



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

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétiques

Réf. : ...

---

Présenté et soutenu par :  
**Abderrafik MAANANI**

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

## **Etude d'un échangeur eau-air; utilisation de la géothermie à haute température dans la région de Biskra.**

---

### Jury :

|    |                    |     |                      |            |
|----|--------------------|-----|----------------------|------------|
| Pr | Noureddine BELGHAR | Pr  | Université de Biskra | Président  |
| Dr | Adnane LABED       | MCA | Université de Biskra | Rapporteur |
| Dr | Nora BOULTIF       | MCB | Université de Biskra | Examineur  |

# Dédicace

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents que j'aime profondément, et qui ont toujours été dévoués pour puisse  
réaliser ce travail de recherche dans les meilleurs conditions.*

*Sans omettre mes chères sœurs ainsi leurs maries et leur enfants Nazim, Anes, Aya et Taher.*

*A mes grandes mères.*

*A tous les membres de ma famille.*

*Aussi tous mes amis.*

*Yacine, Khaled, Thamer, Aymen, Abdelbaki, Ilyes et Tarek*

*A ceux qui j'aime.*

*Merci*

**MAANANI ABDERRAFIK**

# Remerciements

*Tout d'abord je remercie Dieu le tout puissant pour la volonté, la sante, la patience qu'il m'a données durant tous ces années d'études.*

*Mes sincères remerciements s'adresse à mon encadreur Dr. Adnane LABED de m'avoir fait confiance et pour la qualité de son encadrement exceptionnel et sa disponibilité durant ma préparation de ce mémoire.*

*Mes remerciements s'adressent à Dr. Amar ROUAG, Mr. Abderrahmane CHETTIR, Mr. Abdelbassit KHEIREDDINE et Mr. Mohamed Aymen KETHIRI pour leurs aides et leurs encouragements.*

*Sans oublier mes enseignants et chaque personne qui m'ont soutenue et aider durant mes études*

## 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 محول 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.

اظهرت النتائج الرقمية لهذه الدراسة أن الطاقة المكتسبة من هذا الحل التكنولوجي تتناسب و طول المحول الحراري, حيث ترتفع درجة حرارة الهواء بزيادة طول هذا الأخير الى ان تستقر عند بلوغ طول المحول 45 متر و هذا ما يؤكد النجاعة التقنية للحل المقترح.

## 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 la nappe Albienne dont les eaux chaude des forages, des sources chaudes et des stations thermale sont mal exploitée. Pour cela nous avons proposé d'utiliser un échangeur immergé dans un réservoir et de faire souffler l'air ambiant à travers cet échangeur dans un habitat pour le chauffer. Cette solution technologique va permettre de diminuer la consommation électrique du chauffage des habitats et surtout ceux des stations thermale. Les résultats numériques de cette étude ont montré que le gain d'énergie est en fonction de la longueur de l'échangeur jusqu'à 45m où la température de sortie devient plus ou moins stable, ce qui fait que la solution proposée est très faisable de point de vue technique.<sup>22</sup>

# Sommaire

|                              |      |
|------------------------------|------|
| <b>Dédicace</b>              |      |
| <b>Remerciement</b>          |      |
| <b>Sommaire</b>              | I    |
| <b>Liste des figures</b>     | V    |
| <b>Nomenclature</b>          | VIII |
| <b>Introduction générale</b> | 1    |

## Chapitre I : Généralités

|         |   |   |
|---------|---|---|
| I.1     | Introduction  | 3 |
| I.2     | La géothermie   | 3 |
| I.2.1   | Définition  | 3 |
| I.2.2   | Différents types de géothermie et potentiel d'utilisation | 3 |
| I.2.2.1 | Géothermie haute énergie                                  | 3 |
| I.2.2.2 | Géothermie basse énergie                                  | 4 |
| I.2.2.3 | Géothermie très basse énergie                             | 4 |
| I.2.3   | Importance de la géothermie                               | 5 |
| I.2.4   | avantages et les inconvénients de la géothermie           | 5 |
| I.2.5   | L'utilisation de l'énergie géothermie                     | 6 |
| I.3     | Les procédés d'exploitation de l'énergie géothermique     | 6 |
| I.3.1   | Puits canadien  | 6 |
| I.3.1.1 | Définition  | 6 |
| I.3.1.2 | Principe de fonctionnement                                | 7 |
| I.3.2   | Pompe à chaleur géothermique                              | 7 |
| I.3.2.1 | Définition  | 7 |
| I.3.2.2 | Principe de fonctionnement                                | 8 |
| I.3.3   | Les échangeurs de chaleur                                 | 9 |
| I.3.3.1 | Définition  | 9 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| I.3.3.2   | Principe de fonctionnement                                     | 9  |
| I.3.3.3   | Types de contact   | 9  |
| I.3.3.4   | Disposition des écoulements                                    | 9  |
| I.3.3.5   | Critères de classement des échangeurs                          | 10 |
| I.3.3.5.1 | Classement technologique                                       | 10 |
| I.3.3.5.2 | Classement suivant les types d'échange                         | 11 |
| I.3.3.5.3 | Classement selon la compacité de surface                       | 11 |
| I.3.3.5.4 | Classement selon le nombre de fluides                          | 11 |
| I.3.3.5.5 | Classement Selon la construction                               | 11 |
| I.3.3.5.6 | Classement selon les mécanismes de transfert de chaleur        | 12 |
| I.3.3.5.7 | Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange | 12 |
| I.3.3.5.8 | Classement suivant le procédé de transfert de chaleur          | 12 |
| I.3.3.6   | Les différents types des échangeurs de chaleur                 | 13 |
| I.3.3.6.1 | Echangeurs tubulaires  | 13 |
| I.3.3.6.2 | Echangeur à plaques  | 14 |
| I.3.3.6.3 | Echangeurs de chaleurs spiralées                               | 15 |
| I.3.3.6.4 | Échangeur à bloc   | 16 |
| I.3.3.6.5 | Echangeur à lames raclantes                                    | 17 |
| I.3.3.6.6 | Aérothermes industriels (aéro-réfrigérants)                    | 17 |
| I.3.3.6.7 | Echangeurs à ailettes  | 18 |
| I.3.3.6.8 | Échangeur lamellaire   | 19 |

## **Chapitre II : Etude énergétique d'un échangeur**

|          |   |    |
|----------|---|----|
| II.1     | Introduction                                    | 20 |
| II.2     | Description du modèle étudié                    | 20 |
| II.3     | Transfert de chaleur dans Les échangeurs        | 21 |
| II.3.1   | La puissance                                    | 21 |
| II.3.2   | Différence de Température Logarithmique Moyenne | 21 |
| II.3.2.1 | Échangeur fonctionnant à co-courant             | 22 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| II.3.2.2 | Échangeur fonctionnant à contre-courant  | 22 |
| II.3.3   | Le coefficient d'échange global K  | 23 |
| II.3.4   | Coefficient d'échange convectif  | 24 |
| II.3.5   | Nombre de Nusselt  | 24 |
| II.3.6   | Nombre de Reynolds   | 24 |
| II.3.7   | Nombre de Prandtl  | 25 |
| II.3.8   | La vitesse   | 25 |
| II.3.9   | Diamètre hydraulique   | 26 |
| II.3.10  | Coefficient de performance   | 27 |
| II.4     | Calcul et dimensionnement thermique du modèle proposé  | 27 |
| II.4.1   | Dimensionnement de l'échangeur de chaleur (eau-air)  | 27 |
| II.4.2   | Hypothèses de calcul   | 27 |
| II.4.3   | Bilan Energétique  | 28 |
| II.5     | Organigramme du programme qui calcul les Dimensionnement de l'échangeur de chaleur (eau-air) | 30 |
| II.6     | Les données Techniques   | 31 |
| II.6.1   | Données géométriques   | 31 |
| II.6.2   | Données thermiques   | 31 |
| II.6.3   | Les propriétés thermo-physiques  | 31 |
| II.6.4   | puissance du ventilateur   | 31 |
| II.6.5   | Résultats à rechercher   | 31 |

## **Chapitre III : Résultats et discussion**

|         |   |    |
|---------|---|----|
| III.1   | Introduction  | 32 |
| III.2   | Caractéristiques technique de l'échangeur                                     | 32 |
| III.3   | Température ambiante de l'air   | 32 |
| III.4   | Résultats et discussion   | 33 |
| III.4.1 | Influence de la longueur de l'échangeur sur la température de sortie de l'air | 33 |
| III.4.2 | Influence du diamètre de l'échangeur sur la température de sortie de l'air    | 36 |
| III.4.3 | Influence du débit d'air  | 37 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| III.4.4 | Influence de la longueur de l'échangeur sur le coefficient de performance (COP) | 39 |
| III.4.5 | Influence du débit d'air sur le coefficient de performance (COP)                | 41 |
| III.5   | Conclusion  | 43 |
|         | <b>Conclusion générale</b>  | 45 |
|         | <b>Référence bibliographie</b>  | 46 |



# Listes des figures

|       |   |    |
|-------|---|----|
| I.1   | Géothermie haute énergie  | 4  |
| I.2   | Géothermie basse énergie  | 4  |
| I.3   | Géothermie très basse énergie   | 5  |
| I.4   | Description d'un puits canadien   | 7  |
| I.5   | Schéma d'une pompe à chaleur  | 8  |
| I.6   | Représentation schématique des échangeurs en fonction de leurs modes d'écoulement   | 10 |
| I.7   | Disposition des écoulements   | 10 |
| I.8   | Différents types d'échangeurs tubulaires  | 13 |
| I.9   | Exemple d'un échangeur de chaleur à plaque  | 15 |
| I.10  | Les échangeurs de chaleur spiralée  | 15 |
| I.11  | Échangeur à bloc  | 16 |
| I.12  | Echangeur à lames raclantes   | 17 |
| I.13  | Aéro-réfrigérant avec vue sur la ligne d'alimentation et bouchons de tube   | 18 |
| I.14  | Échangeur a tube et ailettes  | 18 |
| I.15  | Échangeur lamellaire  | 19 |
| II.1  | Schématisation de l'échangeur étudié  | 20 |
| II.2  | Représente la surface d'échange d'un tube   | 21 |
| II.3  | Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à co-courant   | 22 |
| II.4  | Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à contre-courant   | 23 |
| II.5  | Diamètre hydraulique de différentes géométries  | 26 |
| III.1 | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour 2 matières en mois de décembre (a) $T_{ea}$ minimale et (b) $T_{ea}$ moyenne     | 33 |
| III.2 | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour 2 matières en mois de janvier (a) $T_{ea}$ est minimale (b) $T_{ea}$ est moyenne | 34 |
| III.3 | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour 2 matières en mois de février (a) $T_{ea}$ est minimale (b) $T_{ea}$ est moyenne | 34 |
| III.4 | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour 2 matières en mois de mars (a) $T_{ea}$ est minimale (b) $T_{ea}$ est moyenne    | 35 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| III.5  | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube de 4 mois   | 35 |
| III.6  | Variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube (Décembre)   | 36 |
| III.7  | Variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube (Janvier)  | 36 |
| III.8  | Variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube (Mars)   | 37 |
| III.9  | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour différents débits en mois de décembre : (a) $T_{ea}$ minimale, (b) $T_{ea}$ moyenne | 37 |
| III.10 | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de janvier (a) $T_{ea}$ est minimale (b) $T_{ea}$ est moyenne    | 38 |
| III.11 | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour différents débits en mois de février : (a) $T_{ea}$ minimale, (b) $T_{ea}$ moyenne  | 38 |
| III.12 | Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de mars (a) $T_{ea}$ est minimale (b) $T_{ea}$ est moyenne       | 39 |
| III.13 | Variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube en mois de décembre ( $T_{ea}$ est minimale)   | 39 |
| III.14 | Variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube en mois de janvier ( $T_{ea}$ est minimale)  | 40 |
| III.15 | Variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube en mois de février ( $T_{ea}$ est minimale)  | 40 |
| III.16 | Variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube en mois de mars ( $T_{ea}$ est minimale)   | 41 |
| III.17 | Variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de décembre ( $T_{ea}$ est minimale)                          | 41 |
| III.18 | Variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de janvier ( $T_{ea}$ est minimale)                           | 42 |
| III.19 | Variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de février ( $T_{ea}$ est minimale)                           | 42 |
| III.20 | Variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de mars ( $T_{ea}$ est minimale)                              | 43 |

# Nomenclature

| symbole                | Définition                                      | Unité                   |
|------------------------|---|-------------------------|
| <b>T</b>               | Température                                     | (°C)                    |
| <b>Q</b>               | La puissance                                    | (W)                     |
| <b>W</b>               | Le travail                                      | (W)                     |
| <b>Cp</b>              | Chaleur spécifique                              | (J/kg.°C)               |
| <b>K</b>               | Coefficient d'échange de chaleur global         | (W/m <sup>2</sup> .K)   |
| <b>S</b>               | Section de passage du fluide                    | (m <sup>2</sup> )       |
| <b>h</b>               | Coefficient d'échange convectif                 | (W/m <sup>2</sup> . °C) |
| <b>ΔT<sub>ml</sub></b> | Différence de Température Logarithmique Moyenne | (°C)                    |
| <b>λ</b>               | Conductivité thermique                          | (W/m.K)                 |
| <b>Nu</b>              | Nombre de Nusselt                               |                         |
| <b>Pr</b>              | Nombre de Prandtl                               |                         |
| <b>Re</b>              | Nombre de Reynolds                              |                         |
| <b>ρ</b>               | Masse volumique                                 | (kg/m <sup>3</sup> )    |
| <b>Q<sub>v</sub></b>   | Débit volumique                                 | (m <sup>3</sup> /s)     |
| <b>μ</b>               | Viscosité dynamique                             | (Pas.s)                 |
| <b>R</b>               | Resistance                                      | (W / K)                 |
| <b>r</b>               | Rayon de tube                                   | (m)                     |
| <b>d</b>               | Diamètre de tube                                | (m)                     |
| <b>L</b>               | Longueur de tube                                | (m)                     |
| <b>P</b>               | Périmètre                                       | (m)                     |
| <b>v</b>               | vitesse   | (m/s)                   |
| <b>e</b>               | Epaisseur de tube                               | m                       |
| <b>ṁ</b>              | Débit massique                                  | (kg/s)                  |
| <b>ΔT</b>              | La variation de température                     | (°C)                    |
| <b>P<sub>m</sub></b>   | périmètre mouillé                               | m                       |

## **indice**

**th**

**e**

**t**

**a**

**In**

**ex**

**ae**

**as**

**ee**

**es**

**ef**

**ec**

**sf**

**Sc**

## **Définition**

Thermique

eau

Tube

Air

intérieur

Extérieur

Air entrée

Air sortie

Eau entree

Eau sortie

entrée des fluides froids

entrée des fluides chauds

sortie des fluides froids

sortie des fluides chauds

# **Introduction Générale**

# Introduction générale

*La* région de Biskra est connue par la durée d'ensoleillement qui dépasse les 3000h/an ; ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire pour différentes applications tel que le séchage, le chauffage, la climatisation ...etc. Le problème majeur rencontré devant ces applications c'est l'absence ou l'insuffisance de cette énergie durant la nuit ainsi que pendant les journées à ciel couvert.

Le chauffage est l'action de transmettre de l'énergie thermique à un objet, un matériau ou à l'air ambiant. On distingue le chauffage à des fins de confort thermique domestique (chauffage des locaux, chauffage de l'eau, etc.) et le chauffage à des fins industrielles (chauffage de pièces mécaniques, de processus industriels, etc.) et parmi les procédés de chauffage l'utilisation de l'énergie géothermique. [1]

Le chauffage par géothermie, est une technique non exploitée en Algérie et dans le tiers monde en générale, malgré la disponibilité de plusieurs formes d'énergies géothermales abondantes, surtout dans notre région du SAHARA. C'est une énergie renouvelable propre (pas de déchets à stocker, très peu d'émissions de CO<sub>2</sub>) et abondante.

Cette énergie peut être exploitée par des techniques qui permettent une utilisation correcte dans des meilleures conditions. Parmi les techniques on les plus efficaces, l'utilisation des échangeurs de chaleur qui sont des éléments très importants dans les installations de chauffage. Le bon fonctionnement de ces installations dépend largement de la bonne étude, conception et réalisation de ces échangeurs thermiques.

Dans ce mémoire, nous proposons d'exploiter l'énergie géothermale provenant des forages et des sources chaudes existants dans la région de Biskra au chauffage des locaux. Cette énergie est non exploitée malgré l'existence d'un nombre important de forages, sources chaudes et stations thermales. Pour cela, nous avons étudié numériquement les performances d'un échangeur de chaleur (eau-air) immergé dans l'eau chaude. Autrement dit, un échangeur de chaleur bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé, augmente le bon rendement et permet un bon bénéfice d'énergie.

Notre travail se composé de trois chapitre :

Le premier chapitre expose des généralités sur la géothermie et les échangeurs de chaleur.

## Introduction générale

---

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les théories et la formulation mathématique qui nous a permis l'étude et le dimensionnement de l'échangeur de chaleur eau-air. Pour cela un code de calcul a été élaboré et l'organigramme des étapes de calcul est explicité à la fin du chapitre.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le troisième chapitre.

Enfin, le mémoire est achevé par une conclusion générale sur l'importance des résultats de l'étude et la technique proposée.

# Chapitre I



### I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre notre objectif est de donner une vue générale sur le thème **(Etude d'un échangeur eau-air, utilisation de la géothermie à haute température dans la région de Biskra)**, en faisant exposer la définition, les différents types et les procédés d'exploitation de l'énergie géothermique

### I.2 La géothermie

#### I.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. [2]

#### I.2.2 Différents types de géothermie et potentiel d'utilisation

##### I.2.2.1 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. [3]



Figure I.1 Géothermie haute énergie

### I.2.2.2 Géothermie 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. [3]

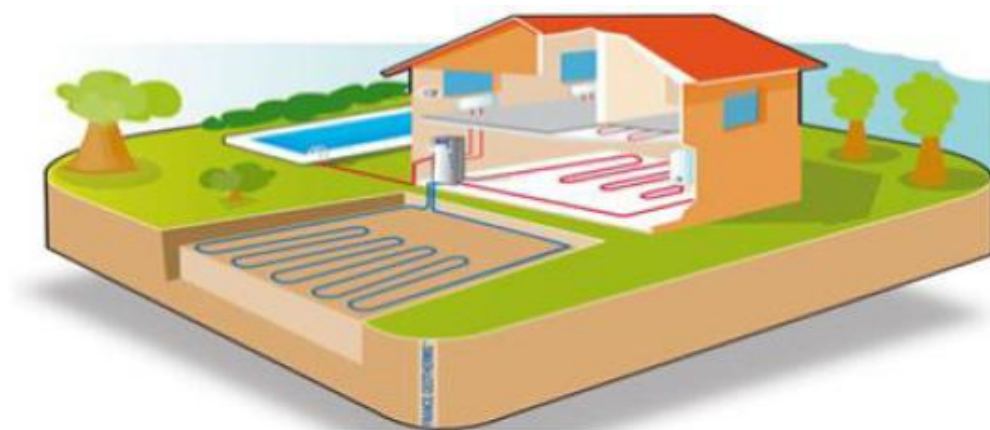


Figure I.2 Géothermie basse énergie

### I.2.2.3 Géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie est rencontrée à des faibles profondeurs (nappes phréatiques) ou la température est de l'ordre de 10 à 30°C.

## Chapitre I : Généralités

---

Elle est utilisée pour le rafraîchissement, chauffage des bâtiments à travers les puits canadiens. [3]

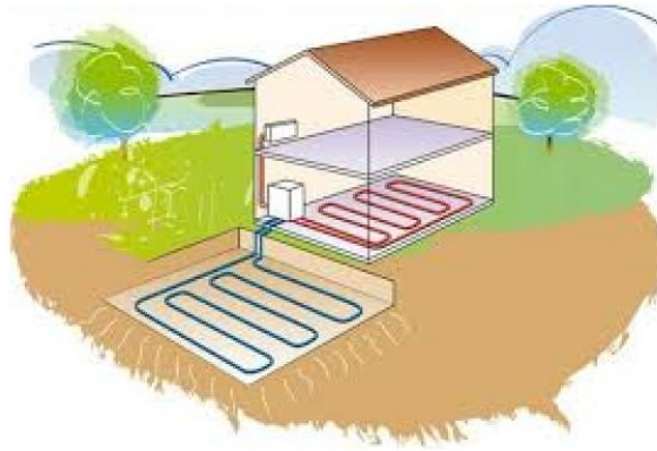


Figure I.3 Géothermie très basse énergie.

### I.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**. [4]

### I.2.4 Les avantages et les inconvénients de la géothermie

#### Les avantages

- 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>). [5]

#### Les inconvénients

- L'eau géothermique est souvent très salée, très chargée en sels minéraux : jusqu'à trois fois plus que l'eau de mer.

- Elle ne peut alors être utilisée qu'à travers un circuit parallèle de l'eau douce, les deux n'étant jamais en contact : il y a perte de rendement.
- Les eaux géothermales sont presque toujours corrosives. Cette corrosion augmente le coût de maintenance.
- Il y a risque de pollution quand l'eau extraite contient des métaux lourds, ce qui nécessite de la réinjecter dans le sous-sol.
- Si l'énergie prélevée est gratuite, les coûts d'investissement et de maintenance sont en revanche très élevés. [6]

### I.2.5 L'utilisation de l'énergie géothermie

- 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. [7]

## I.3 Les procédés d'exploitation de l'énergie géothermique

### I.3.1 Puits canadien

#### I.3.1.1 Définition

Le puits canadien ou puits provençal est un système dit géothermique qui utilise l'énergie présente dans le sol à proximité de sa surface pour chauffer ou refroidir l'air neuf de ventilation des bâtiments. Il est basé sur le fait que la température du sol à quelques mètres de profondeur reste plus stable, est plus élevée que la température ambiante en hiver, et plus basse en été. [8]

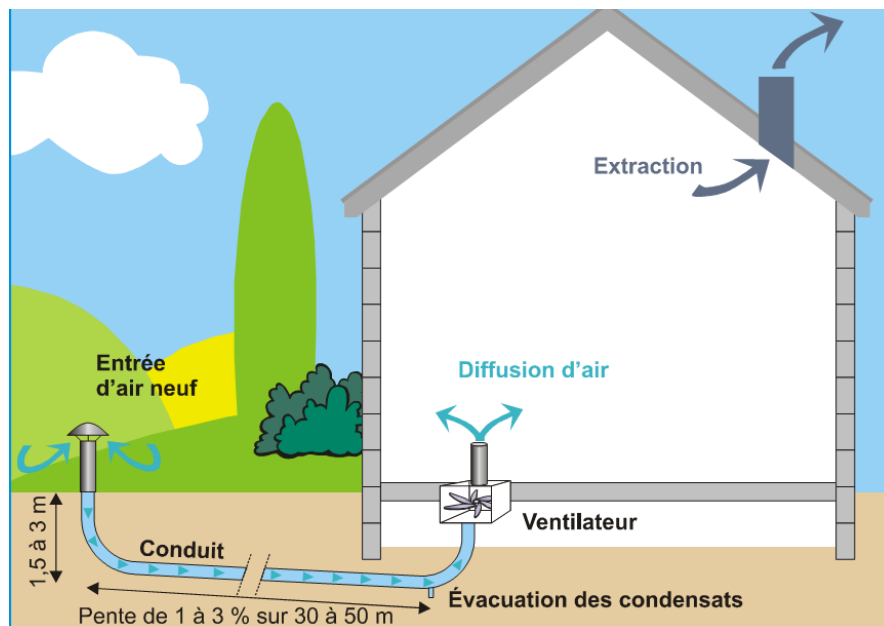


Figure I.4 Description d'un puits canadien

### I.3.1.2 Principe de fonctionnement

Le principe du puits canadien/provençal est de faire circuler l'air neuf de ventilation dans un conduit enterré grâce à un ventilateur, avant de l'insuffler dans le bâtiment.

En hiver, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré. Le puits est alors dit puits canadien.

En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à la température extérieure. Le puits est alors dit puits provençal. [8]

### I.3.2 Pompe à chaleur géothermique

#### I.3.2.1 Définition

La pompe à chaleur est un appareil capable de transférer de l'énergie d'un milieu « froid » vers un milieu « chaud ».

Concrètement, cela consiste à prélever des calories du milieu naturel (air, sol ou eau) pour les injecter à l'intérieur du bâtiment que l'on souhaite chauffer. Même « froids », l'air, le sol et l'eau renferment de la chaleur qu'il est possible d'extraire moyennant une dépense énergétique initiale. [6]

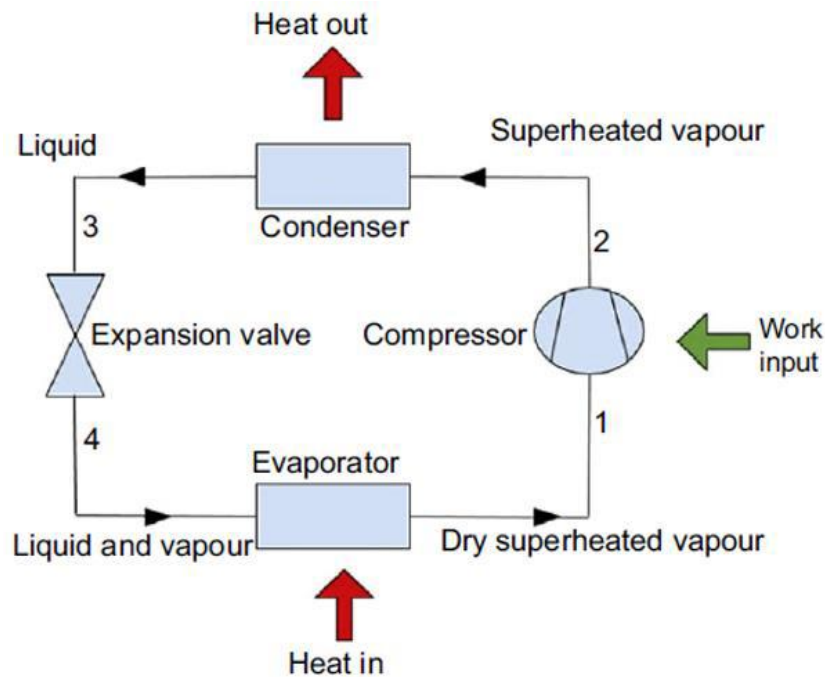


Figure I.5 Schéma d'une pompe à chaleur

### I.3.2.2 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 à 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. [9]

### I.3.3 Les échangeurs de chaleur

#### I.3.3.1 Définition

Un échangeur de chaleur, comme son nom l'indique est un appareil destiné à transformer de la chaleur entre un fluide de service (eau, vapeur d'eau, fluide thermodynamique) et un fluide procédé qui constitue le produit. L'échange de chaleur se fait soit par conduction soit par convection, le rayonnement n'intervient que s'il existe des différences de températures très importantes entre un fluide transparent et la paroi. [10]

#### I.3.3.2 Principe de fonctionnement

Dans un échangeur, la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Le même fluide peut être conservé son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases (cas des condenseurs et des vaporiseurs). [11]

#### I.3.3.3 Types de contact

➤ **Échangeurs à contact direct :**

Le type le plus simple comprend un récipient (ou canalisation) dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.

➤ **Échangeurs à contact indirect :**

Les deux fluides, désignés par 1 et 2, s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison, à faible inertie thermique. La chaleur que le fluide 1 cède à la paroi, par convection le long de la surface de contact, traverse l'épaisseur de la paroi par conduction et est cédée au fluide 2 par convection le long de l'autre face. Le flux de chaleur échangé s'exprime par le produit d'une conductance globale constante le long de l'échangeur, et de la différence entre les températures moyennes  $T_1$  et  $T_2$  des fluides. [11]

#### I.3.3.4 Disposition des écoulements

Il y a trois dispositions plus rencontrées dans les échangeurs de chaleur selon la circulation des fluides (figure I.6)

- ❖ Si les vecteurs de vitesses des deux fluides sont de même sens les écoulements sont « Co-courants ».
- ❖ S'ils sont de sens contraire, les écoulements sont « contre-courant ».

- ❖ Si les vecteurs vitesses de deux fluides sont en moyenne perpendiculaire l'un à l'autre; il s'agit cette fois de «courant croisés». [12]

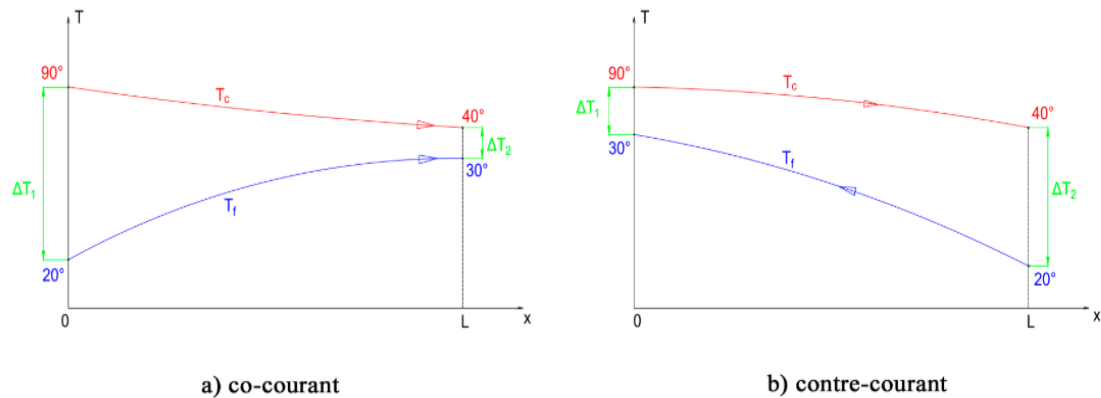


Figure I.6 Représentation schématique des échangeurs en fonction de leurs modes d'écoulement

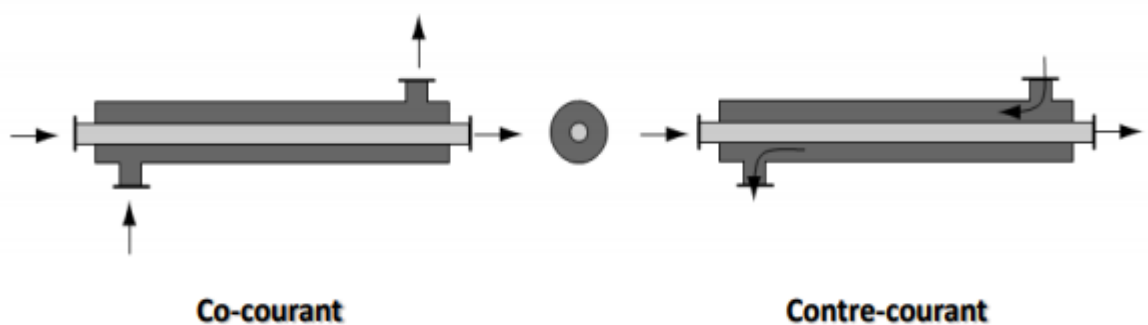


Figure I.7 Disposition des écoulements

### I.3.3.5 Critères de classement des échangeurs

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux.

#### I.3.3.5.1 Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire.
- Autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé. [13]



### I.3.3.5.2 Classement suivant les types d'échange

- **Échangeur sans changement de phase**

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase. Les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur.

- **Échangeur avec changement de phase**

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents: TRI

- l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.
- le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.
- le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état. [14]

### I.3.3.5.3 Classement selon la compacité de surface

- Compact  $\geq 700\text{m}^2/\text{m}^3$
- Non compact  $<700\text{m}^2/\text{m}^3$ . [15]

### I.3.3.5.4 Classement selon le nombre de fluides

- Deux fluides
- Trois fluides
- N fluides ( $N>3$ ). [15]

### I.3.3.5.5 Classement Selon la construction

- **Tubulaire**

- Double tube
- Tubes et calandre
  - ✓ Ecoulement transversal aux tubes
  - ✓ Parallèle aux tubes
- Serpentin

- **A plaque**

- Joint

- Soudé
- Spirale
- **A ailettes**
  - Plaque à ailette
  - Tube à ailette
- **Régénérateur**
  - Rotatif
  - Matrice fixe. [9]

### I.3.3.5.6 Classement selon les mécanismes de transfert de chaleur

- Double phase sur les deux cotés
- Un coté en simple phase et l'autre en double phase
- Simple phase sur les deux cotes
- Divers : échange couplé rayonnement et convection. [9]

### I.3.3.5.7 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi :

- **les échangeurs métalliques en acier** : cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- **les échangeurs non métalliques en plastique** : céramique, graphite, verre, etc. [16]

### I.3.3.5.8 Classement suivant le procédé de transfert de chaleur

Suivant qu'il ya ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :

- Transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou "n" passages et un écoulement en général continu.
- Transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique. [16]

### I.3.3.6 Les différents types des échangeurs de chaleur

#### I.3.3.6.1 Echangeurs tubulaires

Pour des raisons économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant Principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. 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** : dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent ;

**Échangeur coaxial** : 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 multitubulaire** : existant sous quatre formes :

- Échangeur à tubes séparés.
- Échangeur à tubes rapprochés.
- Échangeur à tubes ailettes.
- Echangeur a tube et calandre. [14]

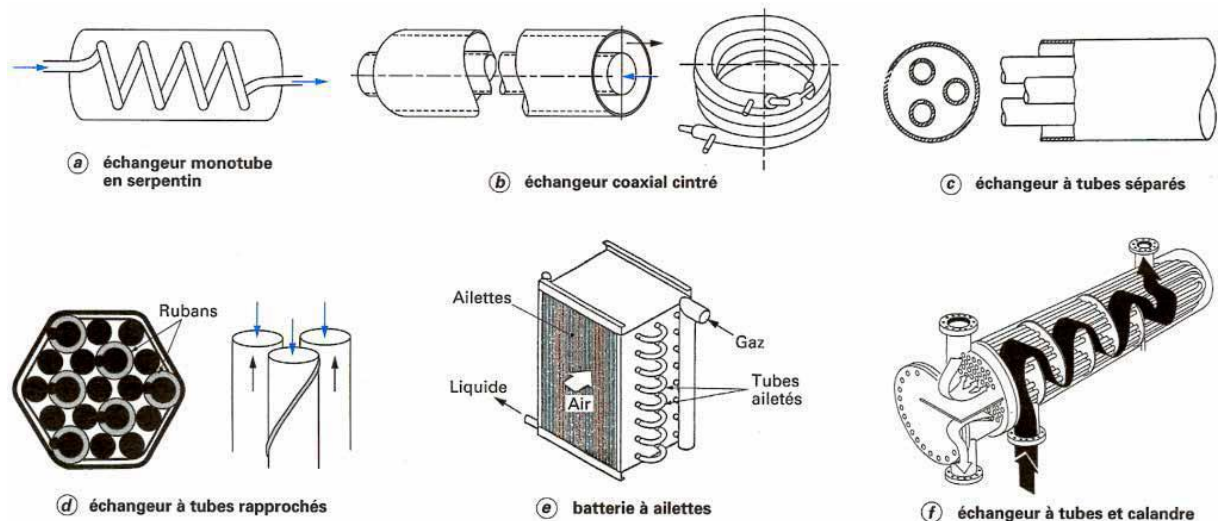


Figure I.8 Différents types d'échangeurs tubulaires

Les avantages et inconvénients de ce type sont :

Les avantages :

- Facilités de démontage et d'entretien.
- Possibilité de fonctionner à contre-courant pur, ce qui permet d'obtenir de bons

Les inconvénients :

- Risque de fuites aux raccords.
- Flexion du tube intérieur si la longueur est importante.
- Comparativement aux autres types d'échangeurs, surface d'échange faible par rapport au volume global de l'appareil en raison du rayon minimal des coudes reliant les longueurs droites des tubes. [9]

### I.3.3.6.2 Echangeur à plaques

Ce type d'échangeur est constitué par un assemblage de plaques cannelées indépendantes. Les plaques sont encastrées et serrées dans un bâti. Chaque paire de plaques adjacente forme un canal et les fluides (produit et fluide caloporteur) circulent alternativement dans les canaux. Les plaques sont équipées de joints permettent d'éviter tout mélange des deux fluides. [10]

On distingue suivant la géométrie de canal utilisée deux types :

- **Échangeurs à surface primaire**

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression.

- **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. [17]

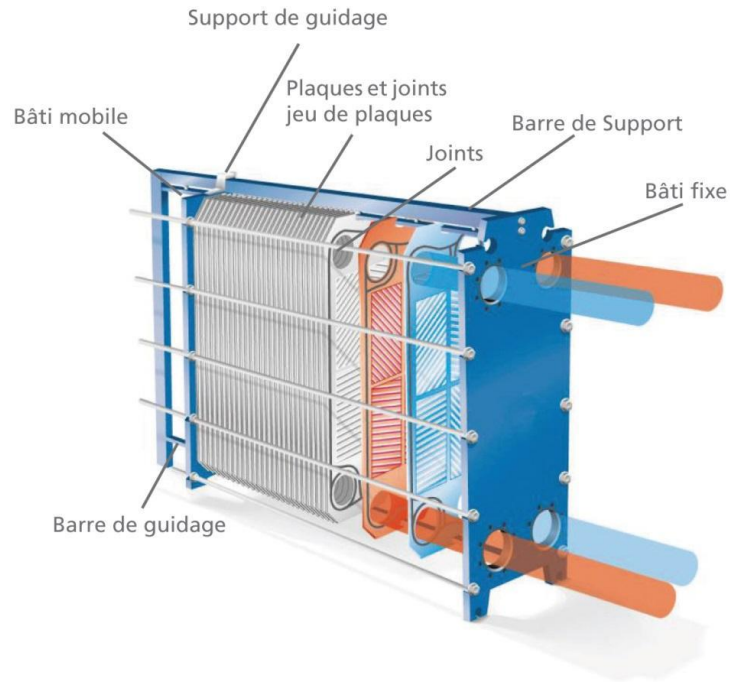


Figure I.9 Exemple d'un échangeur de chaleur à plaque

### I.3.3.6.3 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 importants sur d'autres types d'échangeurs de chaleur. [18]



Figure I.10 Les échangeurs de chaleur spiralée.

### I.3.3.6.4 Échangeur à bloc

L'échangeur à bloc (figure I.8) 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. [14]



Figure I.11 Échangeur à bloc

### I.3.3.6.5 Echangeur à lames raclantes

Cet échangeur est formé d'un arbre rotatif de lames montées concentriquement à l'intérieur d'un tube isolé et enveloppé. Le produit circule à travers le tube interne où, constamment, les lames l'agitent en même temps qu'elles raclent les parois du tube pour le nettoyer. Le fluide, caloporteur ou de refroidissement, circule dans l'espace annulaire entre le cylindre de transmission de chaleur et le tube externe qui est isolé.

Les échangeurs à lames raclantes sont conçus pour les produits à haut degré d'encrassement et pour les opérations de cristallisation, leurs nettoyages est facile. [15]

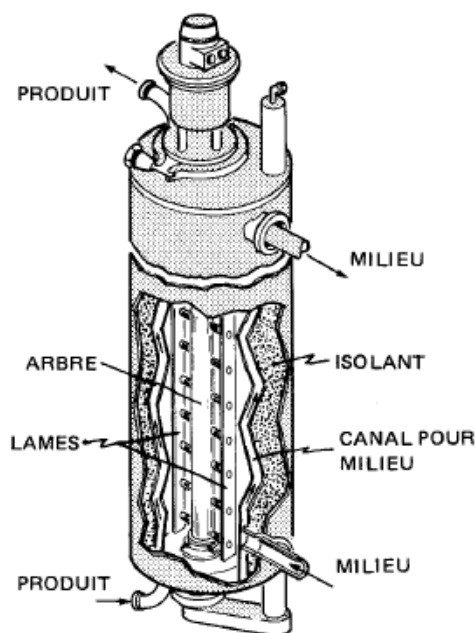


Figure I.12 Echangeur à lames raclantes

### I.3.3.6.6 Aérothermes industriels (aéro-réfrigérants)

L'aérotherme est un échangeur de chaleur composé d'une surface d'échange et d'un moyen de ventilation. Le fluide à refroidir s'écoule dans des tubes et l'air extérieur passe autour des tubes munis d'ailettes pour augmenter le coefficient d'échange thermique. Par exemple, la surface d'échange peut être composée de tubes en cuivre et d'ailettes en aluminium, avec des groupes moteurs-ventilateurs pour assurer la circulation de l'air et l'évacuation de la chaleur. Cet appareil est généralement utilisé pour refroidir les liquides s'écoulant à des débits importants par l'air ambiant (eau, gaz, glycolée, huile, fuel...) et aussi pour condenser et refroidir les gaz (gaz frigorigènes : R22, R134a, R404A, R407C, R410A, R717(NH<sub>3</sub>), R5022, etc.). A une petite taille, la configuration des aéro-réfrigérants rejoint

celle des échangeurs à tubes et ailettes utilisés pour le refroidissement de moteurs thermiques (radiateurs) et autres (climatiseurs, congélateurs...). [9]



Figure I.13 Aéro-réfrigérant avec vue sur la ligne d'alimentation et bouchons de tube.

### I.3.3.6.7 Echangeurs à ailettes

L'échangeur à ailettes continues est appelé batterie à ailettes, il est utilisé dans le cas d'un échangeur liquide gaz tels que : radiateur de voiture, condenseur d'un climatiseur de fenêtre...etc. la faible valeur du coefficient convectif du gaz, qui est souvent de l'air, est soignée par la pose des ailettes continues de diverses formes sur la surface d'échange primaire couplé en général par l'utilisation d'un ventilateur.

L'ailette est une plaque mince construite dans un métal très bon conducteur (cuivre, aluminium,...etc.) elle contient plusieurs trous circulaires par lesquelles passent tous les tubes de la batterie. Un faisceau de tubes contient plusieurs dizaines d'ailettes. [15]

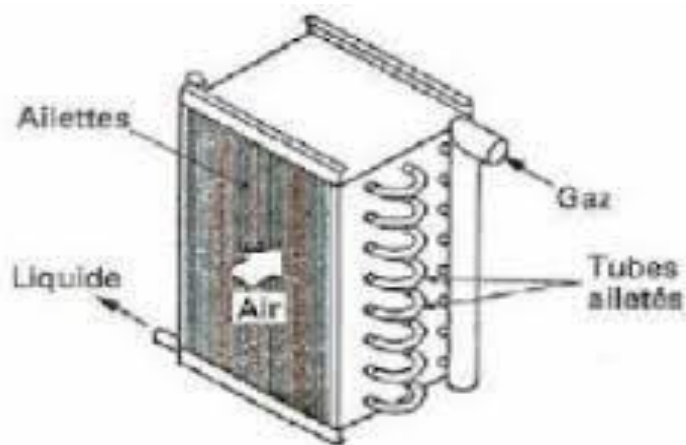


Figure I.14 Echangeurs à tubes et ailettes



### I.3.3.6.8 Échangeur lamellaire

C'est une variante de l'échangeur de type tubes et calandre, dans lequel le faisceau est constitué de tubes aplatis ou lamelles. Ces lamelles sont réalisées à l'aide de deux plaques formées et soudées ensemble et constituant un canal dans lequel circule l'un des fluides. Chaque lamelle peut contenir un élément interne (turbulateur) qui permet d'obtenir une meilleure tenue à la pression et un meilleur échange thermique.

Les limites de fonctionnement de cet échangeur sont de 350 °C en température et 25 bars en pression maximale. Cette technologie d'échangeur est actuellement en pleine mutation. [17]

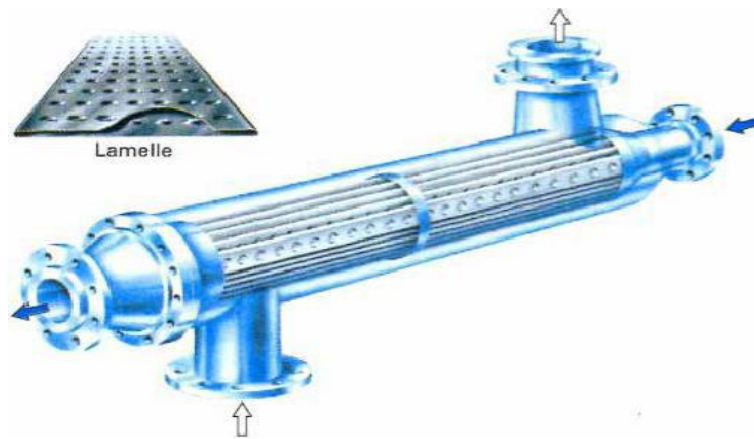


Figure I.15 Échangeur lamellaire

# **Chapitre II**

### II.1 Introduction

Un échangeur de chaleur est un appareil qui permet le transfert de chaleur entre deux fluides ou plus. Le plus souvent sans se mélanger, ce transfert s'effectue par l'intermédiaire d'une paroi solide (plane ou tubulaire). La transmission de chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid. [9]

### II.2 Description du modèle étudié

La solution technologique proposée dans ce travail, s'agit d'un échangeur eau-air utilisé surtout dans les stations thermales et auprès des forages et sources chaudes. L'objectif est de chauffer des locaux en exploitant la haute température de l'eau dans les stations thermales ; ceci permet de minimiser la consommation électrique (ou le gaz) de ces dernières. Cette solution peut être utilisée partout dans le monde est en particulier dans le nord de Sahara où l'eau chaude est très abondante surtout autour de la région de Biskra

Le modèle que nous proposons ici c'est un échangeur eau-air immergé dans un réservoir remplis d'eau chaude sortant d'une source d'eau d'une station thermale. Cet échangeur peut être schématisé comme suit :

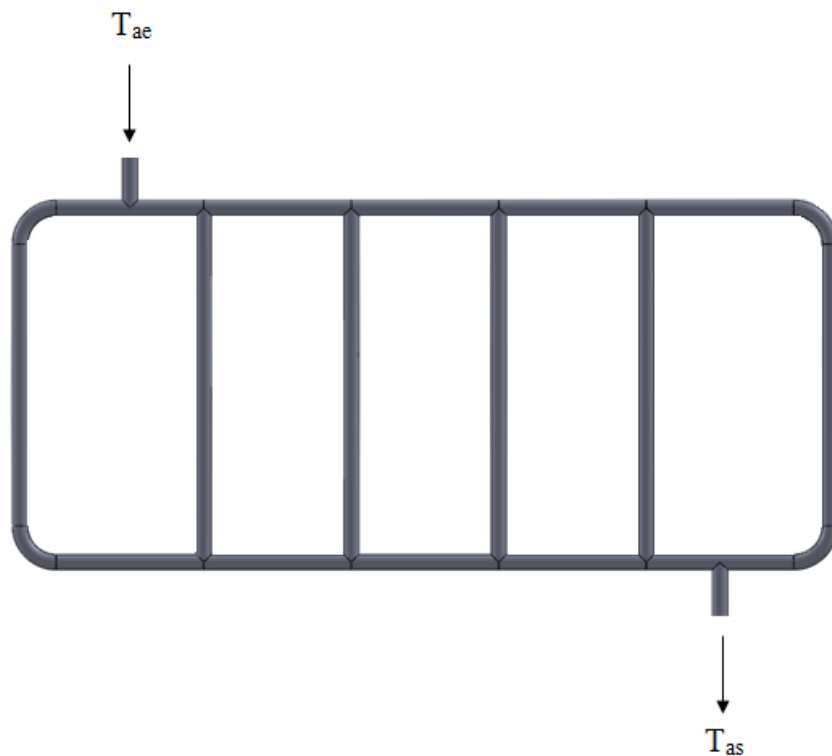


Figure II.1 Schématisation de l'échangeur étudié

## II.3 Transfert de chaleur dans Les échangeurs

### II.3.1 La puissance

Si  $T_c$  et  $T_f$  sont les températures des deux fluides au droit de l'élément  $S$  de la surface d'échange. La puissance thermique  $Q$  échangé entre les deux fluides à travers  $S$  peut s'écrire. [19]

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = K \cdot S \cdot \Delta T_{ml} \quad (\text{II.1})$$

Avec

$\dot{m}$  : Débit massique

$C_p$  : Chaleur spécifique

$\Delta T_{ml}$  : Différence de Température Logarithmique Moyenne

$K$  : Le coefficient d'échange global

$\Delta T$  : La variation de température

$S$  : surface d'échange

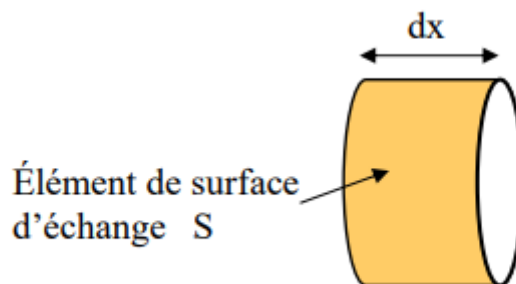


Figure II.2 représente la surface d'échange d'un tube

### II.3.2 Différence de Température Logarithmique Moyenne

Méthode de différence de température moyenne logarithmique la détermination de la surface d'échange connaissant la puissance échangée  $\Phi$  et les températures d'entrée et de sortie des deux fluides (fluide chaud,  $T_{ce} - T_{cs}$  et fluide froid,  $T_{fe} - T_{fs}$ ) (figure II.3, 4). Cette méthode est particulièrement bien adaptée au mode dimensionnement. Plus la  $\Delta T_{ml}$  est grande, plus la chaleur transférée est importante. [13]

### II.3.2.1 Échangeur fonctionnant à co-courant

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (\text{II.2})$$

Avec

$$\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fe}$$

$$\Delta T_2 = T_{cs} - T_{fs}$$

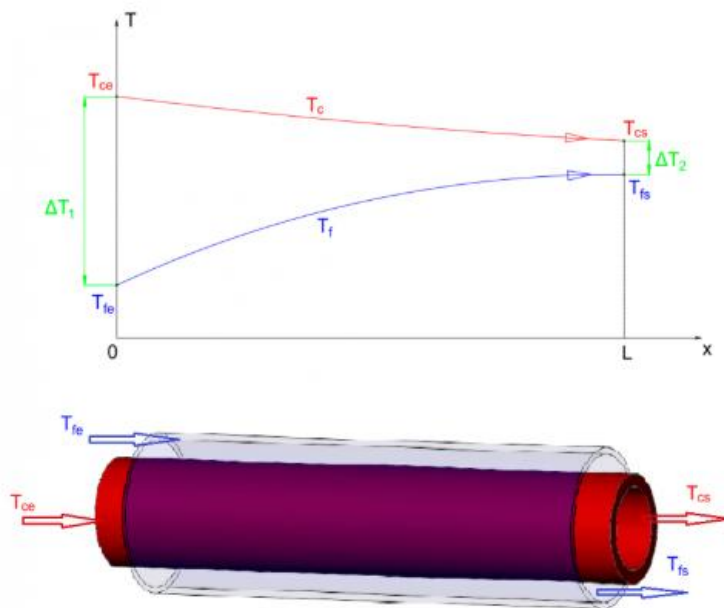


Figure II.3 Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à co-courant

### II.3.2.2 Échangeur fonctionnant à contre-courant

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (\text{II.3})$$

Avec

$$\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fs}$$

$$\Delta T_2 = T_{cs} - T_{fe}$$

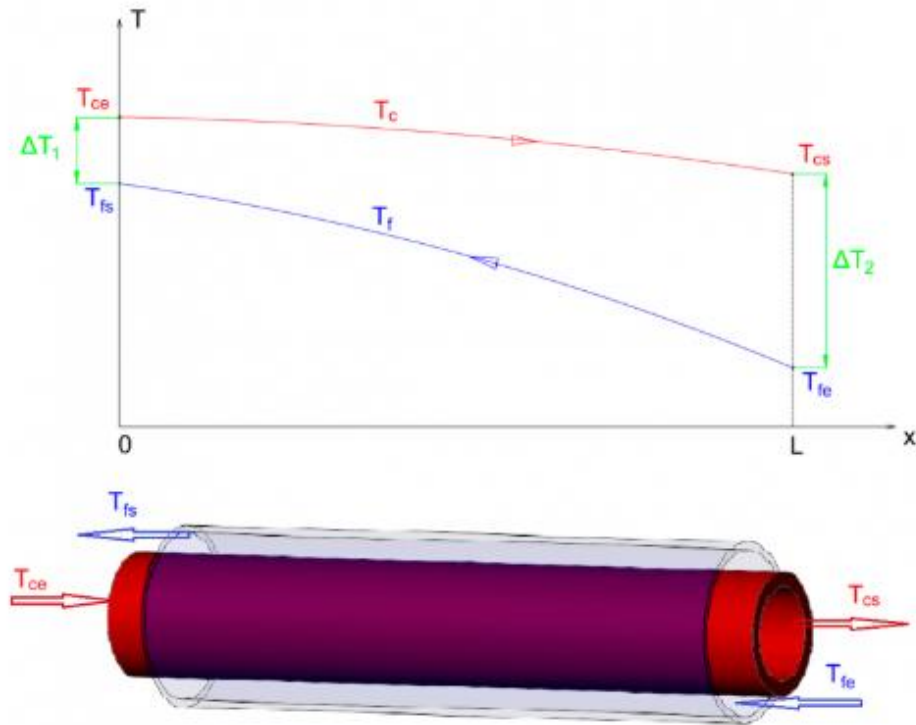


Figure II.4 Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à contre-courant

### I.3.3 Le coefficient d'échange global K

Le coefficient d'échange globale qui est nécessaire de connaître et dont la détermination se fait par le calcul de deux coefficients d'échange par convection  $h_1$  et  $h_2$ , respectivement du cote fluide froid et chaud.[20]

On le définit de la manière suivante :

$$K = \left[ \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda} \right]^{-1} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$h_1$  : coefficient d'échange convectif de l'air

$h_2$  : coefficient d'échange convectif de l'eau

$e$  : épaisseur de tube

$\lambda$  : conductivités thermique de la matière de tube

### II.3.4 Coefficient d'échange convectif

Ce coefficient régit les transferts thermiques par convection à proximité d'une surface d'échange. Ce coefficient dépend de la nature du fluide, de la température de celui-ci ainsi que du type d'écoulement. [21]

On le définit de la manière suivante :

$$h = \frac{\lambda * Nu}{D_h} \quad (\text{II.5})$$

Avec

$\lambda$  : conductivités thermique du fluide

Nu : nombre de Nusselt

$D_h$  : diamètre hydraulique

### II.3.5 Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les transferts thermiques entre un fluide et une paroi, appelé transfert convectif. [22]

On le définit de la manière suivante :

$$Nu = 0.023 * Pr^{0.4} * Re^{0.8} \quad (\text{II.6})$$

Avec

Re : nombre de Reynolds

Nu : nombre de Nusselt

### II.3.6 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les équations de Navier-Stokes. [23]

On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{\rho * V * D_h}{\mu} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$\rho$  : masse volumique du fluide ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  : vitesse caractéristique du fluide ( $\text{m/s}^1$ )

$D_h$  : diamètre hydraulique (m)

$\mu$  : viscosité cinématique du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

### II.3.7 Nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl (Pr) est un nombre sans dimension, ainsi nommé en hommage au physicien allemand Ludwig Prandtl. C'est le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et celle de la chaleur (diffusivité thermique). [24]

On le définit de la manière suivante :

$$\text{Pr} = \frac{\mu * C_p}{\lambda} \quad (\text{II.8})$$

Avec

$\mu$  : la viscosité dynamique (exprimée en  $\text{kg/m.s}$ ),

$\lambda$  : la conductivité thermique (en  $\text{W/m.K}$ ),

$C_p$  : la capacité thermique massique à pression constante (en  $\text{J/kg.K}$ )

### II.3.8 La vitesse

C'est le débit volumique sur la masse volumique, elle est définie de la manière suivante :

$$v = \frac{Q_v}{\rho} \quad (\text{II.9})$$

Avec

$\rho$  : masse volumique du fluide ( $\text{kg/m}^3$ )

$Q_v$  : le débit volumique ( $\text{m}^3/\text{s}$ )



### II.3.9 Diamètre hydraulique

Le diamètre hydraulique,  $D_h$ , est un terme couramment utilisé lors de la manipulation d'un écoulement dans des tubes et des canaux non circulaires. Le diamètre hydraulique transforme les conduits non circulaires en tuyaux de diamètre équivalent. En utilisant ce terme, on peut calculer beaucoup de choses de la même manière que pour un tube rond. [25]

On le définit de la manière suivante :

$$D_h = \frac{4S}{P_m} \quad (\text{II.10})$$

Avec

$S$  : est l'aire de la section transversale

$P_m$  : est le périmètre mouillé de la section transversale

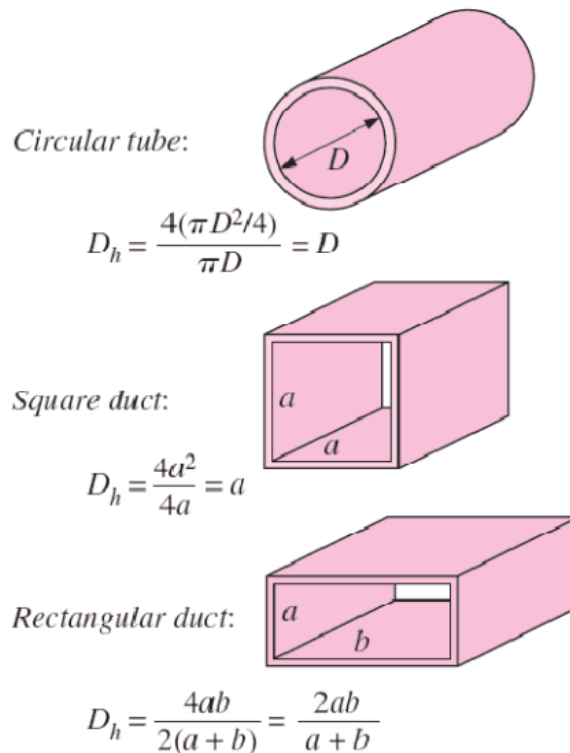


Figure II.5 Diamètre hydraulique de différentes géométries

### II.3.10 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. [26]

$$\text{COP} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie fournie}} = \frac{|Q|}{W} \quad (\text{II.11})$$

## II.4 Calcul et dimensionnement thermique du modèle proposé

### II.4.1 Dimensionnement de l'échangeur de chaleur (eau-air)

Le modèle proposé est un échangeur eau-air immergé dans un réservoir alimenté d'eau chaude avec un grand débit. Il est important de noter que les débits des forages existants au niveau de la wilaya de Biskra sont entre 50 et 130 l/s (à part quelques forages qui sont inférieures à 30 l/s).

### II.4.2 Hypothèses simplificatrices de calcul

Vu le volume important du réservoir d'eau (>100m<sup>3</sup>) et Vu le débit d'eau chaude, nous considérons que la vitesse de l'eau dans le réservoir est infiniment petite et que le transfert par convection est négligeable en égard la conduction.

En plus, nous considérons que :

- La température de l'eau est constante.
- l'échangeur de chaleur (eau-air) fonctionne dans les saisons froides pour réchauffer les locaux.
- Le régime est stationnaire.
- La conductivité thermique de l'eau est constante.
- Les propriétés thermo-physiques de l'air sont calculées à partir des corrélations trouvées dans la littérature.

### II.4.3 Bilan Energétique

Le bilan énergétique entre deux sections distantes de  $dx$  (équation II.10) s'écrit comme suit : [27]

$$mC_p(T(x) - T(x+dx)) = \frac{(T(x)-T_e)}{R_{th}} dx \quad (\text{II.12})$$

Où  $R_{th}$  est la résistance thermique totale entre l'air, le tube et l'eau autour de l'échangeur Air / Eau, elle peut être exprimée par la relation suivante :

$$R_{th} = R_{eau} + R_a + R_t \quad (\text{II.13})$$

La résistance thermique  $R_a$  dû au transfert convectif entre l'air dans le tube et la surface intérieure du tube est calculée comme suit:

$$R_a = \frac{1}{h_i P_i} \quad (\text{II.14})$$

$$h_i = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{d_i} \quad (\text{II.15})$$

Le nombre de Nusselt de l'air en écoulement à l'intérieur du tube est donné par l'équation (II.14) pour  $2300 < Re < 10^5$  et  $1,5 < Pr < 500$  :

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (\text{II.16})$$

La résistance thermique du tube  $R_t$

$$R_t = \frac{\ln(r_{ex}/r_i)}{2\pi\lambda_t L} \quad (\text{II.17})$$

La résistance thermique de l'eau  $R_{eau}$  est donnée par l'équation

$$R_{eau} = \frac{\ln(r_e/r_{ex})}{2\pi\lambda_w L} \quad (\text{II.18})$$

Après la division de l'équation (II.10) par dx, cette équation peut être écrite comme suit :

$$- \dot{m}C_p \frac{dt}{dx} = \frac{(T(x)-T_e)}{R_{th}} \quad (\text{II.19})$$

Donc,

$$T(x) = A \cdot \exp\left(\frac{-x}{\dot{m}C_p R_{th}}\right) + T_e \quad (\text{II.20})$$

Nous pouvons déterminer les constantes A, B en utilisant la condition suivante :

$$\text{Pour } x=0, T(x) = T_a \longrightarrow A = T_0 - T_e$$

$$T(x) = (T_a - T_e) \exp\left(\frac{-x}{\dot{m}C_p R_{th}}\right) + T_e \quad (\text{II.21})$$

Avec :  $\dot{m} = \rho Q_v$

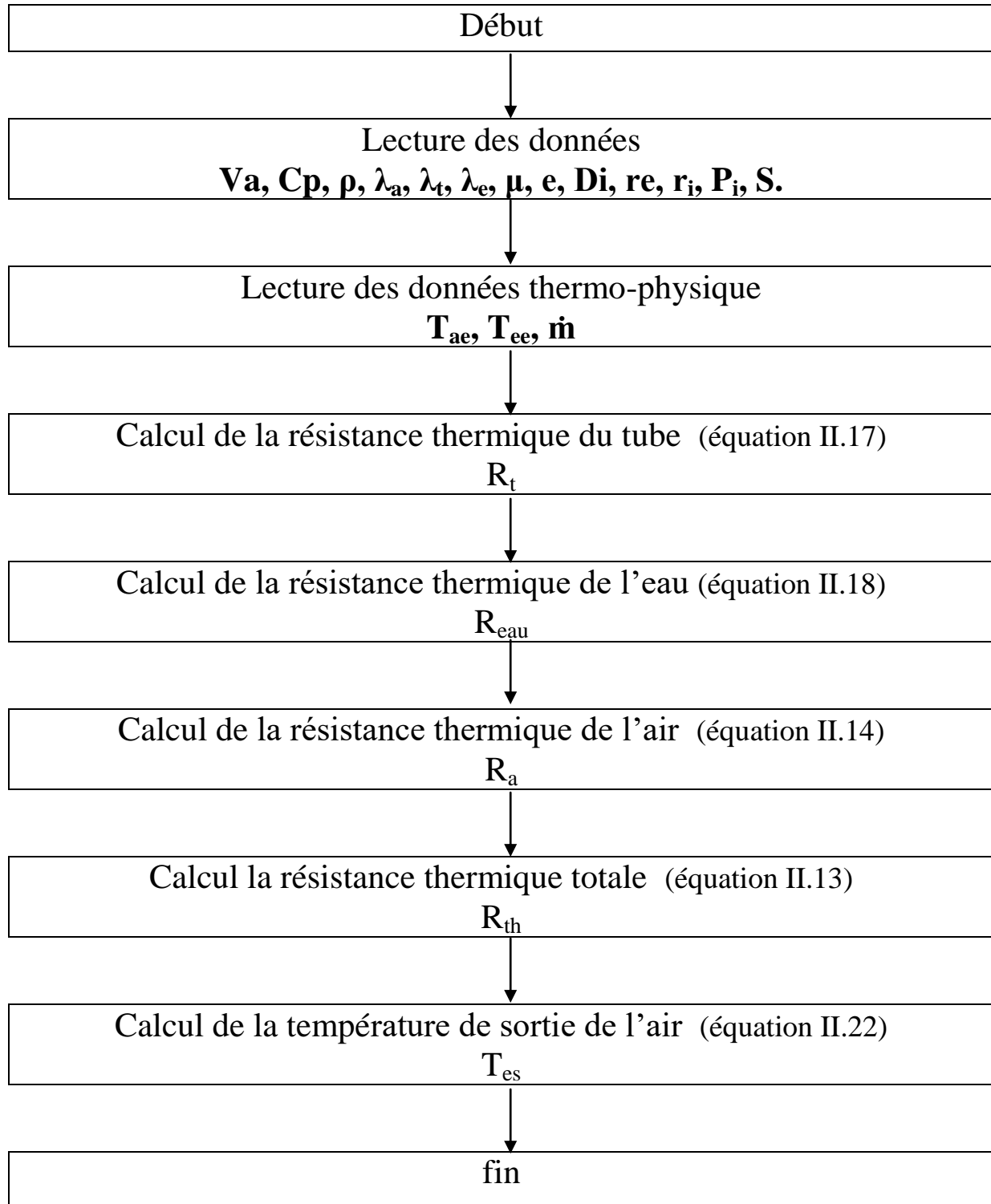
$\rho$  : La masse volumique de l'air

$Q_v$  : Le débit volumique

On peut aussi écrire l'équation (2.10) comme:

$$T(x) = (T_a - T_e) \exp\left(\frac{-x}{\rho C_p Q_v R_{th}}\right) + T_e \quad (\text{II.22})$$

## II.5 Organigramme du programme qui calcul les Dimensionnement de l'échangeur de chaleur (eau-air)



## II.6 Les données Techniques :

### II.6.1 Données géométriques

Matériau : **PVC / Cuivre**

Longueur de tube : **45 m**

Diamètre intérieur : **0.11 m**

Epaisseur de tube : **0.003 m**

### II.6.2 Données thermiques

Température d'entrée de l'air entre : **5°C et 20°C**

Température d'entrée de l'eau : **50 °C**

Débit massique de l'air :  **$\dot{m}=0.05$  kg/s**

### II.6.3 Les propriétés thermo-physiques

Conductivité thermique du tube :  $\lambda_t = (\text{PVC} = 0.16 \text{ w/m.}^\circ\text{C} / \text{cuivre} = 380 \text{ w/m.}^\circ\text{C})$

Conductivité thermique de l'air :  $\lambda_a = 0.024 \text{ w/m.}^\circ\text{C}$

Conductivité thermique de l'eau :  $\lambda_e = 0.65 \text{ w/m.}^\circ\text{C}$

Viscosité dynamique de l'air :  $\mu_{\text{air}} = 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}$

Masse volumique de l'air :  $\rho_{\text{air}} = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Chaleur spécifique de l'air :  $C_{p_{\text{air}}} = 1007 \text{ J/kg.K}$

Vitesse de l'air : **4.2 m/s**

### II.6.4 puissance du ventilateur

Nous avons considéré que la puissance nominale du ventilateur est égale à 120W

### II.6.5 Résultats à rechercher

La température de l'air à la sortie de l'échangeur

Les performances de l'échangeur

# **Chapitre III**

### III.1 Introduction

La solution proposée dans ce travail consiste à utiliser l'énergie géothermale dans des zones précises ; là où se trouve des sources d'eau chaude afin de remplacer l'énergie solaire durant la nuit et les journées à ciel couvert. Cette solution technologique est très utile pour le chauffage de l'habitat et surtout dans les complexes et les stations thermales.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de notre étude qui s'agit d'un dimensionnement d'un échangeur eau-air immergé dans un réservoir d'eau chaude à une température de 50°C.

L'étude est faite grâce à un code de calcul que nous avons élaboré dans un environnement Matlab. Ce code permet de changer les dimensions de l'échangeur, propriétés du matériau (du tube), la température de l'eau et la vitesse de l'air.

### III.2 Caractéristiques techniques de l'échangeur

- Matériau : PVC /Cuivre
- Conductivité thermique du PVC: 0.16 w/m. °C
- Conductivité thermique du cuivre: 380 w/m.°C
- Longueur de tube : 45 m
- Diamètre intérieur : 0.11 m
- Diamètre extérieur : 0.14 m
- Epaisseur de tube : 0.003 m
- Surface d'échange : 0.0095 m<sup>2</sup>
- La température de l'eau (l'eau du forage) = 50 °C

### III.3 Température ambiante de l'air

Nous avons choisis de simuler le fonctionnement de l'échangeur dans la région de Biskra pendant les quatre mois les plus froids, y compris la période hivernale.

Nous avons opté à utiliser deux températures ; moyenne et minimale (nuit), afin de suivre le comportement et le fonctionnement de l'échangeur jour et nuit.



|                         | Décembre | Janvier | Février | Mars |
|-------------------------|----------|---------|---------|------|
| La température minimale | 8°C      | 7°C     | 8°C     | 11°C |
| La température moyenne  | 13°C     | 12°C    | 13°C    | 17°C |

### III.4 Résultats et discussion

Nous avons réalisé une série de calcul pur différents paramètres d'entrée, ceci dont le but de vérifier la faisabilité de cette solution pendant toute la période froide de la région de Biskra.

#### III.4.1 Influence de la longueur de l'échangeur sur la température de sortie de l'air

La figure III-1. Présente une comparaison entre les performances de l'échangeur en mois de décembre pour un débit d'air égal à 0.05 kg/s et pour deux matières différentes du tube ; PVC et cuivre. Il s'avère à travers les deux courbes que la température de sortie est presque la même pour les deux échangeurs. Cette dernière varie proportionnellement avec la longueur, elle atteint ses valeurs maximales qui sont aux alentours de 46°C à une longueur du tube égale à 45m. Ces résultats nous ont encouragés à entreprendre la grande partie de cette étude en considérant un échangeur en PVC ; vu que ce dernier est moins couteux et plus résistant à la corrosion, surtout que l'eau des sources chaudes constitue un milieu agressif.

Les mêmes constatations ont été enregistrées pour les autres mois de la période froide (Figures III-2, 3 et 4).

#### En mois de décembre

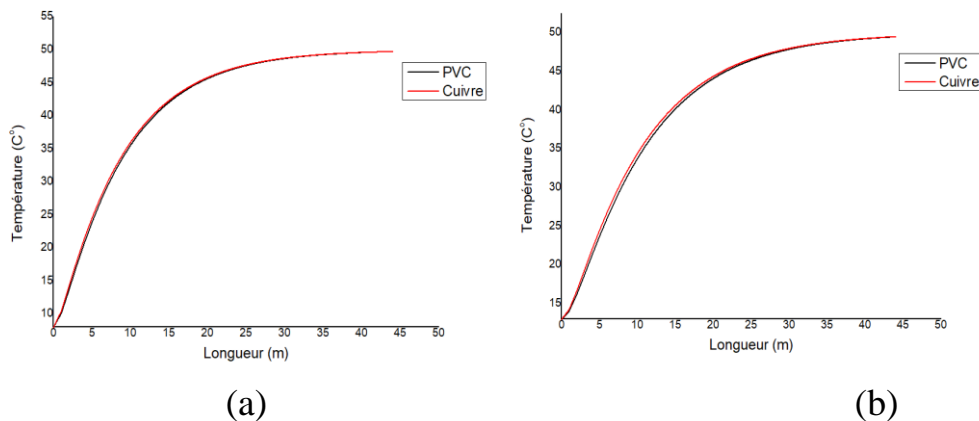


Figure III.1 : Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour 2 matières en mois de décembre (a) T<sub>ea</sub> minimale et (b) T<sub>ea</sub> moyenne.

### En mois de janvier

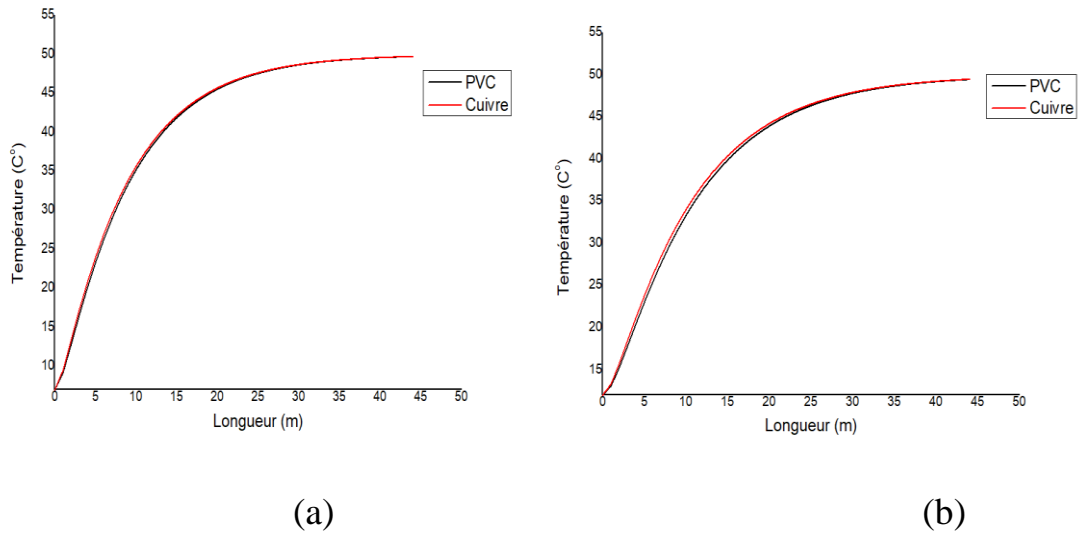


Figure III.2 Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour 2 matières en mois de janvier (a)  $T_{ea}$  minimale (b)  $T_{ea}$  moyenne

### En mois de février

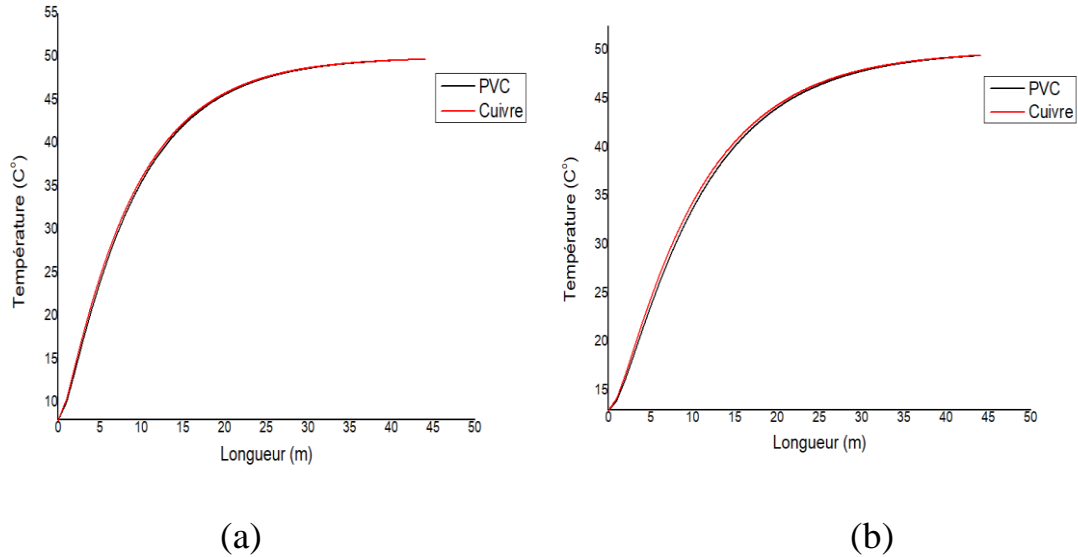


Figure III.3 : Variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour 2 matières en mois de février : (a)  $T_{ea}$  minimale (b)  $T_{ea}$  moyenne

## En mois de mars

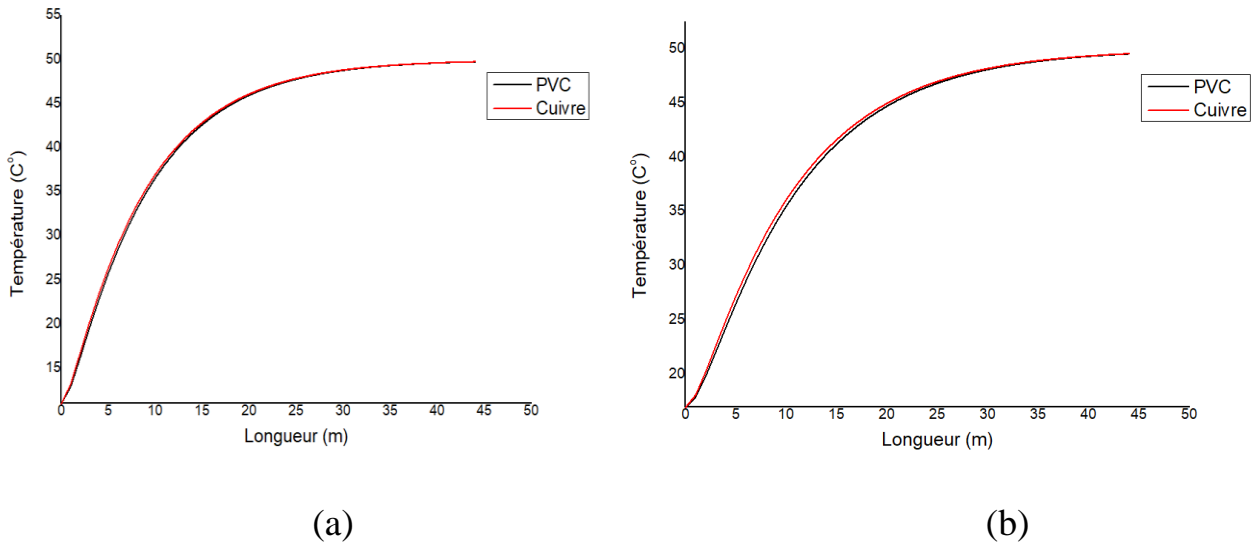


Figure III.4 : variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour deux matières en mois de mars : (a)  $T_{ea}$  minimale (b)  $T_{ea}$  moyenne

Les résultats présentés dans les figures ci-dessus peuvent être récapitulés dans la figure III-9, pour un échangeur en PVC.

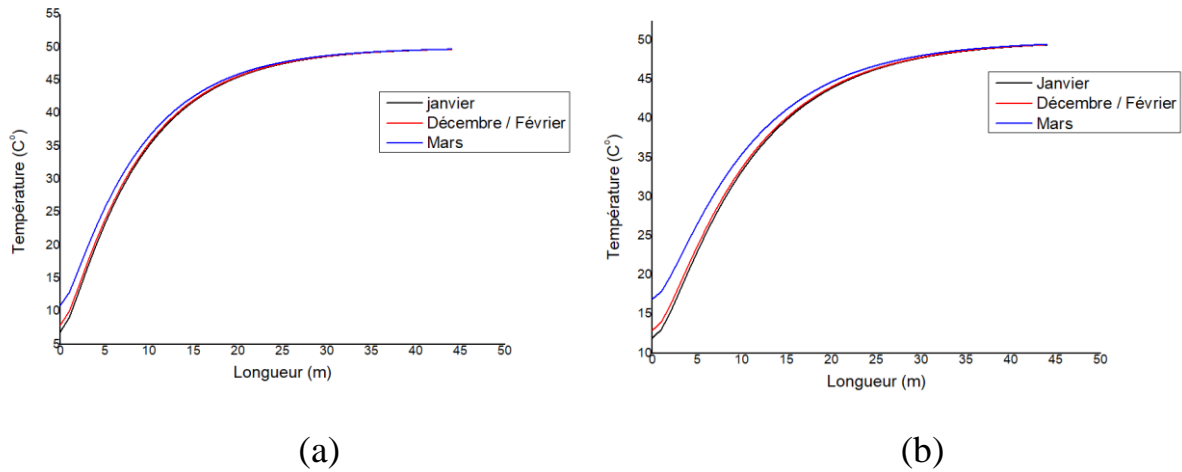


Figure III.5 variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube de 4 mois (PVC) : (a)  $T_{ea}$  minimale (b)  $T_{ea}$  moyenne

### III.4.2 Influence du diamètre de l'échangeur sur la température de sortie de l'air:

Les figures III.6 et 7,8 présentent la variation de la température de l'air à la sortie de l'échangeur en fonction du diamètre du tube en trois mois différents. Nos constatons que la température de sortie est inversement proportionnelle à la valeur du diamètre et que le taux d'échange est meilleur durant la nuit.

#### En mois de Décembre

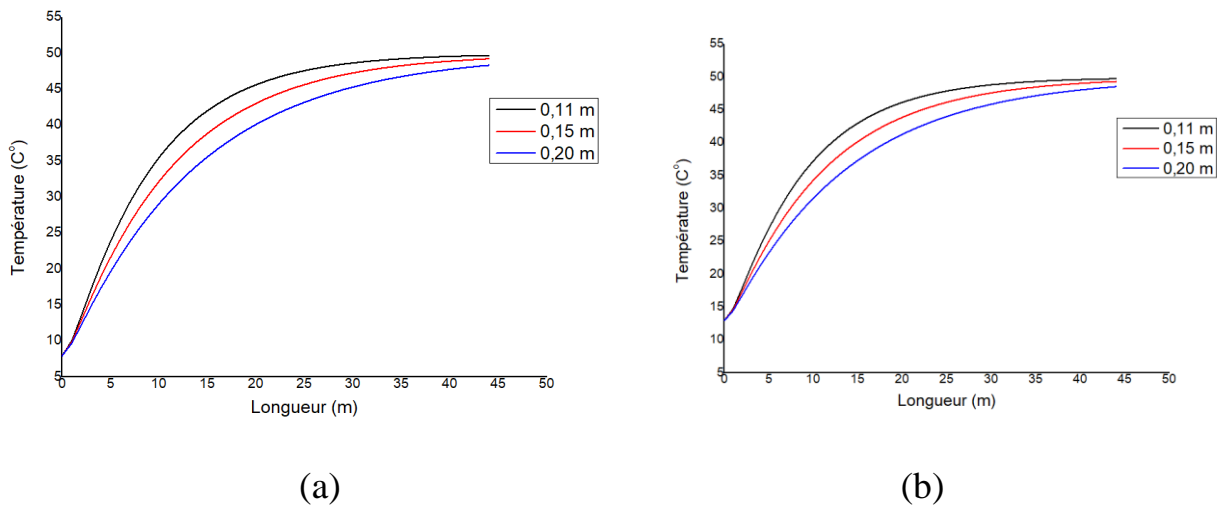


Figure III.6 variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube : (a)  $T_{ea}$  minimale (b)  $T_{ea}$  moyenne

#### En mois de Janvier

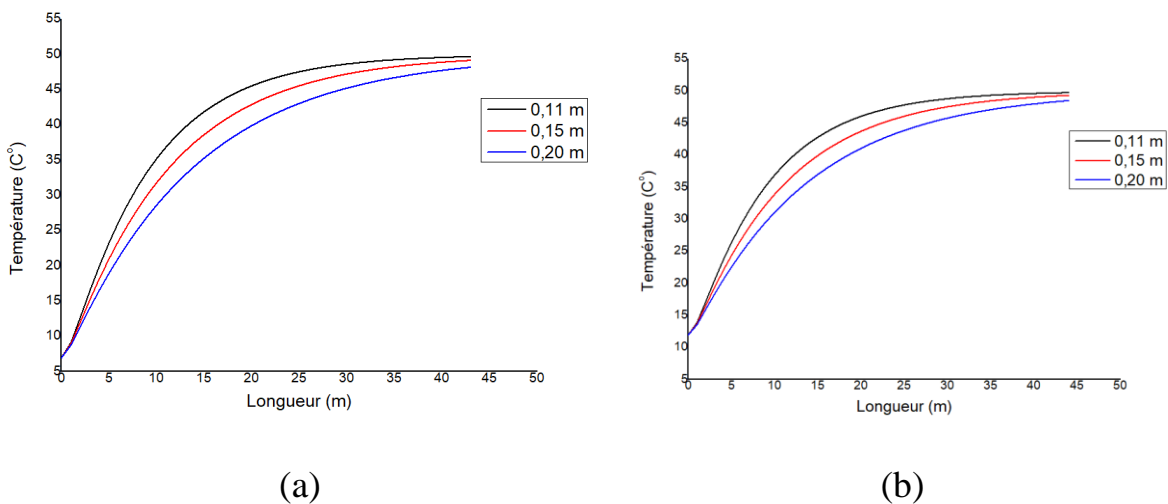


Figure III.7 variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube : (a)  $T_{ea}$  minimale (b)  $T_{ea}$  moyenne

### En mois de mars

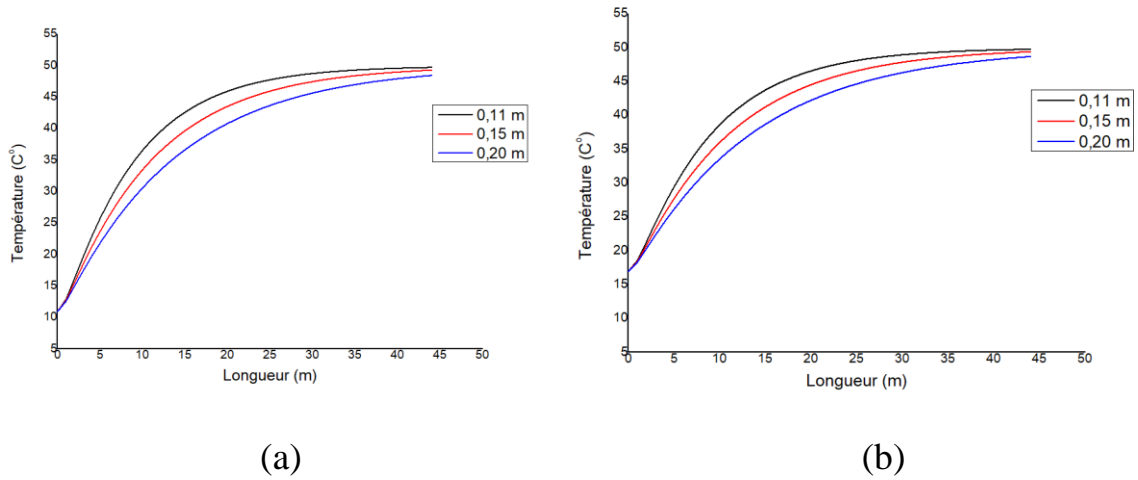


Figure III.8 variation de la température de l'air en fonction du diamètre du tube : (a)  $T_{ea}$  minimale (b)  $T_{ea}$  moyenne

### III.4.3 Influence du débit d'air

Les courbes des figures III.9-12, présentent une comparaison entre la température de l'air à la sortie de l'échangeur pour différentes valeurs du débit d'air. Il s'avère à travers les résultats que plus le débit est faible plus la température de sortie est élevée. Ceci est justifier par le fait que le faible débit permet à l'air un temps de séjour plus long dans l'échangeur et par conséquent une durée d'échange de la chaleur plus étroite.

### En mois de décembre

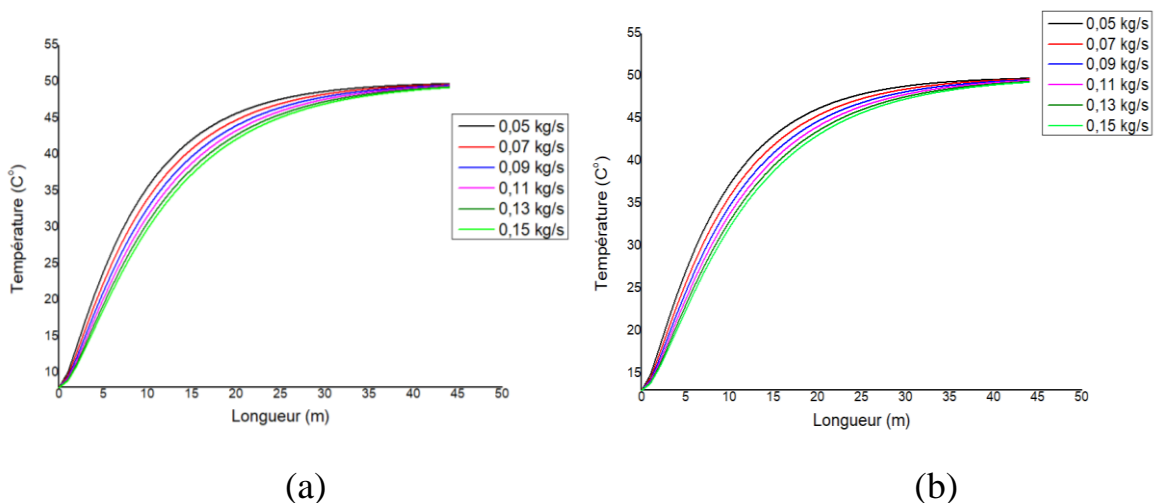


Figure III.9 variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour différents débits en mois de décembre : (a)  $T_{ea}$  minimale, (b)  $T_{ea}$  moyenne.

## En mois de janvier

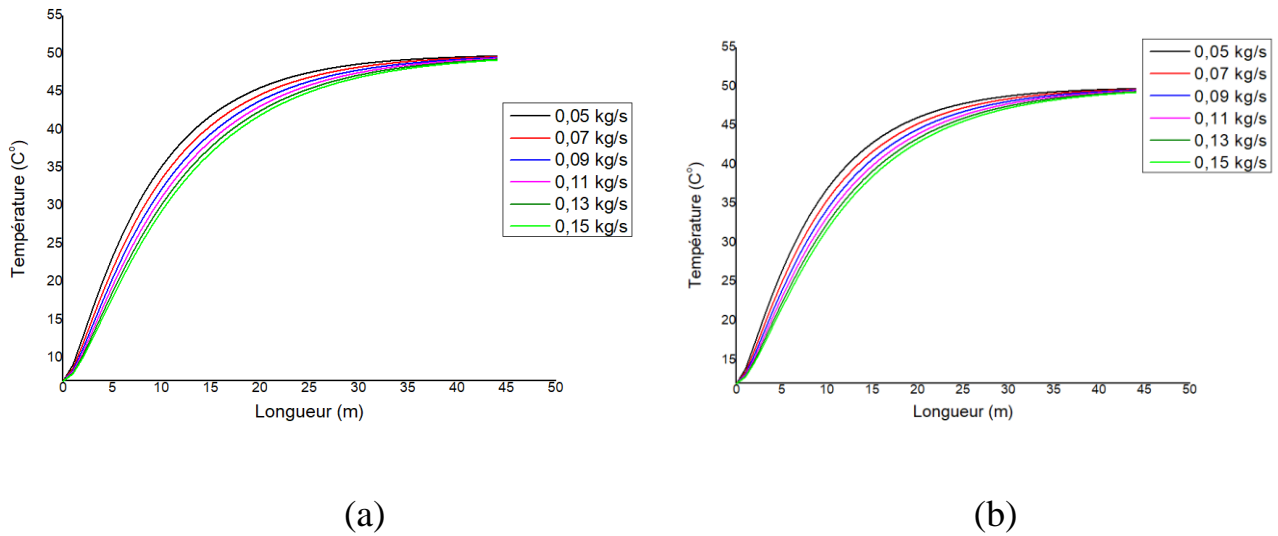


Figure III.10 variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de janvier (a)  $T_{ea}$  est minimale (b)  $T_{ea}$  est moyenne

## En mois de février

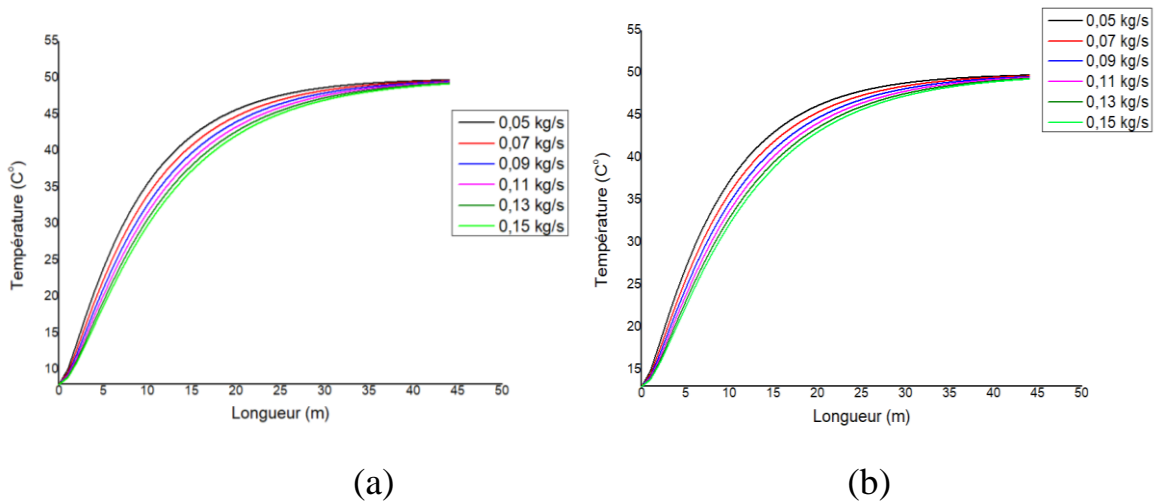


Figure III.11 variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour différents débits en mois de février : (a)  $T_{ea}$  minimale, (b)  $T_{ea}$  moyenne.

### En mois de mars

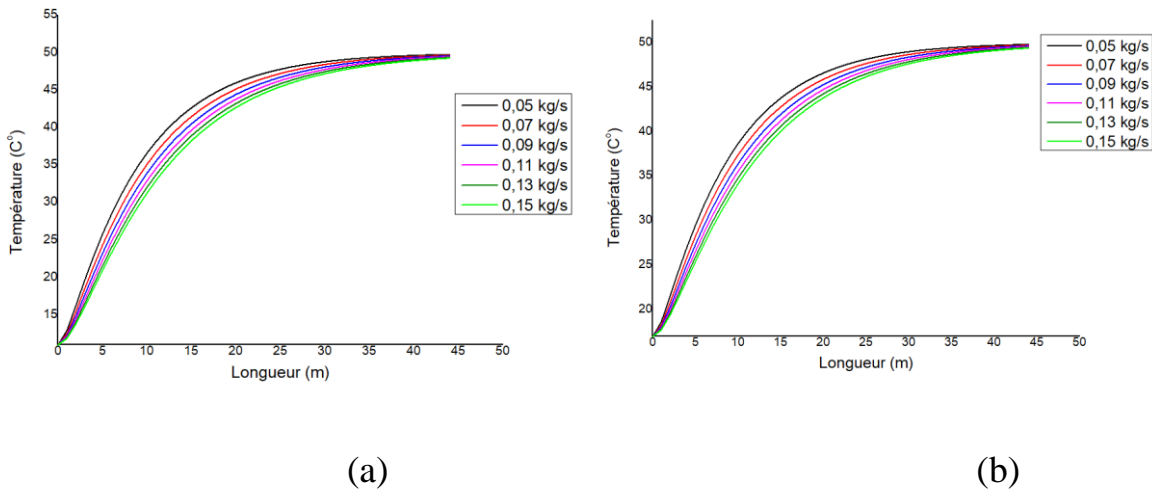


Figure III.12 variation de la température de l'air en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de mars (a)  $T_{ea}$  est minimale (b)  $T_{ea}$  est moyenne

#### III.4.4 Influence de la longueur de l'échangeur sur le coefficient de performance (COP)

Le coefficient de performance COP de l'échangeur est un indicateur très important dans notre étude, il permet donc d'analyser le rendement et la performance de l'échangeur. Ce coefficient représente le rapport entre la quantité d'énergie produite et la quantité d'énergie utilisée. A partir des Figures III.13-16, on peut constater que le COP augmente avec l'augmentation de la longueur de l'échangeur (jusqu'à 50m) où il atteint une valeur égale à 17.5.

### En mois de décembre

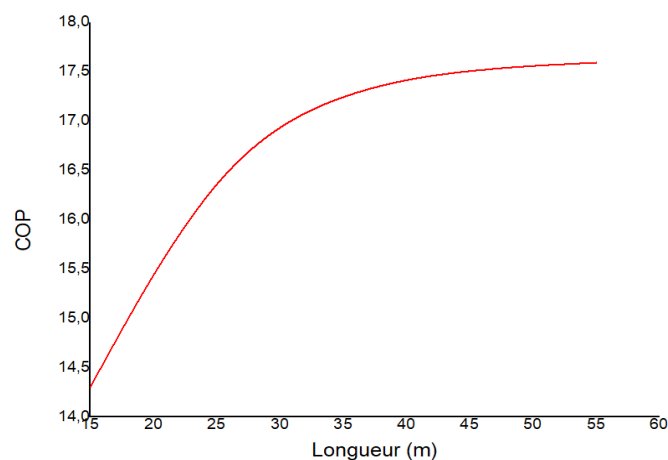


Figure III.13 variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube en mois de décembre ( $T_{ea}$  est minimale)

En mois de janvier

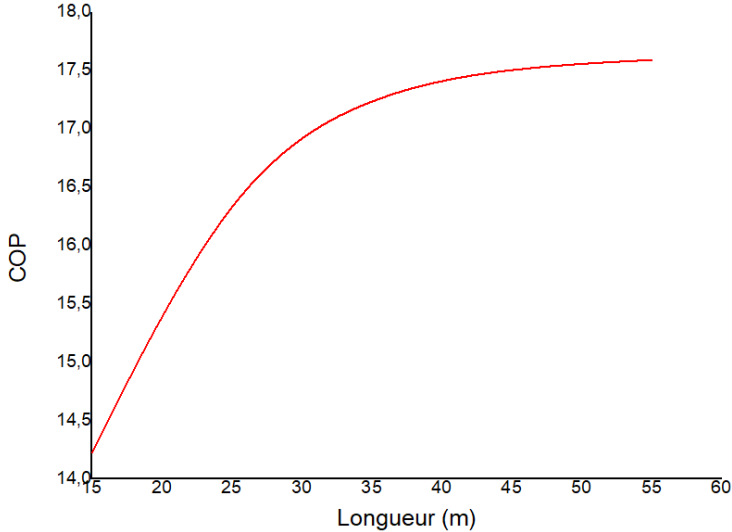


Figure III.14 variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube en mois de janvier ( $T_{ea}$  est minimale)

En mois de février

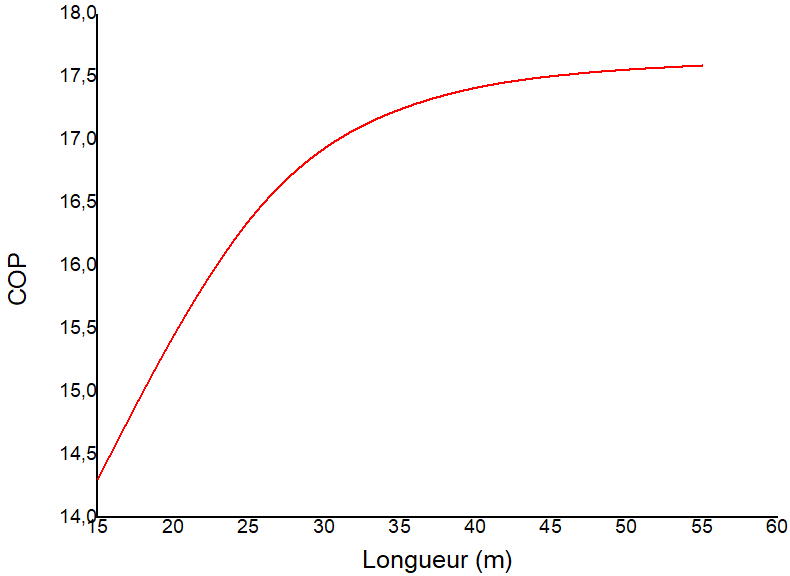


Figure III.15 variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube en mois de février ( $T_{ea}$  est minimale)



### En mois de mars

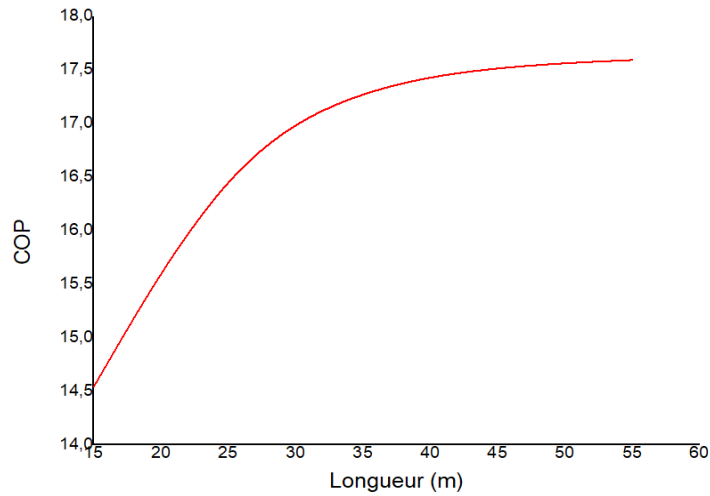


Figure III.16 variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube en mois de mars ( $T_{ea}$  est minimale)

### III.4.5 Influence du débit d'air sur le coefficient de performance (COP)

D'après les Figures III.17-20, il s'avère, très clairement, que le COP augmente la diminution de la vitesse de l'air (temps de séjour plus élevé), ainsi qu'avec le cuivre comme matière de la conduite au lieu du P.V.C. Reste à signaler, en définitive, qu'à une longueur infinie (45m dans notre cas) la température de l'air et également le coefficient de performance sont max: ( $T_{max} \approx 50^{\circ}c$ ) et ( $COP_{max} \approx 17,5$ ).

### En mois de décembre

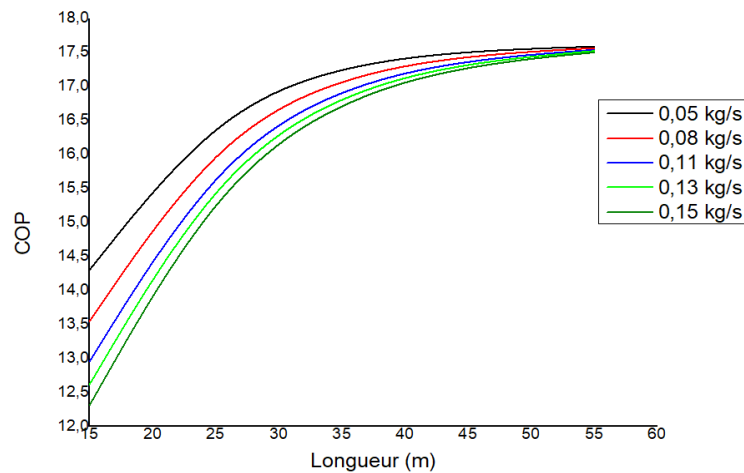


Figure III.17 variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de décembre ( $T_{ea}$  est minimale)

### En mois de janvier

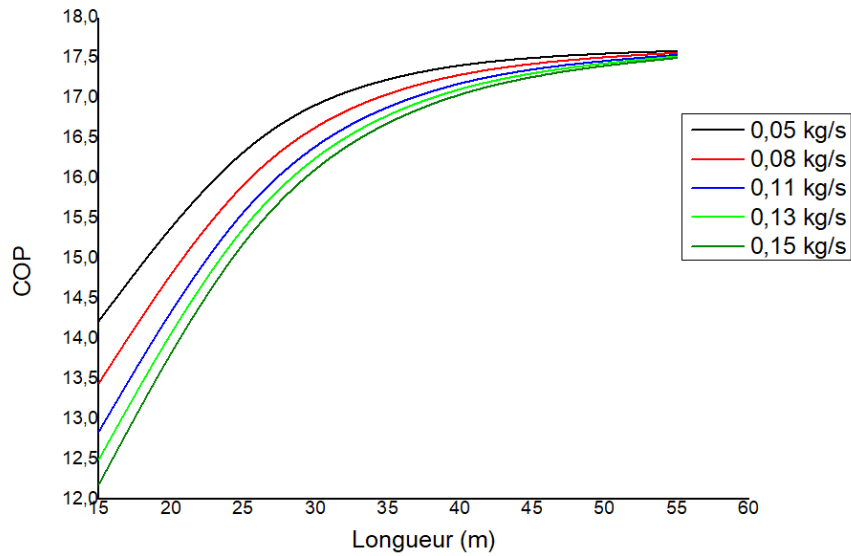


Figure III.18 variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de janvier ( $T_{ea}$  est minimale)

### En mois de février

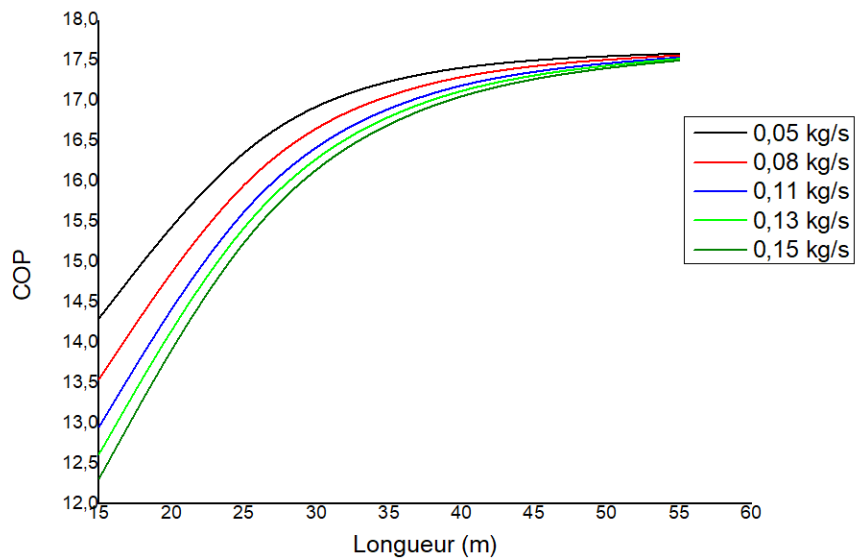


Figure III.19 variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de février ( $T_{ea}$  est minimale)

### En mois de mars

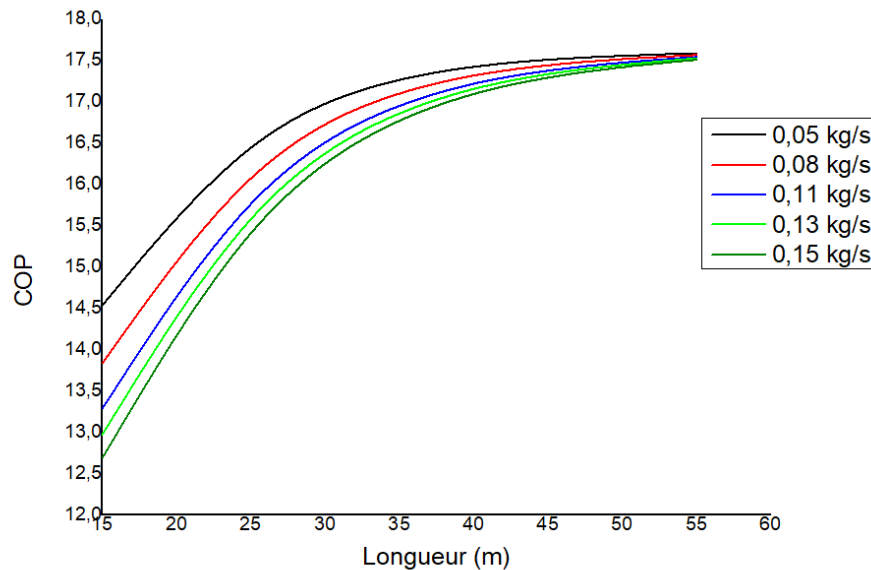


Figure III.20 variation de coefficient de performance en fonction de la longueur du tube pour différents débits en mois de mars ( $T_{ea}$  est minimale)

### Conclusion

D'après les résultats de cette étude, pour les mois concernés (Décembre, Janvier, Février et Mars), on constate, d'abord, que la température de l'air augmente avec la longueur de la conduite, avec une légère performance remarquée en mois de Mars à cause, particulièrement, de la température ambiante qui est sensiblement élevée par rapport aux autres mois. De plus, cette augmentation est bien constatée lorsque l'on diminue la vitesse de l'eau (débit massique). A partir de ces deux constats, on peut conclure que le phénomène d'augmentation de la température de l'air en fonction de la longueur de la conduite de l'échangeur et en diminuant la vitesse de l'écoulement de l'eau s'explique par le fait que l'on offre suffisamment de temps à l'échange thermique entre les deux fluides, pour que celui-ci puisse s'effectuer d'une manière plus performante c.-à-d. plus de temps de séjour à l'air pour qu'il reçoive le maximum de chaleur provenant de l'eau chaude. En outre, la substitution de la conduite en P.V.C., conçue à cette étude, par une autre en cuivre, montre une légère amélioration des performances par rapport au P.V.C. du point de vue échange thermique. Cela est justifié par la position de la courbe correspondant au cuivre qui se situe au-dessus de celle correspondant au P.V.C. dans les mêmes figures ci-indiquées. Ce qui confirme les données

### Chapitre III : Résultats et discussion

---

théoriques ( $\lambda_{\text{cu}}=386\text{w/mk} > \lambda_{\text{p.v.c.}}=0,16\text{ w/mk}$ ). Mais vu le coût élevé du cuivre, on préfère travailler avec le P.V.C. bon marché.

Enfin, pour ce qui est coefficient de performance (COP), il s'avère, très clairement, qu'il augmente avec la longueur de la conduite, et avec la diminution de la vitesse de l'air (temps de séjour plus élevé), ainsi qu'avec le cuivre comme matière de la conduite au lieu du P.V.C. Reste à signaler, en définitive, qu'à une longueur infinie (45m dans notre cas) la température de l'air et également le coefficient de performance sont max: ( $T_{\text{max}} \approx 50^{\circ}\text{c}$ ) et ( $\text{COP}_{\text{max}} \approx 17,5$ ).

# **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail consistait à proposer un nouveau système géothermal permettant d'exploiter une énergie très abondante dans la région Saharienne qui l'énergie géothermique venant des forages et de sources chaudes pour le chauffage des habitats. L'utilisation de l'air comme unique vecteur énergétique pour assurer à la fois les besoins de renouvellement d'air et de chauffage d'une habitation dans une station thermale par l'utilisation d'un échangeur de chaleur immergé dans un réservoir d'eau chaude.

L'étude énergétique du système proposé nous a permis de dimensionner l'échangeur en se basant sur les données moyennes (température ambiante et température de l'eau chaude) caractérisant la région. Ce type d'échangeur de chaleur, nous a permis de valoriser une partie de la chaleur initialement perdue par la vapeur et les eaux abandonnées. Plusieurs prototypes de conduit échangeur, pouvant s'intégrer à la solution proposée. Nous avons choisi d'étudier un échangeur eau-air avec collecteurs vu la faible perte de charge engendré par ce dernier, et par conséquent la faible consommation électrique.

Les résultats de l'étude ont montré qu'il y a une relation proportionnelle entre la température de sortie et la longueur de l'échangeur et relation inversement proportionnelle avec le diamètre du tube. La longueur optimale de l'échangeur pour chauffer une chambre de dimensions moyennes est presque quarante cinq (45) mètres.

En outre, la substitution de la conduite en P.V.C., conçue à cette étude, par une autre en cuivre, montre une légère amélioration des performances par rapport au P.V.C. du point de vue échange thermique. Mais vu le coût élevé du cuivre, nous proposons d'utiliser un échangeur en PVC, surtout que ce dernier est plus résistant aux milieux agressifs.

En termes 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 par une méthode itérative.

# **Références Bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

- [1] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Chauffage> (consulté le : mai 2020)
- [2] Benfateh, H. (2009). Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra).
- [3] Ouali, S (2005). Etude geothermique du sud de l'algerie (mémoire de magister Université M'hamed Bouguerra Boumerdes)
- [4] Semmache, M (2017) Etude des transferts de chaleur dans un échangeur enterré air/sol (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [5] Benchemsa, I. (2017). L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique. (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
- [6] Belloufi, Y. (Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraichissement des locaux), mémoire de Master, Université de Biskra, (2012)
- [7] 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).
- [8] Nebbar. H (Etude théorique et expérimentale d'un échangeur air/sol destiné au rafraichissement des locaux par la géothermie) (mémoire de magister Université de Biskra 2012)
- [9] Louali, Z. (2017). Etude d'un échangeur de chaleur destiné au rafraichissement des locaux par géothermie (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [10] Djoudi, N Saadia, T.(2005). Dimensionnement et simulation d'un échangeur de chaleur au niveau de L'ENICAB (Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [11] Belhadj, K (2014). Etude d'un refroidisseur d'une installation de réfrigération solaire à adsorption (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [12] Padet J. « Echangeur thermique : méthodes globales de calcul avec 11 Problèmes résolus », Masson, Paris (1994).
- [13] Ayaydah, I (2019) Réalisation d'un échangeur thermique BI-TUBE coaxiaux renforcé de fils circulaires bobines (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [14] Deziri, N-E (2017) Simulation d'une conception d'un échangeur de chaleur a faisceau et calandre (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
- [15] Benayad, N (2008) Etude et optimisation des échangeurs de chaleur (mémoire de magister Université Mentouri Constantine).



## Références bibliographiques

---

- [16] Gherbi, S (2018) Dimensionnement d'un échangeur de chaleur pour l'amélioration du rendement de la condensation de l'ammoniac. (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
- [17] Taourit, F (2013) Etude du comportement dynamique et thermique de deux écoulements du fluide dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes) (Mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen)
- [18] Bennajah, M, Chaouni, N (2014) (Echangeurs de chaleur: Technologie, calcul et design), Edition Technip, Paris; France.
- [19] Cours les échangeurs thermiques Master 01 Global Studies Institute de l'Université de Genève
- [20] Rehrah,A Zaidi,O (2014) etude thermique d'un echangeur de chaleur a faisceau et calandre E102 A/B (Mémoire de master, Université M'hamed Bougara Boumerdes )
- [21] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient\\_de\\_convection\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_convection_thermique) (consulté le : mai 2020)
- [22] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre\\_de\\_Nusselt](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Nusselt) (consulté le : mai 2020)
- [23] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre\\_de\\_Reynolds](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds) (consulté le : mai 2020)
- [24] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre\\_de\\_Prandtl](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Prandtl) (consulté le : mai 2020)
- [25] <https://www.thermal-engineering.org/fr/quel-est-le-diametre-hydraulique-definition/>
- [26] <http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/coefficient-de-performance>. (consulté le : juillet 2020)
- [27] Rouag, A (2017) Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption (thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra).