



Université Mohamed khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie Génie
mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : énergétique

Présenté et soutenu par ; Achraf SAYAD

Titre

**Etude expérimentale d'un échangeur eau-air dans
la région de Biskra ; Utilisation de la géothermie
pour la climatisation des habitats.**

Jury :

Pr.	Noureddine MOUMMI	Pr.	Université de Biskra	Président
Dr.	Adnane LABED	MCB.	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Salah GUERBAI	MCB.	Université de Biskra	Examineur

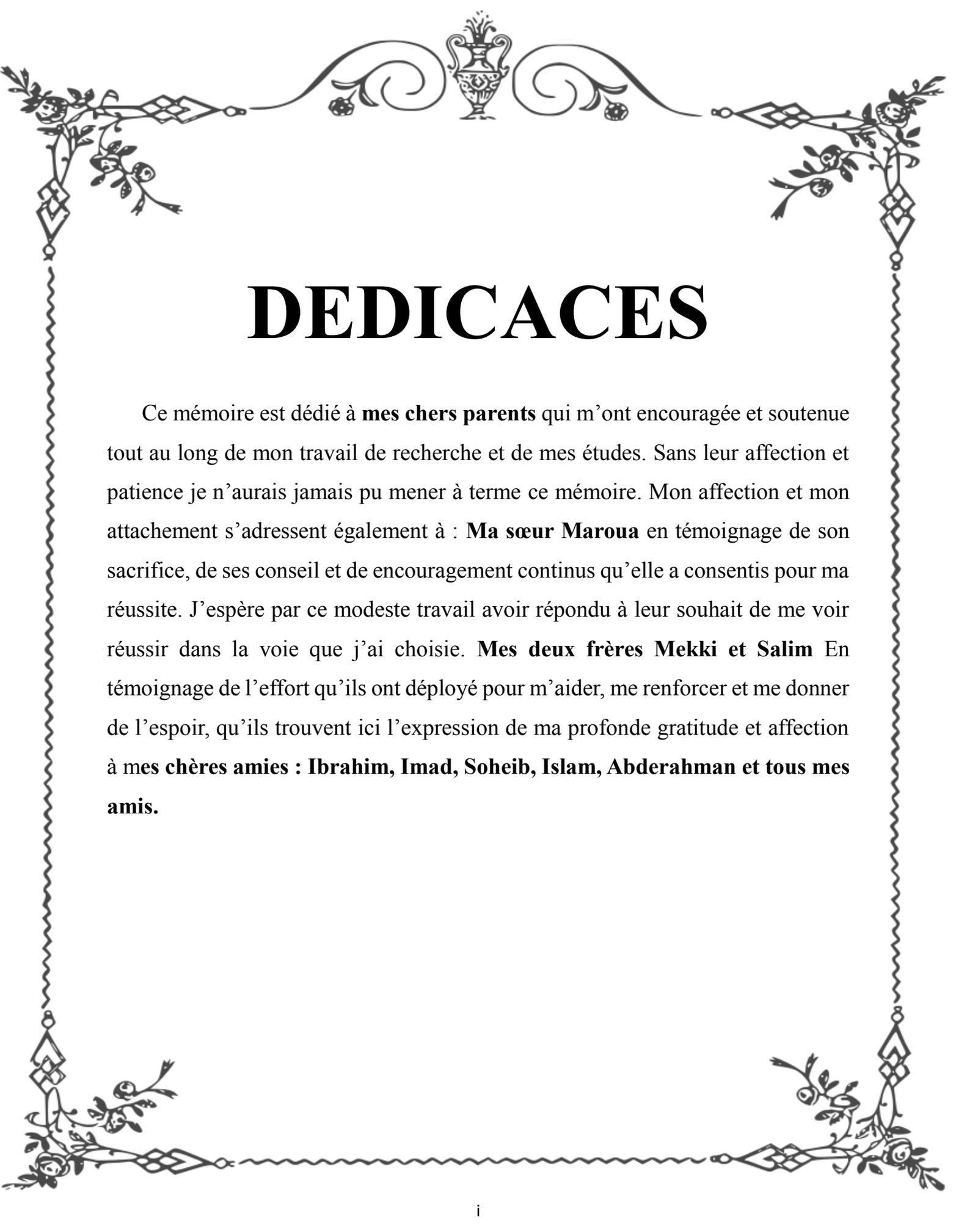
Année universitaire : 2019/2020

Sommaire

Dédicace	i
Remerciements	ii
Nomenclature.....	iii
Liste des figures et les tableaux	iv
Résumé	vi
Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Généralités sur la géothermie</u>	
I.1. Introduction	4
I.2.Principe.....	4
I.3.Avantages/inconvénients	5
I.4.La Géothermie dans l’avenir	6
I.5. Les différents types de géothermie	6
I.5.1. la géothermie haute énergie.....	6
I.5.2. la géothermie moyenne énergie	7
I.5.3. la géothermie de basse énergie	7
I.5.4. la géothermie de très basse énergie	8
I.6. La géothermie en Algérie	8
<u>Chapitre II : Les échangeurs de chaleur ; Rôles et Principes</u>	
II.1. Introduction	12
II.2. Définition.....	12
II.3. Principal but et fonctions d’un échangeur thermique.....	13
II.4. Les différents types d’échangeurs thermiques.....	15
II.5. Fonctionnement général d’un échangeur thermique.....	17
II.6. Critères de performance d’un échangeur	18
II.7. Critère sur les exigences d’étanchéité de l’échangeur et les risques de fuite des fluides .	18
II.8. Conclusions	19
<u>Chapitre III : Résultats et discussions</u>	
III.1. Introduction	21
III.2. Description des échangeurs	21

III.3. Résultats et discussions	22
III.3.1. Chauffage d'air	22
III.3.2. Refroidissement d'air	27
III.3.3. Efficacités des Echangeurs	34
III.4. Conclusion	36
Conclusion général	37
Bibliographie	39

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



DEDICACES

Ce mémoire est dédié à **mes chers parents** qui m'ont encouragée et soutenue tout au long de mon travail de recherche et de mes études. Sans leur affection et patience je n'aurais jamais pu mener à terme ce mémoire. Mon affection et mon attachement s'adressent également à : **Ma sœur Maroua** en témoignage de son sacrifice, de ses conseil et de encouragement continus qu'elle a consentis pour ma réussite. J'espère par ce modeste travail avoir répondu à leur souhait de me voir réussir dans la voie que j'ai choisie. **Mes deux frères Mekki et Salim** En témoignage de l'effort qu'ils ont déployé pour m'aider, me renforcer et me donner de l'espoir, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et affection à **mes chères amies : Ibrahim, Imad, Soheib, Islam, Abderahman et tous mes amis.**



Remerciements

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur ;

Monsieur **Adnane LABED** de m'avoir soutenue et encouragé. Je suis très reconnaissant pour la pertinence de ses conseils et ses explications qui ont contribué à l'amélioration de mes connaissances. Je le remercie, particulièrement, pour la patience qu'il a eue à mon égard et pour le temps qu'il m'a consacré.

Je remercie aussi **Mr. Abderrahmane Chettir** pour son assistance durant toutes les étapes de ce travail.

Mes remerciements sont adressés aussi aux membres de jury, pour avoir l'extrême gentillesse de bien vouloir évaluer ce travail, sans oublier l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique ainsi que le staff administratif du département et le staff technique du Hall technologique.

Nomenclature

C	Celsius (Unité de température)
KWh	Kilo watt heure (Unité de puissance)
M	mètre (Unité de longueur)
CO ₂	Dioxyde Carbonne
Km	Kilo mètre (Unité de longueur)
PAC	Pompe à chaleur
KJ	Kilo Jule (Unité de quantité de la chaleur)
Kg	Kilo gramme (Unité de masse)
G	La gradient géomètre
T	Température
Z	Profondeur
BHT	Botton Hol Température
COER	Centre de développement des énergies renouvelables
MW	Méga Watt (Unité de puissance)
CTA	Centrale de traitement d'air
LMTD	La différence de température moyenne logarithmique
VMC	Ventilations mécaniques contrôlées
DESP	Directive des équipements sous pression
COP	coefficient de performance

Liste des figures et des tableaux

Chapitre I

Les figures

- Figure 1** Principe de la géothermie.
- Figure 2** Schéma expliquant la géothermie à haute énergie.
- Figure 3** Schéma expliquant la géothermie à basse énergie.
- Figure 4** La géothermie à très basse énergie.
- Figure 5** Carte géothermique du Sud algérien.

Les tableaux

- Tableau 1** Comparaison entre la géothermie et les autres énergies.
- Tableau 2** Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.

Chapitre II

Les figures

- Figure 1** Principe de travail d'un échangeur

Chapitre III

Les figures

- Figure 1** Schémas des échangeurs utilisés ; a) à quatre (04) tubes, b) à six (06) tubes
- Figure 2** Variation de la différence de température en fonction du débit d'air.
- Figure 3** Variation de la différence de température en fonction du débit d'air (Ech. a 06 tubes).
- Figure 4** Variation de la différence de température en fonction du débit d'air (Ech. a 08 tubes).
- Figure 5** Variation de la différence de température en fonction du débit d'air pour les trois échangeurs.
- Figure 6** Variation de la différence de température en fonction de la longueur pour trois débits différents.
- Figure 7** Variation de la différence de température de l'air en fonction du débit (échangeur à quatre tubes).

- Figure 8** Variation de la différence de température de l'air en fonction du débit (échangeur à six tubes).
- Figure 9** Variation de la différence de température de l'air en fonction du débit (échangeur à huit tubes).
- Figure 10** Variation de la différence de température de l'air en fonction du débit pour les trois échangeurs.
- Figure 11** Variation de la différence de température en fonction de la longueur pour trois débits différents.
- Figure 12** Variation du COP en fonction du débit pour les trois échangeurs (chauffage)
- Figure 13** Variation du COP en fonction du débit pour les trois échangeurs (rafraichissement)

Les photos

- Photo 1** Echangeur à 4 tubes (chauffage)
- Photos2** Echangeur à 6 tubes (chauffage)
- Photos 3** Echangeur à 8 tubes (chauffage)
- Photos 4** Echangeur à 4 tubes (refroidissement)
- Photos 5** Echangeur à 6 tubes (refroidissement)
- Photos 6** Echangeur à 8 tubes (refroidissement)

الملخص

هذا العمل يهدف لإيجاد حل تكنولوجي جديد لاستغلال واحد من اهم المصادر الطاقوية في شرق وجنوب الجزائر والتي تتمثل في استغلال المياه السطحية والجوفية، الساخنة والباردة التي تكاد تكون غير مستغلة لا سيما في الجانب الطاقوي. ولهذا اقترحنا استعمال محول حراري مغمور داخل حوض من المياه الساخنة/الباردة لتسخين/تبريد الهواء داخل البنايات أو المنشآت السكنية، حيث تسمح لنا هذه التقنية بتقليل استهلاك الطاقة لا سيما المستعملة في التدفئة/التبريد.

اظهرت النتائج التجريبية لهذه الدراسة أن الطاقة المكتسبة من هذا الحل التكنولوجي تتناسب وطول المحول الحراري، حيث ترتفع درجة حرارة الهواء بزيادة طول هذا الأخير، وقد يتجاوز الفارق الحراري المكتسب الـ 20 درجة وهذا 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 des sources d'eau et des nappes dont les eaux chaudes et froides des forages et des sources naturelles. Ces sources, forages et les stations thermales sont mal exploitées de point de vue thermique. 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/rafraichir. Cette solution technologique va permettre de diminuer la consommation électrique du chauffage/climatisation des habitats et surtout ceux des stations thermale. Les résultats expérimentaux réalisés en utilisant deux réservoirs alimentés par deux forages, chaud et froid, ont montré que le gain d'énergie est en fonction de la longueur de l'échangeur. Ce gain peut atteindre jusqu'à 20°C entre l'entrée et la sortie de l'échangeur, ce qui fait que la solution proposée est très faisable de point de vue technique.

Introduction générale

*L*e Sud algérien est un vaste territoire dont le potentiel géothermique est contenu dans les bassins sédimentaires des zones continentales stables. Les ressources géothermiques sont principalement de basse énergie. Afin de déterminer les régions d'intérêt géothermique, les cartes de gradient géothermique de flux de chaleur sont établies.

Les forages pétroliers et hydrauliques qui traversent le territoire saharien indiquent bien que dans certaines régions, les eaux sont très chaudes, ces constatations nous permettent de considérer le Sahara algérien comme favorable à la production de l'énergie géothermique.

Si le potentiel géothermique du Nord algérien est bien déterminé, pour le Sud algérien une étude détaillée s'avère nécessaire pour l'évaluation du potentiel géothermique.

Dans la région de Biskra, l'aquifère du continental intercalaire se présente sous forme d'une nappe artésienne, et elle constitue la plus grande réserve d'eau souterraine dans le Sahara algérien. Cette nappe est surmontée par celle du complexe terminal qui se présente sous forme d'une nappe libre [1].

Les températures les plus élevées enregistrées sont 98 C à Guelma et 118 C à Biskra, située dans la partie Sud-Est du pays. En termes de production d'énergie, l'énergie géothermique interne a été estimée, par le CDER, pour fournir un potentiel de 700MW (plus le flux de l'exploitation de la plate-forme albienne avec le débit total des sources d'eau chaude). Cependant, ces sources d'eau chaude ne sont malheureusement pas exploitées à des fins industrielles [2].

Un nombre important de forages et de sources chaudes et froides dans la région de Biskra, surtout dans le West de la wilaya ne sont pas exploitées. Ces forages et sources peuvent être exploités au chauffage et rafraichissement des habitats qui sont aux alentours, ainsi que la climatisation des stations thermales.

Dans ce mémoire nous proposons une nouvelle solution technologique pour l'exploitation de cette énergie géothermique des eaux profondes et superficielles, que ce soit pour le chauffage ou le rafraichissement des habitats ; il s'agit d'un échangeur eau-air immergé dans un réservoir d'eau. L'étude expérimentale porte sur le dimensionnement et l'évaluation des performances de trois échangeurs à collecteurs qui se différencient par le nombre de tubes (longueur).

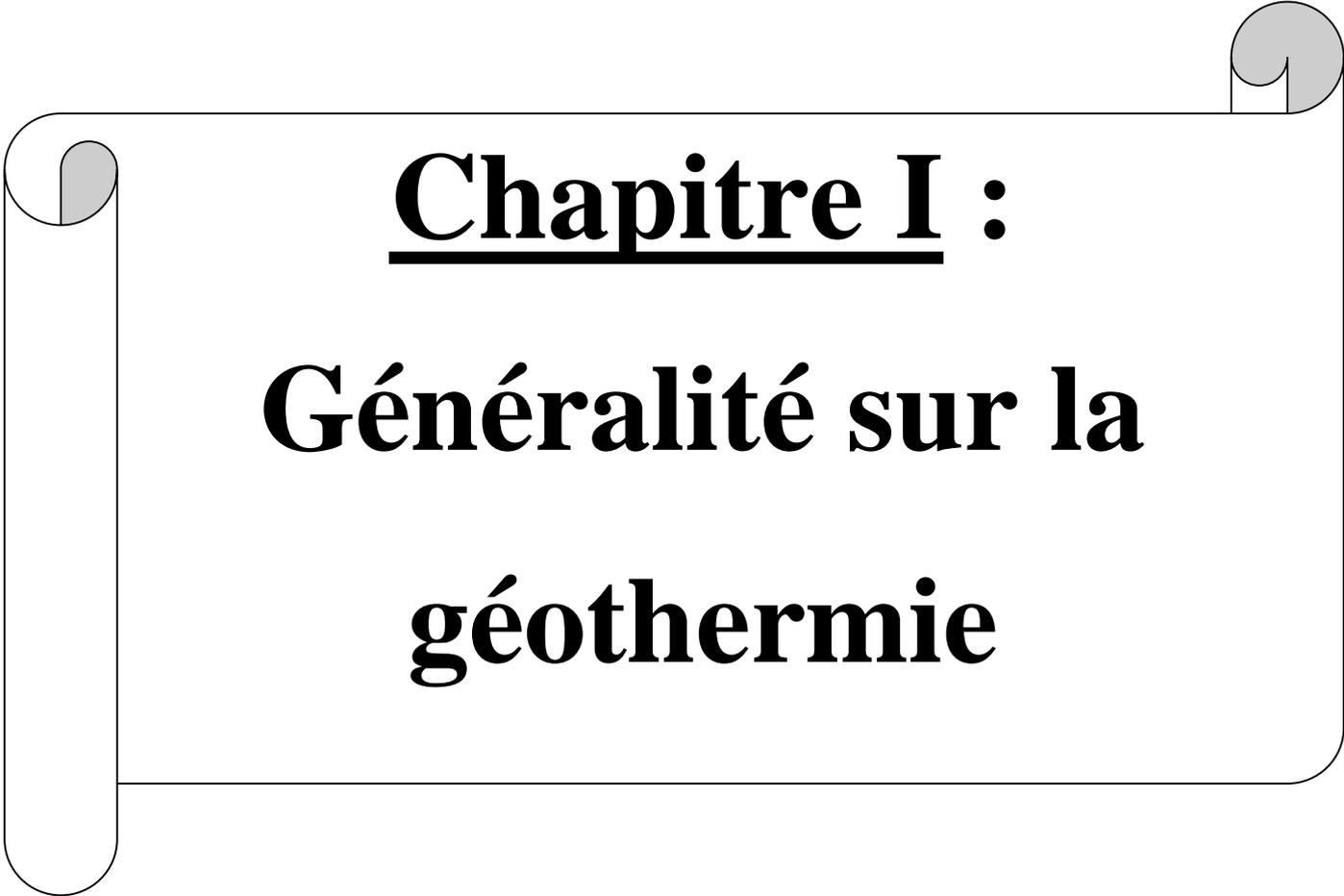
Le manuscrit est réparti en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons donné une idée générale sur la géothermie et ses différents types.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des différents types d'échangeurs 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.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards. The text is centered on the scroll.

Chapitre I :
Généralité sur la
géothermie

1. Introduction

La chaleur terrestre est une source d'énergie durable pour la production de chaleur et d'électricité, qui ne dépend ni des conditions climatiques, ni de la saison ou du moment de la journée. La diversité des températures et des profondeurs autorise une multitude de variantes d'utilisation.

L'énergie géothermique, c'est la chaleur stockée au-dessous de la surface du sol. Cette chaleur provient pour l'essentiel de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, et pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones plus profondes de la Terre. Ce que l'on appelle géothermie, c'est l'utilisation de cette chaleur.

Dans la plupart des régions, les roches possèdent une température d'environ 25-30°C à 500 m de profondeur, et de 35-45°C à 1000 m. Dans d'autres régions, où les conditions géologiques sont différentes (écorce terrestre amincie, volcanisme), ces températures peuvent atteindre 100°C, voire 200°C ou plus !

La chaleur terrestre est une source d'énergie quasiment inépuisable. Sur la base de ce constat, la géothermie a sensiblement gagné en importance ces dernières années et suscite de grands espoirs dans le domaine de l'approvisionnement en énergie. L'importance de la géothermie dans les scénarios d'avenir en matière de politique énergétique ne cesse de croître. [3]

2. Principe

Il existe deux grands types de Géothermie

- **La Géothermie de Surface :**

Le rayonnement du soleil et le ruissellement de l'eau de pluie permettent au sol de jouer un rôle d'inertie thermique, il y règne à quelques mètres de profondeur une température pratiquement constante tout l'année.

La géothermie de surface utilise cette inertie pour obtenir des températures plus basses que les températures à la surface en été, et à l'inverse obtenir des températures plus élevées que les températures à la surface en hiver.

En Hiver, la chaleur du sol ou de l'air est captée par une tuyauterie conduisant un fluide caloporteur. La chaleur est restituée dans le logement par la pompe à chaleur.

En été, L'excès de chaleur dans la maison est restitué dans l'air par la pompe à chaleur.

- ✓ **La Géothermie dite « verticale » ou en profondeur :**

Le principe est de récupérer la chaleur en profondeur dans les nappes d'eau chaudes.

Cette chaleur traverse « l'échangeur de chaleur » (système de pompe à chaleur), où l'excès de chaleur est rejeté dans le tuyau de réjection.

La chaleur restante est envoyée aux radiateurs situés dans le logement. Ce type de géothermie est très pratique pour le chauffage, mais, contrairement à la géothermie de surface, on ne peut pas abaisser la chaleur dans la maison. [3]

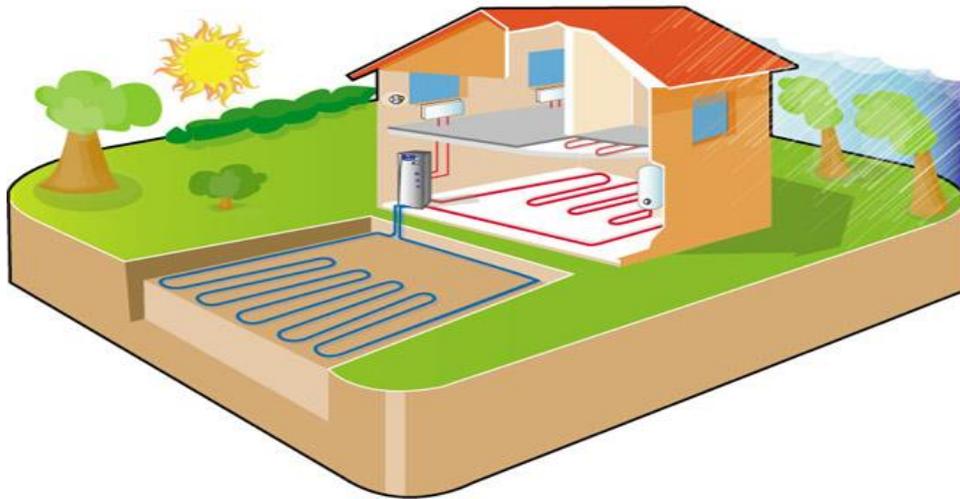


Figure 1 : Principe de la géothermie. [4]

3. Avantages/inconvénients

Avantage :

- Energie inépuisable et renouvelable.
- Durée de vie : supérieure à 30 ans.
- Fonctionnement double : - en Hiver, avec le chauffage.
- en Eté, avec le refroidissement.
- Energie propre : aucune pollution n'est dégagée. Pas d'émission de CO₂.

Inconvénients :

- Prix d'installation relativement élevé.
- Géothermie verticale : il faut se situer sur une zone propice à l'installation de tuyaux pouvant descendre loin en profondeur.
- N'est utilisable en domestique que pour le chauffage, l'électricité pouvant être développée en centrale Géothermique. [3]

4. La Géothermie dans l'avenir

La géothermie est en pleine expansion, car c'est une énergie renouvelable et à rendement conséquent. Elle aura donc sa place après la baisse des énergies fossiles (pétrole, gaz...). Comme toute énergie renouvelable, sa croissance mondiale sera fulgurante. L'énergie géothermique est placée au 5ème rang des énergies à « potentiel futur ». [3]

	<i>Pétrole</i>	<i>Gaz</i>	<i>Energie solaire</i>	<i>Energie éolien</i>	<i>Energie géothermique</i>
Localisation	Proche orient principalement	Gisement le plus souvent en Algérie, en Russie et en pleine mer	La où il y a un rayonnement solaire constant.	La où il y a du vent qui souffle a plus de 10 km/h	Partout pour la basse énergie, des sites plus spécialisés pour d'autres formes d'énergies
Coût (coût d'installation ou coût de consommation)	Coût du baril(Mai 2011 81 euro)	Coût annuel de consommation : 1291,8 euro Selon la ville, pour une utilisation individuelle.	Coût d'installation : De 500 à 1000euro par panneaux. Pas de coût de consommation	Coût d'installation : 15000 euro (pour un champ éolienne) 1,5 à 2 % de l'investissement initial	Coût d'installation au minimum 1000 euro Pas de coût de consommation
Emission de CO2(en gramme de CO2/KWh)	900 à 1150	400 à 420	Pas de rejet sauf lords de la création de centrale solaire.	Très peu de rejets (quelques cas particuliers)	Rejet indirect (carburant par la pompe)

Tableau 1 : Une comparaison entre la géothermie et les autres énergies. [5]

5. Les différents types de géothermie

5.1.La géothermie haute énergie :(aux températures supérieures à 150 °C) qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.

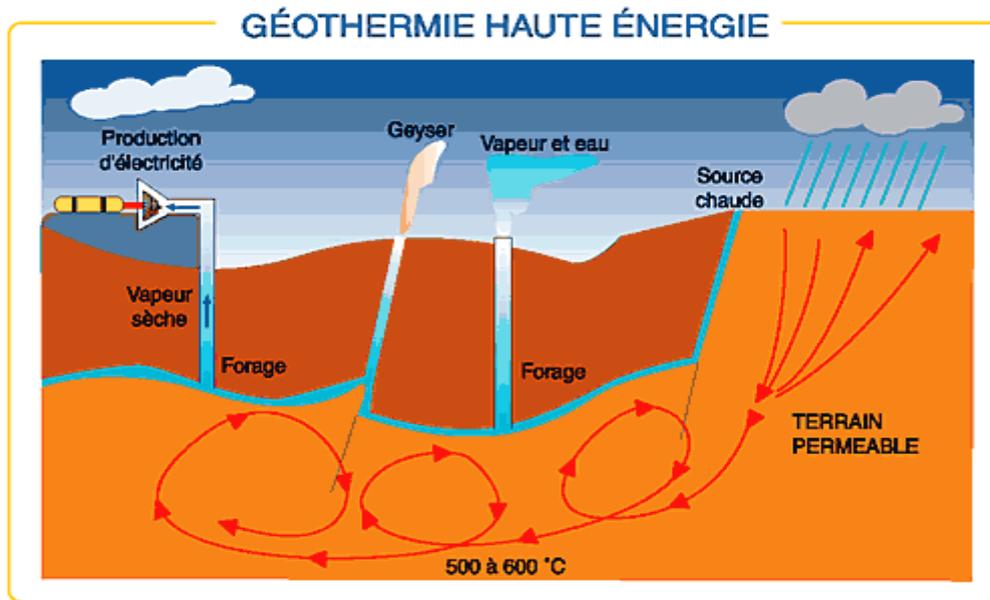


Figure 2 : Schéma expliquant la géothermie haute énergie.[7]

5.2. La géothermie moyenne énergie : (aux températures comprises entre 100 °C et 150 °C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire.

5.3. La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 °C et 100 °C. Principale utilisation : les réseaux de chauffage urbain.

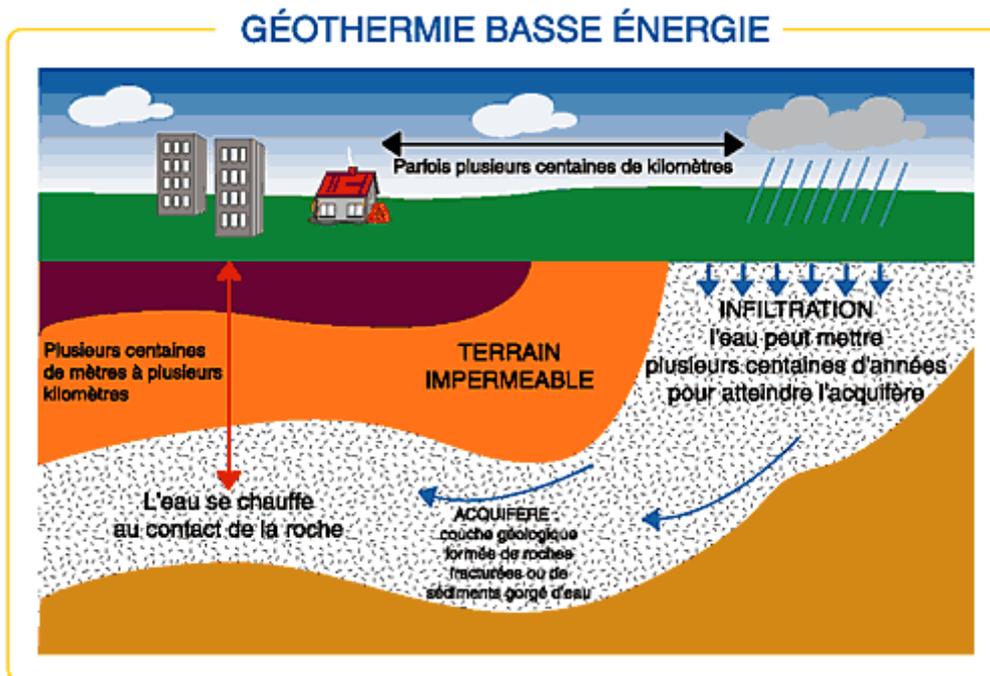


Figure 3 : Schéma expliquant la géothermie basse énergie. [7]

5.4. La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 °C et 30 °C. [6]

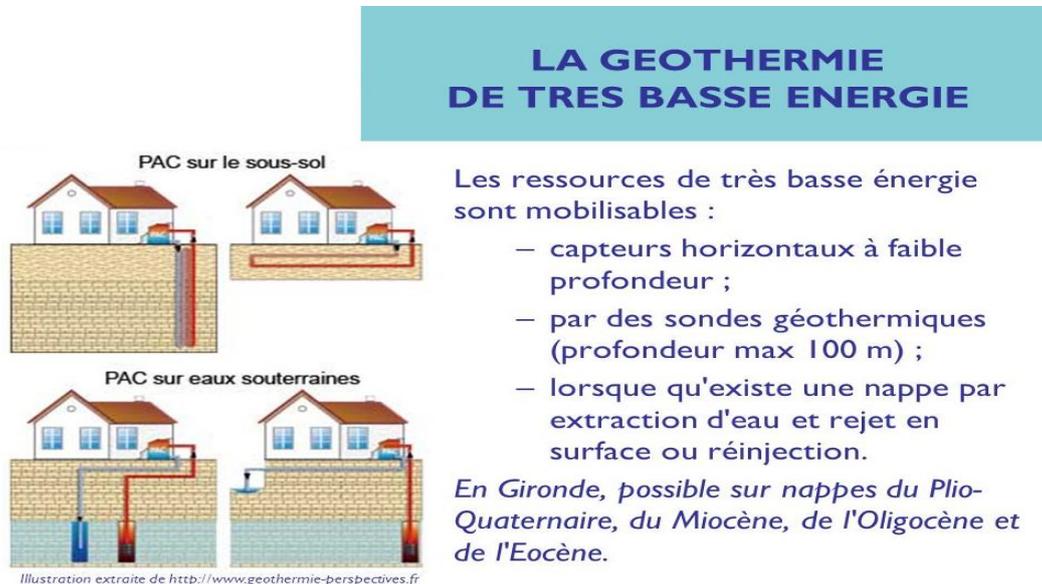


Figure 4 : La géothermie de très basse énergie. [8]

6. La géothermie en Algérie

Les études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire nord algérien, majoritaires au Nord-Est (voir tableau 2). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Maskoutaine (98°C) à Guelma ; Hammam Boutaleb (52°C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Ces nombreuses sources thermales émergent principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre-Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine.

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du Continental Intercalaire

Chapitre I : Généralités sur la géothermie

Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidus Secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H. Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H. Bou Hadjar	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

Tableau2 : Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.

[9]

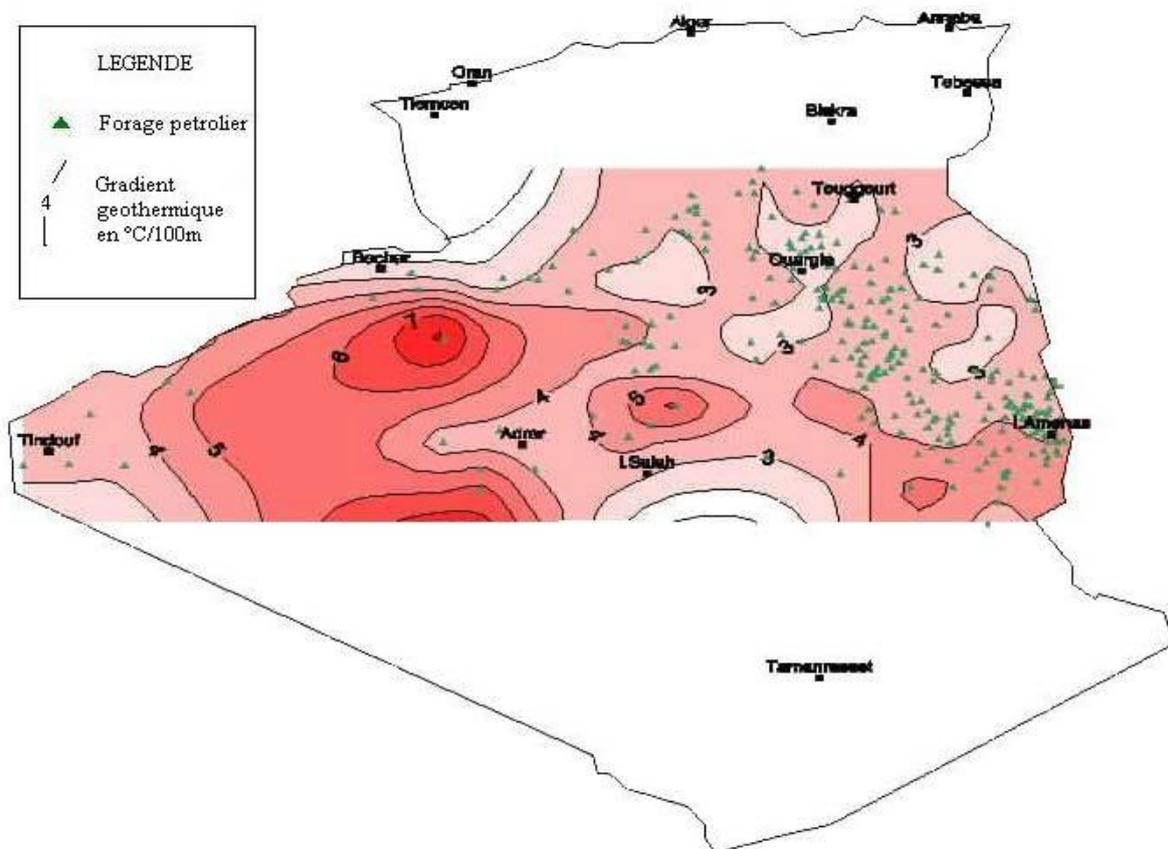


Figure 5 : Carte géothermique du Sud algérien [9]

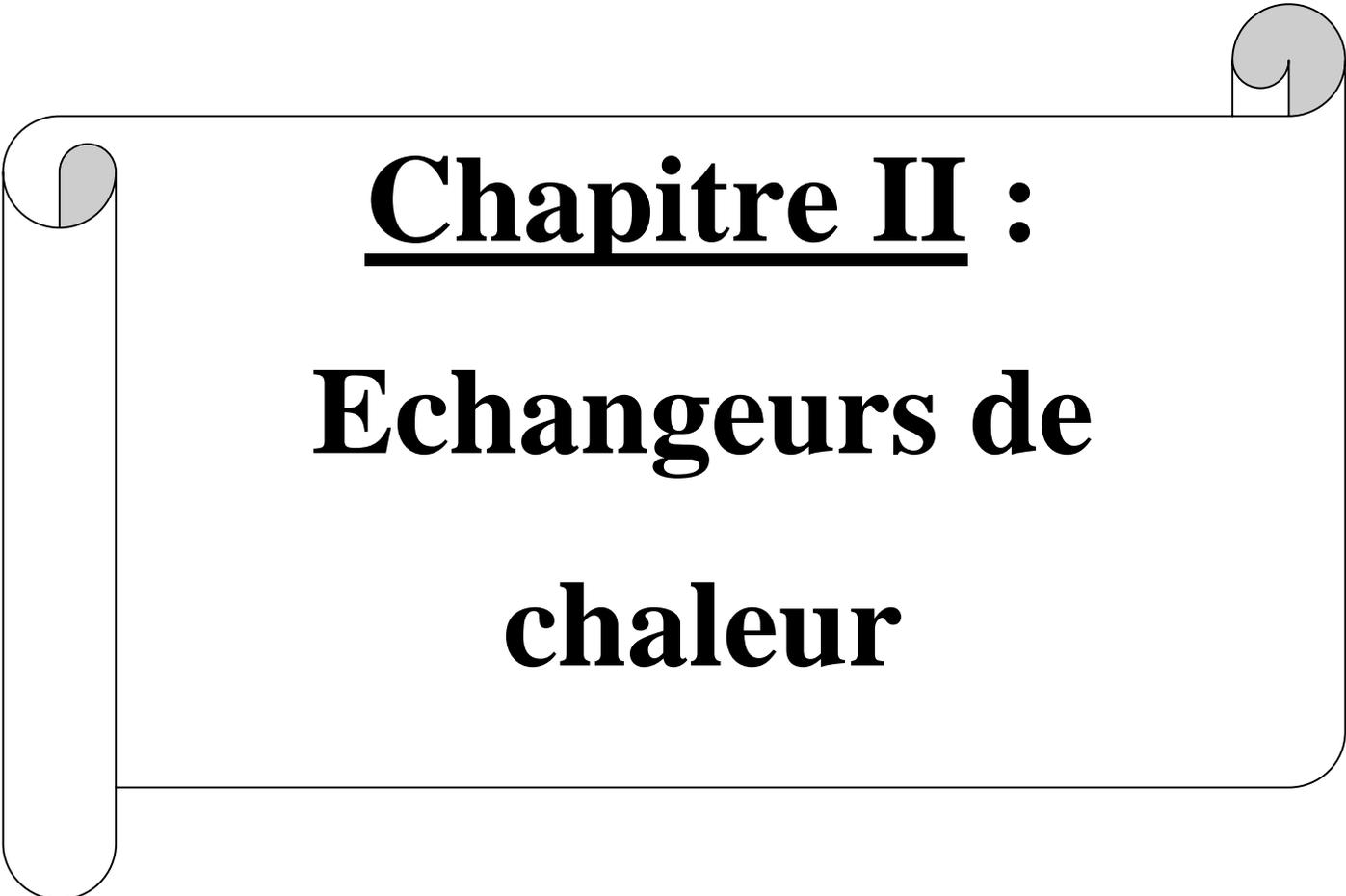
En Algérie, depuis fort longtemps les eaux thermales ont été utilisées pour leurs bienfaits thérapeutiques. Les sculptures découvertes dans les régions des hammams indiquent que bien avant l'époque romaine des établissements balnéaires existaient à ces endroits. Mais ce sont surtout les romains qui ont le mieux développé les techniques de captation et de canalisation des eaux thermales. Très souvent, ils ont construit leurs villes à proximité des établissements thermaux afin de tirer le meilleur parti de ces sources thermales.

Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

Depuis 1990, une récente application de l'énergie géothermique a commencé dans le Sahara Algérien. C'est dans la région de Touggourt qu'une première installation d'équipements destinés aux chauffages des serres est assurée par l'équipe du laboratoire Thermique du C.D.E.R.

Bien que cette application ait donné de bons résultats, elle ne s'est pas encore généralisée et reste très modeste en rapport avec le potentiel géothermique du Sud algérien.

Il reste cependant à noter que l'exploitation de l'énergie géothermique peut être facilitée considérablement au Sud de l'Algérie grâce aux nombreux forages pétroliers qui traversent le sous-sol saharien. [9]

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The scroll is partially unrolled, with the top edge curving upwards. The text is centered within the scroll's frame.

Chapitre II :
Echangeurs de
chaleur

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. 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. 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 rejetée, ou plus économiquement, la chaleur dans la vapeur peut être réutilisée. 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. [10]

2. Définition :

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs utilisés pour transférer de l'énergie thermique d'un fluide à un autre sans mélanger les deux fluides. Les fluides sont généralement

séparés par une paroi solide (avec une conductivité thermique élevée) afin d'empêcher tout mélange ou ils peuvent être en contact direct.

L'exemple classique d'échangeur de chaleur se trouve dans un moteur à combustion interne dans lequel un liquide de refroidissement moteur traverse des serpentins de radiateur et de l'air passe par les serpentins, ce qui refroidit le liquide de refroidissement et réchauffe l'air entrant. En génie électrique, les applications courantes des échangeurs de chaleur incluent les générateurs de vapeur, les ventilateurs, les échangeurs de chaleur à eau de refroidissement et les condenseurs. Par exemple, un générateur de vapeur est utilisé pour convertir l'eau d'alimentation en vapeur d'eau issue de la chaleur produite dans le cœur d'un réacteur nucléaire. La vapeur produite entraîne la turbine.

Le transfert de chaleur dans un échangeur thermique implique généralement une convection dans chaque fluide et une conduction thermique à travers la paroi séparant les deux fluides. Dans l'analyse des échangeurs de chaleur, il est souvent commode de travailler avec un coefficient global de transfert de chaleur, connu comme un facteur U. Le facteur U est défini par une expression analogue à la loi de Newton sur le refroidissement.

De plus, les ingénieurs utilisent également la différence de température moyenne logarithmique (LMTD) pour déterminer la force motrice de la température pour le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur. [11]

3. Principal but et fonctions d'un échangeur thermique

La fonction principale de l'échangeur thermique est de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre à des niveaux de températures distincts. Les fonctionnalités des échangeurs thermiques sont extrêmement diverses et variées : les principales en sont les suivantes :

- Préchauffeur ou refroidisseur d'un liquide ou d'un gaz (air par exemple) pour lesquels de très nombreux exemples pourraient être rappelés et qui se caractérise par une fonction simple : le contrôle de la température du fluide en un point particulier du procédé.
- Récupérateur thermique qui permet d'introduire la récente notion de valorisation de l'énergie thermique d'un procédé. La fonction de cet échangeur est alors d'assurer le transfert d'une capacité thermique maximale afin de permettre une valorisation maximale du rejet thermique sur des critères énergétiques et économiques.

- Réfrigérants (et aéro-réfrigérant lorsque le vecteur de refroidissement est l'air, réfrigérant sur eau) qui assure la dissipation de l'énergie thermique non valorisable d'un procédé vers le milieu extérieur – fonction essentielle dans de nombreux process.
- Capteurs ou émetteurs thermiques dont les équipements ont pour fonction, respectivement, d'associer réception d'énergie thermique et transmission vers l'usage. Les exemples les plus courants sont les capteurs solaires thermiques ainsi que les radiateurs domestiques qui assurent le confort thermique dans un bâtiment.
- Des humidificateurs ou condenseurs partiels qui assurent la condensation d'une vapeur en mélange avec un gaz incondensable pour obtenir, en fin d'opération, un gaz appauvri en vapeur : l'exemple rencontré fréquemment est le déshumidificateur d'air humide qui permet d'assurer un contrôle de l'humidité de l'air en sortie de centrale de traitement d'air (CTA). D'autres exemples industriels peuvent être cités comme la captation de vapeurs organiques dans les Cryo-condenseurs ou les condenseurs de buées fréquemment rencontrés dans les installations de génie chimique.
- Évaporateurs qui assurent l'évaporation complète ou partielle d'un liquide dans différents procédés notamment de production d'énergie mécanique (cycle moteur de Rankine, de Hirn) et de production frigorifique : cycle à compression (PAC), réfrigérateur. Condenseurs qui assurent la condensation complète ou partielle d'un gaz (vapeur) là encore par exemple pour la production d'énergie mécanique et frigorifique.
- Équipements qui permettent la congélation et la fusion d'une phase liquide ou vapeur grâce à une paroi refroidie en dessous du point triple du fluide. Ces dispositifs sont utilisés pour assurer la séparation de plusieurs corps, assurer le stockage d'énergie thermique (stockage de glace ou stockage par MCP), produire une phase solide pour divers usages.[12, 13]

4. Les différents types d'échangeurs thermiques

4.1. Les principales technologies utilisées

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

- Les plaques
- Les tubes

Il en existe d'autres types, tels que 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 :

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

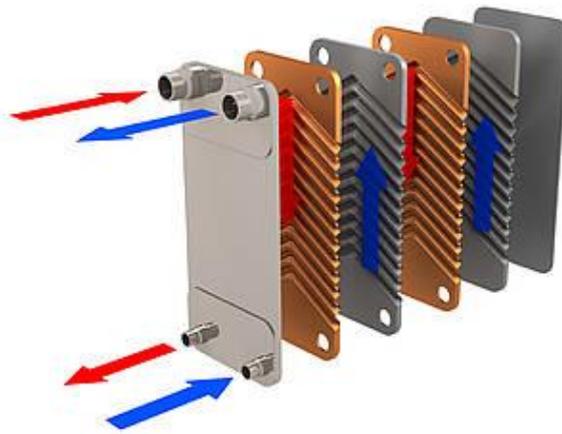


Figure II.1 : Principe de travail d'un échangeur

4.2. L'échangeur thermique à plaques

Dans le cas de l'échangeur thermique à plaques, les fluides se déplacent de chaque côté des plaques, qui sont généralement ondulées. Ce type d'échangeur thermique est fréquemment employé car il est très performant. On le trouve dans les climatisations, les réfrigérateurs ou encore dans les chaudières, pour la production d'eau chaude sanitaire.

Les plaques utilisées dans ce dispositif peuvent être :

- À joints
- Soudées
- Brasées
- Assemblées par fusion

Pour chaque type, il est primordial que l'étanchéité entre chaque plaque soit maximale afin que les fluides de différentes températures ne se mélangent pas. Ici, ce sont les plaques qui vont servir de conducteur de chaleur, elles sont fabriquées dans l'un des matériaux cités précédemment.

L'échangeur thermique à plaques peut donc disposer d'un système eau/eau, mais aussi air/air, comme c'est le cas pour certains systèmes de ventilations mécaniques contrôlées (VMC).

Dans cet exemple, l'échange thermique se fait à courants croisés.

4.3. L'échangeur thermique tubulaire

L'échangeur thermique tubulaire, ou multitubulaire, se compose de nombreux tubes qui sont placés dans une calandre. Très résistant à la pression, il est cependant assez encombrant et ne convient pas forcément aux installations domestiques.

C'est pour ces raisons qu'il est utilisé dans les installations puissantes. Par exemple, c'est généralement ce type d'échangeur thermique qui est employé dans les tours de refroidissement des centrales nucléaires en France.

4.4. L'échangeur thermique en forme de serpent

L'échangeur thermique en forme de serpent utilise un tube qui est immergé dans l'eau. Le fluide primaire circule dans le serpent et réchauffe le fluide secondaire dans lequel le tube est immergé.

On le trouve dans les ballons tampon dotés d'un échangeur ou encore dans les climatiseurs, par exemple.

4.5. 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. [14]

5. Fonctionnement général d'un échangeur thermique

Il existe de nombreuses technologies d'échangeurs de chaleur, mais tous fonctionnent suivant les mêmes processus physiques d'échanges, c'est-à-dire :

- la conduction qui représente les échanges à travers les parois (le plus souvent métalliques),
- la convection qui représente les échanges entre les fluides et les parois,
- le rayonnement qui représente les échanges radiatifs entre les fluides et les parois (principalement infra rouge) bien que ce dernier soit souvent négligeable (car pris en compte uniquement pour un fonctionnement à haute température).

On distingue également trois modes d'écoulement différents :

- à co-courants : écoulements parallèles des fluides et dans la même direction ;
- à contre-courants : écoulements parallèles des fluides mais dans des directions inverses ;
- et à courants croisés : écoulements perpendiculaires entre les deux fluides.

Le mode de circulation influe également sur la qualité et l'efficacité du transfert. Un échangeur dit anti-méthodique (ou à co-courants) signifie que l'entrée des deux fluides (chaud et froid) se situe du même côté de l'échangeur. La configuration dite méthodique est celle où les fluides circulent à contre-courants. On l'appelle méthodique car c'est cette configuration qui permet d'obtenir les meilleures performances d'échangeurs. En effet, pour une circulation à co-courant des fluides, la température de sortie du fluide chaud ne pourra pas être plus basse que la température de sortie du fluide froid tandis qu'à contre-courant, il est possible d'abaisser la température du fluide chaud à une valeur qui tendra vers la température d'entrée du fluide froid. Des représentations graphiques illustreront plus loin ces distinctions.

6. Critères de performance d'un échangeur

Il existe plusieurs critères de performance d'un échangeur :

- L'efficacité d'un échangeur est un critère de performance important.
- Le coefficient d'échange global U (ou K) est aussi un des plus utilisés. Plus ce dernier est important, plus l'échangeur est performant. Il faut néanmoins que les pertes de charge soient les plus faibles possibles (mais suffisante afin d'assurer une bonne distribution des fluides) mais soient totalement dépendantes du design de l'échangeur.

- Enfin, le critère de compacité est aussi important car il est défini par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. Shah [16,15]

7. Critère sur les exigences d'étanchéité de l'échangeur et les risques de fuite des fluides

La question des risques de fuite de fluides (et incidemment la qualité de l'étanchéité de l'échangeur) peut être un critère important notamment vis-à-vis de la sécurité de l'installation, les risques sur l'environnement. Ce critère peut être très contraignant en matière de choix technologique et peut intervenir dans le dimensionnement de l'échangeur lui-même par la nécessité d'une épaisseur de paroi importante (prenant en compte par exemple des scénarii de corrosion annuelle...), voir même des exigences de double paroi.

a- Critère associé à la nécessité d'inspection des équipements techniques

Ce critère est d'une part attribué par des obligations d'ordre réglementaire de type DESP (Directive des équipements sous pression) mais est aussi intimement lié aux critères précédents de l'encrassement et de l'étanchéité.

b- Critère d'encombrement/compacité

La compacité d'un échangeur permet ainsi de juger rapidement de la performance d'un échangeur thermique. Ce critère peut aussi être déterminant en termes de choix technologique et de dimensionnement suivant la place (surface et/ou volume) que demande l'installation de l'échangeur dans le process.

c- Critère de coût de l'échangeur

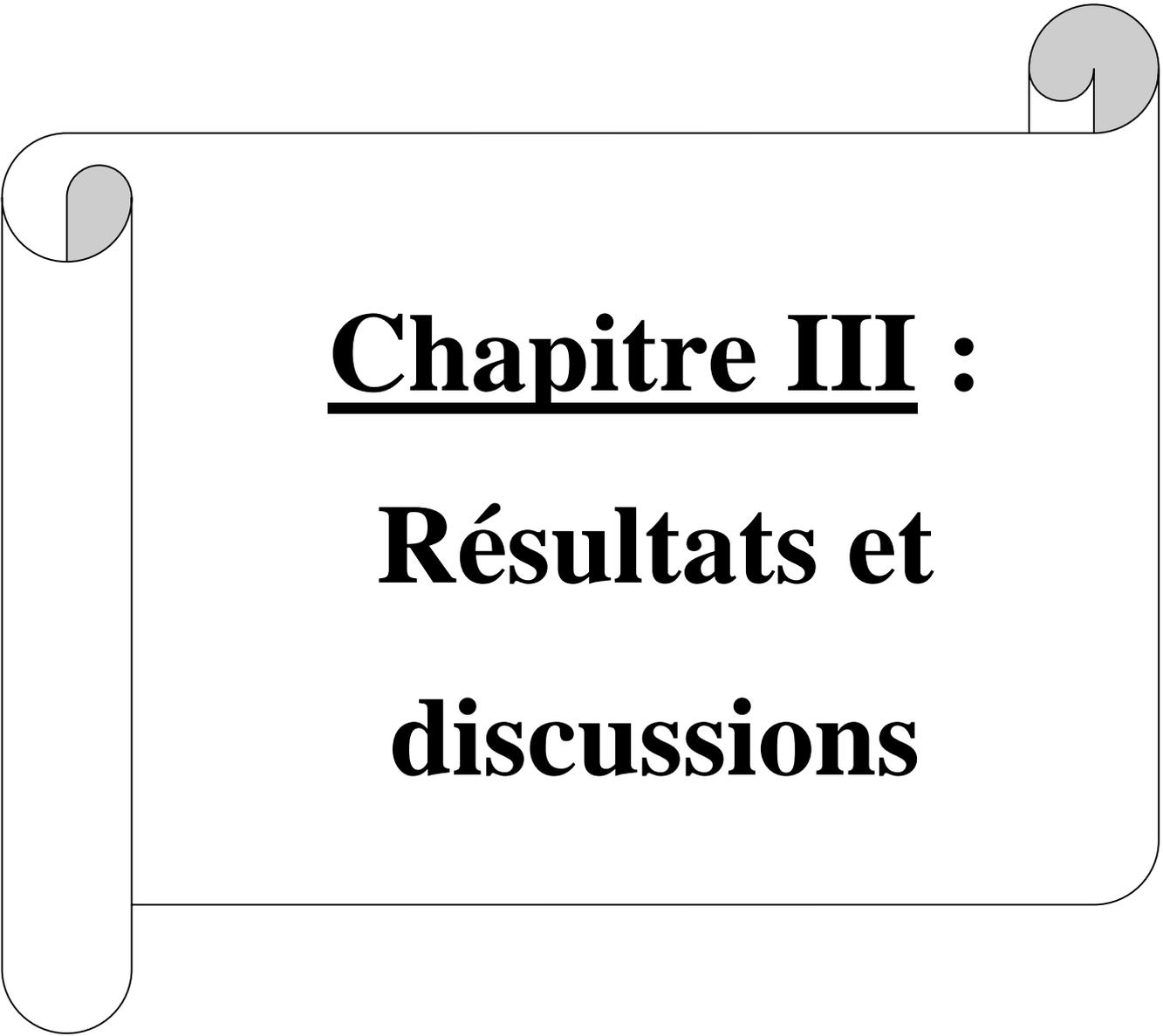
Ce critère reste le point sensible des relations fabricants/utilisateurs, surtout pour des applications bien connues, maîtrisées et standardisées. Pour des applications plus spécifiques ou la réussite du projet est fortement conditionnée par la conception et la fabrication de l'échangeur, le critère du prix peut prendre moins d'importance. [17]

8. Conclusions

À l'évidence, le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain non négligeable de rendement et donc d'énergie dans les process [18].

Le dimensionnement d'un échangeur est un processus complexe, il a fait sujet à de nombreuses recherches afin de préciser :

- les propriétés thermo-physiques des fluides ;
- le choix technologique réalisé ;
- les lois (corrélations) d'échange et de perte de pression spécifiques et adaptées ;
- les contraintes d'intégration et de design (compacité, performance thermique et perte de charge acceptable) ;
- les contraintes liées à l'utilisation de certains fluides (résistance d'encrassement, étanchéité, inspection) ;
- le choix d'un logiciel de calculs appropriés aux besoins ;
- le prix de l'échangeur (qui passe par sa conception, sa fabrication et sa mise en place).

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards. The top-right and bottom-left corners feature a grey circular element representing the scroll's binding or a shadow.

Chapitre III :

Résultats et

discussions

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de deux séries d'expériences réalisées dans la région ouest de Biskra ; la première série a été réalisée en utilisant l'eau chaude sortant d'un forage situé entre la commune de Bouchagroune et la commune d'Ourllal, la température à la sortie du forage est égale à 67°C , l'objectif de ces expériences est de chauffer l'air en utilisant trois différents échangeurs qui se différencient par leurs longueurs. La deuxième série d'expériences a été réalisée en moi de Juillet à la commune de Lioua, sur les mêmes échangeurs qui ont été immergés dans l'eau froide (19°C) d'un forage agricole. Cette fois l'objectif est de rafraichir l'eau entrant à un échangeur air-eau pour une utilisation domestique.

2. Description des échangeurs :

Les trois échangeurs sont en PVC ; le premier est constitué de quatre tubes, le deuxième est constitué de six tubes et le troisième est constitué de huit tubes (Fig. III-1).

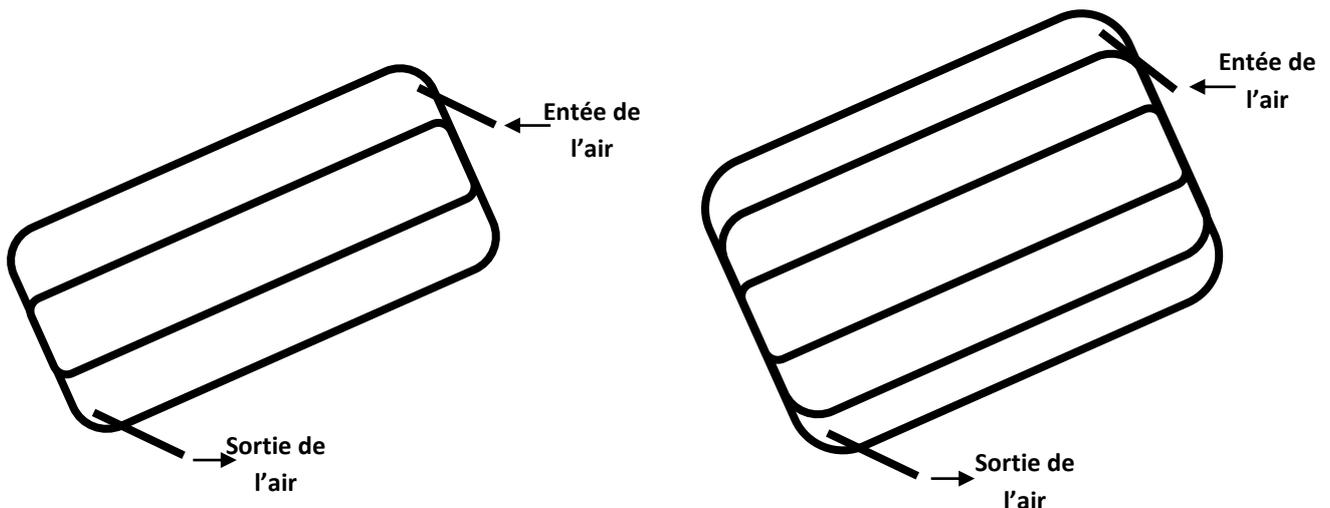


Figure 1 : Schémas des échangeurs utilisés ; a) à quatre (04) tubes, b) à six (06) tubes

Dimensions des échangeurs

Nous avons réalisé trois différents échangeurs dont la même architecture mais qui se différencient par le nombre de tubes (quatre, six et huit tubes).

- La longueur de chaque tube est de 1 mètre.

- La distance entre deux tubes est de 78 mm et la différence entre les deux tubes dans la moyenne de chaque échangeur est de 115 mm
- Le diamètre du tube est de $\varnothing=32\text{mm}$.
- L'épaisseur de la paroi de chaque tube est de 1mm.

3. Résultats et discussions

Nous avons réalisé deux séries d'expériences ; la première a pour objectif de chauffer l'air en passant dans un échangeur immergé dans un réservoir remplis et alimenté en continu par l'eau chaude. La deuxième série a pour objectif de rafraichir est de refroidir l'air chaud en passant dans un échangeur immergé dans un réservoir alimenté par l'eau froide (fraiche).

3.1. Chauffage d'air

La Source chaude est un forage située à la commune d'Ourllal à deux kilomètres à la frontière de la commune de Bouchagroune, dans la ville de Biskra. Ciselé à plus de 3400 mètres de profondeur, sa température atteint 67 degrés Celsius à la sortie du forage.

3.1.1. Influence du Débit d'air :

a) Echangeur à 04 tubes :

La première expérience présente la variation des performances de l'échangeur en fonction du débit ; ces performances sont exprimés en terme de différence de température entre l'entrée et la sortie de l'air. La longueur immergée dans l'eau chaude est égale à cinq (05) mètres. D'après la courbe illustrée dans la figure 02, nous remarquons que le gain apporté par cet échangeur varie entre 15.7 et 17°C pour des valeurs du débit variant entre 160 à 80 m³/h. Une diminution progressive de la différence de température de 17 à 15,7 est enregistrée lors de l'augmentation du débit, cela veut dire qu'elle est inversement proportionnelle à ce dernier (Fig.2).

Chapitre III : Résultats et discussions



Photo 1 : Echangeur à 4 tubes (Expérience de chauffage).

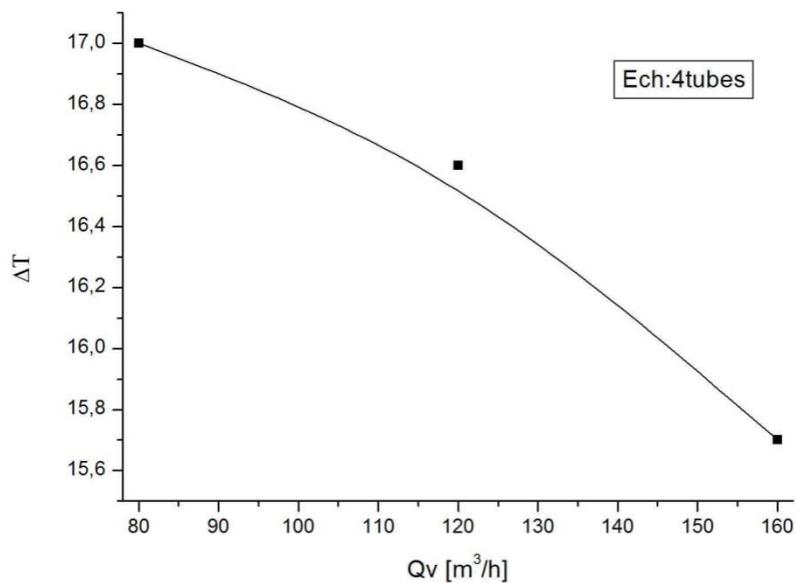


Figure 02 : variation de la différence de température en fonction du débit d'air.

b) Echangeur à 06 tubes :

La figure 03 présente la variation des performances de l'échangeur à six tubes en fonction du débit ; La longueur immergée dans l'eau chaude est égale à sept mètres et demi (07.5m). D'après la courbe illustrée dans la figure 04, nous remarquons que le gain apporté par cet échangeur varie entre 18.4 et 19°C pour des valeurs du débit variant entre 160 à 80 m^3/h .

Chapitre III : Résultats et discussions

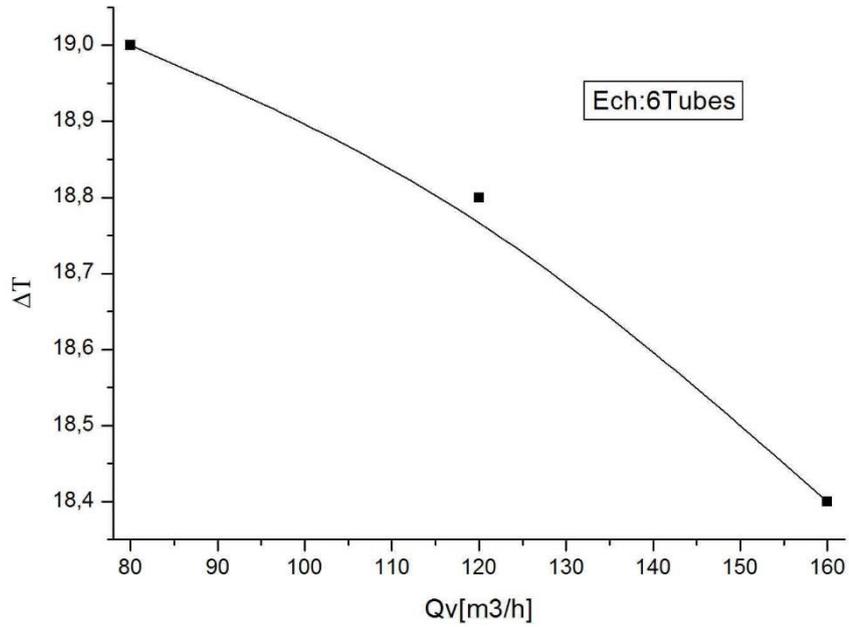


Figure 03 : variation de la différence de température en fonction du débit d'air (Ech. A 06 tubes).



Photo 2 : Echangeur à 6 tubes (Expérience de chauffage).

c) Echangeur à 08 tubes :

La figure 04 présente la variation des performances de l'échangeur à huit tubes en fonction du débit ; La longueur immergée dans l'eau chaude est égale à dix mètres (10 m). D'après la courbe illustrée dans la figure 04, nous remarquons que le gain apporté par cet échangeur varie entre 21.4 et 22.8°C pour des valeurs du débit variant entre 160 à 80 m³/h.

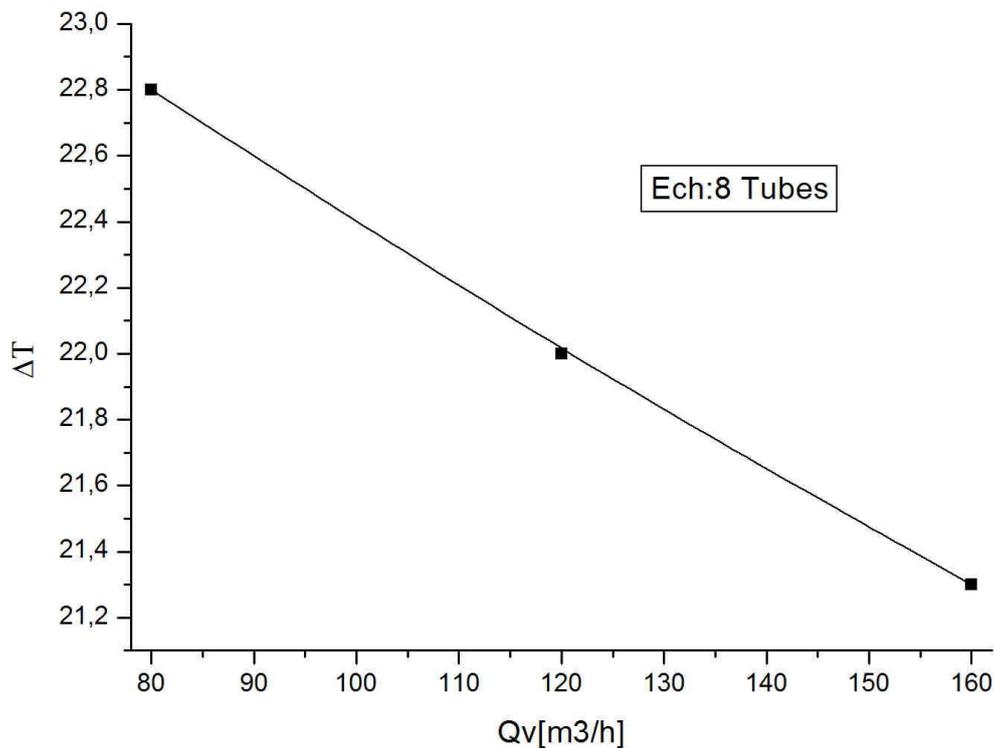


Figure 04 : variation de la différence de température en fonction du débit d'air (Ech. A 08 tubes).

Chapitre III : Résultats et discussions



Photo 3:Échangeur à 8 tubes (Expérience de chauffage).

En superposant les résultats présentés ci-dessus, nous constatons qu'il y a une relation inversement proportionnel entre le débit et la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie de l'échangeur et qu'il y a une nette amélioration apportée par l'adjonction de nouveaux tubes (Fig. 05).

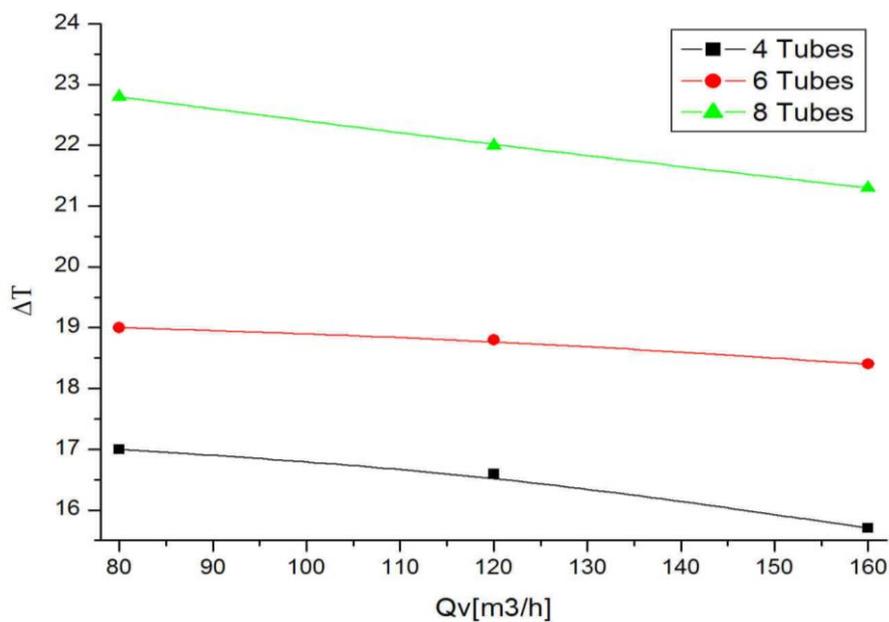


Figure 05 : variation de la différence de température en fonction du débit d'air pour les trois échangeurs.

3.1.2. Influence de la longueur :

La figure 06 présente l'influence de la longueur de l'échangeur sur la différence de température de l'air chauffé ; nous constatons que plus la longueur de l'échangeur augmente plus la différence de température est élevée.

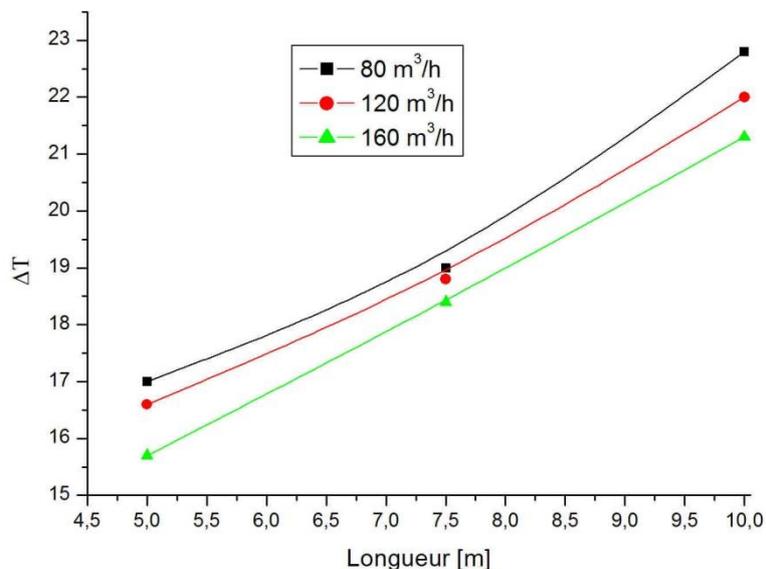


Figure 06 : variation de la différence de température en fonction de la longueur pour trois débits différents.

3.2 Refroidissement d'air

Cette série d'expérience a été réalisée en mois de juillet dans la commune de Lioua à l'ouest de la ville de Biskra, ceci en utilisant une source froide d'un forage agricole, ciselé à plus de 160 mètre de profondeur, la température de sortie du forage est 18,5 °C.

3.2.1. Influence du Débit d'air :

a) Echangeur à 04 tubes :

La figure 7 présente la variation de la différence de température de l'air en fonction du débit pour un échangeur à quatre tubes. Nous remarquons que l'utilisation de cet échangeur nous a permis de diminuer la température de l'air vingt degré Celsius (20.5°C) pour un débit de 80m³/h. Cette différence de température diminue en augmentant le débit, elle atteint une valeur de 16°C pour un débit de 160m³/h.

Chapitre III : Résultats et discussions

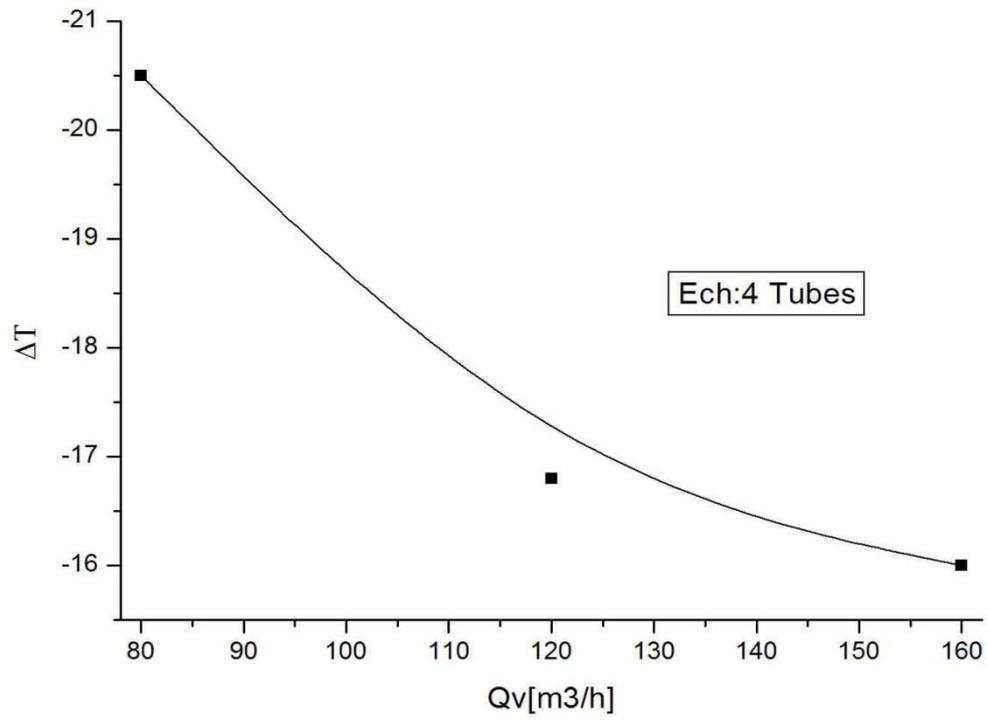


Figure 07 : Variation de la différence de température de l'air en fonction du débit (échangeur à quatre tubes).



Photo 4 : Echangeur à 4 tubes (Expérience de refroidissement).

b) Echangeur à 06 tubes :

La figure 8 présente la variation de la différence de température de l'air en fonction du débit pour un échangeur à quatre tubes. Nous remarquons que l'utilisation de cet échangeur nous a permis de diminuer la température de l'air vingt degré Celsius (22.5°C) pour un débit de $80\text{m}^3/\text{h}$. Cette différence de température diminue en augmentant le débit, elle atteint une valeur de 18°C pour un débit de $160\text{m}^3/\text{h}$.

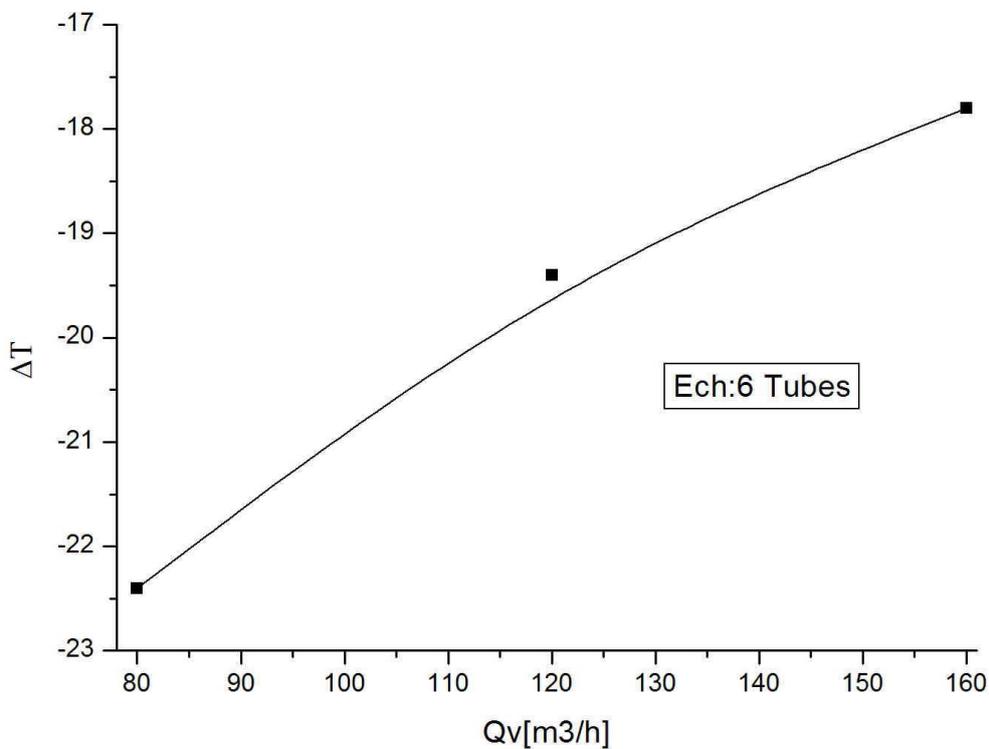


Figure8: variation de la différence de température de l'air en fonction du débit (échangeur à six tubes)



Photo 5 : Échangeur à 6 tubes (expérience de refroidissement)

C) Échangeur à 08 tubes :

La figure 9 présente la variation de la différence de température de l'air en fonction du débit pour un échangeur à quatre tubes. Nous remarquons que l'utilisation de cet échangeur nous a permis de diminuer la température de l'air vingt degrés Celsius (26°C) pour un débit de $80\text{m}^3/\text{h}$. Cette différence de température diminue en augmentant le débit, elle atteint une valeur de 20°C pour un débit de $160\text{m}^3/\text{h}$.

Chapitre III : Résultats et discussions

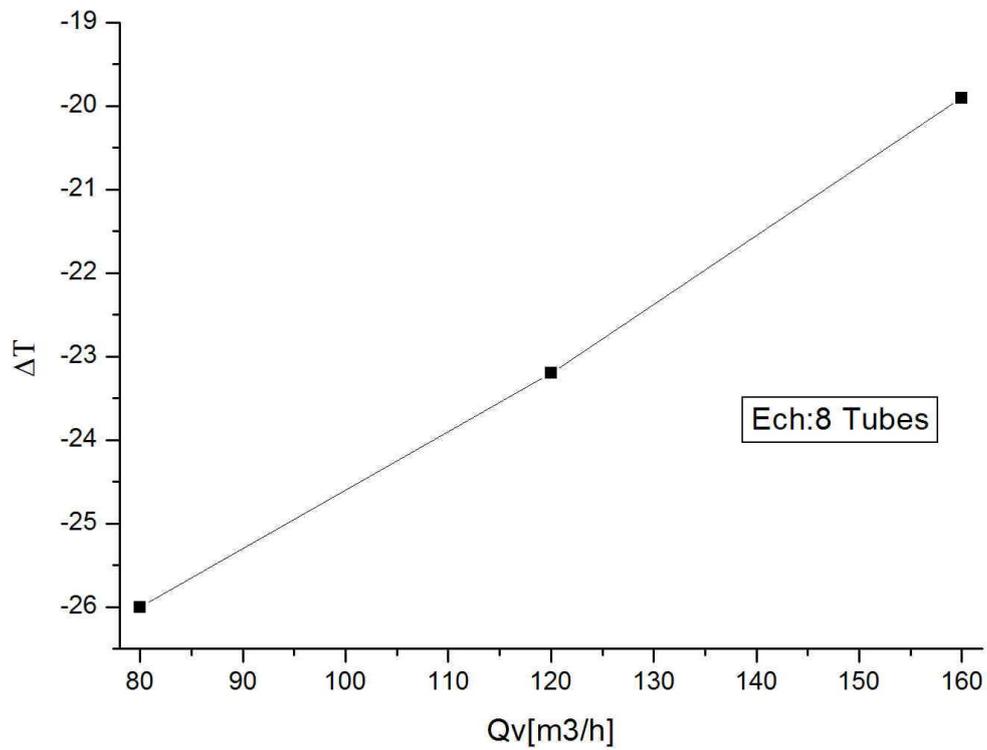


Figure 9 : Variation de la différence de température de l'air en fonction du débit (échangeur à quatre tubes)



Photo 6 : Echangeur à 8 tubes (Expérience de refroidissement).

Chapitre III : Résultats et discussions

En superposant les résultats présentés ci-dessus (Figures. 7-9), nous constatons qu'il y a une relation inversement proportionnel entre le débit et la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie de l'échangeur et qu'il y a une nette amélioration du rafraîchissement lorsque on augmente le nombre de tubes (Fig. 10).

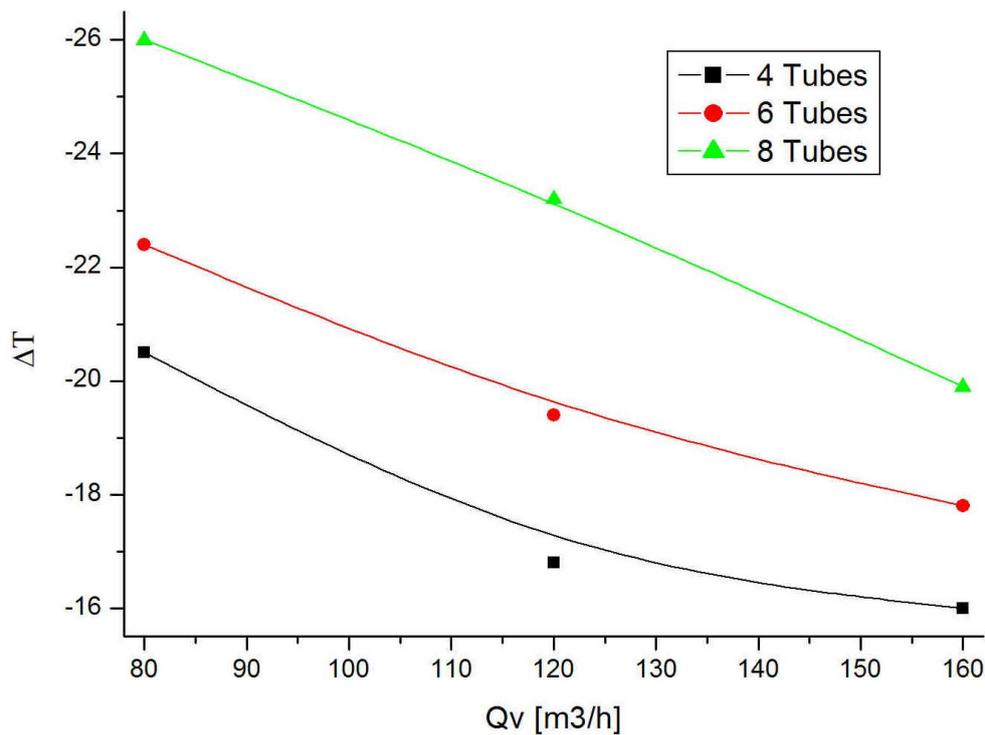


Figure 10 : variation de la différence de température de l'air en fonction du débit pour les trois échangeurs.

3.2.2. Influence de la longueur :

La figure 11 présente l'influence de la longueur de l'échangeur sur l'écart de température de l'air chauffé pour différents débits d'air. Nous constatons que plus la longueur de l'échangeur augmente plus l'écart de température est élevée.

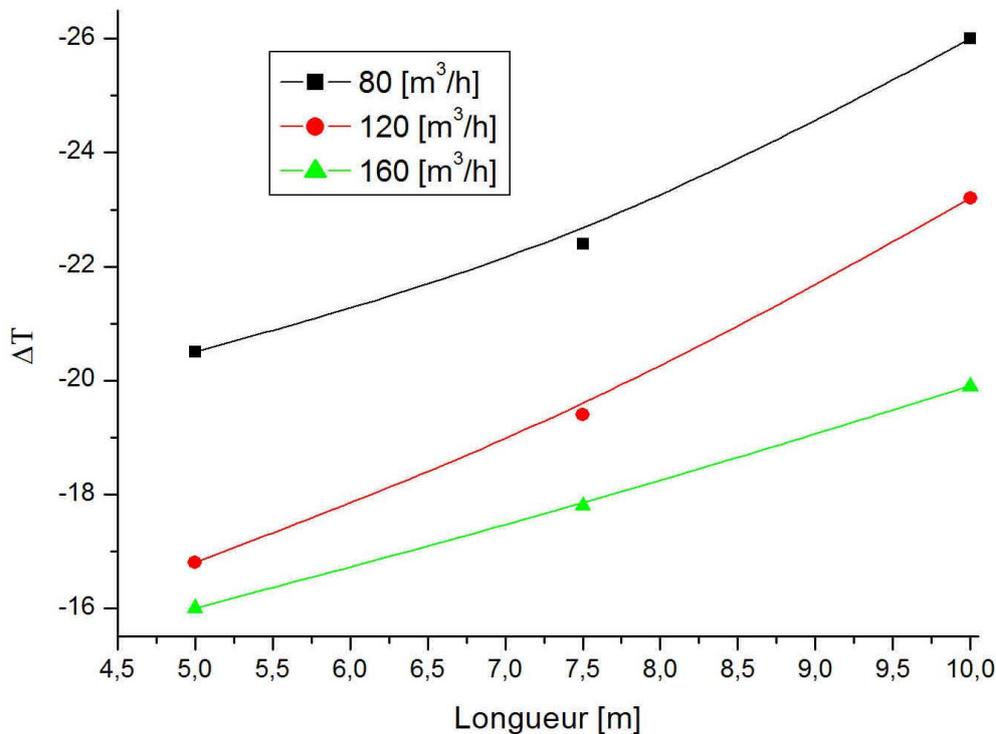


Figure 11 : variation de la différence de température en fonction de la longueur pour trois débits différents.

3.3 Efficacités des Echangeurs

Les figures 12 et 13 présentent la variation du coefficient de performance en fonction de la longueur pour les trois échangeurs.

Pour le chauffage

Nous constatons d'après les courbes de la figure 12, que le coefficient de performance COP augmente avec l'augmentation du débit et qu'il y a une nette amélioration apportée au COP par l'augmentation du nombre de tubes. Les valeurs du COP atteintes lors du chauffage sont de l'ordre de 1.3-3.2 pour un échangeur à 4 tubes, de 1.4-3.8 pour un échangeur à 6 tubes et de l'ordre de 1.7-4.5 pour l'échangeur à 8 tubes.

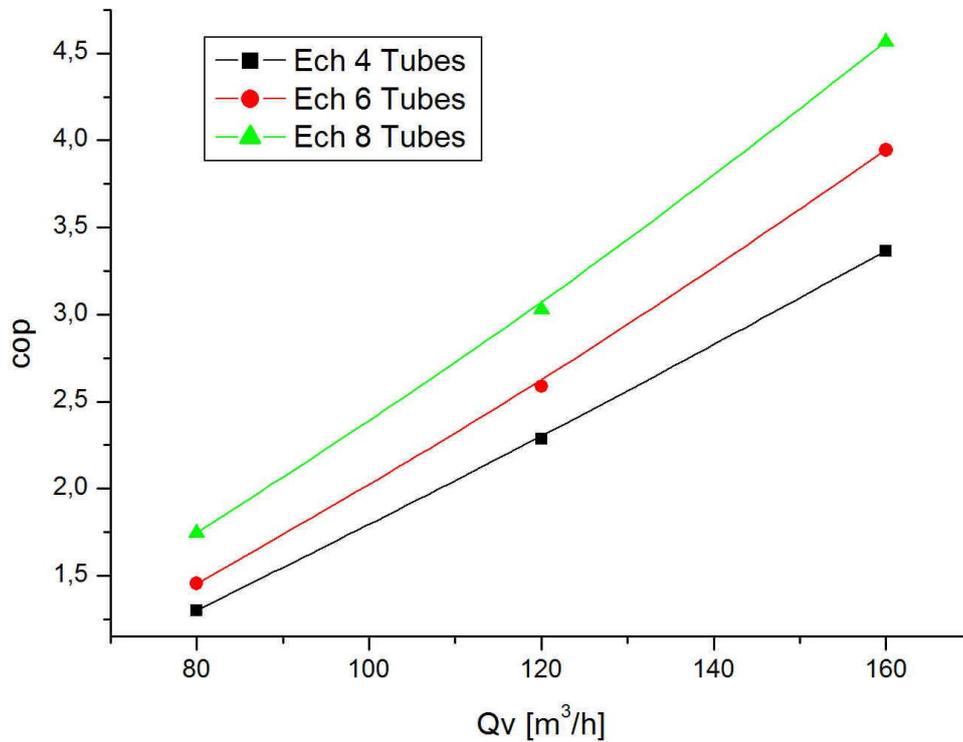


Figure 12 : Variation du COP en fonction du débit pour les trois échangeurs (chauffage)

Pour le rafraîchissement

D'après les courbes de la figure 13, nous constatons que le coefficient de performance COP augmente avec l'augmentation du débit et qu'il y a une nette amélioration apportée à l'efficacité des échangeurs par l'addition de tubes supplémentaires. Les valeurs du COP atteintes lors du chauffage sont de l'ordre de 2.2-2.4 pour l'échangeur à 4 tubes, de 2.4-2.7 pour l'échangeur à 6 tubes et de 2.8-3.1 pour l'échangeur à 8 tubes.

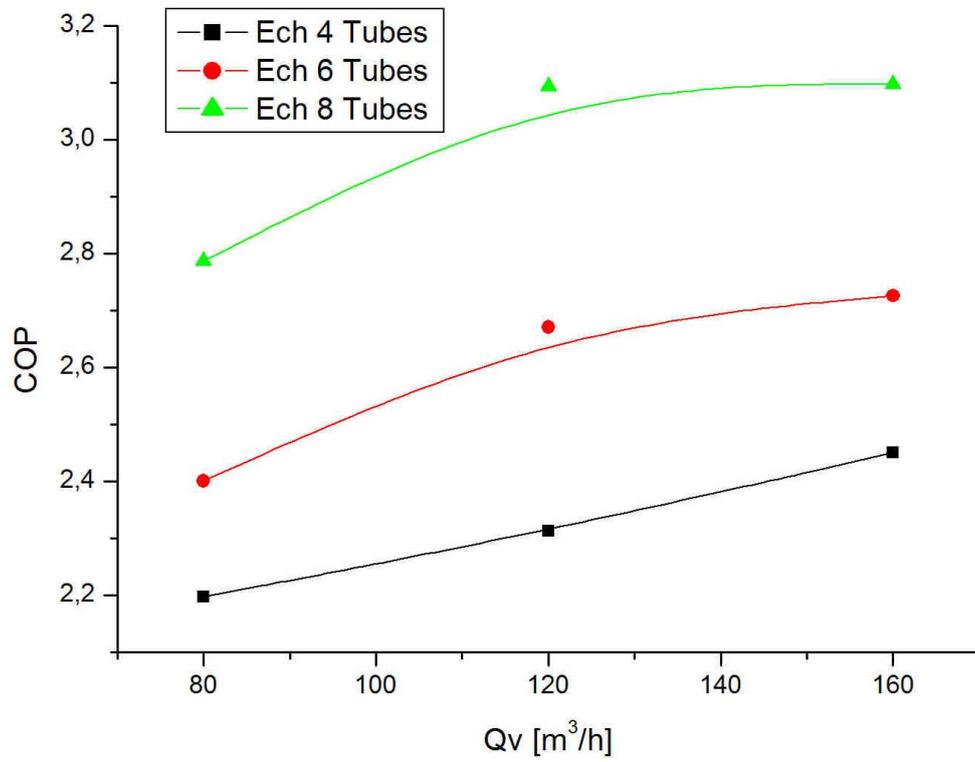


Figure 13 : Variation du COP en fonction du débit pour les trois échangeurs (rafraîchissement)

4. Conclusion

D'après les résultats expérimentaux présentés dans cette étude nous constatons que cette solution technologique proposée dans ce mémoire est très faisable de point de vue technique. Elle nous a permis de gagner plus de vingt degrés Celsius que ce soit dans le cas de chauffage ou dans le cas de refroidissement.

Cependant, il s'avère des résultats que l'augmentation du nombre de tubes améliore les performances de l'échangeur.

En outre, l'augmentation du débit conduit à une diminution de la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur, mais elle améliore son efficacité.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire consistait à proposer une nouvelle solution technologique permettant d'exploiter une énergie géothermique très abondante dans la région Saharienne, venant des forages et de sources chaudes et froide, pour le chauffage et le rafraichissement des habitats. L'utilisation de l'air comme unique vecteur énergétique pourrait assurer à la fois les besoins de renouvellement d'air et de chauffage d'une habitation dans une station thermale ou dans un périmètre agricole par l'utilisation d'un échangeur de chaleur immergé dans un réservoir d'eau.

Deux séries d'expériences ont été réalisées dans deux période déférentes de l'année ; période froide (Mars) et période chaude (Juillet) afin de pouvoir évaluer la capacité d'un nouveau échangeur à chauffer/rafraichir l'air, ceci en immergeant cet échangeur à air dans un réservoir alimenté par de l'eau chaude/froide venant des forages.

La première série d'expériences a été menée dans un réservoir alimenté par de l'eau chaude d'un forage implanté à la commune d'Ourlal (Biskra) et la deuxième série a été réalisée dans un réservoir alimenté par de l'eau froide (18°C) d'un forage agricole situé à la commune de Lioua (Biskra).

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 différence de température entre la sortie et l'entrée et la longueur de l'échangeur et relation inversement proportionnelle avec débit de l'air.

Chapitre III : Résultats et discussions

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.

Bibliographie

Les références :

- [1] S. Ouali, A. Khellaf et K. Baddari, Etude géothermique du Sud de l'Algérie, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 (2006) 297 - 306*
- [2] A. BoudgheneStamboulia,n, Z.Khiat b, S.Flazi b, Y.Kitamura; A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 4445–4460
- [3] <http://www.geothermie.ch/index.php?p=geothermics>
- [4] http://www.energies-renouvelables.org/media/photos/observ-er/geothermie/geothermie2_france_geothermie.jpg
- [5] M. SAADEDDINE, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, Mémoire de Magister, Université de Biskra 2013.
- [6] (En) the Geysers (brochure), Calpine Corporation, 2004.
- [7] Source : ademe.fr
- [8] <http://www.géothermie-perspectives.fr>
- [9] dspace.univ-tlemcen.dz › Département de Physique › Master physique
- [10] http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5218/3/Introduction_general_.pdf
- [11] John R. Thome, Engineering Data Book III. Wolverine Tube Inc. 2004.
- [12] BONTEMPS. A, GUARRIGUE.A, GOUBIER.C, HUETZ.J, MARVILLET.C, MERCIER.P, VIDIL.R. Echangeurs de chaleur, Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique, Références B2340, B2341, B2342, B2343, B2344.
- [13] MARVILLET.C, MANIFICAT.A, BERRADA.N et WEBER.C (2014). E.Book TOME 1 : Echangeurs Thermiques - : Technologies, Conception et dimensionnement, GRETh.
- [14] <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/echangeur-thermique-fonctionnement-types-et-efficacite>
- [15] – CHAUDOURNE.S (1987). Les échangeurs à caloducs. Collection « Echangeurs de chaleur », GRETh, Lavoisier TEC&DOC, Septembre.
– BRICARD.A, CHAUDOURNE.S (1997). Caloducs. Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique, Référence b9545, Avril.

Bibliographie

– REAY.D.A, KEW. P.A, McGLEN.R.J (2014). Heat Pipes – Theory, design and Applications, 6th edition, Elsevier, ISBN: 978-0-08-098266-3.

[16] SHAH R.K. (2003). Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons.

[17] MARVILLET.C, MANIFICAT.A, BERRADA.N et WEBER.C (2014). E.Book TOME 1, op. cit.