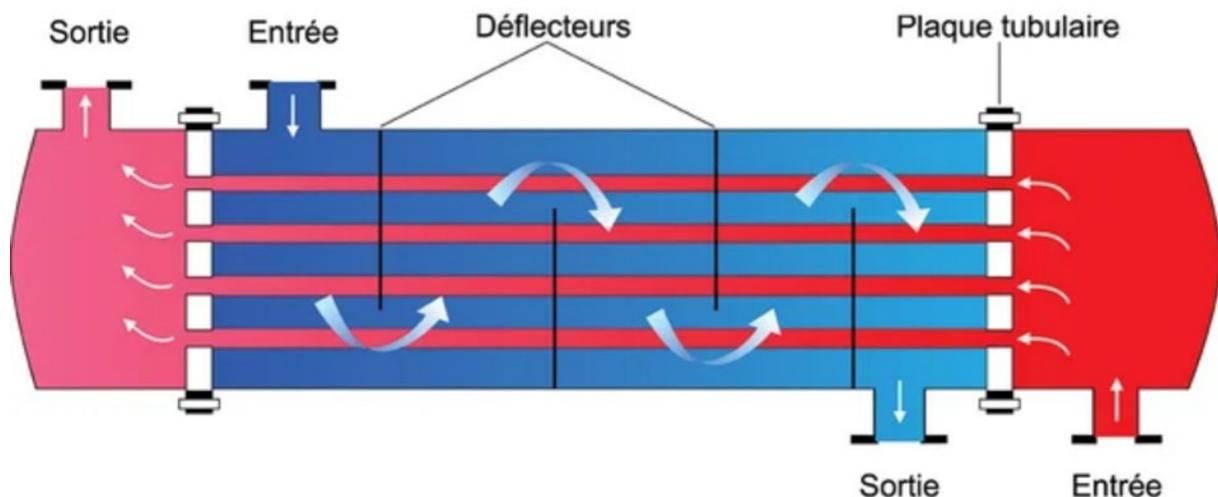


Figure II.10: Schéma expliquant Rôle de l'échangeur thermique [23].

### II.5.2. Son principe de fonctionnement :

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid. En d'autres termes, le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide chaud. Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi [32].

## II .6. Efficacité d'un échangeur thermique

### II .6.1. Le Rendement

La formule utilisée pour le calcul de l'efficacité de l'échangeur est celle utilisée par Hadjaj et al., mais sans connaître cette formule spécifique, il est difficile de fournir le calcul exact. Cependant, étant donné les conditions que vous avez décrites, l'efficacité de l'échangeur de chaleur implique probablement de comparer le transfert de chaleur réel réalisé par l'échangeur au transfert de chaleur maximal possible.

Voici une idée générale de la manière dont l'efficacité pourrait être calculée en fonction des conditions fournies :

1. Déterminer le transfert de chaleur réel : Cela implique de calculer la quantité de chaleur transférée de l'eau à l'air par l'échangeur de chaleur. Ce calcul pourrait probablement impliquer l'équation du taux de transfert de chaleur, qui prend en
2. compte des facteurs tels que la différence de température entre l'eau et l'air, la surface de l'échangeur de chaleur et l'efficacité de la surface de transfert de chaleur.
3. Déterminer le transfert de chaleur maximal possible : Cela implique de calculer la quantité maximale de chaleur qui pourrait théoriquement être transférée entre l'eau et l'air dans des conditions idéales. Ce calcul dépendrait de facteurs tels que la différence de température maximale pouvant être
4. e atteinte entre l'eau et l'air et les propriétés des matériaux impliqués.
5. Calculer l'efficacité : Une fois les transferts de chaleur réel et maximal possibles déterminés, l'efficacité de l'échangeur de chaleur peut être calculée à l'aide de la formule :

$$\text{Efficacité} = (\text{Transfert de chaleur réel} / \text{Transfert de chaleur maximal possible}) * 100\%$$

Si vous avez accès à la formule spécifique utilisée par Hadjaj et al., je peux vous aider à la comprendre ou à l'appliquer à votre situation [31].

$$\eta = \frac{T_s - T_e}{T_{eau} - T_e}$$

### II .6.2. La température

L'écart de température entre les deux fluides circulant dans l'échangeur thermique est très important. En effet, exprimé en Kelvin (K), ou en degrés Celsius (°C), le delta de température (dT), ou écart, doit être suffisant afin d'assurer l'échange de chaleur. Sans cet écart, le transfert ne pourrait avoir lieu ou deviendrait très difficile, et donc énergivore.

Pour chauffer le fluide primaire, le système dans lequel se trouve l'échangeur thermique va alors récupérer l'énergie générée grâce à des résistances électriques ou encore grâce à des produits de combustion (gaz, etc.).

### II .6.3. L'efficacité de l'échangeur thermique

L'efficacité de l'échangeur thermique dépend donc de nombreux critères, à savoir :

Le delta de température entre chaque fluide

La conductivité du matériau utilisé

La réduction des pertes de chaleur

Dans certains systèmes, les échangeurs thermiques à plaques sont privilégiés, tandis que dans d'autres les tubulaires sont plus efficaces [23].

## II .7. Critères généraux de performance d'un échangeur

Les critères de performances d'un échangeur sont généralement les suivant :

Le coefficient d'échange global U (ou K), largement utilisé, où une valeur plus élevée indique une meilleure performance. Il est crucial que les pertes de charge soient minimales tout en assurant une distribution efficace des fluides, ce qui dépend du design de l'échangeur.

La compacité, définie par le rapport entre la surface d'échange et le volume de l'échangeur, est également essentielle. R.K. Shah

Et enfin, l'efficacité, qui indique son rendement [27].

### II .7-1. Exigences d'étanchéité de l'échangeur et les risques de fuite des fluides :

La question des risques de fuite de fluides, en particulier en ce qui concerne l'étanchéité de l'échangeur, revêt une importance cruciale pour la sécurité de l'installation et la préservation de l'environnement. Cette considération peut grandement influencer le choix technologique et le dimensionnement de l'échangeur, notamment en exigeant des parois plus épaisses pour résister à la corrosion annuelle et parfois même des exigences de double paroi [27].

### II .7. 2. Critère associé à la nécessité d'inspection des équipements techniques :

Ce critère est déterminé à la fois par les obligations réglementaires telles que la DESP (Directive des équipements sous pression), et il est également étroitement lié aux critères précédents concernant l'encrassement et l'étanchéité [27].

### II .7. 3. Critère d'encombrement compacité :

La compacité d'un échangeur thermique offre une évaluation rapide de sa performance. Ce critère peut également influencer considérablement le choix technologique et le dimensionnement en fonction de l'espace requis par l'installation de l'échangeur dans le processus, que ce soit en termes de surface ou de volume [27].

### II .7. 4. Critère de coût de l'échangeur :

Dans les relations entre fabricants et utilisateurs, la compacité demeure un sujet délicat, surtout pour des applications courantes et bien maîtrisées. Cependant, dans des projets où la conception et la fabrication de l'échangeur sont déterminantes, le critère du prix peut être moins prépondérant [27].

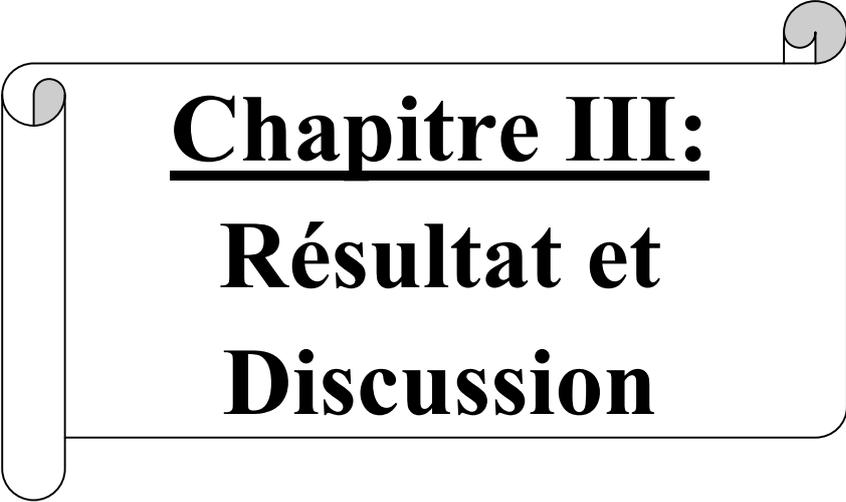
## II.8. Coefficient de performance :

La performance d'un échangeur de chaleur s'exprime par le coefficient de performance (COP). Le COP est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie transférée par la PAC (chaleur restituée dans le bâtiment) et l'énergie consommée pour réaliser ce transfert (énergie utilisée pour faire fonctionner le compresseur et certains auxiliaires). Le COP est un nombre sans dimension [25].

$$COP = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie fournie}} = \frac{|Q|}{W}$$

### II.9 Conclusion

En conclusion, la géothermie offre une gamme variée de ressources énergétiques, allant de la haute à la basse énergie. L'exploitation de la chaleur géothermique présente des avantages significatifs, notamment sa durabilité et sa faible émission de gaz à effet de serre. Cependant, des défis subsistent, notamment les coûts initiaux élevés et la limitation géographique des zones géothermiques. En Algérie, les ressources géothermiques, telles que la nappe albiennaise et les sources chaudes, offrent un potentiel prometteur pour répondre aux besoins énergétiques du pays. Avec une planification stratégique et des investissements appropriés, l'Algérie peut exploiter pleinement ces ressources pour contribuer à sa transition énergétique et à son développement durable.



**Chapitre III:**  
**Résultat et**  
**Discussion**

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'une série d'expériences menées dans la région West de la wilaya de Biskra. Cette série a été réalisée en utilisant de l'eau chaude provenant d'un puits situé dans la ville de M'lili, où la température à la sortie du puits est de 68 degrés Celsius. L'objectif de ces expériences est d'optimiser les dimensions d'un échangeur de type « Vertical Slinky » dont le but d'utiliser la chaleur de l'eau albienne pour le chauffage des locaux. Pour arriver aux objectifs visés nous avons utilisé un échangeur de chaleur de 30 mètres de longueur et nous avons placé plusieurs capteurs pour mesurer la température de l'air à différentes longueurs.

Malgré les risques et les conditions expérimentales dures, nous avons été obligés de répéter les expériences trois fois vu que les résultats de mesures contredisent la théorie.

La première expérience a été réalisée le 09 /02 /2024. Nous avons enroulé le tuyau autour d'un tourillon en bois. Les résultats ont montré un aspect aléatoire de l'évolution de la température de sortie en fonction de la longueur (Fig. 1).

La même remarque a été enregistrée aux résultats de l'expérience du 19/03 /2024 où nous avons utilisé des barres de fer pour fixer le rouleau au lieu du tourillon de bois (Fig.2).

Nous avons attribué cet aspect aléatoire au débit élevé de l'eau chaude du forage et au contact du bois avec le tuyau qui va influencer sur le transfert de chaleur entre l'eau chaude et le tuyau.



**Figure III.1** : Échangeur de chaleur monotube de 21,5 m de long (première expérience de chauffage de l'air 09 /02 /2024).



**Figure III.2:** Échangeur de chaleur monotube de 22 m de long (deuxième expérience de chauffage de l'air 19/03/2024)

### III.2. Description de l'échangeur :

L'échangeur est un tube en plastique enroulé hélicoïdalement autour des colonnes en fer pour le fixer et créer un espacement entre les enroulements, comme illustré dans le schéma suivant :



**Figure III.3:** Photo de l'Echangeur utilisé dans l'Expérience



**Figure III.4 :** Schémas de l'échangeur utilisé (Veritcal slinky).

**III.3. Dimensions de l'échangeur :**

Nous avons utilisé un échangeur de même structure, long de 30 mètres, le diamètre du tube est de  $D=32$  mm et l'épaisseur de la paroi du tube est de 1 mm, et nous avons installé cinq capteurs pour mesurer la température à l'intérieur de l'échangeur répartis le long de sa longueur, comme indiqué dans le tableau suivant. :

**Tableau III.1 :** Tableau montrant la distance entre les capteurs repartis le long de l'échangeur.

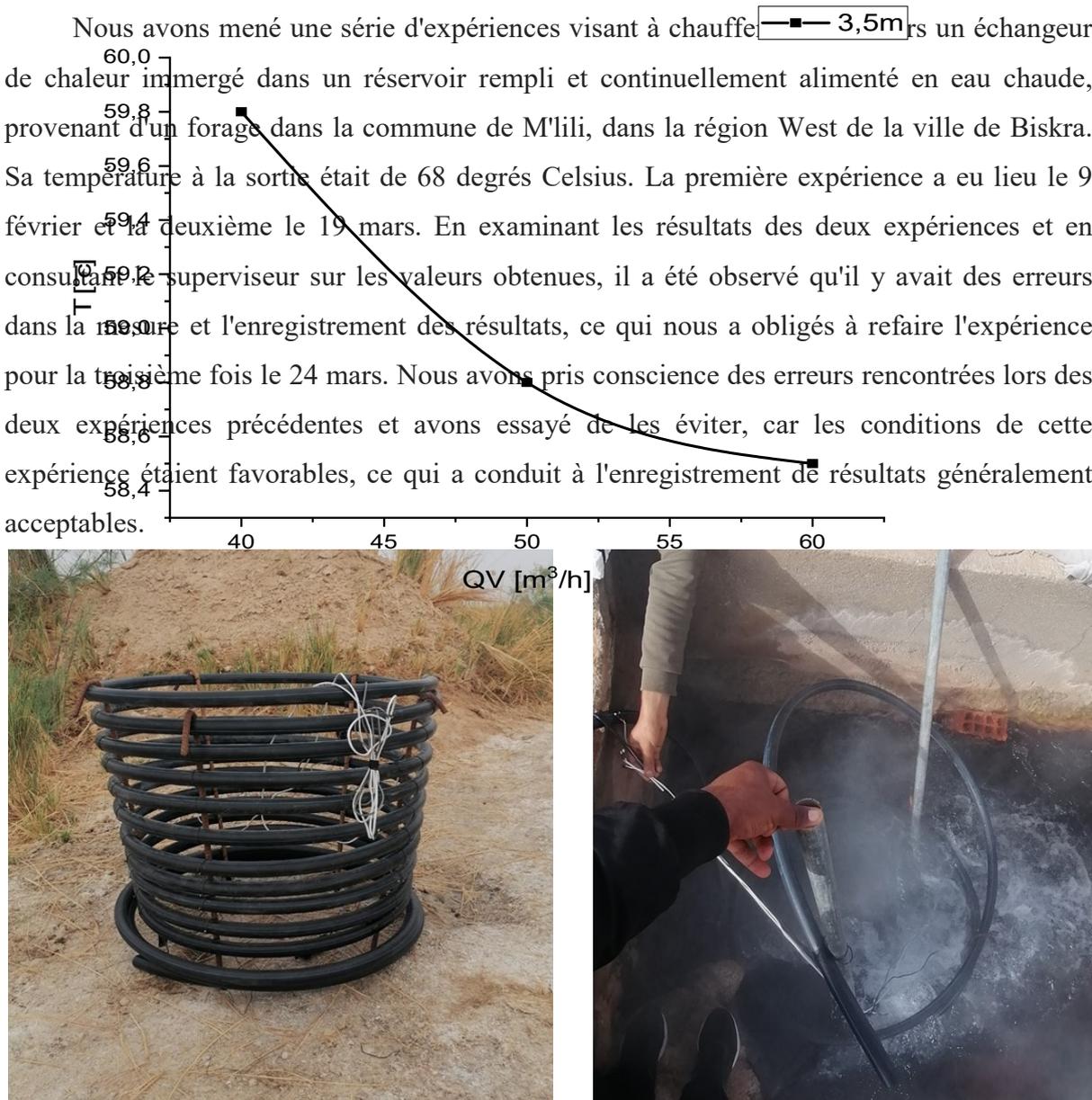
Capteur de température	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
La distance depuis l'entrée du tube	3.5	8.5	14.5	18.5	21.5



**Figure III.5 :** Capteurs de mesure de température à l'intérieure de l'échangeur

**III.4. Résultats et discussions :**

Nous avons mené une série d'expériences visant à chauffer un échangeur de chaleur immergé dans un réservoir rempli et continuellement alimenté en eau chaude, provenant d'un forage dans la commune de M'lili, dans la région West de la ville de Biskra. Sa température à la sortie était de 68 degrés Celsius. La première expérience a eu lieu le 9 février et la deuxième le 19 mars. En examinant les résultats des deux expériences et en consultant le superviseur sur les valeurs obtenues, il a été observé qu'il y avait des erreurs dans la mesure et l'enregistrement des résultats, ce qui nous a obligés à refaire l'expérience pour la troisième fois le 24 mars. Nous avons pris conscience des erreurs rencontrées lors des deux expériences précédentes et avons essayé de les éviter, car les conditions de cette expérience étaient favorables, ce qui a conduit à l'enregistrement de résultats généralement acceptables.



**Figure III.6 :** Échangeur de chaleur monotube (Verical Slinky) : (long= 21,5 m, 24/03/2024)

**III.4.1. Effet du Débit d'air sur la température de l'air :**

L'expérience a révélé une variation de performance dans l'échange de chaleur en fonction du débit, exprimé par la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'air, ainsi que la longueur immergée dans l'eau chaude, qui est de vingt et un mètres et demi (21,5). Des capteurs sont répartis le long de cette longueur pour mesurer la température, comme indiqué dans le tableau précédent (Tableau 3).

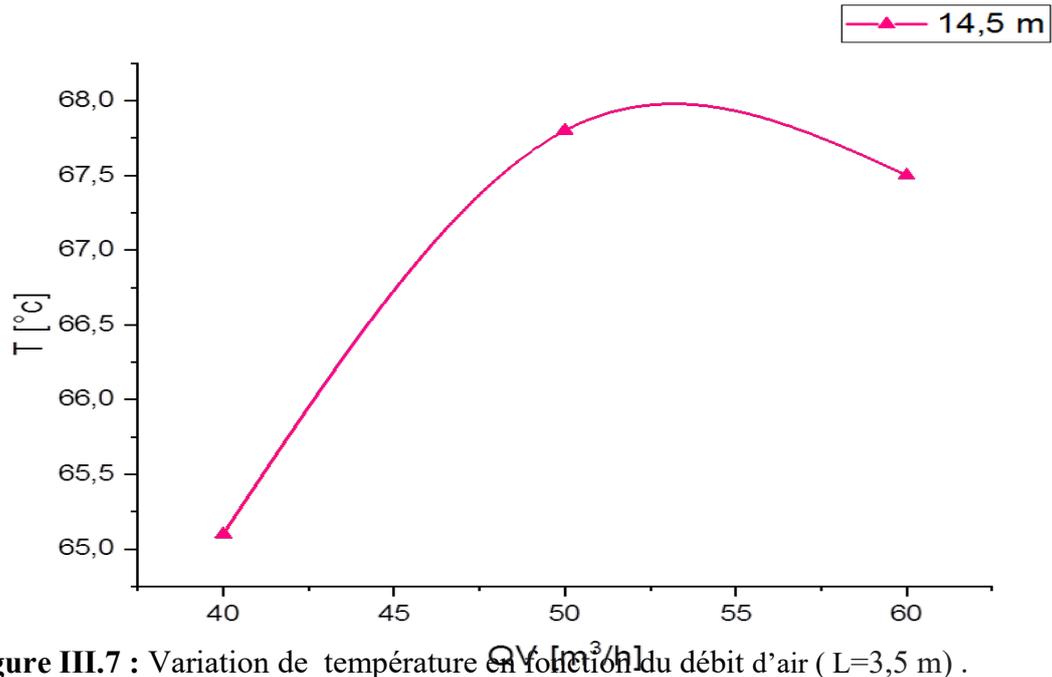


Figure III.7 : Variation de température en fonction du débit d'air ( $L=3,5$  m) .

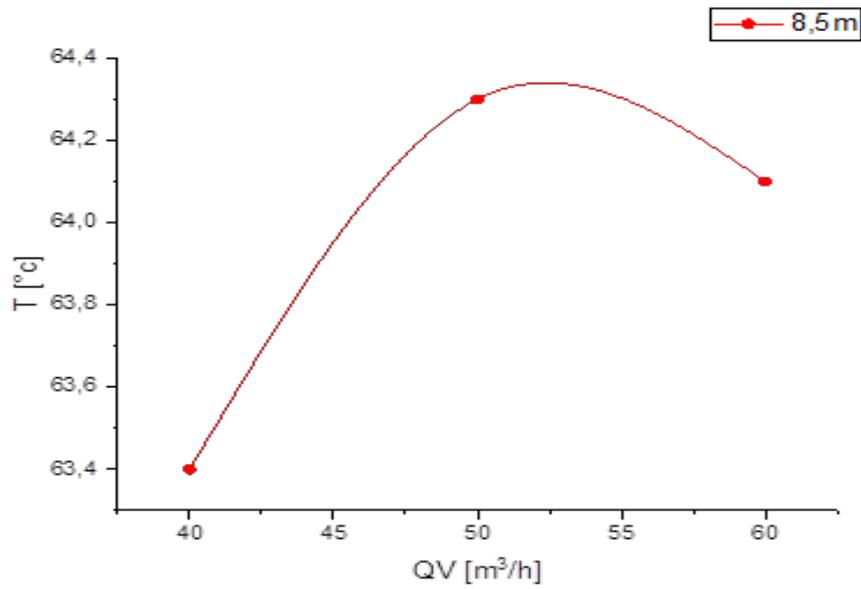
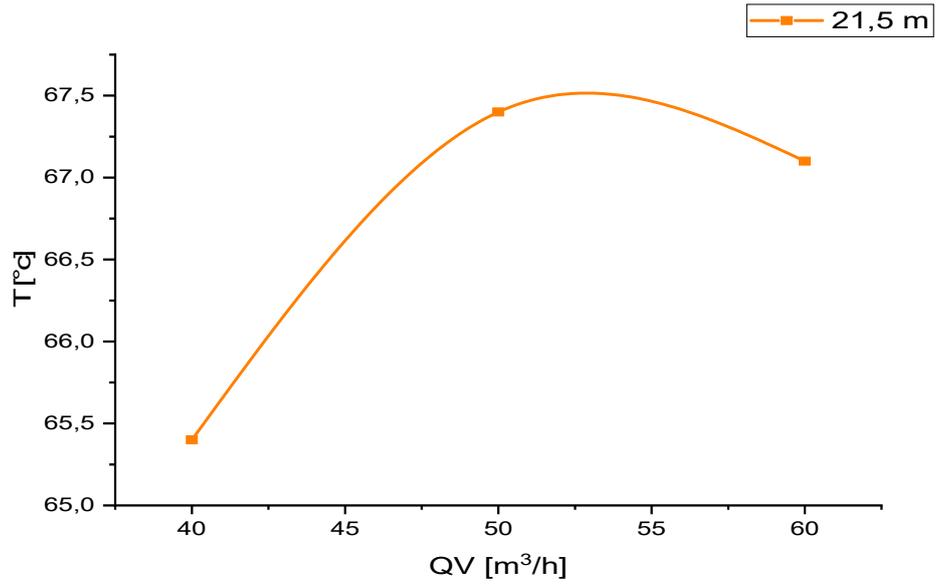
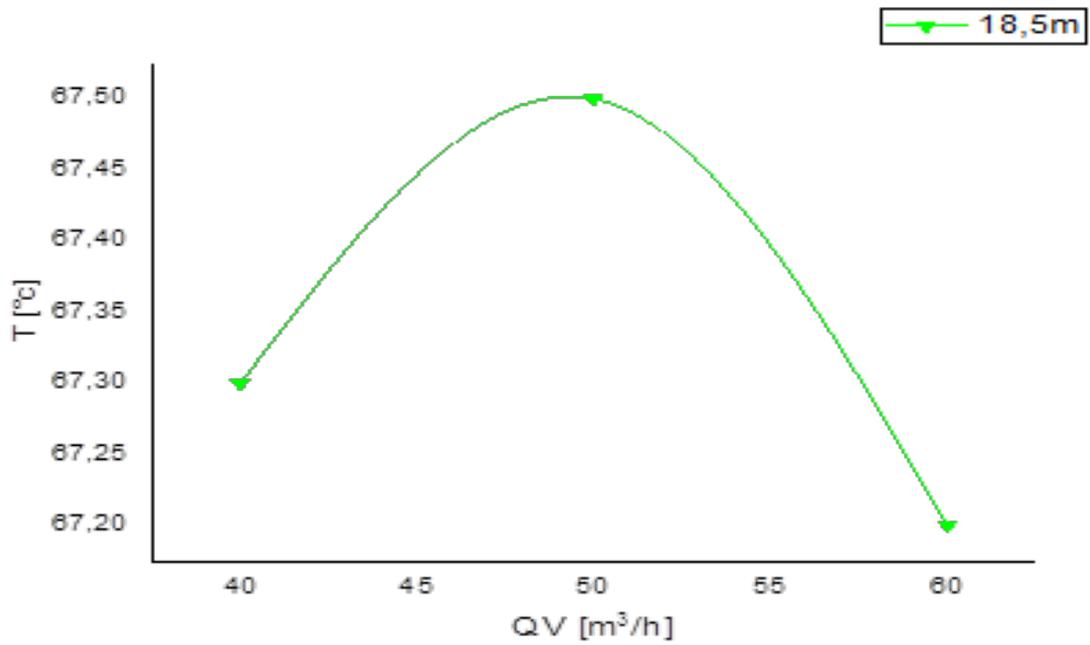


Figure III.8 : variation de température en fonction du débit d'air ( $L=8,5$  m) .



**Figure III.9:** Variation de température en fonction du débit d'air(  $L=14,5m$ ).



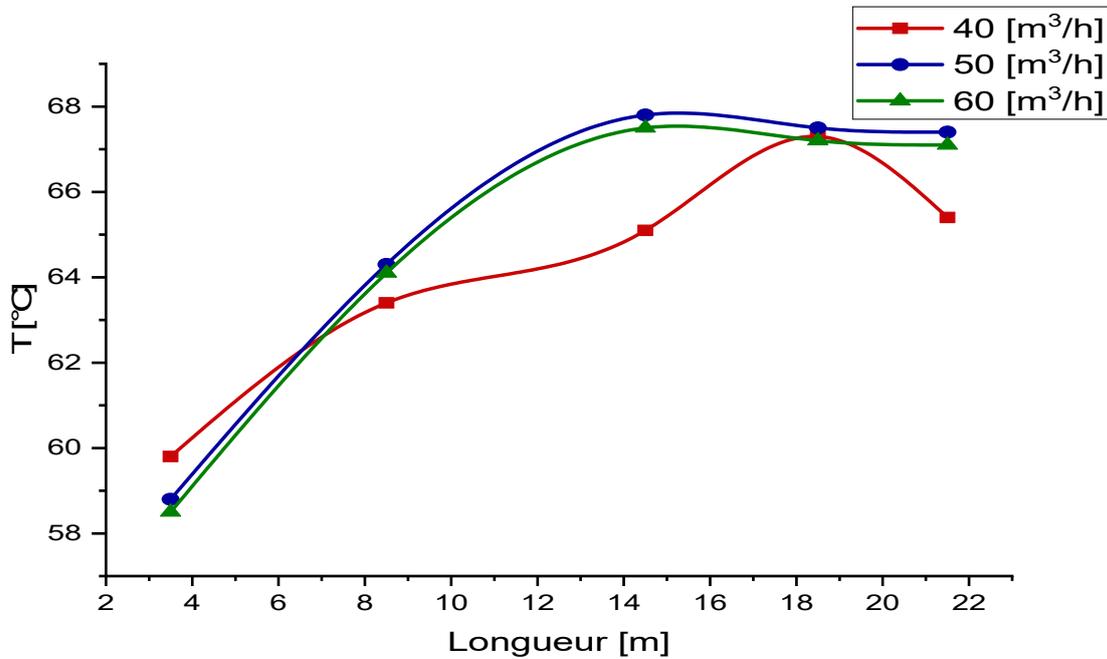
**Figure III.10:** Variation de température en fonction du débit d'air (  $L=18,5 m$  ) .

**Figure III.11** : Variation de température en fonction du débit d'air ( $L=21,5$  m) .

Selon l'analyse des résultats indiqués dans le graphique, il est clair qu'il existe une relation inverse entre le débit et l'écart de température de l'air avec l'augmentation de la longueur de l'échangeur. Selon les courbes indiquées dans le graphique, nous remarquons que le gain thermique fourni par cet échangeur varie entre 35 et 45 degrés Celsius pour des débits compris entre 40 et 60 mètres cubes par heure, et nous observons une diminution progressive de l'écart de température de 45 à 35 avec l'augmentation du débit, ce qui signifie qu'il est inversement proportionnel à la température.

#### **III.4.2. Effet de la longueur sur la température de l'air :**

Le graphique représente l'effet de la longueur de l'échangeur de chaleur sur la température de l'air chaud, où l'on peut voir qu'avec l'augmentation de la longueur de l'échangeur de chaleur, la température de l'air augmente. Cette dernière varie proportionnellement à la longueur pour atteindre sa valeur maximale d'environ 67 degrés Celsius lorsque la longueur du tube est de 21,5 mètres.



**Figure III.12 :** Evolution de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour différents débits d'air.

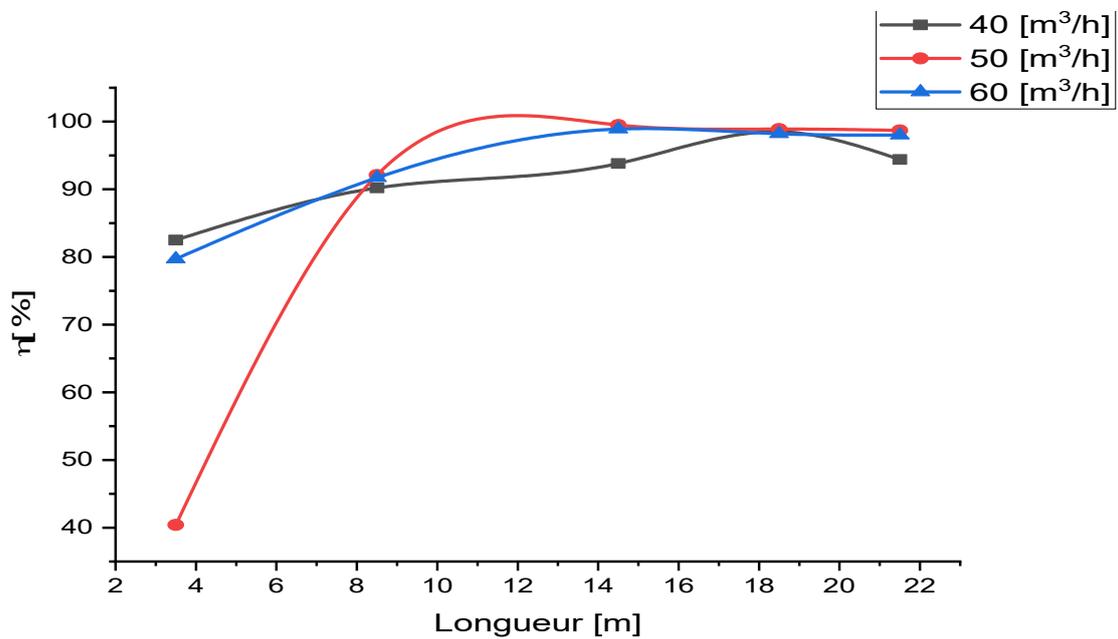
### III.4.3. Rendement de l'échangeur :

Les courbes de la **Figure III. 13** montrent clairement que l'efficacité de l'échangeur de chaleur augmente avec la longueur jusqu'à un certain point avant de se stabiliser. Cela indique qu'il existe une longueur optimale pour l'échangeur où une efficacité maximale est atteinte, avant que toute augmentation supplémentaire n'entraîne une amélioration minimale de l'efficacité.

La **figure III. 14** illustre la relation entre le rendement (exprimé en pourcentage) et le débit d'air ( $Q_V$ ) pour différentes longueurs. Les courbes représentent quatre longueurs différentes : 3,5 m, 8,5 m, 14,5 m et 18,5 m.

La courbe du rendement pour la longueur de 14,5 m est particulièrement intéressante. Elle maintient un rendement relativement constant sur toute la plage de débit d'air. Tandis que ; les autres courbes montrent une tendance à la baisse du rendement aux débits d'air plus faibles et plus élevés.

La courbe en forme de U indique qu'il existe une plage de débit d'air optimale où le rendement atteint son maximum avant de diminuer à nouveau. Il est essentiel de comprendre cette relation pour concevoir des systèmes tels que la ventilation ou le chauffage, où la gestion du débit d'air est cruciale pour optimiser les performances.



**Figure III.13:** Variation du rendement en fonction de la longueur de l'échangeur

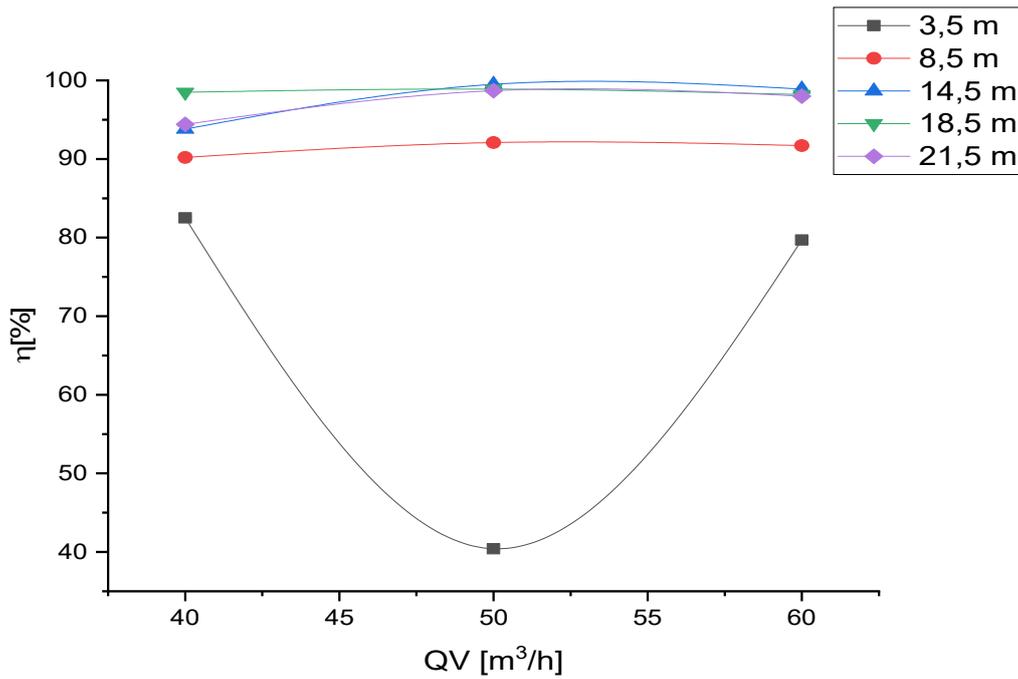


Figure III.14: Variation du rendement en fonction du débit d'air.

### III.4.4. Coefficient de Performance :

Le Coefficient de Performance (COP), également désigné par CP ou CoP, est le rapport entre la chaleur produite ou absorbée et le travail fourni, que ce soit pour une pompe à chaleur, un réfrigérateur ou un système de climatisation. Plus le COP est élevé, plus cela signifie une réduction des coûts d'exploitation.

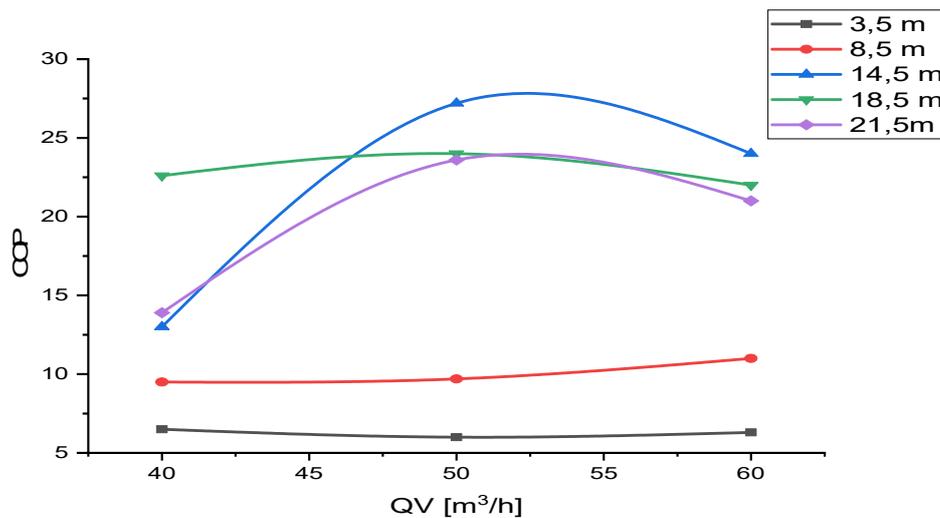


Figure III.15: Variation du COP en fonction du débit d'air dans l'échangeur

### III.5. Conclusion :

Sur la base des résultats expérimentaux présentés dans cette étude, nous constatons que la solution technologique proposée dans cette recherche est techniquement réalisable, car nous avons réussi à obtenir une augmentation de la température d'air à la sortie de l'échangeur dépassant les trente degrés Celsius dans le cas du chauffage. Les résultats montrent également que l'augmentation du débit d'air et de la longueur du tube améliore les performances de l'échangeur de chaleur. En outre, l'augmentation du débit réduit la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur.

Les courbes présentant la différence de température et le rendement de l'échangeur confirment que la longueur optimale du tube est d'environ 14.5m pour le diamètre 32mm et les débits d'air 50 et 60 m<sup>3</sup>/h. Tandis que pour le débit d'air 40m<sup>3</sup>/h, le gain énergétique exprimé en termes de différence de température ainsi que les performances de l'échangeur ont été faible, ceci peut être dû au fait que le régime est laminaire ce qui ne favorise pas l'échange thermique avec la paroi intérieure du tube, par contre le régime d'écoulement est turbulent pour les deux autres débits (50 et 60 m<sup>3</sup>/h) donnant ainsi la possibilité aux particules d'air d'échanger la chaleur avec la paroi du tube.



# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était de proposer une nouvelle solution technologique pour exploiter l'énergie géothermique abondante dans la région saharienne, provenant des forages et des sources chaudes, afin de chauffer les habitats. En utilisant l'air comme unique vecteur énergétique, cette solution pourrait répondre aux besoins de renouvellement d'air et de chauffage des habitations dans une station thermale ou dans un périmètre agricole, grâce à un échangeur de chaleur immergé dans un réservoir d'eau.

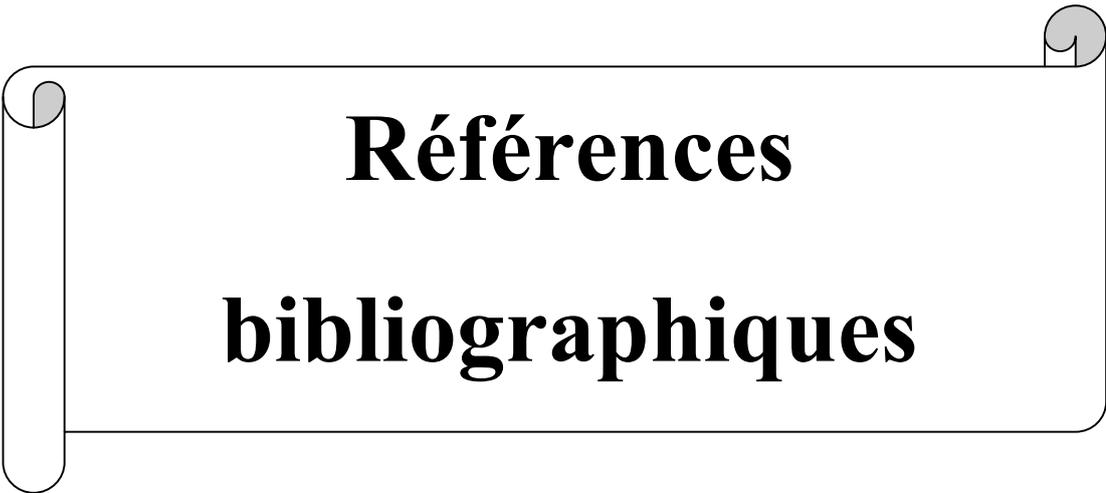
Trois séries d'expériences ont été conduites à divers journées de l'année en utilisant de l'eau chaude provenant d'une source dans la commune de Melilli, Wilaya de Biskra, dont la température à la sortie était de 68 degrés Celsius.

Les expériences menées, nous ont permis de valoriser une énergie géothermique abandonnée. Plusieurs prototypes de conduit échangeur, pouvant s'intégrer à la solution proposée. Nous avons choisi d'étudier un échangeur eau-air de forme d'un ressort vu sa forme simple et son faible coût.

Les résultats de l'étude ont montré qu'il y a une relation proportionnelle entre la différence de température de l'air entre la sortie et l'entrée de l'échangeur et sa longueur, et relation inversement proportionnelle avec débit de l'air.

Un gain de température dépassant les 40°C a été enregistré pour la majorité des débits et des longueurs de l'échangeur, ce qui fait de la solution proposée très faisable de point de vue technique.

En terme de perspectives, la prochaine phase qui s'inscrit logiquement dans la continuité de ce travail consiste à proposer et étudier l'efficacité d'autres types et modèles d'échangeurs et d'autres matériaux et d'étudier le transfert de chaleur à l'intérieur de l'échangeur.



**Références**  
**bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] Ouali, S., Khellaf, A., & Baddari, K. (2007). Etude des ressources géothermiques du sud algérien. *Journal of Renewable Energies*, 10(3), 407-414.
- [2] Benfateh, H. (2009). Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra).
- [3] SAYAD, A. (2020). Etude expérimentale d'un échangeur eau-air dans la région de Biskra ; Utilisation de la géothermie pour la climatisation des habitats
- [4] <https://qcm-svt.fr/QCM/public-affichage.php?niveau=TS&id=166>
- [5] Ouali, S. (2005). Étude géothermique du sud de l'Algérie (Doctoral dissertation, Boumerdès).
- [6] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geothermie-haute-temperature>
- [7] Do Couto, D. (2022). La géothermie : une énergie ubiquiste, sous différentes formes. *Géologues*
- [8] Belloufi, Y. (2012). Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraichissement des locaux (Master's thesis).
- [9] <https://batijournal.com/index.php/qualiforage-pour-les-forages-geothermiques-de-tres-basse>
- [10] Kethiri, M A. (2019). Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation dans la zone de Biskra. (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra)
- [11] Saibi, H. (2009). Geothermal resources in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2544-2552.
- [12] A. Labeled, A. Rouag, M. A. Kheireddine, C. Bensaci, A. Benchabane and N. Moumami, Investigation into the energetic algerian sahara potential for cooling systems applications; feasibility, obstructions and sustainable solutions, 7th Global Conference on Global Warming, Izmir, Turkey (24-28/6/2018)

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [13] World Energy Council 2013 World Energy Resources : Geothermal  
[http://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2013/09/WER\\_2013\\_9\\_Geothermal.pdf](http://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2013/09/WER_2013_9_Geothermal.pdf)
- [14] Benchemsa, I. (2017). L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique. (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
- [15] <https://www.greenwatt.fr/chauffage-geothermique-avantages-inconvenients/>
- [16] Deziri, N-E, (2017) Simulation d'une conception D'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre, mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba
- [17] Kakaç, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2002). Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. CRC press.
- [18] P.J. Marto, 1991, « Heat Transfer in Condensation », Naval post graduate school, Monterey,
- [19] Whalley, P. B. (1991). Evaporators and reboilers in the process and chemical industries. Boilers, evaporators, and condensers, 717-778.
- [20] Pate, M. B. (1991). Evaporators and condensers for refrigeration and air-conditioning systems. Boiler Evaporator and Condensers, 635.
- [21] Thome, J. R. (2004). Engineering data book III. Wolverine Tube Inc, 2010.
- [22] A. BONTEMPS, A. GAREIGUE, CH. GOUBIER, J. HUETZ, CH. MARVILLET et R. VIDIL « Description des échangeurs de chaleur », technique de l'ingénieur [B 2 341].
- [23] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/echangeur-thermique-fonctionnement-types-et-efficacite#:~:text=L%C3%A9changeur%20thermique%20a%20pour,%C3%A0%20chauffer%20le%20fluide%20secondaire>
- [24] M. S. Mon and U. Gross, 2004, « Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers », International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp. 1953-1964,
- [25] MAANANI, A. Etude d'un échangeur eau-air ; utilisation de la géothermie à haute température dans la région de Biskra.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [26] Aissani, M., HAMZAOU, R., BASSIR, D. H., GUESSASMA, S., & Benkedda, Y. (2014). Simulation des Flux Thermiques lors du soudage TIG et prédiction de la taille des zones du cordon dans les tôles d'Acier 304L, Partie B : Evolution 3D. En 4 -ème Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Matériaux et Alliages (IC-WNDT-MI'14).
- [27] KREITH, F., BOEHM, R.F., et. al. (1999). « Heat and Mass Transfer » Mechanical
- [28] Bennajah, M, Chaouni, N (2014) (Echangeurs de chaleur : Technologie, calcul et design), Edition Technip, Paris ; France.
- [29] Technique de L'ingénieur, traité génie énergétique, volume [BE5].
- [30] Stambouli, A. B., Khiat, Z., Flazi, S., & Kitamura, Y. (2012). A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(7), 4445-4460.
- [31] Hadjadj, A., Benhaoua, B., Atia, A., Khechekhouche, A., Lebbihiat, N., & Rouag, A. (2020). Air velocity effect on the performance of geothermal helicoidally water-air heat exchanger under El Oued climate, Algeria. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100548.
- [32] Bontemps, A., Garrigue, A., Goubier, C., Huetz, J., Marvillet, C., Mercier, P., & Vidil, R. (1974). *Echangeurs de chaleur*. Ed. Techniques Ingénieur.
- [33] Hadfi K. Etude des problèmes de l'endommagement de l'échangeur 101 E04. Mémoire de fin d'étude : science et génie des matériaux. Ecole nationale supérieure des mines et métallurgie ENSMM-annaba- : 2015-2016.