



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 : Énergétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Ayoub Keddar

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

Étude expérimentale des échanges thermiques en régime transitoire entre le sol et un échangeur enterré

Jury :

Dr.	Salah GUERBAAI	MCA	Université de Biskra	Président
Pr.	Adnane LABED	Pr	Université de Biskra	Encadreur
Pr.	Adel BENCHABANE	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2020 – 2021

Dédicaces

Je dédie ce mémoire.

*Mon père (**Brahim**) et ces conseils exceptionnels.*

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

d'études,

Ma mère et mon père pour leur patience et leur amour

Mes frères et sœurs et toute la famille de Keddar.

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

beaucoup de souvenirs inoubliables.

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

A tout mes enseignants par son nom

A chaque personne qui m'a aidée

A tous ce que j'aime.

Merci !

Remerciements

Avant tout, je remercie le bon dieu tout puissant qui nous a donné toutes les capacités, la santé et la force pour réaliser ce modeste travail.

Cette thèse est l'aboutissement d'un travail, certes personnel, mais n'aurait pu voir le jour sans l'aide de nombreuses personnes. Je tiens donc ici à remercier tous ceux qui ont mené cette étude de près ou de loin. Et tout d'abord mon directeur de thèse, Mr. "**Adnane Labeled**",

Docteur au département génie mécanique, l'université de Biskra. Je voudrais le remercier de m'avoir donné sa confiance pour mener à bien ce travail. J'exprime toute ma reconnaissance et appréciation à lui pour son soutien, son aide et ses conseils.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé au cours de la partie expérimentale,

Et je tiens à remercier ma famille, mes amis

Je tiens également à remercier le personnel du département de génie mécanique et de la faculté des sciences et de la technologie de m'avoir aidé pendant toutes ces années.

Mes remerciements s'adressent aussi au docteur "Salah Guerbaai" et le professeur " Adel Benchabane "pour présider ce jury.

RÉSUMÉ :

Ce travail consiste à exploitation de l'un des plus importants gisements énergétique dans l'East et le sud Algérien. des sources chaudes et des stations thermale.

Dans ce travail nous allons étudier expérimentalement l'évolution de la température dans les deux sens horizontal et vertical, autour d'un échangeur enterré dans la région de djamaa.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى استغلال أحد أهم مصادر الطاقة في شرق وجنوب الجزائر؛ كالينابيع الساخنة والمنتجعات الحرارية.

في هذا العمل، سوف ندرس بشكل تجريبي تطور درجة الحرارة في كلا الاتجاهين الأفقي والعمودي، حول مبادل مدفون في منطقة جامعة

ABSTRACT:

This work consists of the exploitation of one of the most important energy deposits in the East and the South of Algeria; hot springs and thermal spas.

In this work we will experimentally study the evolution of temperature in both horizontal and vertical directions, around an exchanger buried in the djamaa region.

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Sommaire	I
Liste des figures	IV
Liste de photo	VI
Liste de tableau.....	VI
Nomenclature	VII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la géothermie	
1. Introduction	3
2. La géothermie.....	3
3. Types de Géothermie	4
3.1- La Géothermie de Surface	4
3.2- La Géothermie dite « verticale » ou en profondeur	5
4. Classification des ressources géothermiques	5
4.1- Géothermie haute énergie	5
4.2- La géothermie basse énergie.....	6
4.3- Géothermie très basse énergie	7
4.4- Selon la nature du sol	7
4.5- Conductivité thermique.....	7
4.6- Capacité calorifique du sol	8
5. Flux géothermique	8
6. L'utilisation de l'énergie géothermie.....	9
7. La géothermie en Algérie	9
8. Les zones géothermiques En Algérie	9
9. Les avantages et les inconvénients de la géothermie.....	10
9.1- Les avantages.....	10

9.2- Les inconvénients.....	10
10. Généralités et caractéristiques.....	11
10.1- Aperçu géomorphologique	11
10.2- Caractéristiques géographiques.....	12
10.3- Géologie.....	13
10.4- Le Cadre hydrogéologique	13
10.5- Les ressources hydriques	14
10.6- Caractéristiques climatiques.....	15
11. Les types des sols en Algérie	15
12. Le sol	16
12.1- Le sol de la région d'étude	16
12.2- Humidité du sol.....	16
13. Références de chapitre I	18

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

1. Introduction	21
2. Matériaux applicables aux échangeurs de chaleur.....	22
3. Critères de classement des échangeurs	22
3.1- Types de contact.....	22
3.1-1- Échangeur a contact direct	22
3.1-2- Échangeur a contact indirect.....	22
3.2- Classement suivant la direction des écoulements	22
a) Echangeur à Co-courant	22
b) Echangeur à contre-courant.....	23
c) Echangeur à courant croisés	24
3.3- Classement suivant les types d'échangeur.....	24
3.3-1- Échangeur sans changement de phase.....	24
3.3-2- Échangeur avec changement de phase	24
3.4- Classement suivant La nature du matériau de la paroi d'échange	25
3.5- Classement selon la compacité de surface.....	25
3.6- Classement fonctionnel.....	25

3.7- Classement technologique	25
4. Les échangeurs de chaleur les plus courants	26
4.1- Echangeur à plaques	26
4.2- Echangeur à tubes et calandre	26
4.3- Echangeurs de chaleurs spiralées	27
4.4- Échangeurs lamellaires	28
4.5- Echangeur tubes à ailettes.....	28
4.5-1- Ailettes plain (Batterie à ailettes)	28
4.5-2- Ailettes annulaires	29
4.6- Echangeurs à tubes et ailettes.....	29
4.7- Échangeur à bloc	30
5. Méthodes de calcul thermique des échangeurs	32
5.1- Méthode NUT	32
5.2- Efficacité d'un échangeur de chaleur	34
5.3- Méthode DTLM	34
5.4 Estimation de la résistance thermique du sol.....	35
6. Références de chapitre II.....	37

Chapitre III : Résultats et discussions

1. Introduction	40
2. Description du banc d'essais	40
3. Dimension du banc d'essais (Échangeur à quatre tubes)	40
4. Résultats et discussions	41
1. Variation de la température dans le sens horizontal.....	41
2. Variation de la température dans le sens verticale.....	47
3. Evolution de la température du sol sous l'effet des conditions climatiques	50
4. Echangeur Air-Sol	52
5. Conclusion.....	54
Conclusion générale.....	56

Liste des figures :

Chapitre I

Figure (I-1)	schéma Principe de la géothermie.	5
Figure (I-2)	Schéma expliquant la géothermie haute énergie.....	6
Figure (I-3)	Schéma expliquant la géothermie basse énergie	6
Figure (I-4)	géothermie à très basse énergie	7
Figure (I-5)	Situation géographique de la région d'EL Oued	12
Figure (I-6)	Plan géologique du Grand Erg Oriental	13
Figure (I-7)	Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale	14
Figure (I-8)	Variations de l'humidité du sol dans les zones d'études	17

Chapitre II

Figure (II-1)	Les échangeurs de chaleur	21
Figure (II-2)	Principe d'un échangeur à Co-courant.....	23
Figure (II-3)	Principe d'un échangeur à contre-courant	23
Figure (II-4)	Principe d'un échangeur à courant croisés	24
Figure (II-5)	Exemple d'un échangeur de chaleur à plaque	26
Figure (II-6)	Echangeur à tubes et calandre.....	27
Figure (II-7)	Les échangeurs de chaleur spiralée	27
Figure (II-8)	Echangeur de chaleur lamellaire.....	28
Figure (II-9)	Echangeurs de chaleur tubes à ailettes plain.....	29
Figure (II-10)	Diffèrent types des échangeurs de chaleur tube à ailettes annulaire	29
Figure (II-11)	Echangeurs à tubes et ailettes	30
Figure (II-12)	Echangeur à Bloc.....	31
Figure (II-13)	Efficacité d'un échangeur à Co-courant.....	33
Figure (II-14)	Efficacité d'un échangeur à contre-courant	33
Figure (II-15)	Le schéma montre l'épaisseur du sol perturbé, δ , et le rayon du sol, $r\delta$	36
Figure (II-16)	Vues axiales et radiales du tuyau et du sol environnant.....	36

Chapitre III

Figure (III-1) Variation de la température du sol en fonction de la distance de l'échangeur durant les heures de l'expérience de l'entrée l'échangeur.....	42
Figure (III-2) Variation de la température du sol en fonction du temps à différentes distances de l'entrée l'échangeur.....	43
Figure (III-3) Variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) en fonction du temps	43
Figure (III-4) Variation de la température du sol en fonction de la distance de l'échangeur durant les heures de l'expérience à coté T_s	45
Figure (III-5) Evolution de la température du sol en fonction du temps à différents points (à côté de la sortie de l'échangeur)	46
Figure (III-6) Variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) en fonction de temps	46
Figure (III-7) Variation de la température du sol à différentes positions au-dessus de l'échangeur en fonction de la distance de l'échangeur	48
Figure (III-8) Variation de la température du sol au-dessus de l'échangeur en fonction du temps.	49
Figure (III-9) Variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) au cours de l'expérience du 31/05/2021	49
Figure III-10 Evolution de la température du sol à différentes profondeurs en fonction du temps	51
Figure (III-11) Evolution de la température du sol à différentes profondeurs en fonction du temps	51
Figure (III-12) Variation de la température du sol en fonction de la distance de l'échangeur durant les heures de l'expérience à coté l'échangeur (air-sol)	53
Figure (III-13) Variation de la température du sol en fonction du temps à différentes distances de côté l'échangeur (air sol)	53
Figure (III-14) Variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) à coté l'échangeur (air sol) en fonction de temps	54

Liste des photos :

Chapitre III :

Photo (III-1)	Échangeur à quatre tubes	41
Photo (III-2)	Première expérience (vendredi 26 mars 2021)	41
Photo (III-3)	Deuxième expérience (Samedi 27 mars 2021)	44
Photo (III-4)	troisième expérience (Mercredi 31 mai 2021)	47
Photo (III-5)	photo de la 4eme expérience (mercredi 20 avril 2021)	50
Photo (III-6)	5eme expérience	52

Liste des tableaux :

Chapitre I

Tableau (I-1)	Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol.....	8
Tableau (I-2)	Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie	10

Chapitre III

Tableau (III-1)	Exemple des Mesures réalisés le 26 mars 2021 (à côté l'entrée)	42
Tableau (III-2)	Mesures réalisés le 27/03/2021(à côté de la sortie)	44
Tableau (III-3)	Exemple des résultats de Mesure (au-dessus de l'échangeur)	48
Tableau (III-4)	Résultats des Mesures le 20/04/21	50
Tableau (III-5)	Résultat de la Mesure à coté l'échangeur (air sol)	52

Nomenclature :

Notations latines :

Désignation	Unité	Description
T	[°C]	Température
t	[S]	Temps
D	[Cm]	Distance
T _{amb}	[°C]	Température ambiante
T _s	[°C]	Température de sortie de l'échangeur
T _e	[°C]	Température d'entrée du fluide
ΔT	[K]	Différence de température
C _p	[J / (Kg. K)]	Chaleur spécifique
C _{PC}	[J / (Kg. K)]	Chaleur spécifique du fluide chaude
C _f	[J / (Kg. K)]	Chaleur spécifique du fluide froide
ṁ	[Kg/s]	Débit massique de fluide
A, S	[m ²]	Surface
T _C ^{ent}	[K]	Température d'entrée du fluide chaude
T _f ^{ent}	[K]	Température d'entrée du fluide froide
T _c ^{sor}	[K]	Température de sortie du fluide chaude
T _f ^{sor}	[K]	Température de sortie du fluide froide
ΔT _{ML}	[K]	Différence de température moyenne
k	[m ² /s ²]	Energie cinétique turbulente
h	[W/m ² . K]	Coefficient de transfert convectif
r	[m]	Rayon
R _{cv}	[m ² . °k/w]	Résistance thermique entre l'eau et le tube

Lettre grecques :

Symboles	Unité	Signification
ε	[s ² /m ²]	Dissipation de l'énergie turbulente
λ	[W/m. K]	Conductivité thermique
μ	[Kg/m. s]	La viscosité dynamique
ν	[m ² /S]	Viscosité cinématique
η	[/]	Efficacité de L'échangeur
φ	[W]	Flux de chaleur
δ	[m]	Epaisseur

Indice :

Indice	Signification
C	Chaude
ent, e	Entrée
f	Froid
LM	Logarithmique moyenne
Sor, s	Sortie
Max	Maximale
Min	Minimal
cv	Convectif

Nombres adimensionnels :

NUT	Nombre d'unité de transfert	$NUT = \frac{KS}{C_{min}}$
Nu	Nombre de Nusselt	$Nu = \frac{hl}{\lambda}$
Pr	Nombre de Prandlt	$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$
Re	Nombre de Reynolds	$Re = \frac{VD}{\mu}$

Introduction générale

Introduction générale :

Les ressources géothermiques de l'Algérie sont nombreuses. Ces dernières se manifestent sous forme de sources thermales qui sont très répandues sur tout le territoire nord algérien. Elles sont réparties d'est en ouest, mais elles sont de plus forte concentration dans la région est qui se caractérise par un gradient géothermique de plus de 5°C/100 m. Au sud de l'Algérie, la formation géologique du Continental Intercalaire, connue aussi par « la nappe albienne », constitue une importante réserve d'eau thermale dans le Sahara algérien où elle s'étend sur une vaste superficie de plus de 650 000 km².

Aujourd'hui, la géothermie est la troisième énergie renouvelable effectivement exploitée dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. L'utilisation de l'énergie géothermique est en pleine expansion, elle est développée dans une soixantaine de pays, comme par exemple les Etats-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse [*]

Cette énergie géothermique n'a pas été exploitée dans les régions du sud, surtout l'État djamaa. Cette énergie géothermique peut être utilisée pour le chauffage.

Dans cette thèse, nous exploiterons l'énergie géothermique de l'eau pour faire du chauffage par un échangeur de chaleur sol-eau immergé sous terre et étudierons l'effet de l'énergie hydrothermale horizontalement et verticalement et voir l'interaction thermique entre l'échangeur et le sol(ou appelé saturation du sol).

Le manuscrit est réparti en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre nous avons donné une idée générale sur la géothermie et ses différents types et caractéristique de la région d'étude.
- Le deuxième chapitre est dédié à la présentation du différent classement des échangeurs et les échangeurs de chaleur les plus courants et leur Méthodes de calcul thermique des échangeurs.
- Le troisième chapitre est consacré à de notre solution technologique ; les résultats expérimentaux sont présentés et interprétés dans ce chapitre.
- Enfin, nous terminons ce modeste travail par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des résultats et des conclusions de cette étude.

Chapitre I

Généralité sur la géothermie

1. Introduction:

Le centre de la Terre est très chaud ; la température pourrait y atteindre 5000 °C ! Cette chaleur rayonne vers la surface, à travers le manteau de roche de la planète. À certains endroits, elle peut faire fondre le manteau. La roche en fusion ainsi produite s'élève alors vers la surface, pénètre et traverse la croûte terrestre et peut produire des éruptions volcaniques, quoique plus souvent qu'autrement, elle demeure sous la surface et chauffe la roche environnante, ainsi que les eaux souterraines qui ont pénétré dans la terre par des fissures. Cette chaleur émanant de la Terre constitue l'énergie géothermique. Par endroits, les eaux souterraines qu'elle chauffe forment des geysers ou des sources hydrothermales. Toutefois, l'énergie géothermique est habituellement cachée sous la surface de la Terre et ne peut être captée qu'en forant des puits. Pour exploiter les sources d'énergie géothermique les plus chaudes, il faut forer des puits profonds dans des réservoirs souterrains pour capter la vapeur et l'eau très chaude (plus de 150 °C) qui peuvent faire fonctionner des turbines et produire de l'électricité. L'eau d'une température intermédiaire (entre 50 et 150 °C environ) a des applications industrielles directes et peut aussi servir à chauffer des immeubles. Dans le cas d'une eau d'une température de moins de 50 °C, des thermopompes sont utilisées pour la chauffer. Même l'eau d'une température de quelque 5 °C peut représenter une source d'énergie, dans la mesure où il y en a suffisamment. [1]

2. La géothermie:

La géothermie est d'abord la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre. Par extension, ce terme désigne aussi l'ensemble des applications techniques qui permettent d'exploiter les sources d'énergie géothermique.

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]

L'énergie géothermique est l'énergie thermique dans la croûte terrestre : énergie thermique dans la roche et les fluides (eau, vapeur ou eau contenant de grandes quantités de solides dissous) qui remplit les pores et se fracture dans la roche, le sable et le gravier. Les calculs montrent que la Terre, provenant d'un état complètement fondu, se serait refroidie et serait devenue complètement solide il y a plusieurs milliers d'années sans un apport d'énergie supérieur à celui du soleil. On croit que la source ultime d'énergie géothermique est la désintégration radioactive dans la Terre. Par le mouvement des plaques et le volcanisme, une partie de cette énergie est concentrée à haute température près de la surface de la terre. L'énergie est également transférée des parties les plus profondes de la croûte à la surface de la Terre par conduction et par convection dans les régions où les conditions géologiques et la présence d'eau le permettent. En raison de la variation de l'activité volcanique, de la désintégration radioactive, de la conductivité des roches et de la circulation des fluides, différentes régions ont des flux de chaleur différents (de la croûte à la surface), ainsi que des températures différentes à une profondeur donnée. L'augmentation normale de la température avec la profondeur (c'est-à-dire le gradient géothermique normal) est d'environ 24 K / km de profondeur, les gradients allant de 9 à 48 K / km étant courants. Les zones présentant des gradients de température et / ou des débits thermiques supérieurs à la moyenne constituent les ressources économiques les plus intéressantes et les plus viables. Cependant, les zones à gradients normaux peuvent constituer des ressources précieuses si certaines caractéristiques géologiques sont présentées. [2]

3. Types de Géothermie:

3. 1- 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. [3]

3. 2- 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 rejetée dans le tuyau de rejection .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]

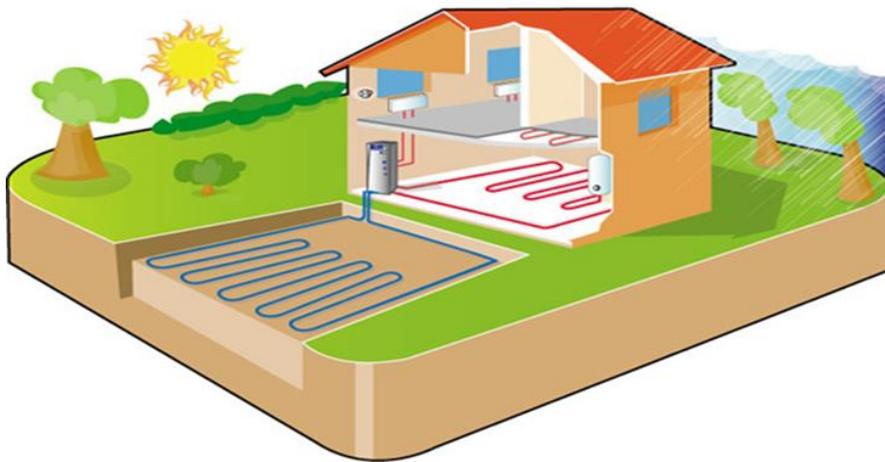


Figure (I-1): schéma Principe de la géothermie. [4]

4. Classification des ressources géothermiques:**4. 1- Géothermie haute énergie:**

- La géothermie a haute énergie : (haute enthalpie, haute température, profonde),
- La profondeur : plus de 1500 mètres.
- La température : entre 80 et 300 °C.
- L'objectif : Production d'électricité et de chaleur à la fois. Le moyen : une turbine à vapeur pour l'électricité et de récupération des condensats de vapeur pour la chaleur. [5, 6]

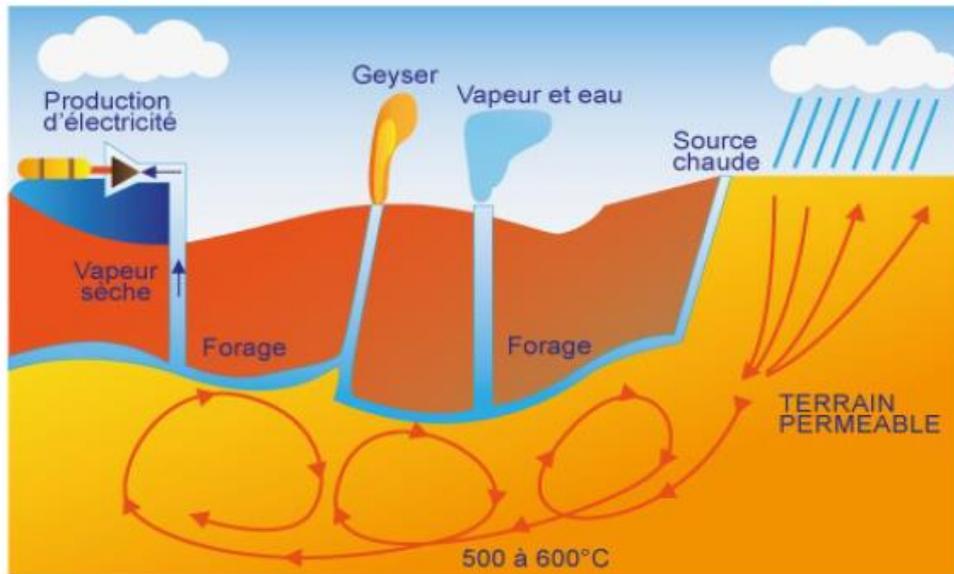


Figure (I-2): Schéma expliquant la géothermie haute énergie. [5]

4. 2- La géothermie basse énergie:

Géothermie à basse énergie

- La profondeur : 1500 et 2500 mètres et La température : entre 30 °C et 100 °C.
- L'objectif : le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur et certaines applications industrielles.
- Le moyen : Pompe à chaleur sur une nappe phréatique, afin de prélever et transférer de l'énergie contenue dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer ou à climatiser. [5, 6]

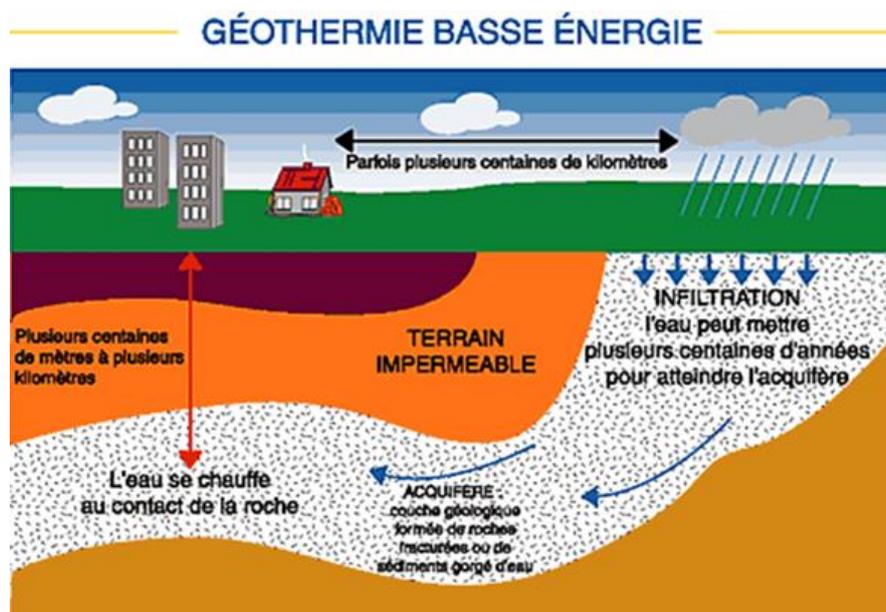


Figure (I-3): Schéma expliquant la géothermie basse énergie. [5]

4. 3- Géothermie très basse énergie:

- La profondeur : centaines mètres.
- La température : entre 10 et 30°C.
- L'objectif : la climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal et le chauffage et la climatisation.
- Le moyen : pompe à chaleur géothermique prélevant la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique. [5 ,6]

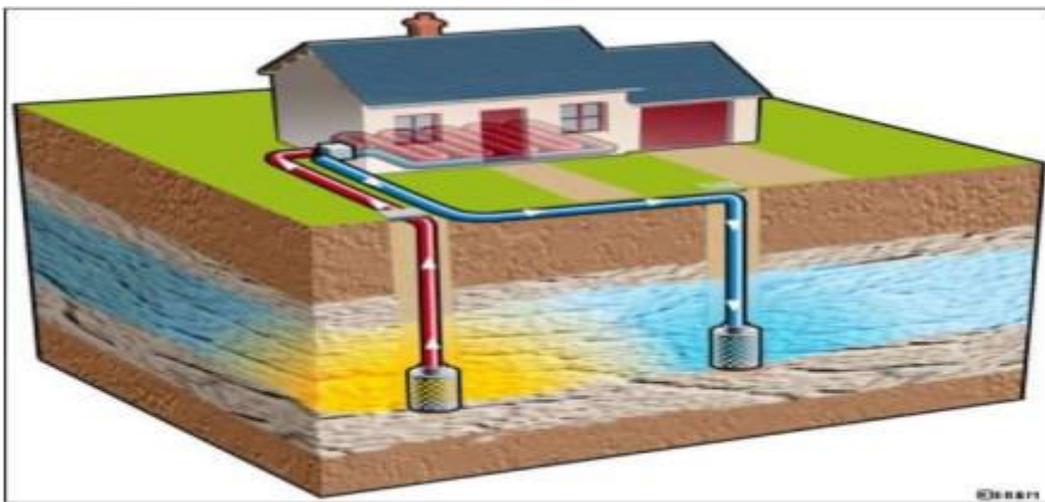


Figure (I-4): géothermie à très basse énergie. [5]

4. 4- Selon la nature du sol:

Les principaux éléments à prendre en compte lors de la conception d'un canadien/provençal. Les performances du puits sont directement liées à la capacité calorifique à la conductivité thermique du sol. [7]

4. 5- Conductivité thermique:

La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules ainsi que de sa teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur de Chaleur qu'il sera humide. [7]

4. 6- Capacité calorifique du sol:

La capacité calorifique d'un sol s'exprime par la moyenne pondérée des capacités calorifiques des constituants : minéraux, matière organique, eau, air. [7]

Tableau (I-1) : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol. [7]

Matière	ρ (kg/m ³)	C (kJ/k.kg)	λ (w/k.m)
Minéraux (moy)	2650	0.80	2.90
Sable et Gravier	1700 à 2200	0.91 à 1.18	2.00
Argile et Limon	1200 à 1880	1.67 à 2.50	1.50
Matière organique	1300	1.90	0.25

5. Flux géothermique:

Grace à l'étude des dégagements thermiques à la surface de notre planète, le flux de chaleur, appelé aussi flux géothermique à travers la croûte terrestre (continentale et marine), est provoqué par la chaleur transférée du manteau à la base de la croûte terrestre ainsi que par la désintégration des matériaux radioactifs contenus dans la croûte. Le flux géothermique montre le comportement général suivant :

- Le flux diminue avec la profondeur à cause de la désintégration matérielle radioactive impliquée.
- Le flux est maximal à la surface de la terre et diminue avec la profondeur à cause de la réduction de la quantité de matériel radioactif sous-jacent.
- Le flux varie géométriquement mais relativement uniforme sur une vaste étendue.

Pour la majorité des problèmes d'intérêt, compte tenu des faibles profondeurs et de l'étendue restreinte des études hydrogéologiques, même régionales, le flux géothermique pourra être considéré constant à la fois en fonction de la profondeur et sur l'ensemble de la région d'étude considérée. Pour les continents, le flux géothermique moyen varie entre 40 MW/m² dans les cratons stables et 70 MW/m² dans provinces tectonique tertiaires. [8]

6. 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. [9]

7. La géothermie en Algérie:

L'Algérie, est considérée parmi les pays riches en eaux thermo-minérales. Et dispose des nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C.

Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90°C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C. Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouermen et 119 °C à Biskra. On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser. Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région d'El Menai. [10]

8. Les zones géothermiques En Algérie:

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien, 'Carte Géothermique Préliminaire du Nord de l'Algérie. Ces études montrent que le

Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales.

Près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nord algérien, majoritaires au Nord-est (Tableau 1). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. 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 de l'Omanie, de la Kabylie et du Constantinois. [11]

Tableau (I-2): Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie. [11]

Sources Thermique	Région	Faciés Chimique	Résidus Secs(mg/l)	Température e(°C)	Dedit (l/s)
H.chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H.Bouhadjar	Ain-Timouchent	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.SudiBou Abdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H.Della	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

9. Les avantages et les inconvénients de la géothermie:

9. 1- Les avantages:

1. Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport ;
2. Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement ;
3. Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables ;
4. Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques. [1]

9. 2- Les inconvénients :

1. Coûts d'investissement et de maintenance très élevés ;
2. L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques
3. Risque de glissement de terrain. [1]

10. Généralités et caractéristiques:

10. 1- Aperçu géomorphologique:

Situé au nord-ouest de l'Afrique, l'Algérie est subdivisée en deux grandes zones très différentes, sur le plan géographique, morphologique, géologique, hydrogéologique, climatique...Etc.: Le Nord et le Sud Algérien. Ces deux domaines sont séparés par l'accident sud atlasique (Atlas saharien ou la flexure sud-atlasique), sensiblement orienté « WSW–ENE».

L'atlas saharien est constitué par les monts d'Ouled-neil, des Aurès et des Nemamchas).

Le Nord algérien, plus peuplé, ouvert sur la Méditerranée (en sa partie nord), appartient à la marge nord du continent africain. Il appartient au vaste système alpin, qui d'Est (Gibraltar) en Ouest (Himalaya) n'a pas encore terminé son évolution. C'est une zone instable, bouleversée, à relief confus, et jeune.

L'autre partie commence au pied de l'Atlas saharien et s'étend vers le Sud : c'est le Sahara (Désert), dur, monotone, stable où le jaune, l'ocre et le noir des sables ou de la patine désertique ne sont souvent qu'un léger voile sous lequel on peut lire des structures tectoniques, sédimentaires et magmatiques.

Le Sahara algérien comprend des ensembles géologiques différents. Morphologiquement, il est constitué de sols très variés tel que :

- **Les Regs** : généralement des zones plates, peu élevées, sableuses et caillouteuses qui ont été débarrassées des éléments fins par le vent.

Les Hamadas : plateaux peu élevés, la partie supérieure ressemble à une surface structurale (Hamada Sud-atlasique : calcaire). Entre les Regs et Hamadas, nous avons :

- **Les Ergs** : désert de dunes, plus précisément des champs de dunes fixes dont seul le sable superficiel est remodelé sans cesse par le vent. Ils occupent environ 20% de la surface du Sahara. Certains ont commencé à se former au cours du pléistocène.
- **Le Sif** : constitue la partie sommitale des dunes. Il sépare la partie en pente douce (pente "au vent") de la partie en pente raide (pente "sous le vent").
- **Les plateaux** : Surfaces structurales surélevées, occupées soit par des Ergs ou par des

Hamadas (plateau de Tademaït).

- **Oued** : signifie rivière en arabe, désigne les cours d'eau d'Afriques du Nord et des régions désertiques et semi-désertiques.
- **Chott** : (de l'arabe chatt) : est une étendue d'eau salée permanente, aux rivages changeants, située dans les régions arides et semi-arides [8]

10. 2- Caractéristiques géographiques:

La wilaya d'El-Oued est située au Sud-est de l'Algérie, (33° à 34° latitude Nord. ; 6° à 8° longitude Est). Elle à une superficie de 54 573 km² Il s'agit d'un vaste ensemble de palmiers entourés par les dunes de sable qui se trouve à une altitude de 70 mètres au niveau de la mer.

Elle est limitée :

*Au Nord par les wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa.

*A l'Est par la Tunisie.

*A l'Ouest par les wilayas de Biskra, Djelfa et Ouargla.

*Au Sud par la wilaya d'Ouargla.

La situation géographique des régions d'étude est présentée dans la (figure I-5.) [12]

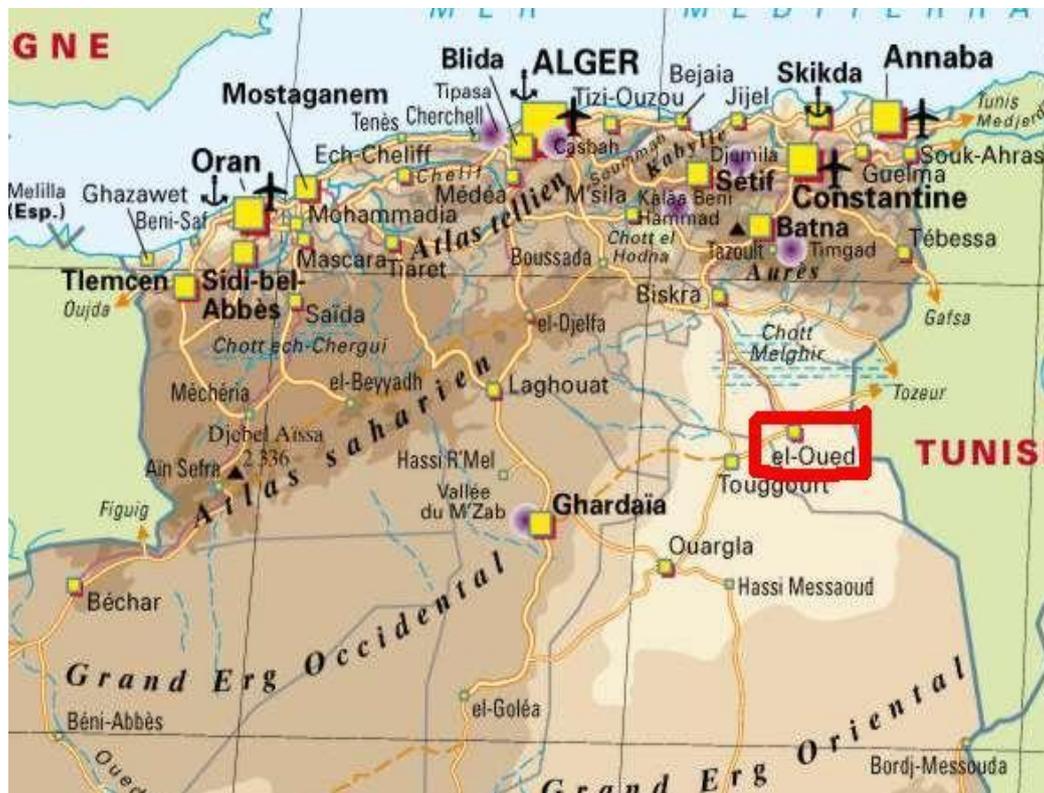


Figure (I-5): Situation géographique de la région d'EL Oued. [12]

10. 3- Géologie:

La région du Souf se situe dans une mer de sable de couleur jaune ocre, issue de dépôts quaternaires.

Dans la région du Souf, les conditions tectoniques et paléogéographiques ont permis la mise en place d'une série sédimentaire à caractère lithologique divers et variable dans le temps, plutôt calme, régulière et homogène dans l'espace (Figure I-6). CES caractéristique sont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le bas Sahara de plusieurs terrains aquifères comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès [13]

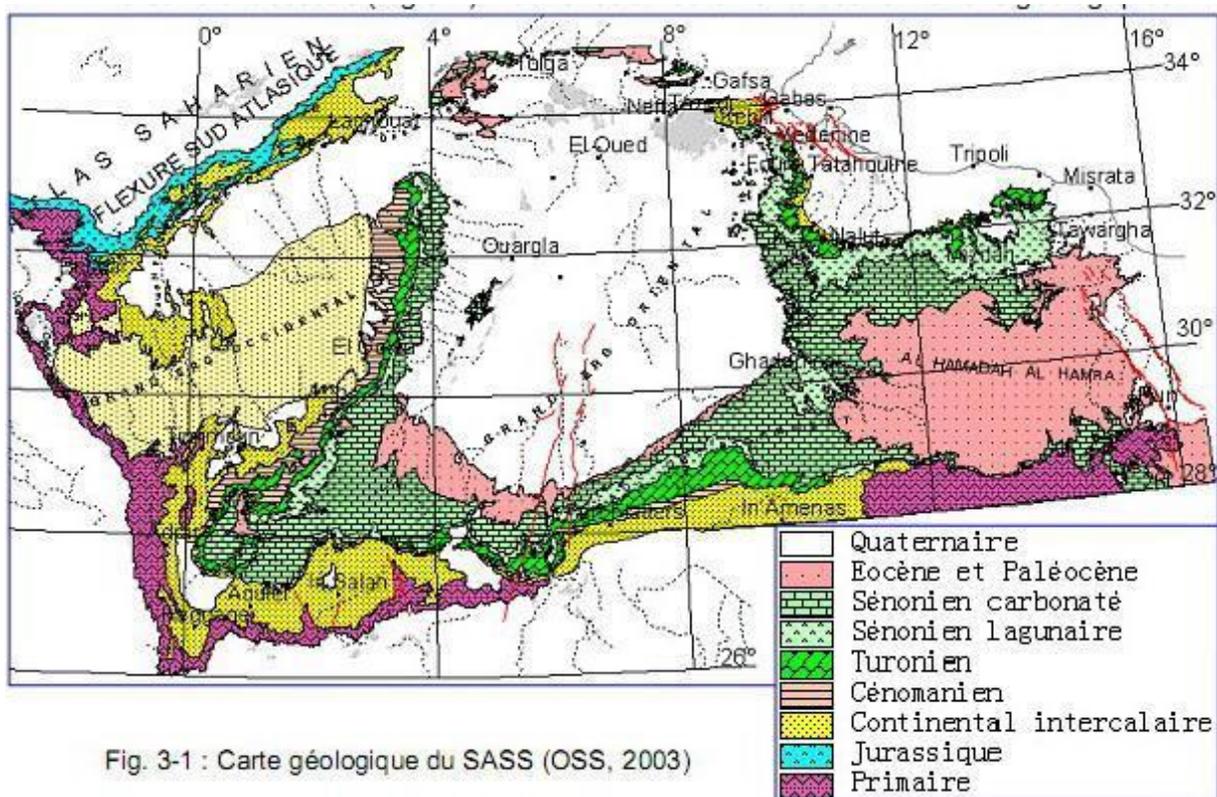


Fig. 3-1 : Carte géologique du SASS (OSS, 2003)

Figure (I-6): Plan géologique du Grand Erg Oriental. [13]

10. 4- Le Cadre hydrogéologique :

Le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois aquifères (Figure I-7) un aquifère libre, et deux aquifères captifs (le complexe terminal (CT) et le continentale intercalaire (CI) L'aquifère libre est constituée de formations quaternaires représentées par les : sable, grès, sable argileux, et l'argile sableuse, alors que le substratum est constitué d'argile.

La profondeur du substratum est comprise entre 50 et 90 mètres.

Du point de vue hydrogéologie, la région d'El Oued est représentée par deux systèmes aquifères, à savoir :

Le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Ces deux systèmes sont surmontés par une nappe libre appelée nappe phréatique. [14]

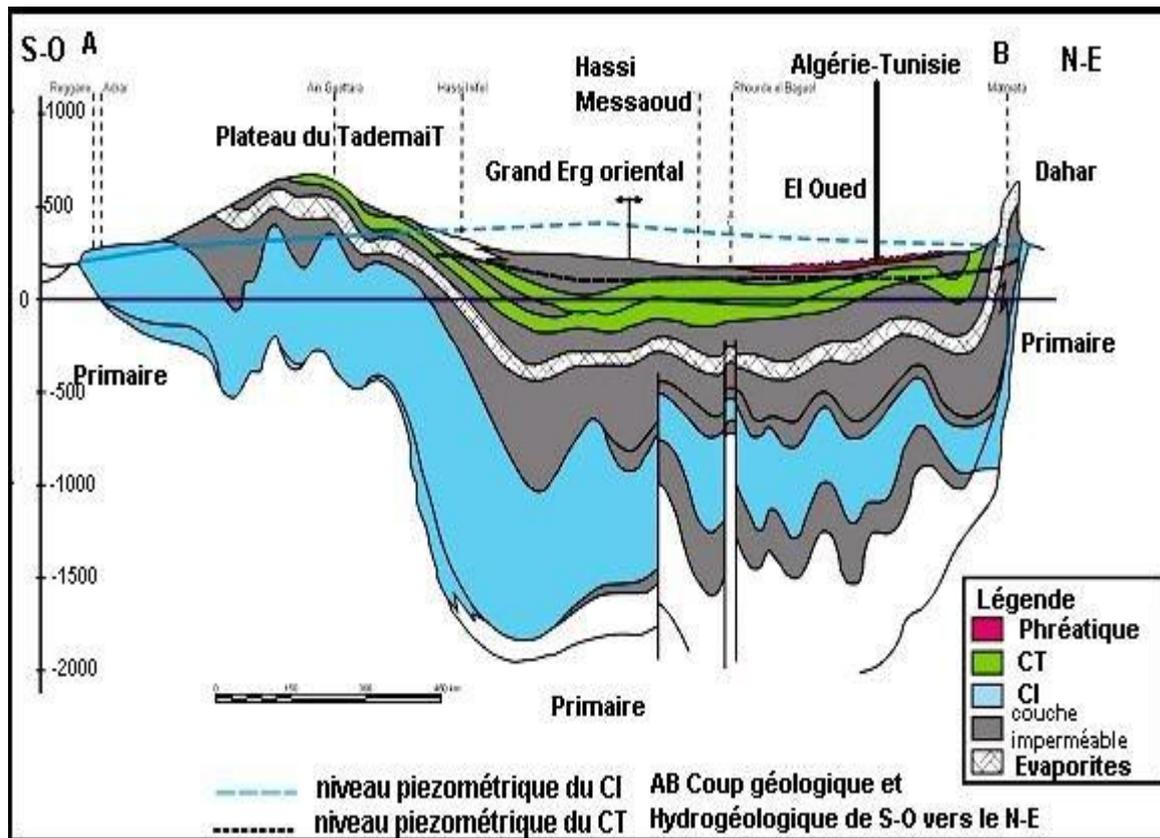


Figure (I-7): Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale. [14]

10. 5- Les ressources hydriques:

La région du souf est classée à l'échelle nationale comme région à fort potentialité hydrique. Les ressources en eaux souterraines mobilisables sont estimées à 4,9 milliards de m3. Est sont suffisantes. Elles sont facilement exploitables et à la portée des agriculteurs. L'eau est moyennement salée (3 à 5g / l) ne limitant pas les rendements. [15]

10. 6- Caractéristiques climatiques:

Le climat joue un rôle essentiel dans la morphologie du relief, sur la végétation, la genèse et le type des sols et sur les activités agricoles.

La région d'El Oued se caractérise par un climat aride de type saharien désertique, en hiver la température baisse Au-dessous de 0°C alors qu'en été elle atteint 50°C ; la pluviométrie moyenne varie entre 80 et 100 mm/an (période d'Octobre à février) [15]

Le climat dans El-Oued ressemble à celui du Sahara avec la particularité que les nuits sont plus fraîches qu'ailleurs vu la différence de température sentie à travers les grandes étendues de sable.

Aridité, sécheresse de l'air, manque d'eau en surface, irrégularité des précipitations, pauvreté en végétation sont les signes d'un climat désertique partagé aussi par cette région. [16]

L'aridité et la chaleur sont ses caractères essentiels. Les vents, par l'évaporation qu'ils provoquent, Ajoutent à son aridité.

L'agitation de l'air est souvent provoquée, localement, par les contrastes de températures, qu'aucune humidité n'atténue. Les mois d'été sont très chauds, et les températures atteignent 49°C à l'ombre et plus de 50°C.

La couche superficielle du sable frôle les 60°, mais la température diminue notablement avec la Profondeur.

Les variations diurnes sont considérables, et la température chute à la nuit Tombante d'une vingtaine de degrés. En revanche, l'hiver est relativement froid tandis que le gel n'est pas rare ; et parfois la température peut descendre au-dessous de 0°, notamment la nuit. [17]

11. Les types des sols en Algérie:

On distingue plusieurs types de sols en Algérie :

- Les sols minéraux bruts.
- Les sols peu évolués.
- Les sols calcimagnésiques.
- Les sols isohumoques.
- Les halomorphes. [18,19]

12. Le sol :**12. 1- Le sol de la région d'étude:**

La région d'oued souf distingue surtout par un paysage dunaire, Les types des sols de la région sont constitués surtout par une seule formation d'apport éolien avec des caractères d'halomorphe et hydromorphie.

Les sols halomorphes de la région se situent dans des dépressions où la nappe est proche de la surface du sol, une profondeur inférieure à 2 mètres. La faible capacité totale d'échange et les forts teneurs en calcium (carbonate de calcium et gypse) empêchent l'alcalinisation du complexe absorbant.

Généralement des sols de la région Présentent une texture grossière, une structure particulière, meuble et peut être fondue et particulière.

Ils sont très perméables et peu compacts fortement calcaire. On note en générale, la présence de graviers et gravillons dans les profils et dépassant rarement les 10%.

Le gypse est présent en pourcentage faible, il se trouve à l'état finement divisé ou parfois sous forme de taches, amas et cristaux isolés, affectant peu les propriétés du sol. [20]

12. 2- Humidité du sol :

L'humidité du sol est différente dans les zones d'études et elle ne varie pas de même façon (Figure I-8).

Nous observons que le taux d'humidité augmente en fonction de la profondeur du sol au niveau des trois zones, et le rapprochement de la nappe phréatique.

L'examen des graphiques montre une diminution de l'humidité du sol dans les terrains nus, par rapport aux terrains cultivés, cela est dû à l'effet d'une irrigation excessif d'une part et l'absence d'un réseau de drainage adéquate d'autre part. [21]

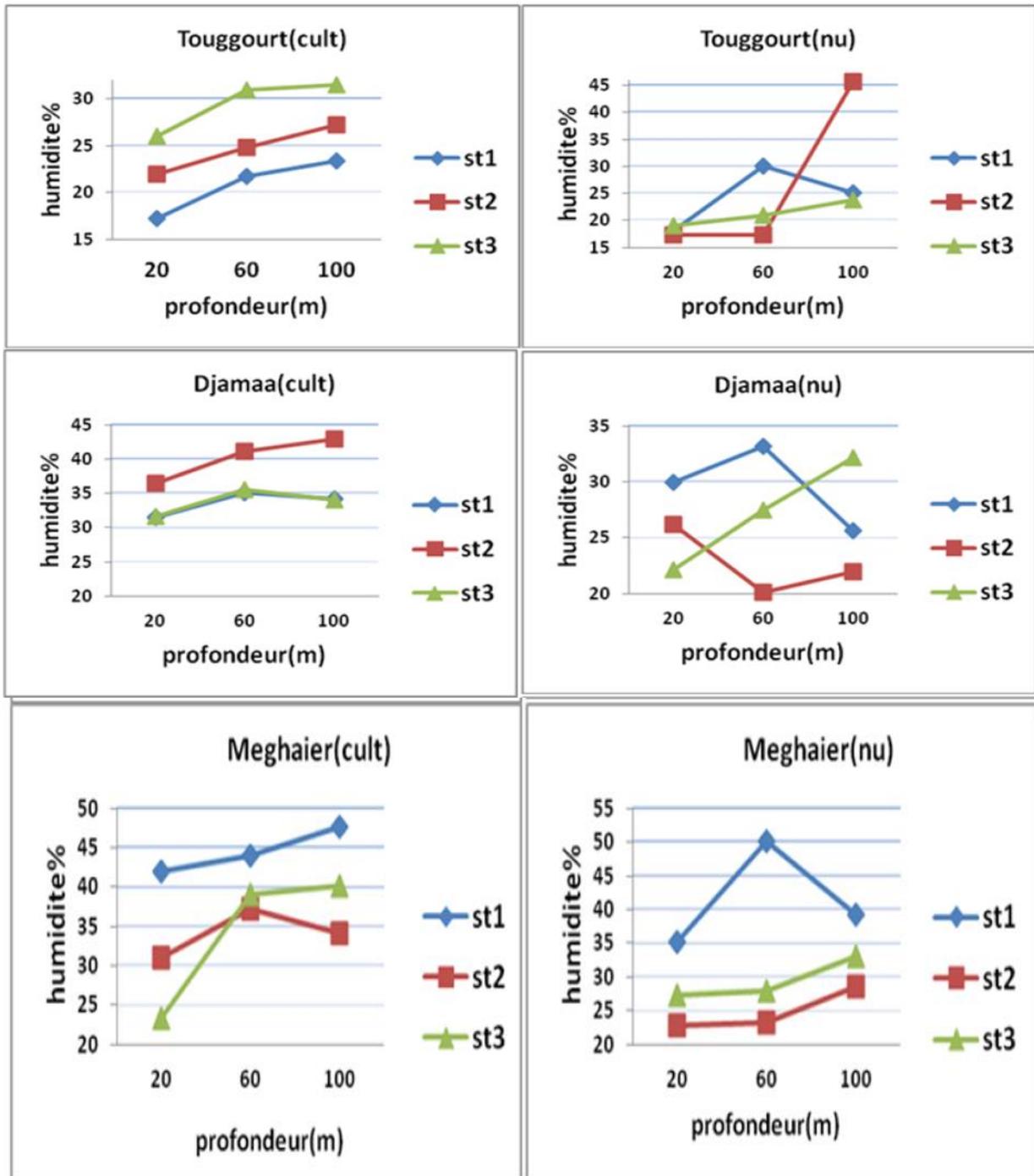


Figure (I-8): Variations de l'humidité du sol dans les zones d'études. [21]

Référence chapitre I :

- [*]: Ouali, S., Khellaf, A., & Baddari, K.. Etude des ressources géothermiques du sud algérien *Revue des énergies renouvelables*, 10(3), 407-414. (2007).
- [1]: Benchemsa Issam, L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage Domestique, mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba
- [2]: Benfateh, H. Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra). (2009).
- [3]: <http://www.geothermie.ch/index.php?p=geothermics>
- [4]: http://www.energies-renouvelables.org/energie_geothermie.asp
- [5]: Idriss BENGHEZALA, "Contribution à l'étude des Performances Dynamiques et Thermiques d'un Echangeur Enterré", Mémoire de magistère 2014.
- [6]: Touil Abdelhak., 'Étude Numérique D'un Échangeur Géothermique Eau-Sol.' Mémoire de Master (2018).
- [7]: Julien HEINTZ (CETIAT). Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d'informations) "janvier 2008.
- [8]: K BOULIFA, « Synthèse hydrogéologique sur la région d'El-Oued Sahara nord oriental – Est Algérien » Mémoire de Magister université de Constantine 1, (2012)
- [9]: Kethiri, M A. Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation dans la zone de Biskra. (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra) (2019).
- [10]: Sung Look Do. Jeff S. Haberl à review of ground coupled heat pump models used in Wholebuilding computer simulation programs.
- [11]: S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en géophysique, Université Boumerdès, Mars 2006
- [12]: Meziani H DRIDI M. et KALLA., 2012. La réutilisation des eaux usées dans la région de Souf-Sahara Algérien, *Canadian Journal of Technologie and Scientifique Management*, Vol. 1, Issue 1. Pp.106.
- [13]: MILOUDI. A, Mécanismes et remèdes de phénomène de la remontée des Eaux dans la région d'Oued souf. L'impact sur l'environnement de la région, Thés magister université d'Ouargla 2008.
- [14]: Cleere, H. (2011). The 1972 UNESCO World Heritage convention. *Heritage Society*, 4(2), 173-186.
- [15]: ANDI-2013 : PESSERI, B INVSTIN ALAERIA P1-17 wilaya d'el oued ANDI 2013 agence nationale de développement l'investissement
- [16]: Lebsir. A, Les Cultures Constructives Traditionnelles Cas des Aurès, L'Oued Mya et Le Souf. Biskra, Algérie : Université Mohamed Khider –Biskra, p292. Mémoire.Magister en Architecture 2016.
- [17]: Messaoudi, Salim A., and Belkacem Said-Houar, Uniform decay in a Timoshenko type system with past history. *Journal of mathematical analysis and applications* 360.2: 459-475 (2009).

[18]: DJEBAILI et al. Djebaili S., 1978. Recherches phytosociologiques et phytoécologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas saharien algérien. Thèse Doc, Montpellier, 1983 229p

[19] : HALITIM 1988 : HALITIM, A. Sols des régions arides d'Algérie. Ed. Office de la publication universitaire. 1988

[20] : KHADRAOIE 2010. LES OISISE DU L'agriculture en El-oued et en sol sableux p161-163, Edition N°2.

[21] : NE Bekkari 1, Y Halis1, ML Benhaddya1, ML. Saker 2, No 14 (2017), Étude de l'impact des activités agricoles sur l'environnement Oasien de la région de l'Oued Righ, Journal Algérien des Régions Arides (JARA)

Chapitre II

Généralités sur les échangeurs de chaleurs

1. Introduction:

Les échangeurs de chaleurs sont des appareils permettent de transférer la chaleur entre deux ou plusieurs fluides à des températures différentes.

Dans la plupart des cas, les deux fluides ne sont pas en contact directe et le transfert s'effectue, généralement, à travers une paroi d'échange solide. Au sein de la paroi séparatrice, le mécanisme de transmission de la chaleur est la conduction, et, sur chacune des deux surfaces de contact avec les fluides, ce sont presque toujours les phénomènes de convection qui prédominent.

Dans de nombreux cas, les fluides restent monophasiques, qu'ils soient gazeux ou liquides. Pratiquement, il existe trois grandes catégories d'échangeurs dans lesquelles surviennent des changements de phase : les évaporateurs où l'on vaporise un liquide, les condenseurs où une vapeur est liquéfiée, et les vapo-condenseurs dans laquelle les deux fluides changent leur phase.

Actuellement, les échangeurs thermiques ont de nombreuses applications, majoritairement dans l'industrie, mais également dans l'habitat (notamment le conditionnement d'air, la réfrigération et le chauffage urbain) ou dans le domaine de transport (climatisation et refroidissement des moteurs) [1].

Dans ce chapitre nous allons rappeler des généralités et des caractéristiques essentielles des échangeurs de chaleur, leurs classifications et leurs descriptions les plus couramment utilisés. Enfin nous allons présenter quelques méthodes de calcul thermique des échangeurs.

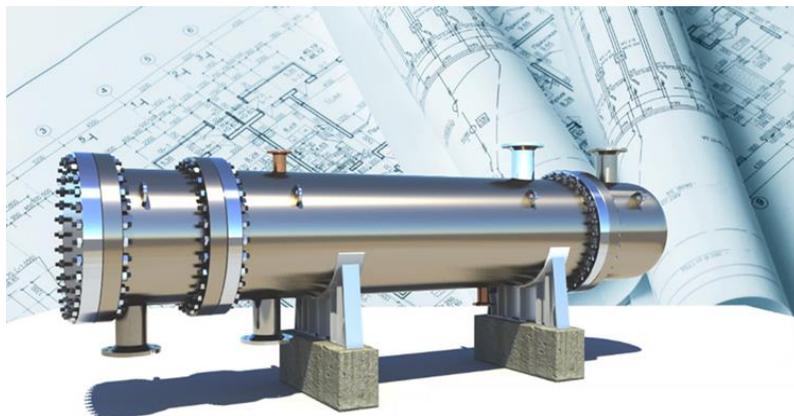


Figure (II-1): Les échangeurs de chaleur. [2]

2. Matériaux utilisés aux échangeurs de chaleur:

Les échangeurs de chaleur sont fabriqués en utilisant de nombreuses matières. Le choix d'un matériau pour les différentes pièces de l'échangeur, dépend surtout des conditions de service (température, pression, degré de corrosivité du milieu).

La température de service des échangeurs de chaleur se trouve couramment dans les limites d'utilisation des aciers au carbone (de -30° à 475°C) [3].

Les matériaux employés pour la réalisation des tubes sont le plus souvent métalliques (acier, laiton). Les céramiques se développent dans les échangeurs où transitent des fluides à haute température. Les tubes en plastique (généralement de très petits diamètres) sont également utilisés, soit en faisceaux, soit intégrés dans des plaques minces qui leur servent de raidisseurs [4]

3. Critères de classement des échangeurs:

Il existe plusieurs critères de classement des d'échangeurs thermiques :

3. 1- Types de contact :

3. 1-1- Échangeur a 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.

3. 1-2- Échangeur a contact indirect: Les fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi [5].

3.2- Classement suivant la direction des écoulements:

Le type de l'écoulement des fluides:

a) Echangeur à Co-courant:

Lorsque l'échangeur de chaleur fonctionne à courant parallèle, les deux fluides s'écoulent dans la même direction et entrent dans l'échangeur de chaleur au même endroit.

La température de sortie du côté froid peut atteindre au maximum la température de sortie du côté chaud (voir Figure (II-2)). [6]

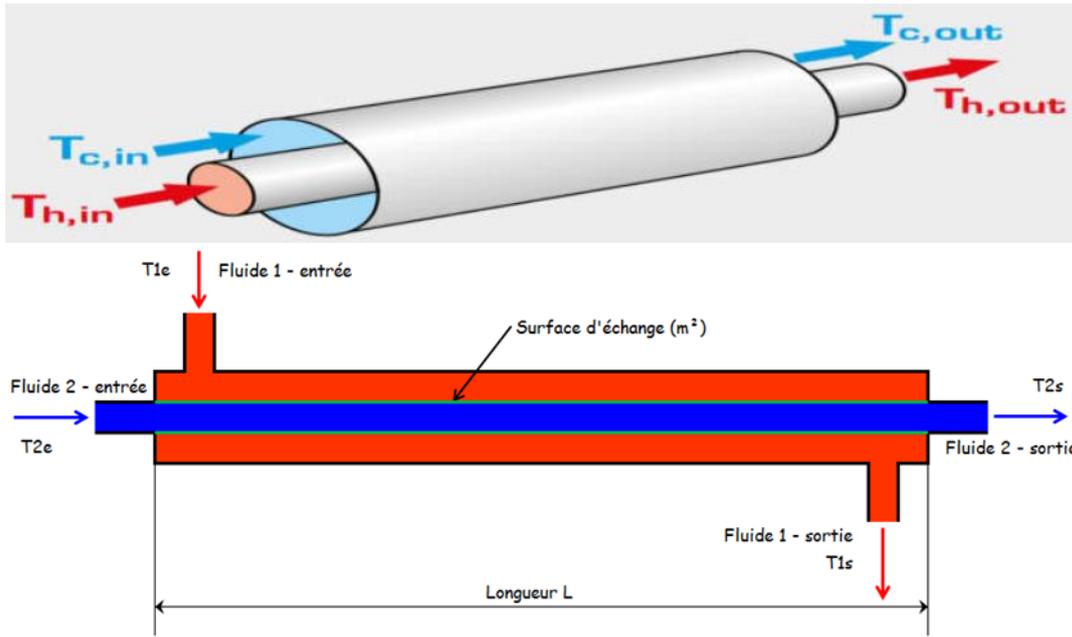


FIGURE 1 : principe d'un échangeur à co-courants

Figure (II-2): Principe d'un échangeur à Co-courant. [6]

b) Echangeur à contre-courant:

En fonctionnement à contre-courant, les deux fluides s'écoulent dans des directions opposées sans se toucher. Le lieu d'entrée du premier fluide correspond au lieu de sortie du second fluide.

Lorsque l'échangeur de chaleur est très bien conçu, il est possible que la température de sortie soit plus élevée du côté froid que la température de sortie du côté chaud [6].

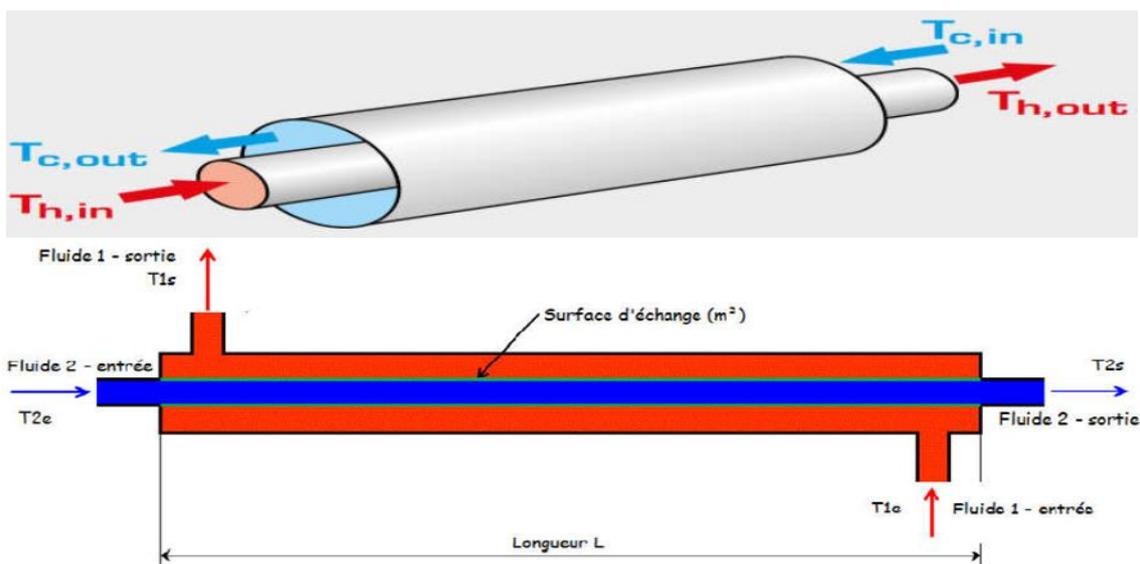


Figure (II-3): Principe d'un échangeur à contre-courant. [7]

c) Echangeur à courant croisés:

En fonctionnement à courants croisés, les directions des fluides se croisent. Le fonctionnement à courants croisés est surtout utilisé pour assurer une distribution uniforme de la température du deux fluides. Ce type d'échangeur est la plus utilisé dans l'industrie [6]

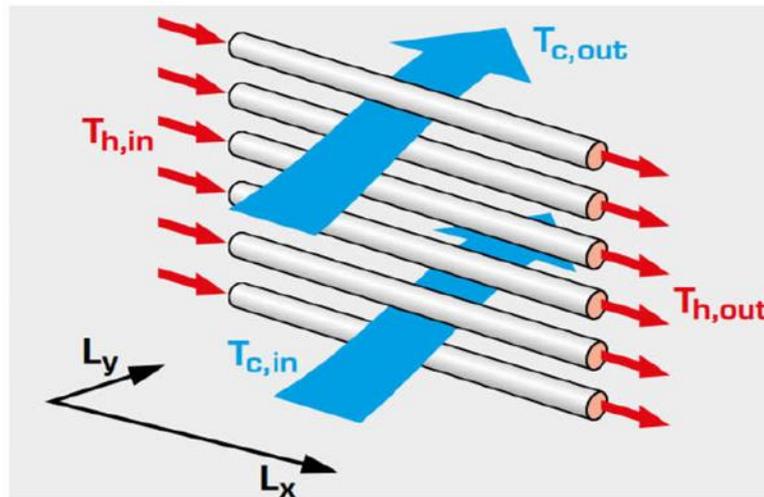


Figure (II-4): Principe d'un échangeur à courant croisés. [6].

3. 3- Classement suivant les types d'échangeur :**3. 3-1- 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. [8]

3. 3-2- Échangeur avec changement de phase:

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

1. L'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.
2. 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.
3. Le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état [8].

3. 4- Classement suivant La nature du matériau de la paroi d'échange:

On retiendra deux types de paroi :

- 1- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium.
- 2- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, verre...etc. [5].

3. 5- Classement selon la compacité de surface:

- Compact $\geq 700\text{m}^2/\text{m}^3$
- Non compact $<700\text{m}^2/\text{m}^3$. [9]

3. 6- Classement fonctionnel:

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ;

Suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre

Alors les différents cas suivants :

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- Un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs oueds condenseurs ; [10]

3. 7- 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 [10]

4. Les échangeurs de chaleur les plus courants:

Dans cette partie on va citer les échangeurs de chaleur les plus connus dans les structures industrielles et civiles.

4. 1- Echangeur à plaques:

Ce type d'échangeur est constitué par un assemblage de plaque cannelée indépendantes. Les plaques sont encastrées et serrées dans un bâti. Chaque paire de plaque 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. [11]

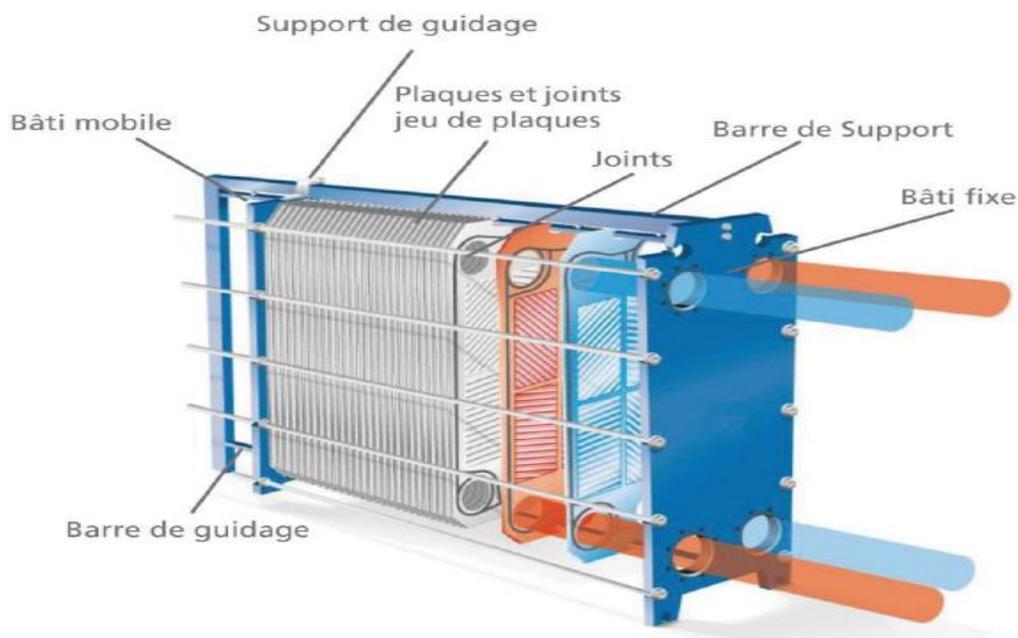


Figure (II-5): Exemple d'un échangeur de chaleur à plaque. [11]

4. 2- Echangeur à tubes et calandre:

C'est un échangeur à multi passe qui constitue des tubes et calandre (fig. III-1). Le fluide à l'intérieur des tubes peut circuler dans une seule passe ou multiples passes. La même chose pour l'autre fluide du fait de la présence des chicanes.

La forme des chicanes se diffère pour chaque échangeur : circulaires, demi-circulaires, segments, disques, orifices, etc. [12]

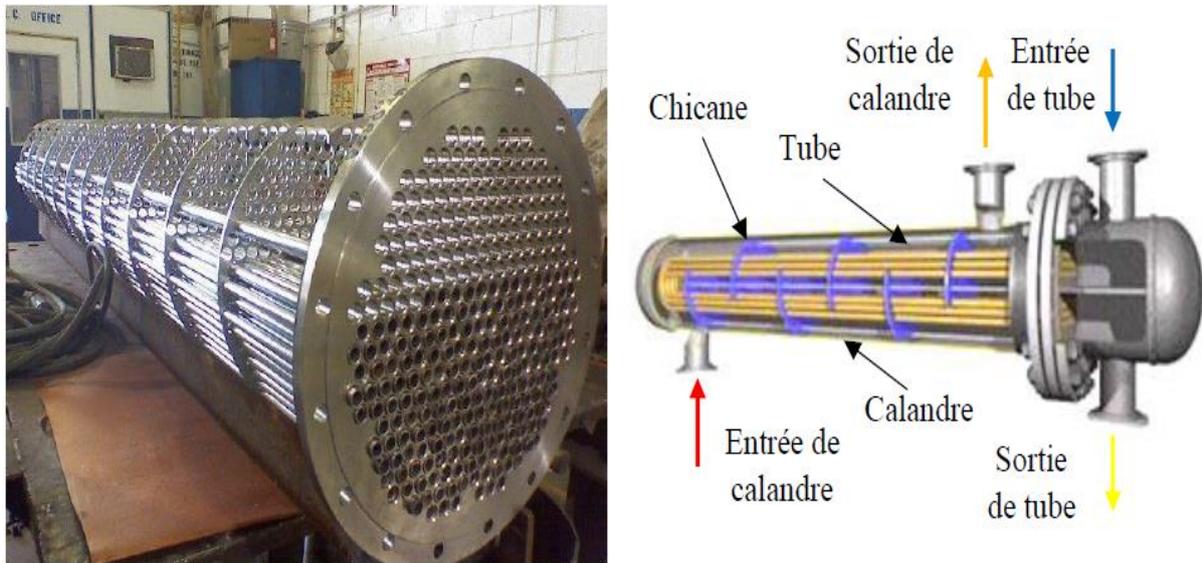


Figure (II-6): Echangeur à tubes et calandre. [12]

4. 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 importante sur d'autres types d'échangeurs de chaleur. [13]

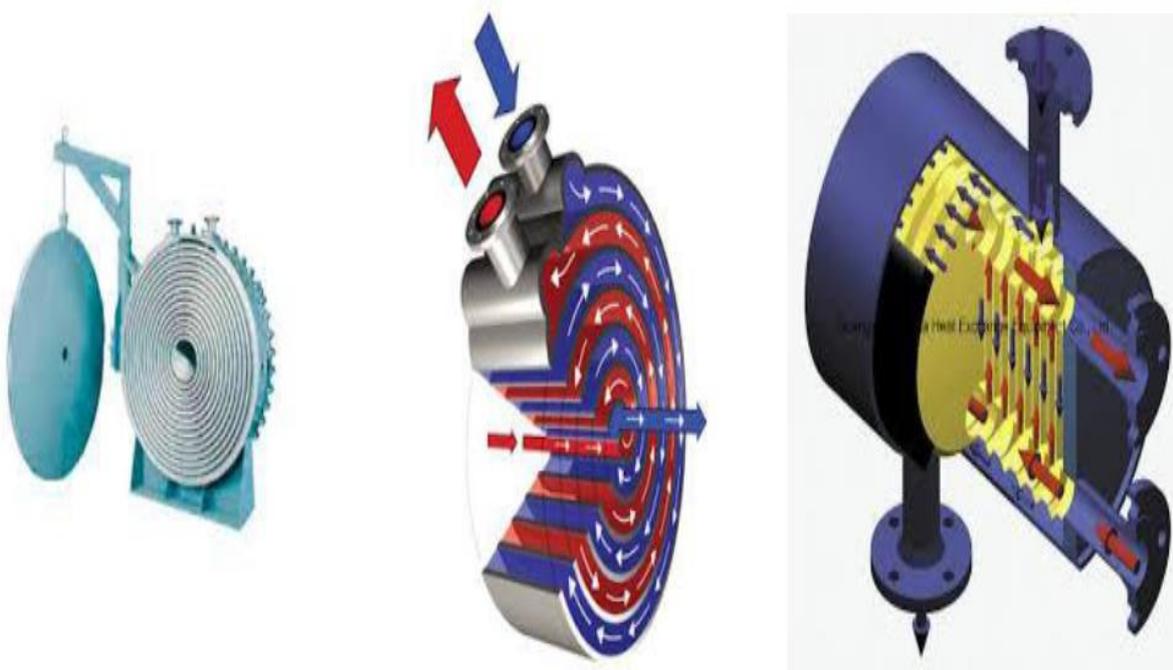


Figure (II-7): Les échangeurs de chaleur spiralée. [13]

4. 4- Échangeurs lamellaires:

C'est une variante de l'échangeur de type tubes et calandre (Figure II,8), 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 qui permet d'obtenir une meilleure tenue à la pression et un meilleur échange thermique [14].

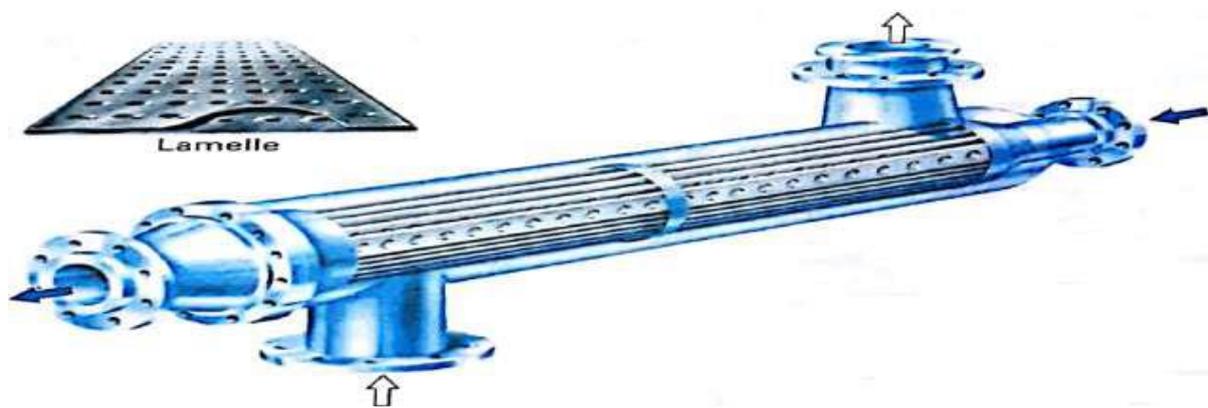


Figure (II- 8): Echangeur de chaleur lamellaire. [14]

4. 5- Echangeur tubes à ailettes:

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

4. 5-1- Ailettes plain (Batterie à ailettes):

Dans ce type d'échangeur (figure II-9), les ailettes et les tubes sont généralement construits avec des matériaux de très bonnes conductivités thermiques (Cuivre, Aluminium, etc.). Les ailettes contiennent plusieurs trous par lesquels passent les tubes (circulaire, rectangulaire, ovale, etc.), et les ailettes peuvent être de différents types (plain, ondulé, etc.).[12]



Figure (II-9): Echangeurs de chaleur tubes à ailettes plain. [12]

4. 5-2- Ailettes annulaires:

Les ailettes dans ce type des échangeurs de chaleur (figure (II-10)) sont généralement uniques pour un seul tube. La forme des ailettes et tubes se diffère selon l'utilisation (circulaire, rectangulaire, ovale, etc.).[12]



Figure (II-10) : Diffèrent types des échangeurs de chaleur tube à ailettes annulaire. [12]

4. 6- Echangeurs à tubes et ailettes:

Lorsque l'un des fluides transitant dans l'échangeur s'avère nettement moins bon calo vecteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes s'impose autour des tubes ou quelquefois dans les tubes afin que la résistance thermique globale ne soit pas principalement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique. C'est le cas de échangeurs gaz-liquide et liquide-gaz utilisés

dans la récupération thermique sur les fumées ou les gaz chauds ou dans les différents systèmes thermodynamiques tels que pompes à chaleur ou groupes de réfrigération ; en génie climatique, ces échangeurs sont appelés batteries à ailettes. Les batteries à ailettes sont constituées d'un faisceau de tubes, répartis en rangs ou nappes, dans lesquels circule un fluide caloporteur ayant un bon coefficient d'échange. Le fluide extérieur étant un gaz (air généralement) nécessite un ailettement externe des tubes pour diminuer l'écart entre les résistances thermiques externes et internes. [15]

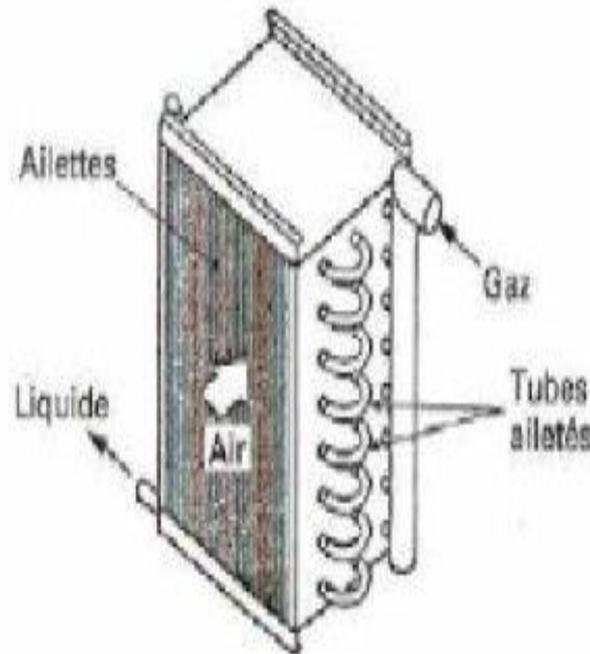


Figure (II-11): Echangeurs à tubes et ailettes. [15]

4. 7-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 [16].



Figure (II-12): Echangeur à Bloc. [16]

5. Méthodes de calcul thermique des échangeurs:

5.1- Méthode NUT:

L'efficacité d'un échangeur de chaleur est définie comme le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximale théoriquement possible, avec les mêmes conditions d'entrée des fluides dans l'échangeur (mêmes fluides, débits et températures d'entrée).

$$\mathcal{E} = \frac{\varphi_{réel}}{\varphi_{max}} \quad (1)$$

$$\varphi_{réel} = \dot{m}_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) \quad (2)$$

$$\varphi_{réel} = \dot{m}_f C_{pf} (T_{fe} - T_{fs}) \quad (3)$$

$$\varphi_{max} = (\dot{m}Cp)_{min} (T_{ce} - T_{fe}) \quad (4)$$

Donc, l'efficacité de l'échangeur pour un fluide chaud est :

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{m}_c C_{pc} (T_{ce} - T_{fe})}{\dot{m}Cp_{min} (T_{ce} - T_{fe})} \quad (5)$$

Pour un fluide froid :

$$\varphi = \mathcal{E} C_{min} (T_{ce} - T_{fe}) \quad (6)$$

➤ L'efficacité d'un échangeur de chaleur à courant parallèle :

$$\mathcal{E} = \frac{1 - \exp\left(-\text{Nut}\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right)}{1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}} \quad (7)$$

➤ L'efficacité d'un échangeur de chaleur à contre courants :

$$\mathcal{E} = \frac{1 - \exp\left(-\text{Nut}\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right)}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} \exp\left(-\text{Nut}\left(\frac{C_{min}}{C_{max}} - 1\right)\right)} \quad (8)$$

NUT : est un groupement adimensionnel, il est appelé nombre d'unité de transfert, il représente le pouvoir d'échange de l'appareil.

$$NUT = \frac{K \times S_{tot}}{C_{min}} \quad (9)$$

Des abaques fournissent l'efficacité de l'échangeur à partir du nombre NUT et du rapport $\frac{C_{min}}{C_{max}}$ ont été dressés pour la plupart de configurations des échangeurs thermiques [17].

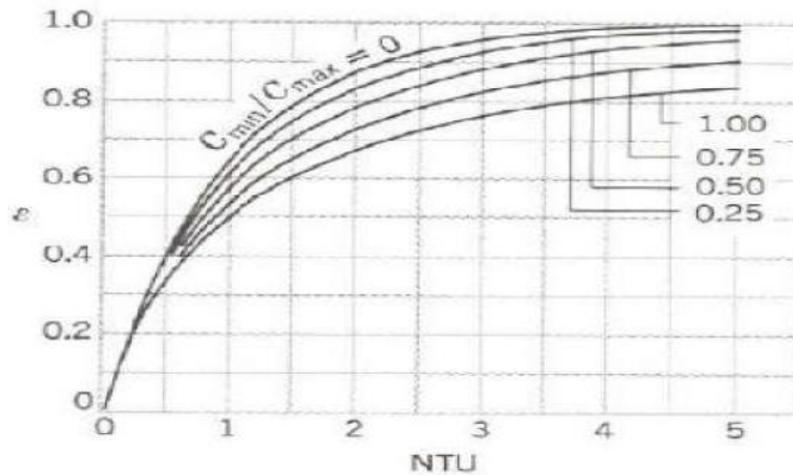


Figure (II-13): Efficacité d'un échangeur à Co-courant. [17]

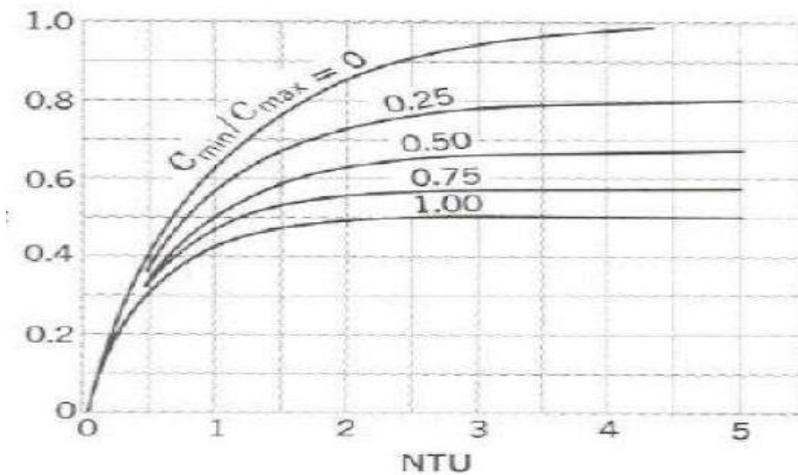


Figure (II-14): Efficacité d'un échangeur à contre-courant. [17]

5. 2- Efficacité d'un échangeur de chaleur:

On définit l'efficacité d'un échangeur comme le rapport du flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur au flux de chaleur maximal dans les conditions d'une surface d'échange illimitée.

L'efficacité d'un échangeur est un nombre adimensionnel inférieur ou égal à l'unité ($0 \leq \eta \leq 1$) [18].

$$\eta = \frac{\varphi}{\varphi_{max}} \quad (10)$$

Avec :

$$\varphi_{max} = \text{Min} (m_1 C_{p1}, m_2 C_{p2}) \quad (11)$$

Ou d'une autre façon, on peut écrire :

$$\eta = \frac{M_{max}(\Delta T_1, \Delta T_2)}{\Delta T_{max}} \quad (12)$$

5. 3- Méthode DTLM:

La méthode de la différence de température logarithmique moyenne (DTLM) est la méthode classique de calcul ; grâce à elle, la puissance thermique φ pour un échangeur tubulaire concentrique à contre-courant est déterminée avec la relation suivante :

$$\varphi = KA \Delta T_{ML} = KA \frac{(T_c^{ent} - T_f^{sor}) - (T_c^{sor} - T_f^{ent})}{\frac{(T_c^{ent} - T_f^{sor})}{(T_c^{sor} - T_f^{ent})}} \quad (13)$$

Pour les échangeurs plus complexes que le type contre-courant pur, la quantité ΔT_{ML} évaluée selon la méthode précédente ne représente plus exactement la différence de température moyenne effectuée. On continue cependant à calculer ΔT_{ML} comme s'il s'agissait d'un échangeur à contre-courant pur, en corrigeant néanmoins le résultat obtenu, par l'introduction d'un facteur "F" tenant compte de la véritable configuration des écoulements.

On a donc :

$$Q = KAF \Delta T_{ML} \quad (14)$$

Le facteur correctif "F" est toujours inférieur à l'unité, la littérature fournit les valeurs de "F" sous la forme d'abaques pour la plupart des configurations courantes d'écoulements. [19]

5. 4- Estimation de la résistance thermique du sol:

La résistance thermique totale entre l'air, le tuyau et le sol environnant la j^{th} couche de l'EAHE peut être exprimée par la relation suivante [20]:

$$R_{tot} = R_{cv} + R_p + R_s \quad (15)$$

Où la résistance thermique due au transfert de chaleur par convection entre l'air et la surface intérieure du tuyau, R_{cv} est calculée comme suit :

$$R_{cv} = 1/(h_a 2\pi r_{int}) \quad (16)$$

Le coefficient de convection de l'air est :

$$h_a = Nu \cdot \lambda_a / d_{int} \quad (17)$$

Où d_i est le diamètre intérieur du tuyau. Le numéro Nusselt pour le débit d'air à l'intérieur du tuyau est donné par l'Eq. (18) :

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} \quad (18)$$

Où Re et Pr sont respectivement les nombres de Reynolds et de Prandtl sont défini comme :

$$Re = V_a d_H / \nu_a \quad (19)$$

$$Pr = \mu_a C_{pa} / \lambda_a \quad (20)$$

La résistance thermique du tuyau, R_p est donnée par la formule suivante :

$$R_p = \log(r_e / r_{int}) / (2\pi \lambda_p) \quad (21)$$

La résistance thermique du sol, R_s est donnée par l'équation. (11) :

$$R_s = \log(r_\delta / r_e) / (2\pi \lambda_s) \quad (22)$$

$$r_\delta = r_e + \delta \quad (23)$$

Où r_δ et δ sont respectivement le rayon du sol et le sol perturbé épaisseur (voir Figure (II-15)).

Généralement, la résistance thermique du tuyau, R_p et la résistance due à la convection de l'air dans le tuyau, les R_{cv} sont constantes.

La j^{th} couche environnant le conduit où le sol est considéré comme un cylindre creux semi-infini, où i, j et k sont les indices du temps, la couche et le rayon respectivement.

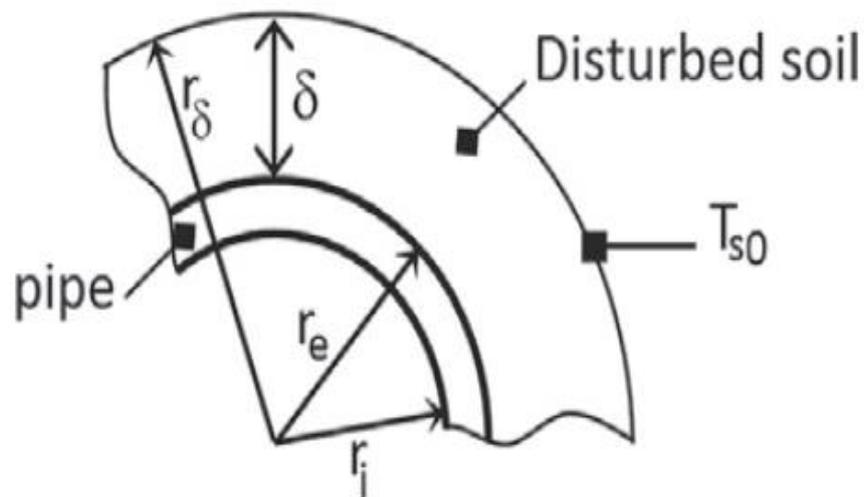


Figure (II-15) : Le schéma montre l'épaisseur du sol perturbé, δ , et le rayon du sol. r_δ . [20]

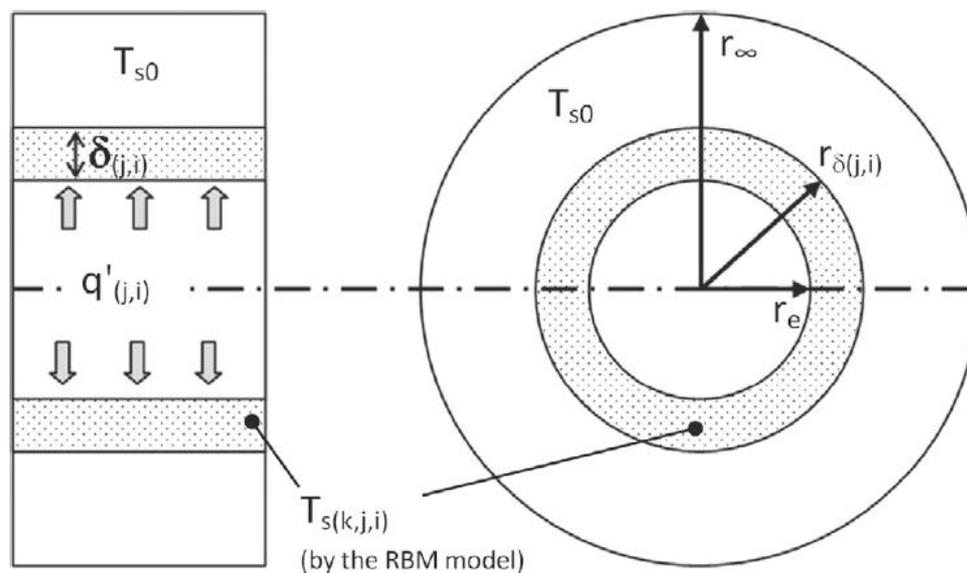


Figure (II-16) : Vues axiales et radiales du tuyau et du sol environnant. [20]

Références de chapitre II :

- [1]: M. REKIOUA, "Etude des performances d'un échangeur de chaleur croise avec ou sans ailettes poreuses," in Mémoire de magistère en génie mécanique, université de Constantine, 2011, pp. 12
- [2]: site web consulté le : 20 /04/2021
<https://www.google.com/search?q=%C3%A9changeurs+de+chaleurs&sxsrf>
- [3]: Site web : la récupération de la chaleur dans l'industrie des aliments et boissons. Htm.
- [4] : W. Technid." Raffinage et génie chimique Tome 1 et 2", 1965.
- [5] : F. TAHROUR, "Modélisation et optimisation des échangeurs de chaleur à ailettes indépendantes," in Sciences de la Matière : El Hadj Lakhder -BATNA-, 2016.
- [6]: M. S. Mon and U. Gross, "Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp.1953-1964, 2004.
- [7]: H. Nemati and M. Moghimi, "Numerical study of flow over annular-finned tube heat exchangers by different turbulent models," CFD Letters, vol. 6(3), pp. 101-112, 2014.
- [8]: H. T. Chen, J. C. Chou, and H. C. Wang, "Estimation of heat transfer coefficient on the vertical plate fin of finned-tube heat exchangers for various air speeds and fin spacings," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 50, pp. 45-57, 2007
- [9] : Benayad, N, Etude et optimisation des échangeurs de chaleur (mémoire de magister Université Mentouri Constantine) (2008).
- [10] : Deziri NedjemEddine, Simulation d'une conception D'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre, mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba 2016/2017.
- [11] : Djoudi, N Saadia, T. 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 Khaider de Biskra) (2005).
- [12] : FOURAR Issam, , Etude numérique et expérimentale des phénomènes de convection sur des échangeurs de chaleur à ailettes indépendantes, Thèse de Doctorat LMD, Université de Biskra Edition Technip, Paris ; France 2020.
- [13] : Bennajah, M, Chaouni, (Echangeurs de chaleur : Technologie, calcul et design) N (2014),
- [14] : Technique de L'ingénieur, traité génie énergétique, volume [BE5].
- [15] : BONTEMPS, A, et al, « Echangeurs de chaleur (description des échangeurs) », Techniques de l'ingénieur.
- [16] : Deziri, N-E, Simulation d'une conception d'un échangeur de chaleur a faisceau et calandre (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba) (2017).
- [17]: A. Kumar, J. B. Joshi, and A. K. Nayak, "A comparison of thermal-hydraulic Performance of various fin patterns using 3D CFD simulations," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 109, pp. 336-356, 2017.
- [18]: REZZIG Amina, Etude énergétique comparative d'un échangeur de chaleur de tubes à ailettes annulaires, mémoire de master, université Mohamed Boudiaf- M'SILA 2017/2018.
- [19]: YETTOU Nourelhouda, Etude de l'effet du décalage de tube sur les performances d'un échangeur de chaleur, Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf Msila 2018/2019

[20]: Charaf Eddine Mehdid, Adel Benchabane, Amar Rouag, Nouredine Moummia, Mohammed Amin Melhegueg, Abdelhafid Moumami, Mohamed Larbi Benabdi Abdelhafid Brima, "Thermal design of Earth-to-air heat exchanger. Part II a new transient Semi analytical model and experimental validation for estimating air temperature", Journal of Cleaner Production 198 (2018) 1536e1544

Chapitre III

Résultats et Discussions

1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons étudier et analyser les résultats expérimentaux réalisées le long de cette étude. Ces expériences sont menées dans la région d'El-oued (Djamaa), dans le but de voir l'influence de la température sur le sol entourant un échangeur enterré.

Et pour y parvenir, nous avons creusé une fosse de 60cm de profondeur, et nous avons placé des sondes de température horizontalement et verticalement, à différentes distances de l'échangeur, ce qui nous a permis de tracer la distribution de la température en fonction du temps.

2. Description du banc d'essais :

Le banc d'essais est un échangeur de chaleur en PVC avec deux cumulateurs, ce qui fait que cet échangeur ressemble à un échangeur à calandre. Cet échangeur a été réalisé, parmi deux autres, par l'étudiant A. Sayed dans le cadre d'un mémoire de Master (2020)(Fig. III-1).

3. Dimension du banc d'essais (Échangeur à quatre 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

Protocole expérimental :

Les expériences sont réalisées à Djamaa-El oued, à une profondeur de 0.6 m. Les mesures sont effectuées du 9h00 à 16h00 à un intervalle de temps de 30 min entre deux mesures.

Les mesures concernent la température de l'air ambiant, de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'échangeur et la température du sol à différentes distances de l'échangeur.



Photo (III-1): Échangeur à quatre tubes.

4. Résultats et discussions :

1. Variation de la température dans le sens horizontal

Première expérience :

Nous avons placé l'échangeur de chaleur à une profondeur de 60 cm, faisons passer de l'eau chaude jusqu'à 50 degrés, et nous avons mesuré la température du sol (horizontalement) à côté de l'entrée de l'échangeur à différentes distances de ce dernier. L'expérience a duré de 9h00 à 16h00 et les mesures sont enregistrées chaque 30mn.



Photo (III-2): Première expérience (vendredi 26 mars 2021).

Le tableau ci-dessous présente les résultats expérimentaux mesurés le vendredi 26 mars 2021 à différentes distances à côté de l'échangeur près de l'entrée de l'échangeur.

La figure (III-1) présente la variation de la température du sol à différentes distances de l'échangeur à côté de son entrée mesuré chaque demi-heure durant la journée d'expérience.

Nous remarquons que la température du sol diminue sensiblement en s'éloignant de l'échangeur. En plus, cette température augmente en fonction du temps.

Tableau (III-1) : Exemple des Mesures réalisés le 26 mars 2021 (à côté l'entré).

Temps	Tamb	Te	1cm	2cm	4cm	8cm	Ts
9 :00	15,8	15,1	19,1	18,7	18,9	18,1	15,6
9 :30	16,3	49,1	31,5	27,3	22	18,6	48,1
10 :00	18	49,1	33,7	30,2	25	19,7	48,3
10 :30	25,5	49,3	34,4	31,7	27,8	20,7	48,2
11 :00	32,2	49,5	35,3	32,9	28,3	21,5	48,9
11 :30	32,9	49,3	36	33,9	29,9	22,6	48,5
12 :00	34,7	49,3	36,2	34,4	30,8	23,9	48,5
13 :30	30,6	50,3	38	35,8	31,8	25,7	49,8
14 :30	31	50,5	38,8	36,2	33,1	26,7	50
14 :30	30	50,5	39,4	36,8	33,2	26,9	50,1
15 :00	29,5	51	39,9	37,8	34,3	27,3	50,5
15 :30	29,2	51	41,1	38,4	35	27,9	50,5
16 :00	29,5	51	42,2	39,6	36,1	28,1	50,5

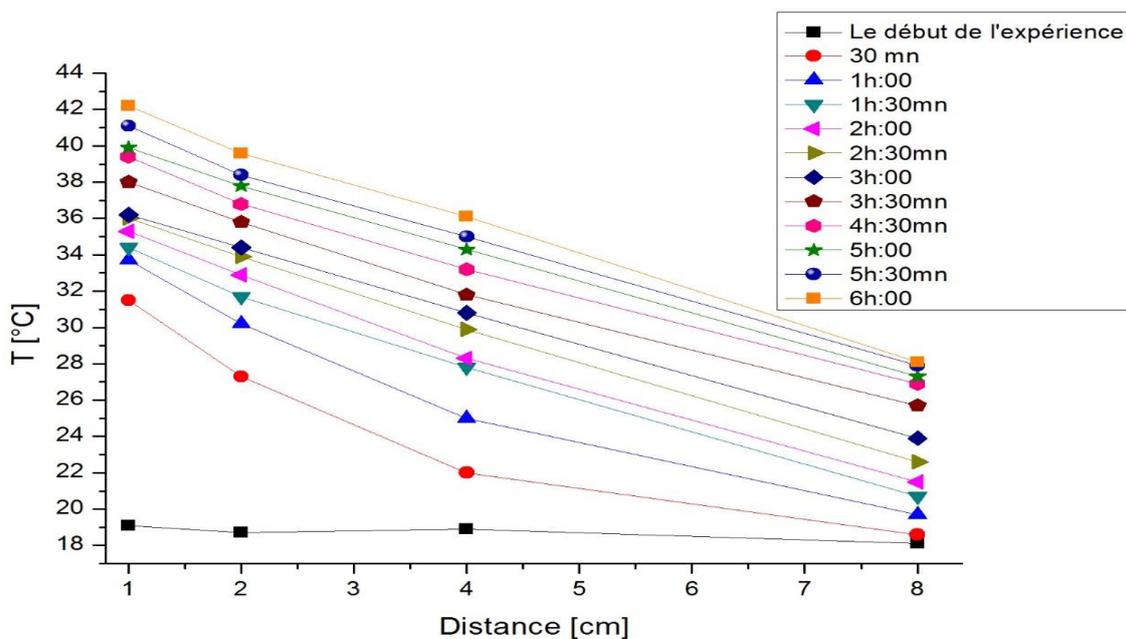
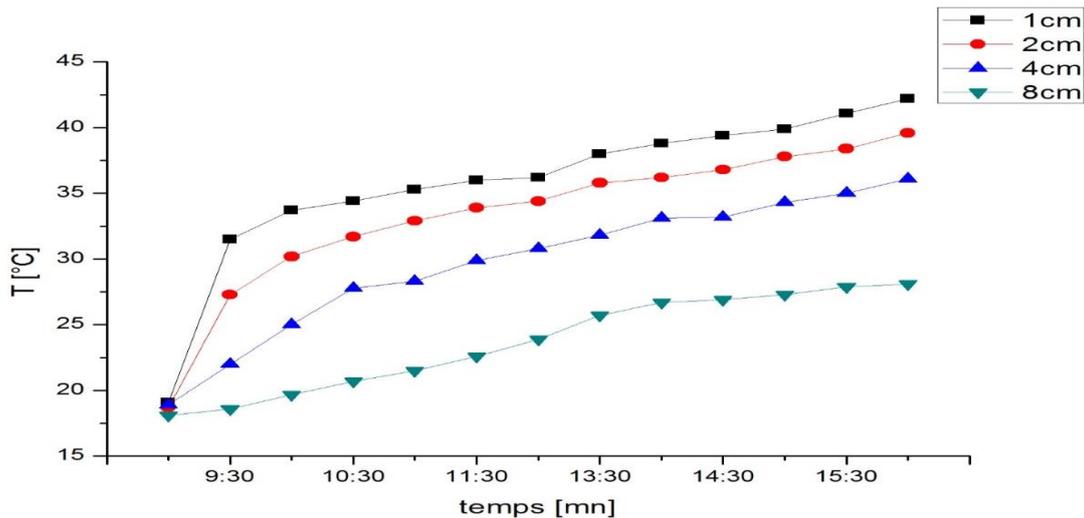


Figure (III-1): Variation de la température du sol en fonction de la distance de l'échangeur durant les heures de l'expérience de l'entrée l'échangeur.

La figure (III-2) présente la variation de la température du sol en fonction du temps à différentes distances de l'échangeur à côté de son entrée.

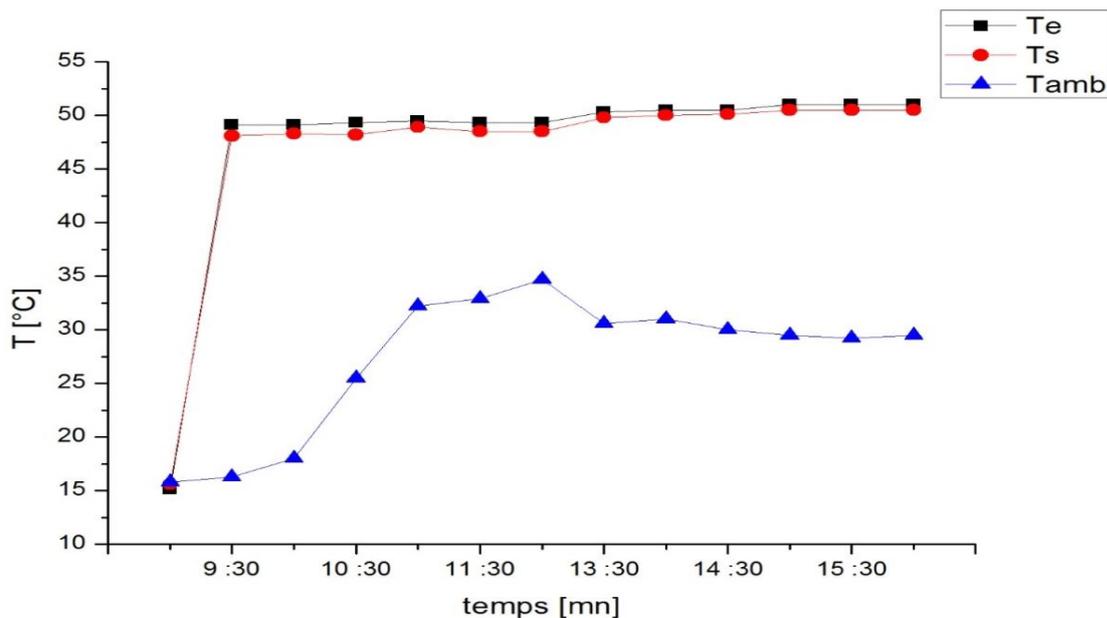
Nous remarquons que les valeurs de la température du sol à différentes distances sont égales au début de l'expérience, et commencent à augmenter progressivement en fonction du temps.

Il est à noter que la température du sol diminue en s'éloignant de l'échangeur durant toutes les heures d'expérimentation.



La figure (III-2): Variation de la température du sol en fonction du temps à différentes distances de l'entrée l'échangeur.

La figure (III-3) présente la variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) durant la première expérience.



La figure (III-3): Variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) en fonction du temps.

Deuxième expérience: Nous avons placé les thermocouples (horizontalement) à côté de la sortie de l'échangeur de chaleur à une profondeur de 60 cm, faisons passer de l'eau chaude jusqu'à 50 degrés, et nous avons mesuré la température du sol à différentes distances de ce dernier. L'expérience a duré de 9h00 à 16h00 et les mesures sont enregistrées chaque 30 mn.



Photo (III-3): Deuxième expérience (Samedi 27 mars 2021).

Tableau (III-2): Mesures réalisés le 27/03/2021(à côté de la sortie).

Temps	Tamb	Ts	1cm	2cm	4cm	8cm	Te
9 :30	18,5	23,8	24,8	23	22,7	22	24,6
10 :00	19,2	49,5	30,4	25,6	23,1	22,4	49,8
10 :30	20	49,6	33	28,3	24,2	22,5	49,8
11 :00	23,7	50,2	35,1	31,2	26,3	22,6	50,4
11 :30	36,5	49,8	36,1	32,3	27,5	22,9	50
12 :00	38,8	49,9	36,5	33,2	28,3	23,2	50
12 :30	37,2	50	37,4	34,9	29,1	23,3	50,1
13 :00	38,8	50,2	38,8	35	30,1	24,8	50,4
13 :30	30,9	49,8	39	35,3	30,5	24,9	50
14 :00	29,9	50,1	39,2	36,6	31,7	25,8	50,3
14 :30	27,8	50,6	40,3	37,5	32,9	26,9	50,9
15 :00	27,7	50,3	40,4	38,2	33,5	27,9	50,7
15 :30	27,9	50,2	41,7	39	34,8	28,2	50,5
16 :00	27,1	50	42,2	35,5	35,4	29,4	50

La figure (III-4) présente la variation de la température du sol à différentes distances de L'échangeur à côté de son sortie mesuré chaque demi-heure durant la journée d'expérience. Nous remarquons que la température du sol diminue sensiblement en s'éloignant de L'échangeur. En plus, cette température augmente en fonction du temps.

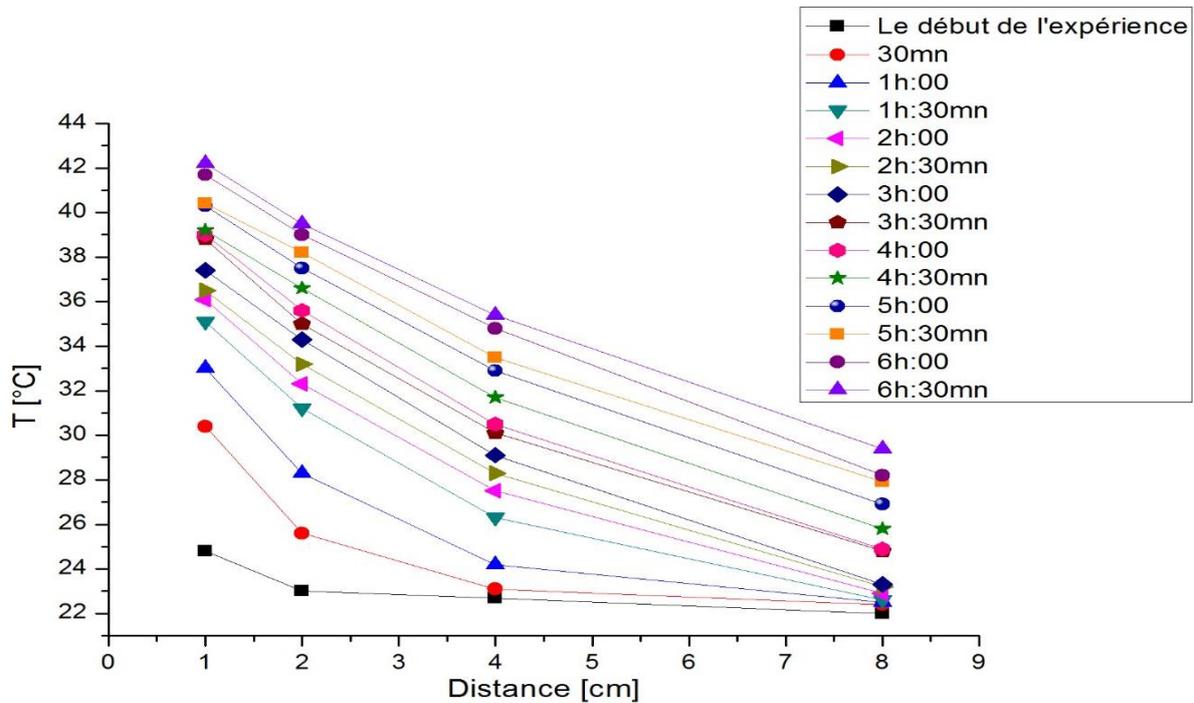
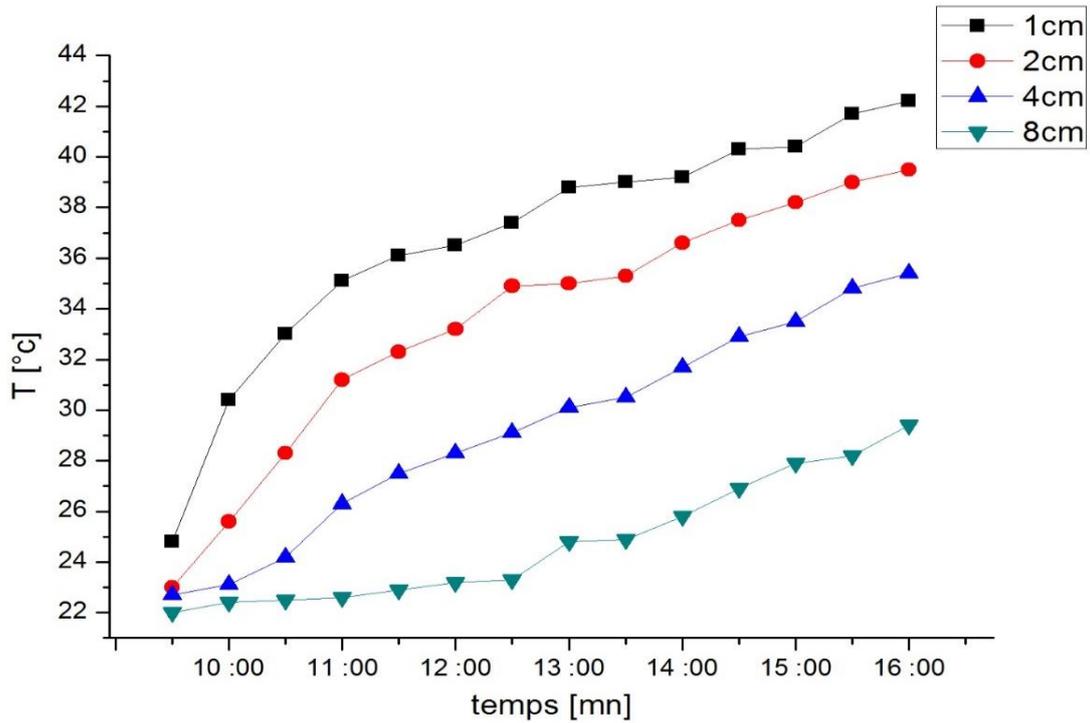


Figure (III-4): Variation de la température du sol en fonction de la distance de l'échangeur durant les heures de l'expérience à coté Ts.

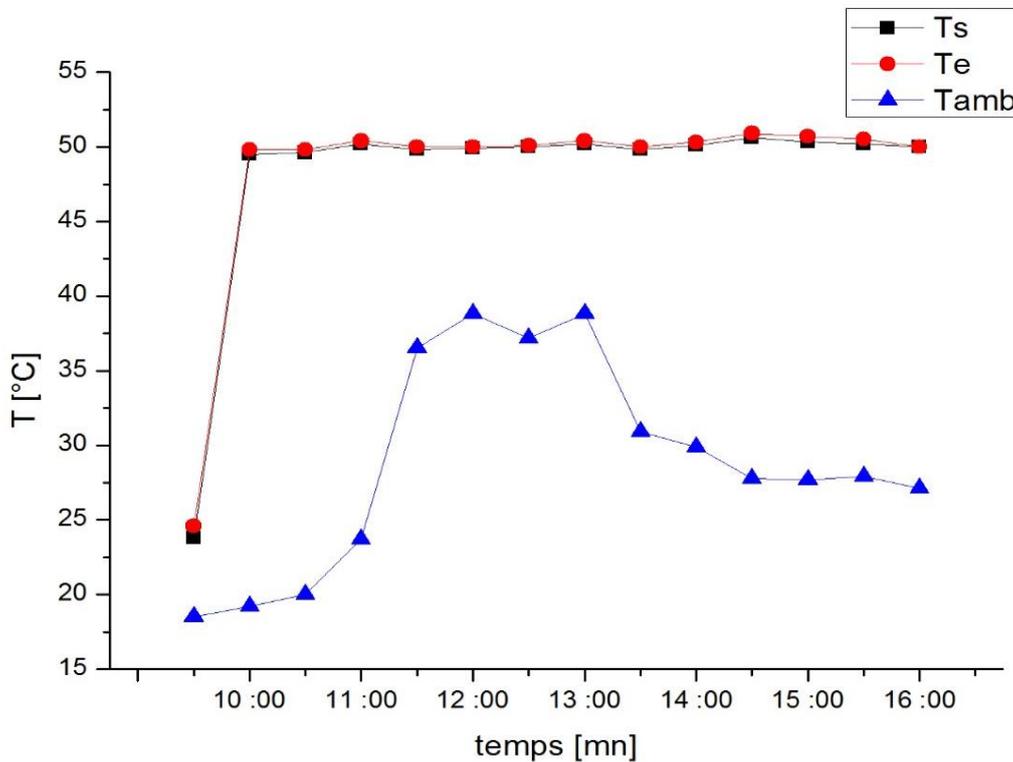
Les courbes de la figure (III-5) traduisent la variation (horizontale) de la température du sol à côté de la sortie de l'échangeur en fonction du temps.

On peut noter qu'une augmentation progressive de la température est enregistrée depuis le début jusqu'à la fin de l'expérience. Les valeurs de T enregistrées sont plus élevées en se rapprochant de l'échangeur.



La figure (III-5): Evolution de la température du sol en fonction du temps à différents points (à côté de la sortie de l'échangeur).

La figure (III-6) présente la variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) durant la deuxième expérience.



La figure (III-6): Variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) en fonction de temps.

2. Variation de la température dans le sens verticale :

Lors de la **troisième expérience**, nous avons placé l'échangeur de chaleur à une profondeur de 60 cm, faisons passer de l'eau chaude jusqu'à 50 degrés, et nous avons mesuré la température à différents points au-dessus de l'échangeur (Verticalement).

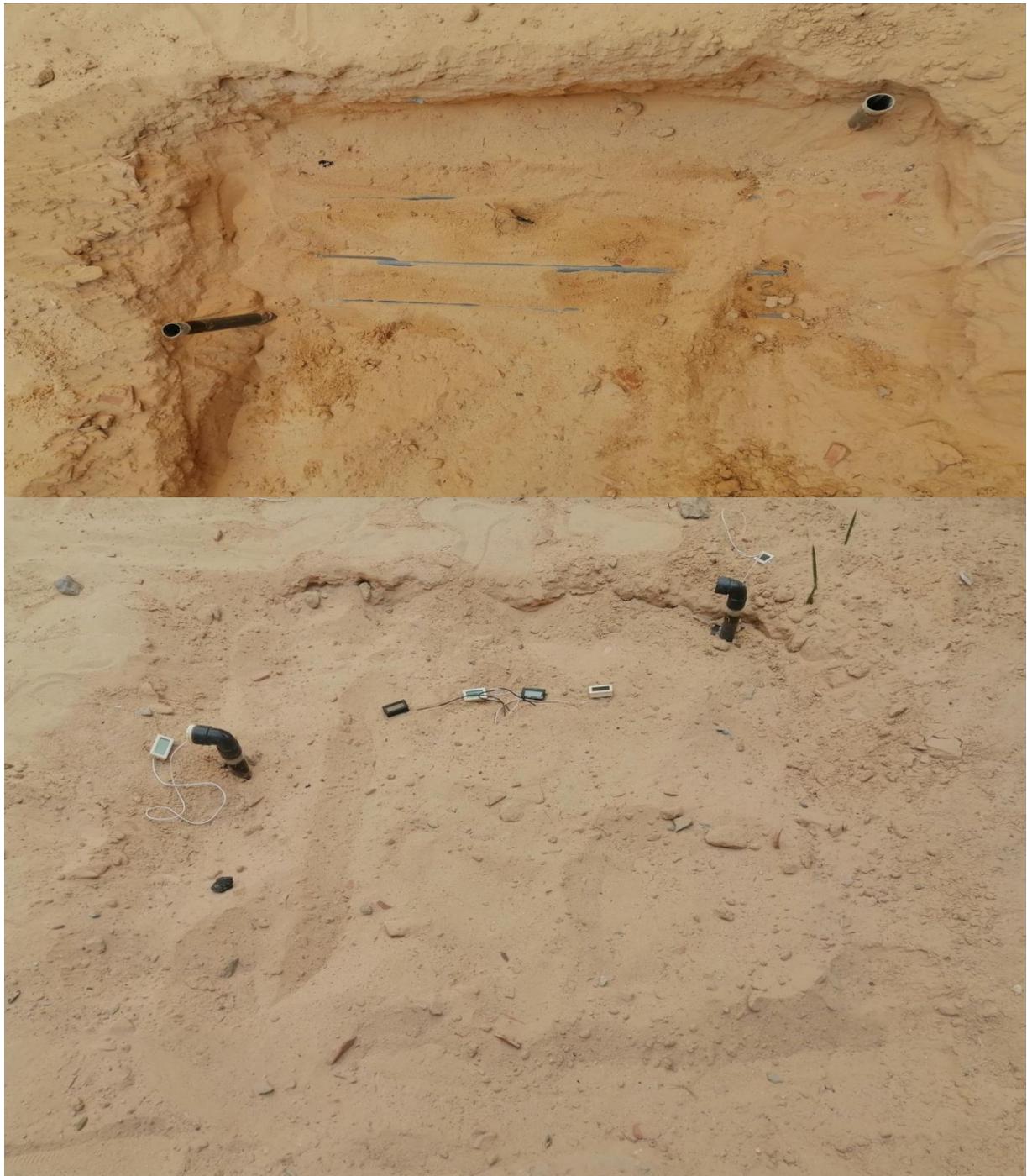


Photo (III-4) : troisième expérience (Mercredi 31 mai 2021).

Tableau (III-3) : Exemple des résultats de Mesure (au-dessus de l'échangeur).

Temps	Tamb	Te	1cm	2cm	4cm	8cm	Ts
9 :00	20,1	21,3	16,4	17,2	16,7	16,5	20,9
9 :30	21,1	48	23,6	18,5	16,7	16,9	46,3
10 :00	22,8	48,7	32,5	26,2	20,3	17,9	47,9
10 :30	23,9	49,1	34,4	29,5	23,5	19,6	48,5
11 :00	23,9	49,3	36	30,9	25,3	20,4	49
11 :30	38,5	50	36,8	32,9	27,1	22,4	49,7
12 :00	39	50	37	33,2	27,4	22,7	49,7
12 :30	40	50	37,1	34	28,6	22,7	49,8
13 :00	41	50,3	38,1	35,1	29,9	26,4	50,2
13 :30	42,9	50,1	38,6	36,2	30,8	27,4	49,9
14 :00	37,9	50,5	39,5	36,9	32,1	29,8	50,3
14 :30	38	50,8	39,9	37	32,9	30,8	50,5
15 :00	38,2	50,5	40,4	37,9	33,8	31,5	50,3
15 :30	31,1	50,5	41,1	38,7	34,4	32,3	50,5
16 :00	31,3	50,5	41,3	39,2	35,2	32,8	50,4

Les courbes des figures (III-7 et III-8) traduisent la variation de la température du sol à différentes positions au-dessus de l'échangeur, durant les heures de l'expérience. Nous rappelons que la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur est égale à 50°C. La figure (III-9) présente la variation des températures (Tamb, Te, Ts) au cours de cette expérience.

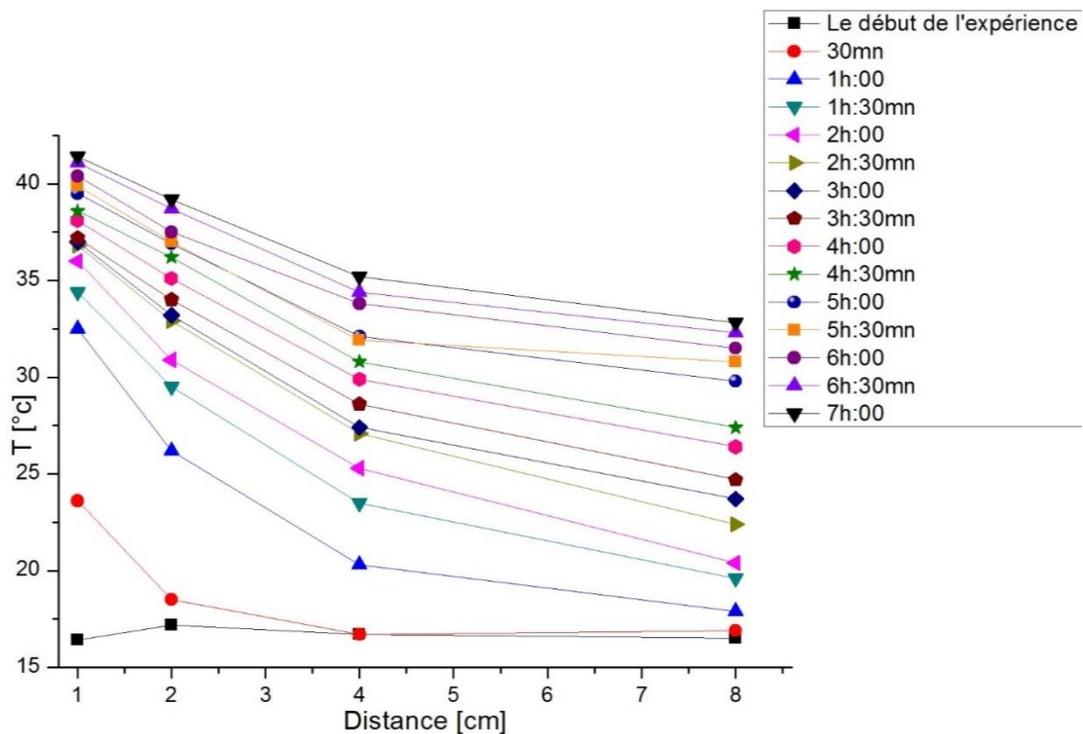
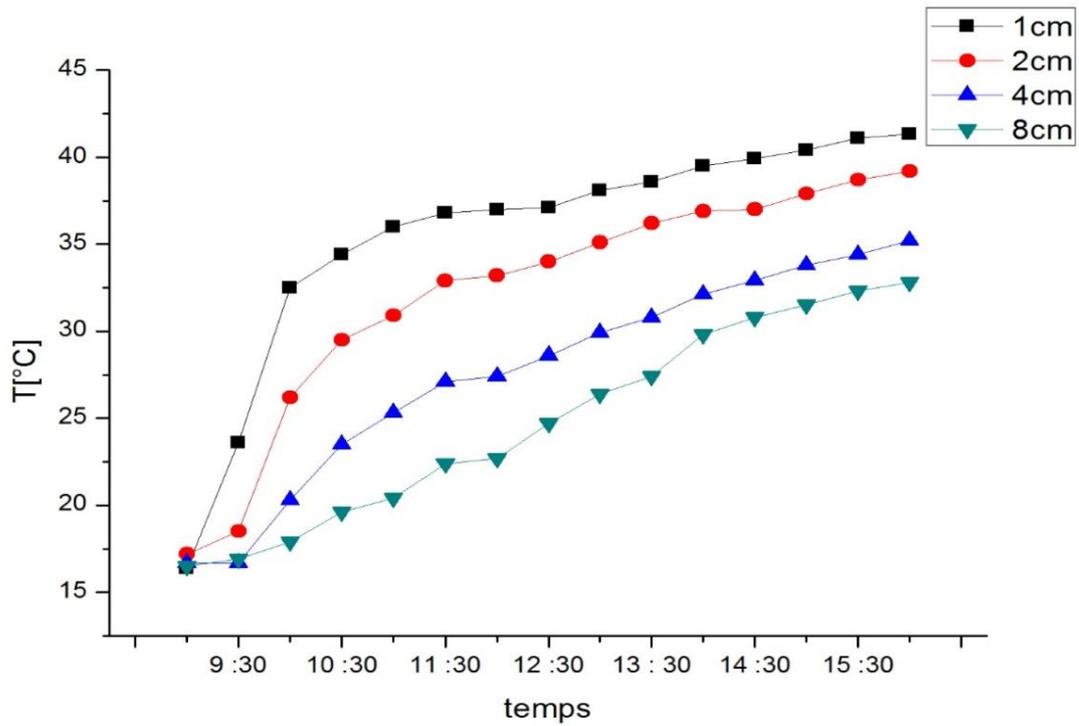
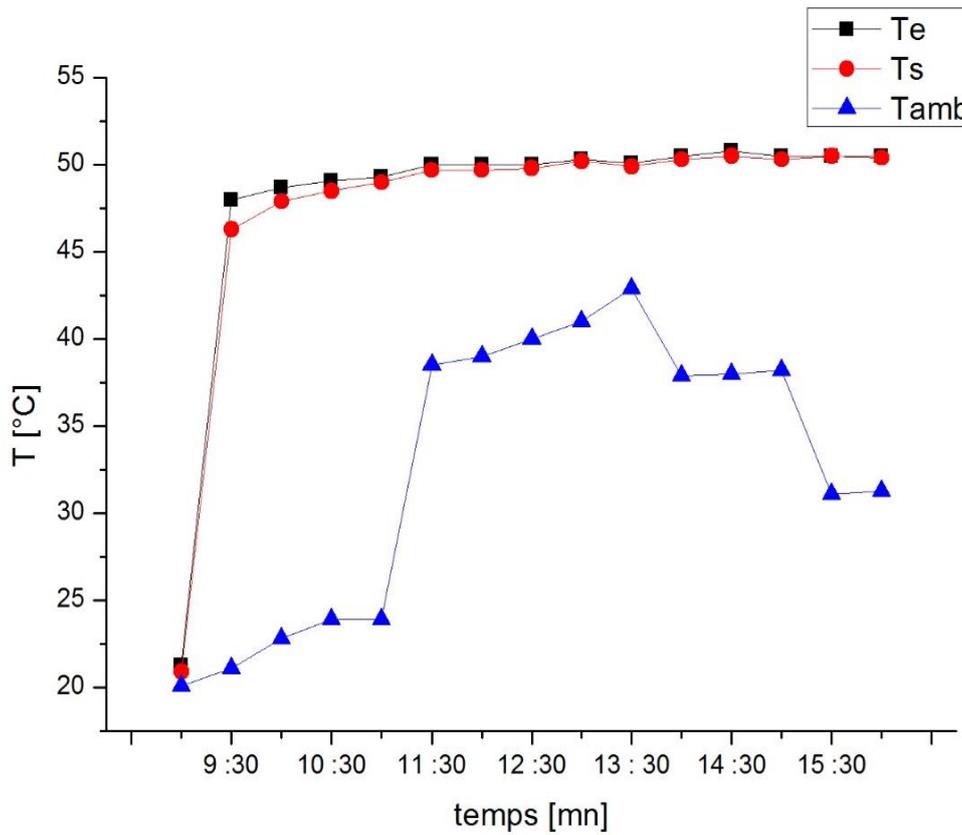


Figure (III-7): Variation de la température du sol à différentes positions au-dessus de l'échangeur en fonction de la distance de l'échangeur.



La figure (III-8): Variation de la température du sol au-dessus de l'échangeur en fonction du temps.



La figure (III-9): Variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) au cours de l'expérience du 31/05/2021.

3. Evolution de la température du sol sous l'effet des conditions climatiques :

Dans cette 4^{ème} expérience : les mesures de température ont été réalisées verticalement à différentes profondeurs dans le sol sous l'effet unique des conditions climatiques. Nous avons commencé les mesures à 9 h jusqu'à 18 h avec un intervalle de temps de 1 heure (photo 5).



Photo (III-5): photo de la 4^{ème} expérience (mercredi 20 avril 2021)

Tableau (III-4) : Résultats des Mesures le 20/04/21.

Temps	Tamb	60cm	50cm	30cm	10cm	1cm
9 :00	25,9	25,6	26	25,5	23,3	25,6
10 :00	24,1	25,6	26	25,5	23,5	25,9
11 :00	25,2	25,4	26	25,3	24,1	27
12 :00	24,9	25,5	26	25,3	24,6	33,4
13 :00	28	25,6	25,9	25,2	24,4	33,9
14 :00	31	25,2	26,3	25,3	25,9	33,7
15 :00	29	25 ,6	26,1	25,3	25,5	33,9
16 :00	29,9	25,6	25,9	25,5	27,1	32
17 :00	28,6	25,6	25,9	25,4	27,3	30
18 :00	27,5	25,5	25,9	25,5	27,5	28

Les figures (III-10 et III-11) présentent l'évolution de la température du sol, selon la profondeur, en fonction du temps jusqu'à une profondeur de 60 cm, sous l'effet unique des conditions climatiques. Nous pouvons remarquer que la température devient plus ou moins stable à partir d'une profondeur de 30 cm.

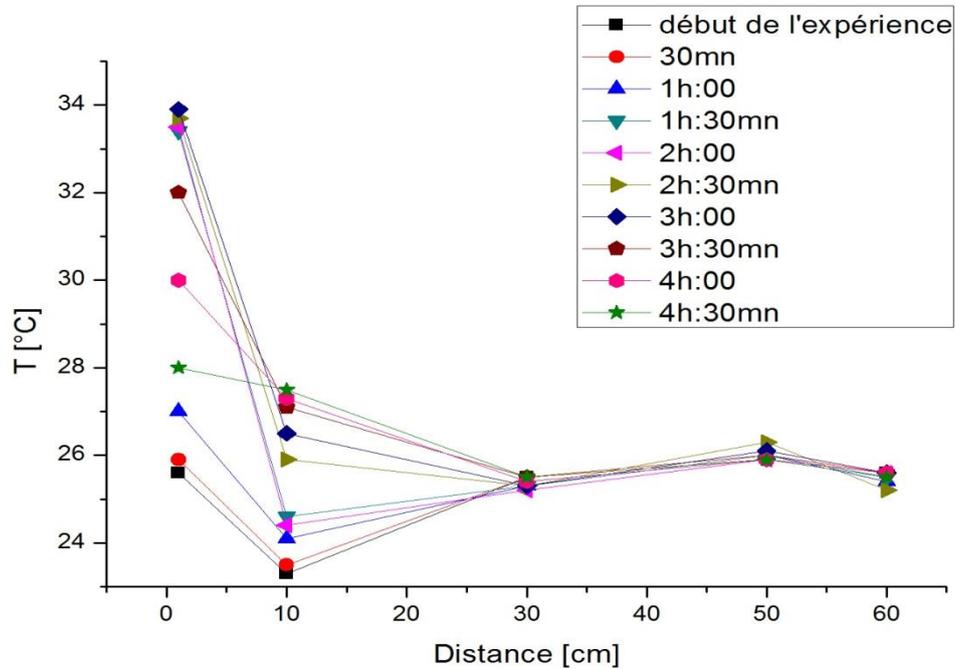


Figure III-10: Evolution de la température du sol à différentes profondeurs en fonction du temps.

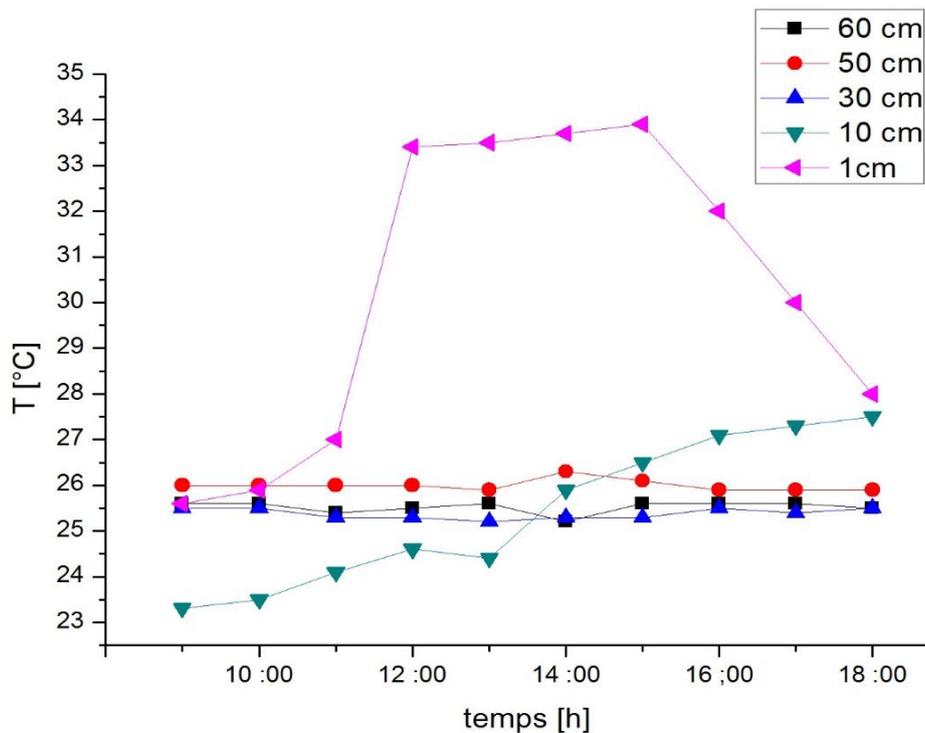


Figure (III-11): Evolution de la température du sol à différentes profondeurs en fonction du temps.

4. Echangeur Air-Sol

Dans la 5eme expérience: nous avons utilisé le même échangeur, mais cette fois avec de l'air qui circule à l'intérieur de 9h00 à 16h00 toutes les 30 mn.



Photo (III-6) :5eme expérience.

Tableau (III-5): résultat de la Mesure à coté l'échangeur (air sol).

Temps	Tamb	Te	1cm	2cm	6cm	10cm	20cm	40cm	Ts
8 :30	29,5	28,3	27,7	28	28,2	28,3	28,4	28,4	28,9
9 :00	30,6	37	28,1	28,1	28,4	28,4	28,4	28,4	33,2
9 :30	31,5	37,4	28,7	28,7	28,7	28,5	28,4	28,4	33,9
10 :00	31,6	37,5	28,9	28,8	28,8	28,6	28,4	28,4	34,4
10 :30	35,1	38,2	29,3	29,2	29	28,6	28,5	28,4	35,3
11 :00	36,7	39,4	29,4	29,3	29,1	28,6	28,5	28,4	36,2
11 :30	42,5	41	29,8	29,6	29,3	28,6	28,5	28,5	37,2
12 :00	45	43	29,9	29,8	29,4	28,7	28,6	28,5	38
12 :30	44	42,8	29,9	29,8	29,5	28,8	28,6	28,5	37,9
13 :00	41	41,7	29,9	29,9	29,5	28,9	28,6	28,5	37,5

Les Figure (III-12 et III-13) présentent la variation de la température du sol en fonction du temps pour différentes distances de l'échangeur.

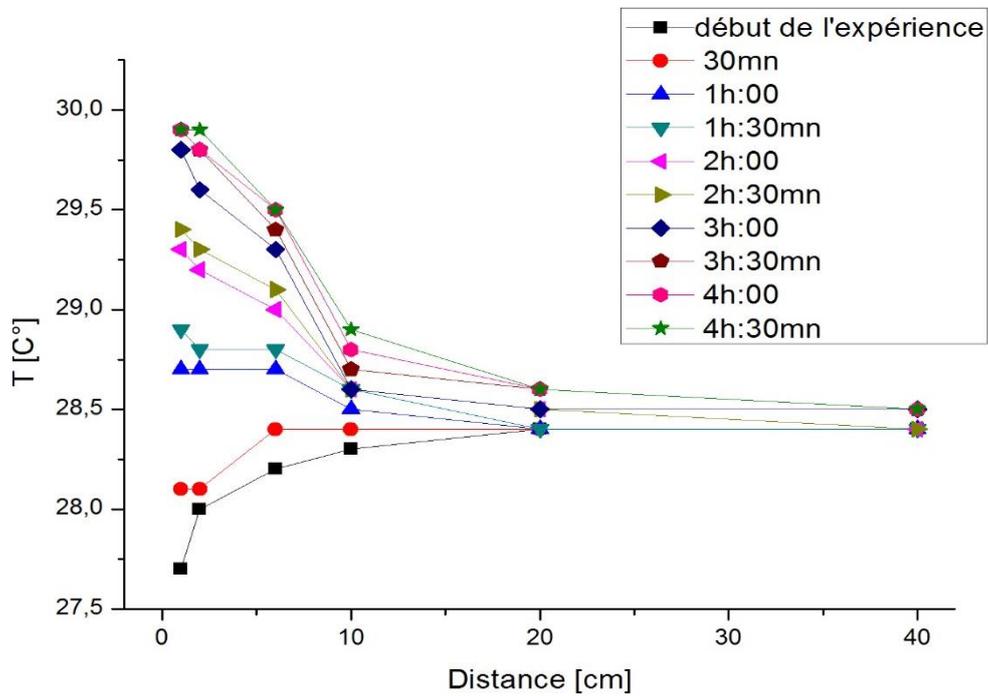


Figure (III-12):Variation de la température du sol en fonction de la distance de l'échangeur durant les heures de l'expérience à coté l'échangeur (air-sol).

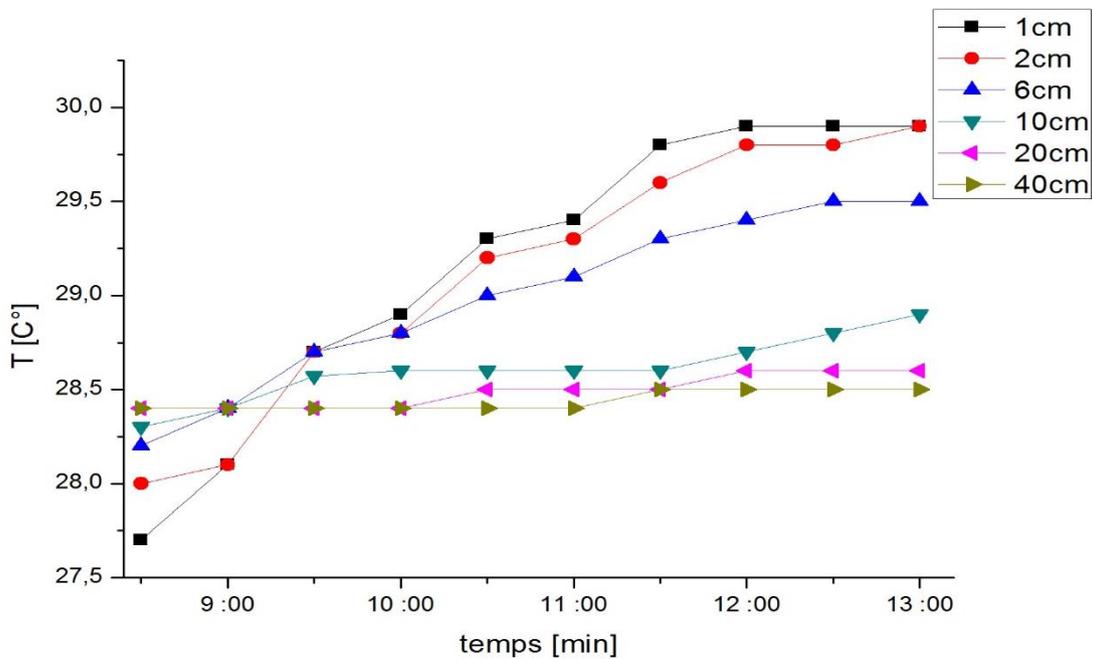


Figure (III-13): Variation de la température du sol en fonction du temps à différentes distances de côté l'échangeur (air sol).

La figure (III-18) présente la variation de la température ambiante et celles de l'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur en fonction de temps.

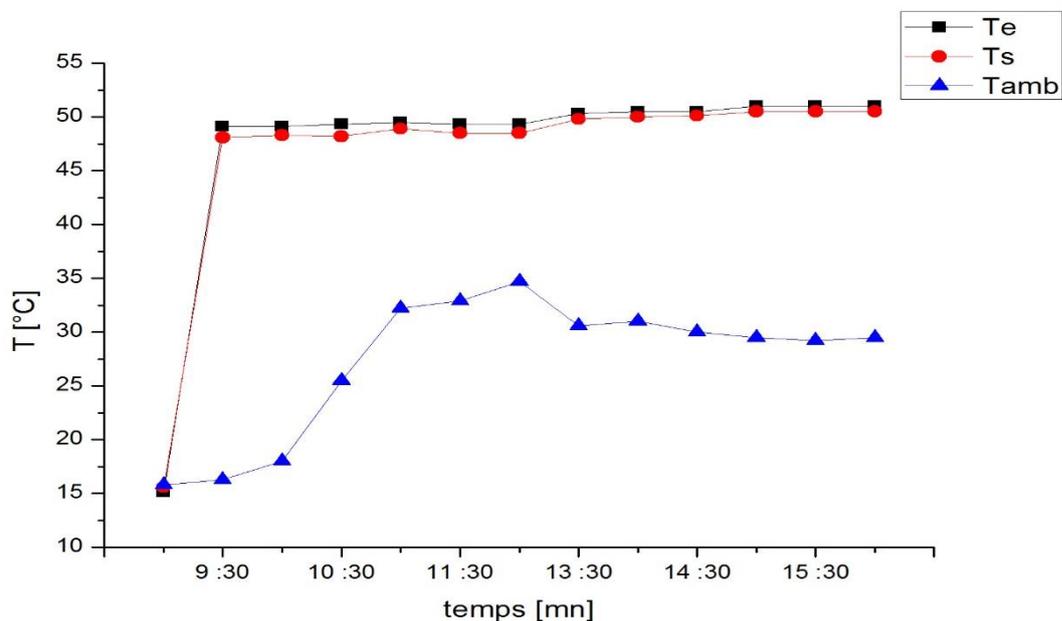


Figure (III-14): Variation des températures (T_{amb} , T_e , T_s) à coté l'échangeur (air sol) en fonction de temps.

5. Conclusion :

Nous avons essayé à travers les expériences menées dans cette partie expérimentale de voir l'interaction thermique entre l'échangeur et le sol, et surtout la propagation de la chaleur dans le sol.

Nous avons essayé d'abord, de prendre une idée sur l'évolution de la température du sol, durant les heures de la journée d'expérimentation, sous l'effet des conditions climatiques et sans l'existence de 'échangeur. Nous avons noté que la température du sol est plus ou moins stable à partir d'une profondeur de 30cm.

Il s'avère à travers les résultats que le transfert de chaleur dans le sens horizontale n'est plus le même que dans le sens vertical, et que la propagation de la température est plus lente dans le sen horizontale, et continue a augmenté en chaque point de mesure dans le sol jusqu'à la fin de l'expérience.

De même, l'utilisation de l'air à induit une interaction thermique entre l'échangeur et le sol. Ceci a été enregistré dans tous les points de mesures.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les meilleures méthodes d'exploitation de l'énergie géothermique dans la région Saharienne. Pour cela nous avons opté à étudier l'évolution de la température, dans les deux sens horizontal et vertical, autour d'un échangeur enterré dans la région de djamaa.

L'utilisation de l'eau chaude comme source d'énergie thermique, nous a permis de tracer les courbes qui présentent l'évolution de la température dans le sol en fonction du temps.

Nous avons essayé à travers les expériences menées dans cette partie expérimentale de voir l'interaction thermique entre l'échangeur et le sol, et surtout la propagation de la chaleur dans le sol.

Les expériences nous ont permis de prendre une idée sur l'évolution de la température du sol, durant les heures de la journée d'expérimentation, sous l'effet des conditions climatiques et sans l'existence de 'échangeur. Nous avons noté que la température du sol est plus ou moins stable à partir d'une profondeur de 30cm.

Il s'avère à travers les résultats que le transfert de chaleur dans le sens horizontale n'est plus le même que dans le sens verticale, et que la propagation de la température est plus lente dans le sens horizontale, et continue a augmenté en chaque point de mesure dans le sol jusqu'à la fin de l'expérience.

De même, l'utilisation de l'air à induit une interaction thermique entre l'échangeur et le sol. Ceci a été enregistré dans tous les points de mesures.