



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA  
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité :** Génie Mécanique

**Option :** Construction Mécanique

**Présenté par :**

*Hammouya Rabah et Djeddai Tahar*

*Thème:*

### Étude thermo-énergétique d'un échangeur géothermique horizontale

*Soutenu Devant le jury composé de :*

Dr : Chahat.A	M.C.B	President
Mr : Messaoudi .A	M.C.B	Encadreur
Dr : Radia.Z	M.C.B	Examineur

*Présenté le /06/2018.*

# Remerciement

Tout d'abord nous remercions le bon Dieu tout puissant de la santé, de la volonté, la patience qu'il nous a donnés tout au long de notre cursus.

Nous tenons à remercier très vivement :

Notre encadreur : Mr \*Messaoudi A\* pour son aide qui nous a fait aimer notre travail.

N'oublions pas de remercier les enseignants de l'université Abbes LAGHDUR et toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de cette étude.

DJEDDAI T \_\_\_\_\_ Hammouya R

# Dédicace

*Je loue Dieu tout puissant qui m'a donné force et Courage pour achever ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ceux que personne ne peut compenser les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon bien être; Esprit de mes très chers parents .A ma chair épouse et ma petite fille bouchra , Sans oublier ma grande famille.*

*A mon encadreur : Mr Messaoudi Aissam*

*A mon bénom : djeddai taber*

*Tous mes amis sans exception*

*Et L'équipe de Génie Mécanique.*

*A tous les enseignants de l'université Abbas Laghrour*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la Réalisation de ce travail.*

*Hammouya Rabah*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire.*

*A mes chers parents ma mère et mon père.*

*A toute ma famille.*

*A mon encadreur : Mr Messaoudi Aissam*

*et mon bénom : Hammouya rabah.*

*A mes camarades.*

*Pour conclut, je le dédie à :*

*Tous les amis de Master 1 (2015-2016) et tous les  
enseignants de Génie Mécanique et de la faculté « Sciences  
et technologie » .*

*DJEDDAI Takar*

## Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: GENERALITES SUR L'ENERGIES RENOUVELABLES .....	2
I.1. INTRODUCTION .....	3
I.2. L'ENERGIE .....	3
I.3. LES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIE.....	4
I.3.1. Les énergies fossiles .....	4
I.3.2. Le nucléaire.....	5
I.3.3. L'énergie renouvelable : .....	5
I.4. LES DIFFERENTES ENERGIES RENOUVELABLES [12].....	5
I.4.1. L'énergie solaire : .....	5
I.4.2. L'énergie hydraulique :.....	7
I.4.3. L'énergie éolienne : .....	7
I.4.4. La biomasse : .....	8
I.4.5. L'énergie de la Terre ou géothermie : .....	9
I.5. LES AVANTAGES DES ENERGIES RENOUVELABLES.....	10
I.6. LA SITUATION ACTUELLE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES.....	12
I.7. L'ENERGIE RENOUVELABLE ET L'AVENIR.....	13
I.8. CONCLUSION.....	14
CHAPITRE II: LES TYPES DES ECHANGEURS GEOTHERMIQUES .....	15
II.1. INTRODUCTION .....	16
II.2. LA GEOTHERMIE .....	16
II.2.1. Définition de la géothermie .....	16
II.2.2. Histoire de la géothermie .....	16
II.2.3. Structure interne du globe.....	17
II.3. TYPES DE LA GEOTHERMIE : .....	18
II.3.1. La géothermie haute énergie :.....	18
II.3.2. La géothermie basse énergie :.....	18
II.3.3. La géothermie très basse énergie. ....	18
II.4. LA GEOTHERMIE DANS LE MONDE.....	20
II.5. LE CHAUFFAGE GEOTHERMIQUE :.....	21
II.5.1. Géothermie Horizontale :.....	21

II.5.2. Géothermie Verticale :	22
II.6. POMPES A CHALEUR GEOTHERMIQUE (PAC)	23
II.7. LES TYPES DES ECHANGEURS(LES CAPTEURS) GEOTHERMIQUE:[13].	24
II.7.1. CAPTEURS POUR FAIBLES PROFONDEURS	24
II.7.2. CAPTEURS POUR MOYENNES PROFONDEURS	31
II.7.3. SONDES COAXIALES	31
II.7.4. PILIERS DE FONDATION	31
II.7.5. CAPTEURS POUR GRANDES PROFONDEURS.	34
II.8. CONCLUSION	36
CHAPITRE III: MODELISATION DE TYPE D'ECHANGEUR QUI ETUDIE	37
III.1. LES EQUATIONS ANALYTIQUES	38
III.1.1. Model de ligne Source	38
III.1.2. model de source cylindre	39
III.1.3. linéique finie (SLF)	39
III.2. BILAN THERMIQUE DE L'ÉCHANGEUR	40
III.2.1. Hypothèses géométriques et thermique simplificatrice	40
III.2.2. Description du problème et géométrie	40
III.2.3. Résistance thermique de conduction :	41
III.2.4. Evaluation du coefficient d'échange par convection	42
III.2.5. Température de l'eau dans le tube	43
III.2.6. Le flux de chaleur dans le tube	44
III.2.7. Le profil de Température sur le tube.	44
CHAPITRE IV: CALCUL NUMERIQUE ET RESULTATS DE SIMULATION	46
IV.1. INTRODUCTION :	47
IV.2. LES DONNEES DE BASE :	47
IV.2.1. Données géographique :	47
IV.2.2. Données Métrologiques de la ville de Biskra :	47
IV.2.3. Données géothermiques :	47
IV.2.3.1. Les Propriétés physiques du sol de la région de Biskra (nature de sol : limon argilo sableux)	47
IV.2.3.2. la température dans le sol :	48
IV.3. STRUCTURE DU CODE DE CALCUL :	49

IV.3.1. Algorithme du programme.....	50
IV.3.2. Sortie des résultats. ....	50
IV.4. RESULTATS DE SIMULATIONS : .....	51
IV.4.1. Effet du débit.....	51
IV.4.2. Effet de la longueur sur température de sortie de l'échangeur.....	54
IV.4.3. Effet de la température en durant toute l'année .....	61
CONCLUSION GENERALE .....	63

*ANNEXE -A- I*

<i>LE PROGRAMME DE CALCUL EN FORTRAN.....</i>	<i>I</i>
---	----------

**Liste des tableaux**

Tableau II-1 : Classés en fonction de la température de l'eau ou de la vapeur récupérée. .	19
Tableau II-2 : Les utilisations de la géothermie à travers le monde. [10] .....	21
Tableau IV-1 : Données Métrologiques de la ville de Biskra [9].....	47
Tableau IV-2 : Les Propriétés physiques du sol de la région de Biskra [9] .....	47
Tableau IV-3 : Valeur de la température de sortie et la variation du flux récupéré Q du sol en fonction de la longueur $L= 40$ m et débit $m=0,25$ kg/s pour une profondeur de 3 mètres en durant toute l'année (avec $T_{ee}$ = la température de l'air ambiant).....	61

## Liste des figures

Figure I-1 : centrale nucléaire de production électrique.....	5
Figure I-2 : l'énergie solaire convertie en électricité.....	6
Figure I-3 : l'énergie solaire convertie en chaleur.....	6
Figure I-4 : Transformation du l'énergie hydraulique en énergie électrique .....	7
Figure I-5 : Principe de fonctionnement du système éolienne pour la production électrique	8
Figure I-6 : Principe de fonctionnement du système biomasse pour la production électrique .....	8
Figure I-7 : Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande pour la production électrique. .....	10
Figure I-8 : Captage du l'énergie géothermique pour le chauffage des locaux.....	10
Figure II-1: Schéma de la structure interne du glob [13] .....	17
Figure II-2 : Carte des ressources géothermiques mondiales. [10] .....	20
Figure II-3 : principe de chauffage géothermie horizontale .....	22
Figure II-4 : principe de chauffage géothermie verticale .....	23
Figure II-5 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur [10].....	24
Figure II-6 : Capteurs en serpentins ou en escargot.....	25
Figure II-7 : Capteurs en anneau .....	26
Figure II-8 : Capteurs en anneau (linéaires et en peigne).....	26
Figure II-9 : Capteurs en spirale .....	27
Figure II-10 : Capteurs en spirale (posées à l'horizontale ou à la verticale).....	27
Figure II-11 : Capteurs en corbeille.....	28
Figure II-12 : Les différents types des capteurs en corbeille.....	28
Figure II-13 : les zones à respecter pour faire un réseau géothermique .....	30
Figure II-14 : le terrain idéal des capteurs à moyennes profondeurs. ....	32
Figure II-15 : capteurs en corbeille moyennes profondeurs .....	33
Figure II-16 : Les différents types de raccordement des capteurs.....	33
Figure II-17 : Le rendement thermique des sondes augmente en fonction de la profondeur .....	35
Figure II-18 : sondes géothermiques à double U.....	36
Figure III-1 : Géométrie de l'échangeur eau-Sol étudié.....	41
Figure III-2 : Résistances thermiques.....	41
Figure III-3 : Tranche du tube de l'échangeur tubulaire eau/sol .....	43
Figure IV-1 : Gradient géothermique pour la région de Biskra [14] .....	48

<i>Figure IV-2 : Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes profondeurs.....</i>	48
Figure IV-3 : Variation de la température de l'eau le long de l'échangeur L=60m pour différents débits d'eau, pour $T_{e,e}=10^{\circ}\text{C}$ ,.....	51
Figure IV-4 : Variation du flux récupéré Q du sol en fonction de la longueur L= 60m pour différents débits. ....	52
Figure IV-5 :Distribution de la température dans l'échangeur pour L=60m et débit m=0.02 m. ....	52
Figure IV-6 : Distribution de la température dans l'échangeur pour L=60m et débit m=0.03 m. ....	53
Figure IV-7 : Distribution de la température dans l'échangeur pour L=60m et débit m=0.04 m. ....	53
Figure IV-8 : Variation de la température de l'eau le long de l'échangeur L=40m pour différents débits d'eau, pour $T_{e,e}=10^{\circ}\text{C}$ ,.....	54
Figure IV-9 : Variation du flux récupéré Q du sol en fonction de la longueur L= 40 m pour différents débits.....	55
Figure IV-10 : Distribution de la température dans l'échangeur pour L= 40 m et débit m= 0.02 Kg/s. ....	55
Figure IV-11 : Distribution de la température dans l'échangeur pour L=40m et débit m=0.03 m.....	56
Figure IV-12 : Distribution de la température dans l'échangeur pour L=40m et débit m=0.4 m. ....	56
Figure IV-13 : Variation de la température de l'eau le long de l'échangeur L=20m pour différents débits d'eau, pour $T_{e,e}=10^{\circ}\text{C}$ ,.....	57
Figure IV-14 : Variation du flux récupéré Q du sol en fonction de la longueur L= 20m pour différents débits. ....	57
Figure IV-15 : Distribution de la température dans l'échangeur pour L=20m et débit m=0.02 m.....	58
Figure IV-16 : Distribution de la température dans l'échangeur pour L=20 m et débit m=0.03 m.....	58
Figure IV-17 : Distribution de la température dans l'échangeur pour L=20m et débit m=0.04 m.....	59
Figure IV-18 : Distribution de la température sur le tube pour L=20m et débit m=0.03 m.60	

## NOMENCLATURE

### Normales

$c_p$	Capacité calorifique massique	[J/kg.K]
$D$	Diamètre de conduite	[m]
$h$	Coefficient d'échange convectif	[W/m <sup>2</sup> . K]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/m K]
$L$	Longueur	[m]
$Q_v$	Débit volumique	[m <sup>3</sup> /s]
$\dot{M}$	Débit massique	
$S$	Surface d'échange	[m <sup>2</sup> ]
$t$	Temps	[s]
$T$	Température	[K]
$V$	Vitesse d'écoulement	[m/s]
$V_m$	Vitesse maximale	
$Z$	Profondeur	[m]

### Lettres Grecques

$\alpha$	Diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
$\beta$	Coefficient de dilatation isobare	-
$\mu$	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Masse volumique	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	Flux thermique	[W]

### Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds
Pr	Nombre de Prandtl
Pe	Nombre de Péclet
Nu	Nombre de Nusselt

### Indices et exposants

x, y, z	Système de coordonnées cartésiennes
r, $\theta$ , z	Système de coordonnées cylindriques
e	Entrée
in	interne
max	maximum
min	minimum
so	Sol

# *Introduction Générale*

---

## **Introduction générale**

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui permet de produire deux formes d'énergie ; l'électricité et la chaleur. Elle peut répondre au concept de cogénération géothermique (production combinée d'électricité et de chaleur).

L'exploitation de l'énergie géothermique est en premier lieu locale. En effet, les centrales géothermiques permettent l'alimentation in situ et des régions avoisinantes par l'énergie d'origine géothermique. Ce type d'installation peut contribuer à la décentralisation de l'énergie et répondre aux besoins en énergie des régions isolées et montagneuses.

En Algérie la climatisation est très énergivore en matière de consommation énergétique (l'électricité et le gaz naturel). Une solution se trouve dans l'exploitation des ressources naturelles non conventionnelles telles que la géothermie. Maîtriser les consommations énergétiques en améliorant l'isolation thermique est la première étape à privilégier. Mais le recours à la géothermie peut permettre d'aller plus loin en raison de son indépendance des éléments climatiques, sa présence locale et son respect de l'environnement. La géothermie consiste à prélever l'énergie présente dans les terrains ou dans les aquifères superficiels pour la transmettre à une habitation via une pompe à chaleur.

Cette technique allie performance énergétique, économique et environnementale pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.

Dans ce sens l'objectif principal de notre travail est l'étude thermo-énergétique d'un échangeur géothermique horizontale qui utilisé pour extraire l'énergie thermique de terrain pour le chauffer ou refroidit des locaux.

Ce travail est alors organisé en quatre chapitres de la manière suivante :

- **Chapitre I** : Généralité sur les énergies renouvelables
- **Chapitre II** : les types échangeurs géothermiques .
- **Chapitre III** : Modélisation de type d'échangeur qui étudié.
- **Chapitre IV** : Calcul numérique et résultats de simulation

# *CHAPITRE I:*

## *Généralités sur l'énergies Renouvelables*

---

Cette partie présenté des définitions et des notions de base sur les énergies renouvelables et leurs applications

## **I.1. INTRODUCTION**

La consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter, influencée par le développement technique, l'accroissement de la population et la croissance économique qui en résulte.

Ainsi le 20ième siècle a vu la population mondiale multipliée par 4 et la consommation énergétique multipliée par 20 ! Au niveau mondial, environ 14% de l'énergie primaire sont fournis par des énergies renouvelables.

Comment fonctionnent-elles ? Quels sont leurs intérêts et leurs limites ?

Pourquoi les développer ? Pourquoi en parle-t-on tant aujourd'hui ?

Avant cela, voici d'abord quelques précisions concernant l'énergie.

## **I.2. L'ENERGIE**

L'énergie est la capacité à fournir un travail.

Il existe 6 formes principales d'énergie :

- L'énergie thermique, ou chaleur.
- L'énergie électrique.
- L'énergie chimique (dans les carburants ou batteries, par exemple).
- L'énergie potentielle, due à la gravité.
- L'énergie cinétique, dans les objets en mouvement.
- L'énergie nucléaire.

L'unité de mesure de l'énergie est le Joule.

La puissance d'un système est l'énergie développée par ce système par unité de temps. Elle correspond donc à un débit d'énergie. Elle se mesure en watts (W).

1 Watt = 1Joule /seconde.

Pour mesurer l'énergie en terme de puissance, on utilise souvent les unités suivantes :

le kilowattheure (kWh) : 1kWh = 3,6 MJ (Mégajoules).

La Tonne d'équivalent pétrole (TEP) : 1 TEP = 42 GJ (Giga joules).

L'énergie est principalement utilisée pour la production d'électricité, la production de chaleur et le transport.

Le système énergétique est l'ensemble des opérations effectuées sur l'énergie, depuis sa source d'approvisionnement jusqu'à son utilisation par l'homme.[12]

**On distingue 4 niveaux d'énergie :**

➤ L'énergie primaire : celle disponible dans la nature (renouvelable ou non).

Exemples : pétrole brut sortant du puits, chute d'eau au pied d'un barrage, énergie lumineuse arrivant sur un capteur solaire, ...

➤ L'énergie secondaire : celle obtenue après transformation de l'énergie primaire.

Exemples : l'électricité produite dans les centrales électriques, le carburant après raffinage du pétrole brut, ...

➤ L'énergie finale : celle qui est transportée et distribuée à son utilisateur.

Exemple : l'essence dans le réservoir, le gaz naturel dans notre cuisinière, ...

Cette énergie finale n'est qu'une fraction (un peu plus de la moitié) de l'énergie primaire.

➤ L'énergie utile : celle juste nécessaire à la satisfaction du besoin.

Exemples : le déplacement en voiture, la cuisson des aliments, l'éclairage des pièces, ...

➤ L'énergie utile ne représente qu'1/3 de l'énergie primaire mise en œuvre.

Deux tiers ont donc été perdus dans l'environnement (sous forme de chaleur).

➤ Les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, les océans, les marées, les végétaux, la chaleur de la Terre, n'ont pas de réserves limitées et se reforment constamment. Elles sont donc renouvelables.

La majorité de ces énergies renouvelables n'a en fait que deux sources : le soleil (qui est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, de la croissance des végétaux) et la Terre.

Par extension, on assimile souvent l'énergie tirée des déchets à une énergie renouvelable : on peut en effet considérer que l'activité humaine ou animale est perpétuelle, et donc source de déchets sans cesse renouvelés.

**I.3. LES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIE**

Il y a trois types principaux d'énergie :

1. Les énergies fossiles
2. L'énergie nucléaire
3. Les énergies renouvelables

**I.3.1. Les énergies fossiles**

Les trois types d'énergie fossiles sont :

1. le pétrole,
2. le gaz naturel,
3. le charbon.

partout dans le monde. Mais ces énergies ne sont pas inépuisables contrairement aux énergies renouvelables.

### I.3.2. Le nucléaire

Cette énergie est très efficace et produit énormément d'énergie que nous utilisons. Malheureusement les déchets des centrales nucléaires sont radioactive pour la planète et donc très dangereuse. C'est pour cela que certains se demandent si c'est vraiment bien d'utiliser le nucléaire.

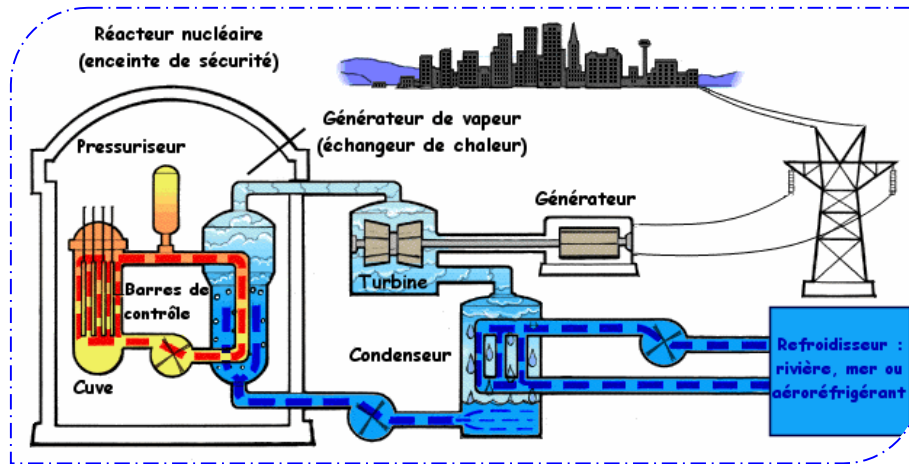


Figure I-1 : centrale nucléaire de production électrique

Une centrale nucléaire est un site industriel utilisant la fission de noyaux atomiques pour produire de la chaleur, dont une partie est transformée en électricité (entre 30 % et 40 % en fonction de la différence de température entre la source froide et chaude). C'est la principale mise en œuvre de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.

### I.3.3. L'énergie renouvelable :

#### Qu'est-ce que l'énergie renouvelable ?

Une énergie renouvelable est une énergie exploitable par l'Homme, de telle manière que ses réserves ne s'épuisent pas. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

## I.4. LES DIFFERENTES ENERGIES RENOUVELABLES [12]

### I.4.1. L'énergie solaire :

Le soleil possède une température de surface de 6000°C, maintenue par de la fusion nucléaire qui s'opère en son sein. Une grande partie de cette énergie est perdue dans l'espace, mais les radiations qui parviennent sur Terre représentent une source constante d'énergie. Ajoutons

que l'énergie solaire est l'énergie renouvelable la plus importante. Elle peut être convertie en chaleur ou en électricité. comme son nom l'indique, l'énergie solaire est l'énergie où l'on se sert du soleil. Pour cette énergie on utilise des panneaux photovoltaïques et des panneaux solaires. La différence entre ces deux si, est que le panneau solaire capte les rayons du soleil tandis que le panneau photovoltaïque n'a besoin que de la lumière.

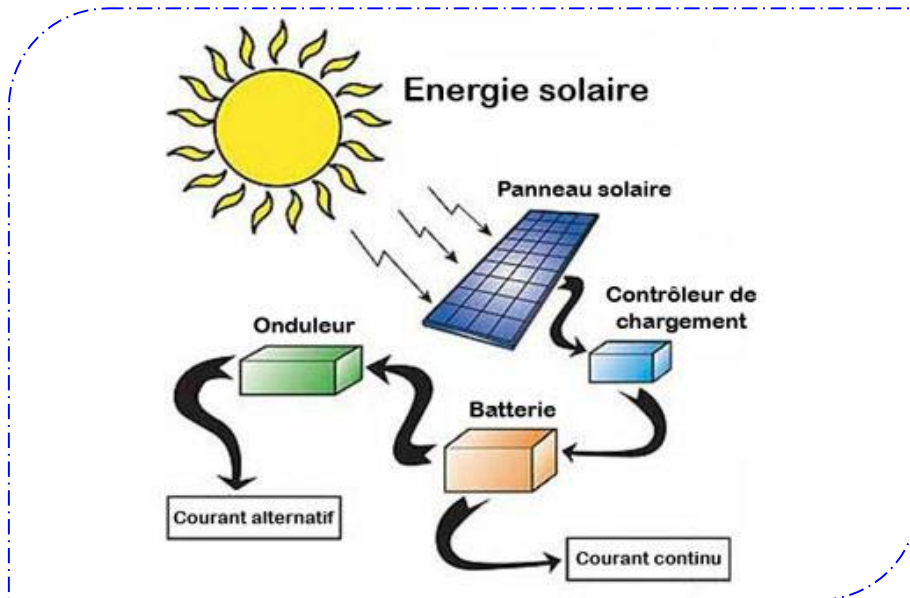


Figure I-2 : l'énergie solaire convertie en électricité

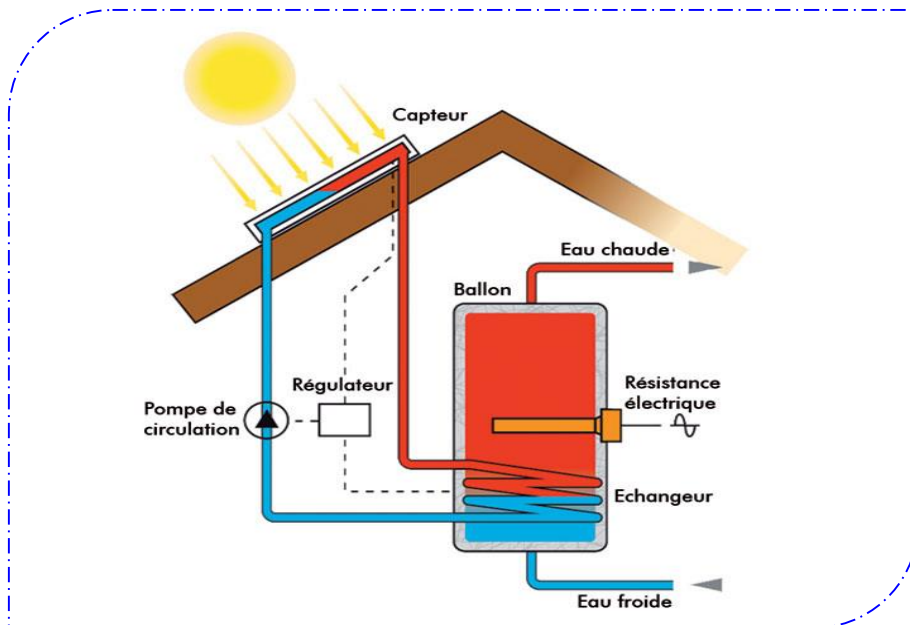


Figure I-3 : l'énergie solaire convertie en chaleur

### I.4.2. L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est la plus ancienne des énergies renouvelables car depuis l'Antiquité, elle est utilisée dans les moulins à eau (ancienne version de nos actuelles centrales hydrauliques).

Cette énergie utilise l'énergie de l'eau pour créer de l'électricité. On parle donc d'hydroélectricité.

Aujourd'hui, on utilise la force de l'eau pour alimenter les turbines de nos centrales hydrauliques et hydroélectriques, des constructions gigantesques qui enjambent des fleuves et rivières, ainsi que de nos grands barrages et petites centrales.

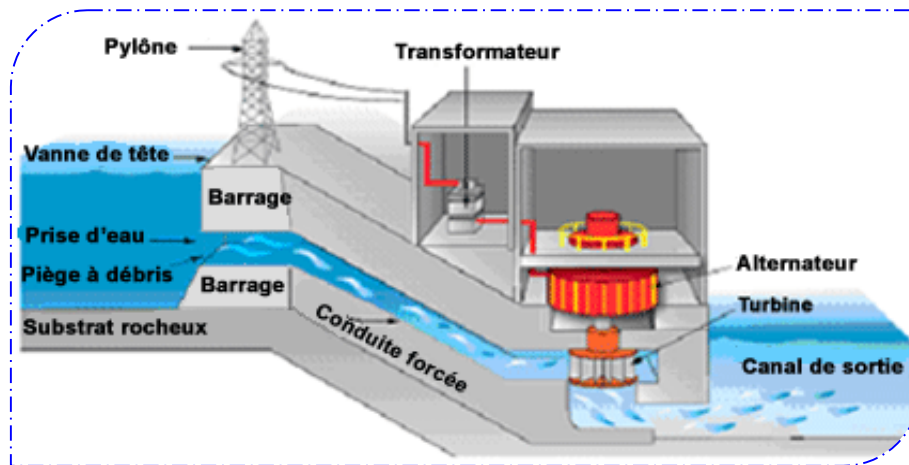


Figure I-4 : Transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique

### I.4.3. L'énergie éolienne :

Le vent est en fait une énergie d'origine solaire. En effet, le rayonnement solaire réchauffe inégalement la surface de la terre et crée ainsi des zones de températures, de densités et de pressions différentes. Les vents sont des déplacements d'air entre ces différentes zones.

L'énergie cinétique du vent va être convertie en énergie mécanique, elle-même généralement transformée en énergie électrique au moyen d'une éolienne.

Une éolienne est composée d'une tour (hauteur de 40 à 120m) surmontée d'un rotor constitué d'un axe horizontal portant (2 ou) 3 pales et actionnant un générateur par le biais d'un multiplicateur de vitesse.

La vitesse du vent est plus élevée en hauteur, puisqu'elle n'est alors plus freinée par les rugosités (arbres, bâtiments, ...) du sol. C'est ce qui explique la hauteur de la tour.

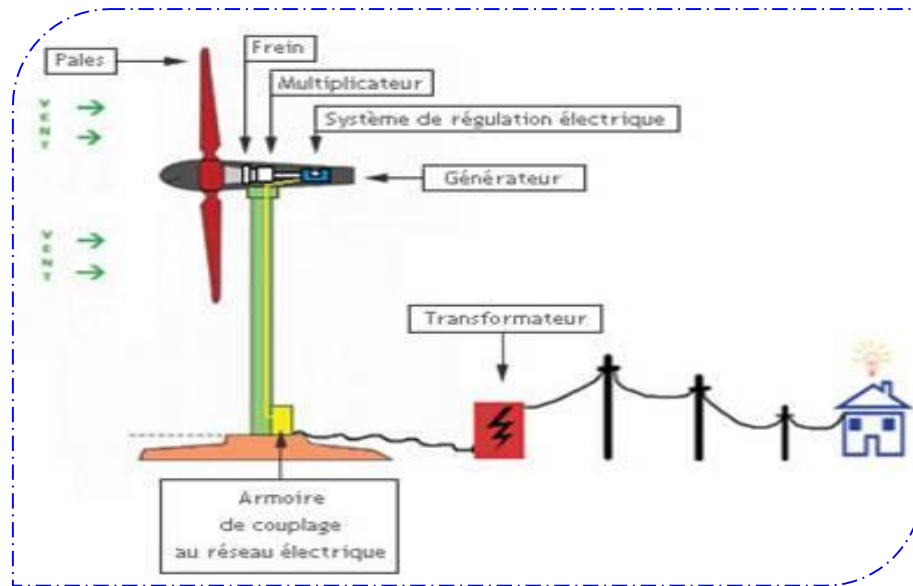


Figure I-5 : Principe de fonctionnement du système éolienne pour la production électrique

#### I.4.4. La biomasse :

On entend par biomasse toute matière organique contenant de l'énergie emmagasinée sous forme d'énergie chimique, généralement au sein de composés de carbone. Elle s'obtient généralement à partir de bois, de fumier, de résidus de récoltes et d'ordures ménagères.

La biomasse est l'énergie renouvelable la plus développée dans le monde, représentant 11% de la production énergétique totale.

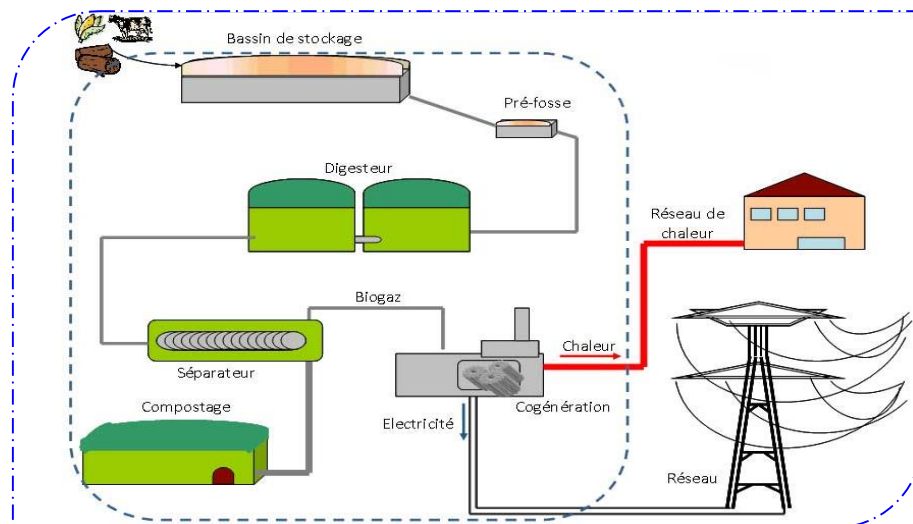


Figure I-6 : Principe de fonctionnement du système biomasse pour la production électrique

#### **I.4.5. L'énergie de la Terre ou géothermie :**

La chaleur de la Terre provient de sa radioactivité naturelle (désintégration de l'uranium, du thorium ou du potassium) qui maintient le magma à haute température.

Le flux de chaleur géothermique à la surface du globe est trop faible que pour être capté.

Ce que l'on va exploiter, c'est la chaleur accumulée dans certaines parties du sous-sol, en général dans des nappes d'eau souterraines.

Alors l'énergie de la Terre ou géothermie elle consiste à transformer la chaleur du sol en électricité grâce à des centrales géothermiques ou pour le chauffage des locaux.

La température du sous-sol à 1000 mètres est en général de 30°C ;

Néanmoins, le flux de chaleur est beaucoup plus fort que la moyenne dans certaines régions à haute activité géothermique (situées sur les pourtours des plaques tectoniques). Là, la température à 1000 mètres de profondeur peut atteindre plusieurs centaines de degrés.

Si des hautes températures (plus de 150°C) sont généralement nécessaires pour fabriquer de l'électricité à partir de l'énergie géothermique, des températures plus faibles sont suffisantes pour produire uniquement de la chaleur.

Mais l'extraction de l'eau chaude stockée en sous-sol va dépendre de la perméabilité de la roche. Si la roche n'est pas assez perméable, on peut la fracturer (en envoyant de l'eau sous pression).

Et si la roche est sèche (faute d'infiltration d'eau de pluie), on peut y injecter artificiellement de l'eau à réchauffer. L'exploitation des roches chaudes sèches permettra sans doute de ne plus limiter la géothermie aux seules formations rocheuses renfermant des eaux souterraines naturelles. Cela augmenterait considérablement le potentiel géothermique.



Figure I-7 : Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande pour la production électrique.

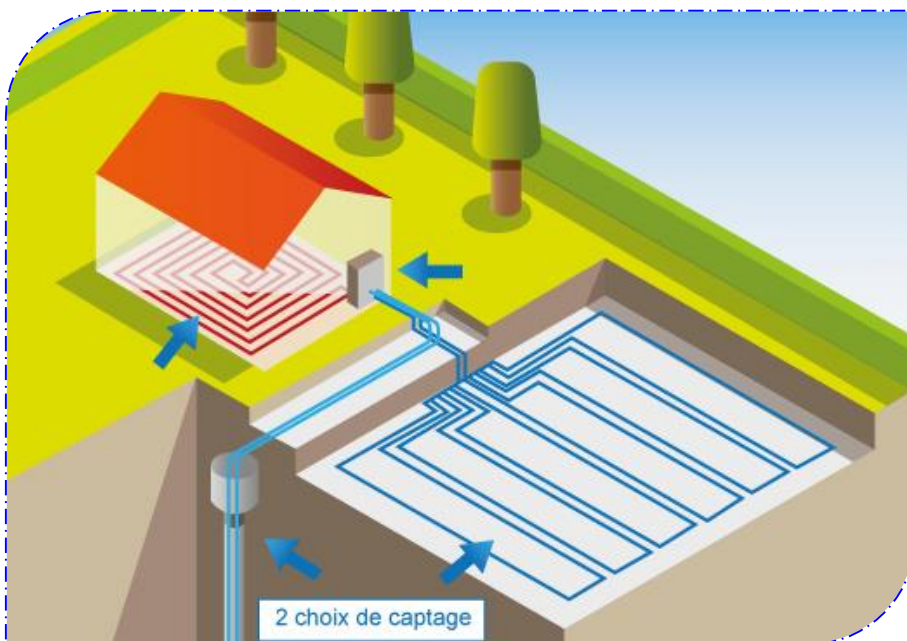


Figure I-8 : Captage de l'énergie géothermique pour le chauffage des locaux

## I.5. LES AVANTAGES DES ENERGIES RENOUVELABLES.

1. Les énergies renouvelables sont plus sûres, il y a moins de risque d'accident et les accidents sont moins conséquents (ex : la fuite de pétrole dans le golf du Mexique a des conséquences désastreuses. Des conséquences pareilles ne pourraient jamais se produire avec des énergies renouvelables).

2. Elles font peu de déchets ou même pas du tout et ceux-ci sont peu dangereux et faciles à gérer. Ce qui est totalement l'inverse de l'énergie nucléaire.
3. Elles respectent l'environnement lors de la fabrication et lors de son fonctionnement.
4. Les énergies renouvelables ne produisent pas de gaz à effet de serre (ou très peu) contrairement aux énergies non renouvelables.
5. Les énergies renouvelables sont inépuisables.
6. Les frais d'installation sont rapidement amortis.
7. Les ressources exploitées sont locales, ce qui permet ainsi un développement durable des économies locales.
8. Elle diminue la dépendance à l'énergie fossile (comme le pétrole) et évite donc certains conflits (comme par exemple la guerre en Irak).

#### **Les désavantages des énergies renouvelables.**

1. Le soleil est disponible partout sur le globe mais n'est présent que 50% du temps et n'est donc pas toujours exploitable. La plupart des autres énergies dépendent du milieu et ne sont donc pas disponible partout et en même temps.
2. Pour le moment, les énergies renouvelables coûtent plus chère que les énergies fossiles.
3. Les producteurs d'énergies renouvelables sont exposés à de grands risques quand ils se lancent dans l'énergie renouvelable. Car ils ne sont pas certains qu'ils pourront vendre toute l'énergie produite, le prix qui dépendent du marché et changent à tout moment et les réglementations données par le gouvernement qui sont énormes et leurs retraits pourraient causer de sérieux problèmes. Toutes ces choses font que moins de personne veulent se lancer là dedans et que donc le prix des énergies renouvelables est élevé.

## **I.6. LA SITUATION ACTUELLE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES.**

D'après certains tests (fait en 2006), les énergies renouvelables produiraient 30% de notre consommation d'énergie par an, ces chiffres sont en constante croissance. La majorité de cette énergie est produite par la biomasse (55%) et par l'hydraulique (29%). En 2000, Ce sont les Etats-Unis qui produisaient le plus d'énergie renouvelable, ensuite l'Allemagne. dans l'union Européenne, ce seraient les Français qui produiraient le plus d'énergie renouvelable, suivis des Suédois puis des Allemands. La Belgique se situe vers la moitié du classement. Ce sont également les Etats-Unis qui investissent le plus dans les énergies renouvelables.

En ce moment, il semble que toutes les mesures climatiques mises en place ne soient pas efficaces.

- Une énorme bureaucratie entrave les investissements.
- L'achat de voitures émettant peu de CO2 diminue tandis qu'augmente celui des voitures qui en émettent beaucoup.
- La Belgique est à la traîne dans le domaine des énergies renouvelables en comparaison avec d'autres pays européens.
- L'activité des deux fours liégeois d'Arcelor-Mittal est prolongée, ce qui nous éloigne davantage des objectifs protocole de Kyoto. Arcelor-Mittal emploie 320.000 personnes réparties dans 60 pays, dont la Belgique. La tension entre emploi et environnement est ici particulièrement manifeste.
- L'incertitude concernant la prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires freine les investissements dans le domaine des énergies renouvelables.

## **I.7. L'ENERGIE RENOUVELABLE ET L'AVENIR...**

En France beaucoup s'inquiètent, les prix du pétrole augmentent. Cette énergie de plus en plus consommée dans le monde va finir par manquer. De plus elle contribue à l'effet de serre. Alors, pour les autorités françaises, il n'y a pas d'autre solution : le nucléaire est indispensable, malgré ses risques et ses déchets radioactifs. En Allemagne les autorités ont décidé de se passer du nucléaire. Est-ce donc possible? En Islande, dès 2030, il ne devrait être consommé que des énergies renouvelables.

Pourquoi ce qui est possible ailleurs ne l'est-il pas en France? Est possible de vivre sans les énergies fossiles et le nucléaire ?

Comme nous l'avons déjà dit précédemment dans le dossier, le nucléaire ne peut pas être considéré comme une énergie renouvelable car il a besoin d'uranium dont les stocks iront forcément en diminuant. De plus il représente un risque important et une source de pollution dangereuse pour très longtemps.

Les énergies renouvelables sont diverses. Il est probable qu'aucune n'aura la capacité, à elle seule, de répondre aux besoins en énergie.

Certaines sources d'énergies renouvelables peuvent être produites dans des lieux et dans des moments où elles ne sont pas nécessaires. Pour pouvoir les utiliser il faut stocker leur énergie. Autrefois nous aurions pu penser à l'usage de batteries. Aujourd'hui il y a beaucoup mieux : stocker l'énergie sous forme d'hydrogène. Cela permet de voir autrement les possibilités des énergies renouvelables.

Au niveau de l'énergie hydraulique par exemple, elle assure actuellement vingt pour cent de l'électricité dans le monde. Cependant c'est seulement dix pour cent de cette énergie qui est exploitée. En théorie la seule énergie hydraulique pourrait fournir deux fois la totalité de l'énergie électrique consommée aujourd'hui dans le monde. Cependant il faut tenir compte des pertes liées au stockage et au transport de cette énergie, et de l'évolution croissante en besoins en énergie.

L'énergie solaire est aussi abondante. Celle qui frappe la terre est estimée à quinze mille fois les besoins en énergie de l'humanité. Seule une petite partie de cette énergie peut être exploitée par des capteurs solaires mais nos besoins ne représentent qu'une minuscule partie de cette énergie.

L'hydrogène est le moyen de stockage le plus approprié pour certaines énergies renouvelables. C'est le cas pour les sources citées auquel il faut au moins ajouter l'énergie issue de l'éolien. La production d'hydrogène peut donc être très importante. Compte tenu de cette abondance et du fait que les énergies renouvelables issues des plantes ne seront pas suffisantes ce sont des véhicules fonctionnant à l'hydrogène qu'il faut construire. Il faut également construire toute une infrastructure pour produire, stocker et distribuer cet hydrogène. La tâche est importante et donc de nombreux emplois sont à pouvoir dans ce domaine.

Aux Etats-Unis, au Japon, en Allemagne... des véhicules fonctionnant à l'hydrogène circulent déjà. En Allemagne la circulation de ces véhicules est médiatisée et la population est préparée à voir des véhicules circulant à l'hydrogène dans leurs rues. En Allemagne également il est possible de trouver aussi des stations services ayant des pompes fournissant de l'huile végétale. L'Allemagne est en avance sur la France dans l'utilisation d'autres sources d'énergies renouvelables. Vous comprendrez alors pourquoi l'Allemagne a renoncé à l'énergie nucléaire et pas la France.

Nous n'avons ici cité que quelques-unes des énergies renouvelables et déjà nous percevons qu'elles peuvent très largement couvrir les besoins de l'humanité.

## **I.8. CONCLUSION**

Les énergies renouvelables présentent de nombreux avantages et certains de leurs défauts pourraient être supprimés. L'énergie renouvelable est donc un milieu très prometteur. Depuis certaines années, tous les pays du monde essaient de développer leur production en énergie renouvelable et cette production est en croissance continue d'ailleurs, ce qui est une très bonne chose.

La géothermie est la deuxième source de production d'électricité dans le monde, mais c'est aussi une source d'échange de chaleur utilisée pour le chauffage urbain, de serre et la pisciculture.

Pour cela, nous avons étudié dans ce travail un échangeur géothermique pour la climatisation urbaine.

## *CHAPITRE II:*

### *Les types des échangeurs géothermiques*

---

## **II.1. INTRODUCTION**

Dans ce chapitre nous traiterons l'énergie de la Terre ou géothermie et plus particulièrement les pompes à chaleurs et les échangeurs géothermique qui exploitent l'énergie thermique du sous-sol.

## **II.2. LA GEOTHERMIE**

### **II.2.1. Définition de la géothermie**

La géothermie est une énergie renouvelable qui consiste à prélevé la chaleur contenus dans le sol.

Le but de la géothermie est d'assurer le confort thermique d'une habitation ou d'une construction en absorbant la chaleur inépuisable contenue dans le sol.

La géothermie permet de chauffer des habitations, des piscines et même de produire de l'eau chaude sanitaire. Elle sert aussi à rafraîchir ou à climatiser sa maison par simple inversion du système, avec le même appareil (« réversibilité »). La géothermie est l'un des rares modes de chauffage qui permette cette réversibilité.

La terre est chauffée à la fois par le soleil, l'air, le vent et l'eau de pluie. Le sol autour d'une maison constitue donc un réservoir qui reçoit en permanence de l'énergie sous forme de calories. Pour capter ces calories puis assurer le confort thermique d'une maison (chauffage, rafraîchissement) ou produire de l'eau chaude.

L'installation géothermique comporte trois éléments majeurs : des capteurs extérieurs, un générateur et un circuit de chauffage à l'intérieur de l'habitation.

La géothermie s'inscrit dans la famille des énergies renouvelables thermiques propres qui contribuent à préserver l'environnement. C'est donc une énergie d'avenir [1]

### **II.2.2. Histoire de la géothermie**

À la fin du 17<sup>e</sup> siècle, à Paris, le physicien et chimiste Lavoisier observe la constance de la température dans le sol. En 1860, Lord Kelvin découvre que la variation de température à une profondeur de 8.1 mètres (26.6 pieds) est de 1/20 par rapport à la température de la surface et n'est que de 1/400 à une profondeur de 16.2 mètres (53.1 pieds). En fait, ces deux découvertes n'étaient que le début de l'étude des sols en général [3].

### II.2.3. Structure interne du globe

Le globe terrestre peut être subdivisé en trois enveloppes principales :

La plus superficielle : la croûte terrestre, a une densité moyenne de 2,7 dans les zones continentales et de 3,3 dans les zones océaniques, son épaisseur varie de 60 kilomètres en moyenne sous les continents à 30 kilomètres sous les océans.

Sous la croûte : le manteau d'une épaisseur de 2900 kilomètres a une densité moyenne de 5,7. Sa température varie de 1000 à 3000°C.

Plus profond : le noyau est constitué d'une enveloppe liquide d'une densité de 10,2 et d'un cœur solide d'une densité de 11,5. La température y atteindrait de l'ordre de 4000°C avec un rayon de l'ordre de 3 470 km [2].

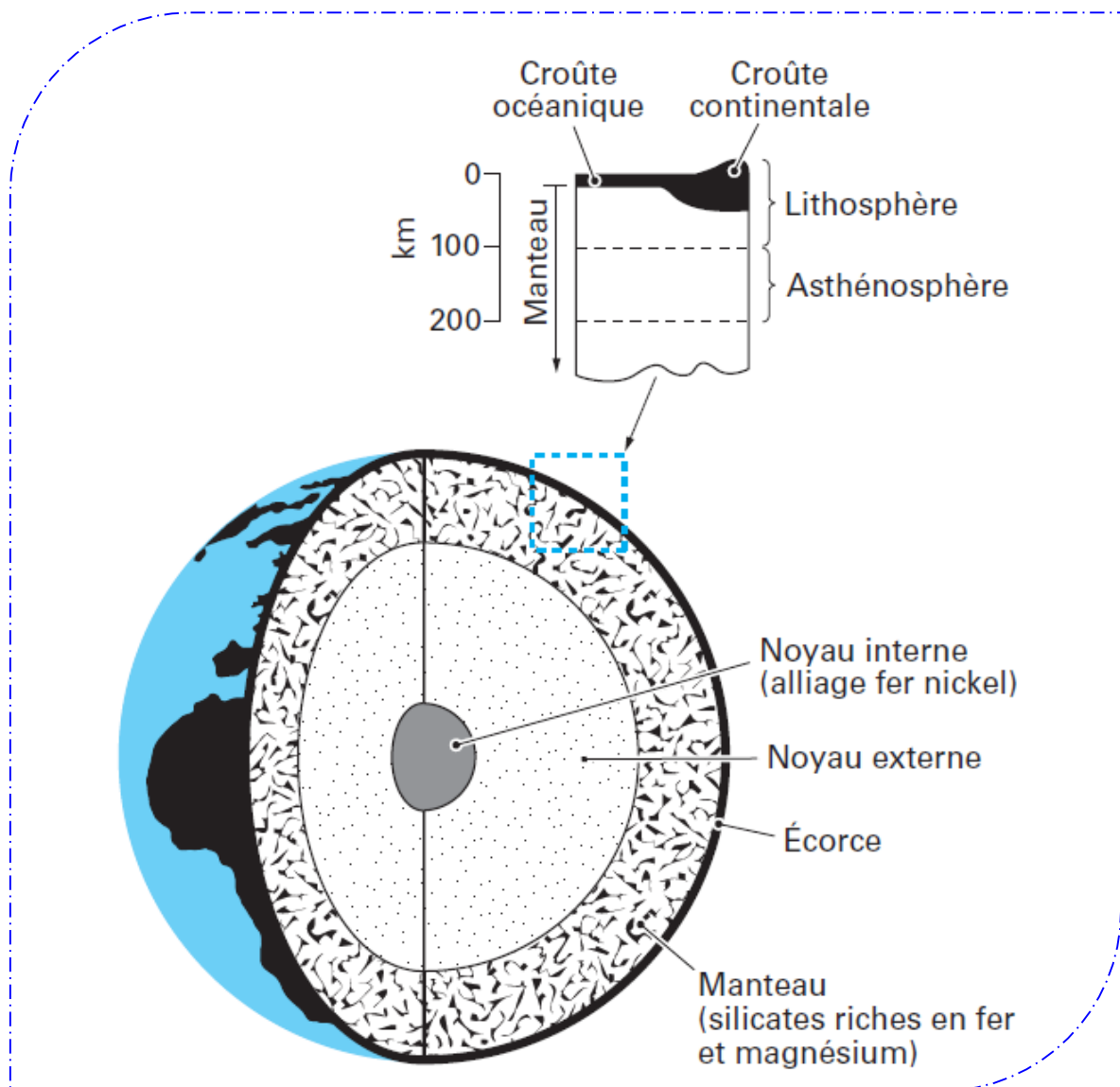


Figure II-1: Schéma de la structure interne du globe [13]

### **II.3. TYPES DE LA GEOTHERMIE :**

L'exploitation de la géothermie dépend du type de gisements et du fluide géothermique existant, ainsi, se distingue trois types de géothermie dans le monde :

#### **II.3.1. La géothermie haute énergie :**

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C. On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques (volcans) et Sismiques (frontières de plaques) ou le gradient géothermique est particulièrement élevé. La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité. La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur.

#### **II.3.2. La géothermie basse énergie :**

On parle de « géothermie basse énergie » lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau entre 30 et 100 °C dans des gisements situés entre 1000 et 3000 m de profondeur (bassin parisien, bassin aquitain...). Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles. La géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 50 ans en moyenne)

#### **II.3.3. La géothermie très basse énergie.**

La géothermie très basse énergie est une géothermie de faible profondeur dans laquelle la température est comprise entre 10 et 30 °C. Dans ce cas, 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 joint un rôle d'inertie thermique.

cette technologie est appliquée à:

- La climatisation.
- Le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

Tableau II-1 : Classés en fonction de la température de l'eau ou de la vapeur récupérée.

Désignation	températures	Utilisations			
La géothermie de haute énergie	sup. à 150°C	■	■	■	■
La géothermie de moyenne énergie	100°C à 150°C	■	■	■	■
La géothermie de basse énergie	30°C à 100°C	■	■	■	■
La géothermie de très basse énergie	inf. à 30°C	■	■	■	■




Légende du tableau

code	Désignation
■	Production d'électricité
■	Chauffage urbain
■	Chauffage de serres
■	Chaleur pour processus industriels
■	Thermalisme
■	Nécessite la mise en œuvre de pompes à chaleur

## II.4. LA GEOTHERMIE DANS LE MONDE

Actuellement, quelques 50 pays utilisent leurs ressources géothermiques à un stade industriel plus ou moins avancé. Les ressources de vapeur à haute température et haute pression sont essentiellement exploitées pour produire de l'électricité. Une vingtaine de pays (USA, Philippines, Mexique, Italie, Nouvelle-Zélande, Indonésie, Japon, Islande, etc.) totalisent une puissance installée les ressources à moyenne ou basse température servent pour des usages directs, en majorité le chauffage de bâtiments et de serres.. Depuis, bien d'autres pays ont à leurs tours investis dans ce domaine, c'est le cas du Japon, du Mexique, du Salvador, de l'Islande et de la Turquie. L'énergie géothermique est l'une des plus importantes sources d'énergies renouvelables dans le monde. Les utilisations de cette énergie sont multiples. Elles vont des utilisations directes telles que la pisciculture, le chauffage des serres et aux utilisations industrielles telle que la production d'électricité [4].

La Figure II 2 représente les zones des ressources géothermiques dans le monde entier.

-  Zones propices au développement de la géothermie haute énergie.
-  Zones favorables à la géothermie basse énergie (bassins sédimentaires)
-  Zones de socle cristallin réservées pour la très basse énergie.

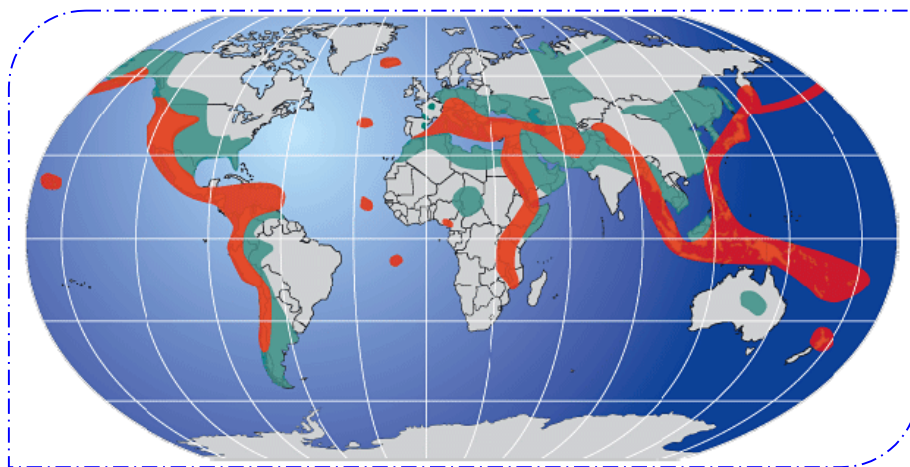
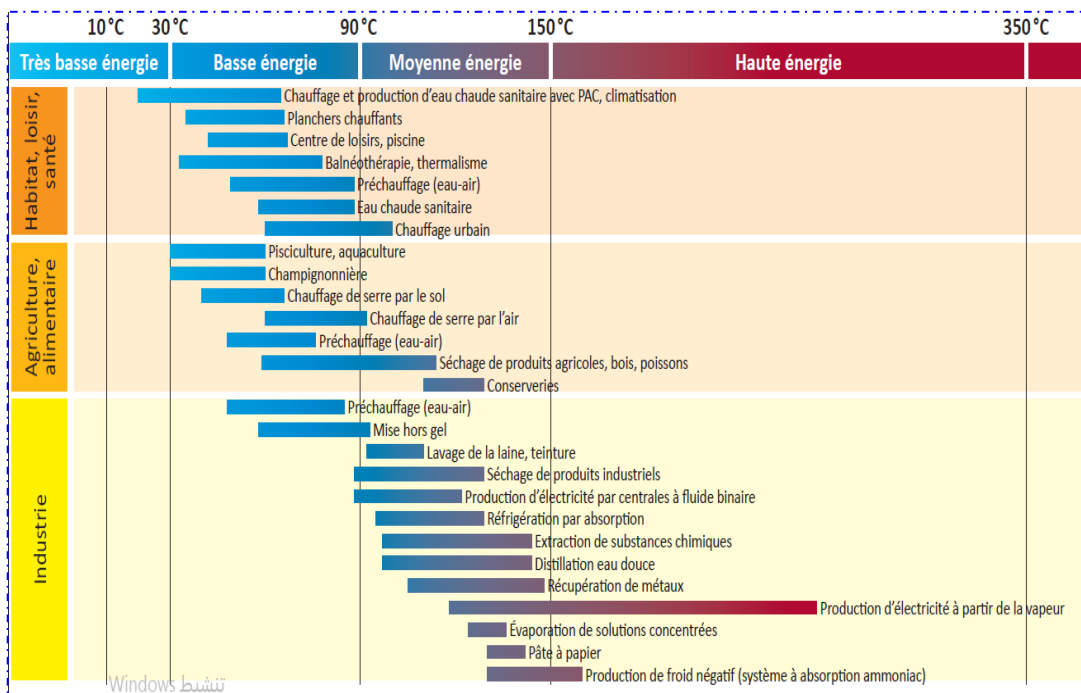


Figure II-2 : Carte des ressources géothermiques mondiales. [10]

La récapitulatif des types & usages des énergies géothermiques peut être présenté sur le (Tableau II 2)

Tableau II-2 : Les utilisations de la géothermie à travers le monde. [10]



## II.5. LE CHAUFFAGE GEOTHERMIQUE :

**Se chauffer par Géothermie c'est extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage**

La chaleur croit à mesure que l'on s'éloigne de la surface de la terre. La géothermie consiste à installer un circuit d'échange de calories entre le sol et un liquide chargé d'assurer le transport des calories : c'est le principe de la pompe à chaleur.

Il existe des systèmes de géothermie de surface (installés horizontalement, ils nécessitent un terrain d'une certaine surface) ou de géothermie profonde (en creusant des puits assez profonds à la verticale).

Aujourd'hui, le terme "géothermie" désigne de façon la plus large les systèmes de pompes sol/eau qui permettent de récupérer les calories gratuites du sous-sol et de chauffer à coût réduit les logements.[9]

### II.5.1. Géothermie Horizontale :

#### le principe

Un stock de calories est accumulé dans la couche superficielle du terrain et est régénéré en permanence par la pluie, le soleil et l'effet du vent.

Le capteur horizontal sol/eau enfoui à environ 80 cm de profondeur récupère cette chaleur par l'intermédiaire d'une circulation d'eau glycolée et d'une thermopompe. La restitution à l'intérieur du logement est assurée par un plancher chauffant ou par ventilo-convecteurs.

La surface de captage varie de 1,5 à 2 fois la surface de la maison. Cette technique est utilisée avec succès depuis plusieurs décennies en France. un réseau de tuyaux dits "capteurs", est alors installé sur un lit de graviers, puis protégé par un grillage avertisseur.

Il est ainsi possible de récupérer jusqu'à 75% des calories nécessaires au chauffage par ce moyen.[9]

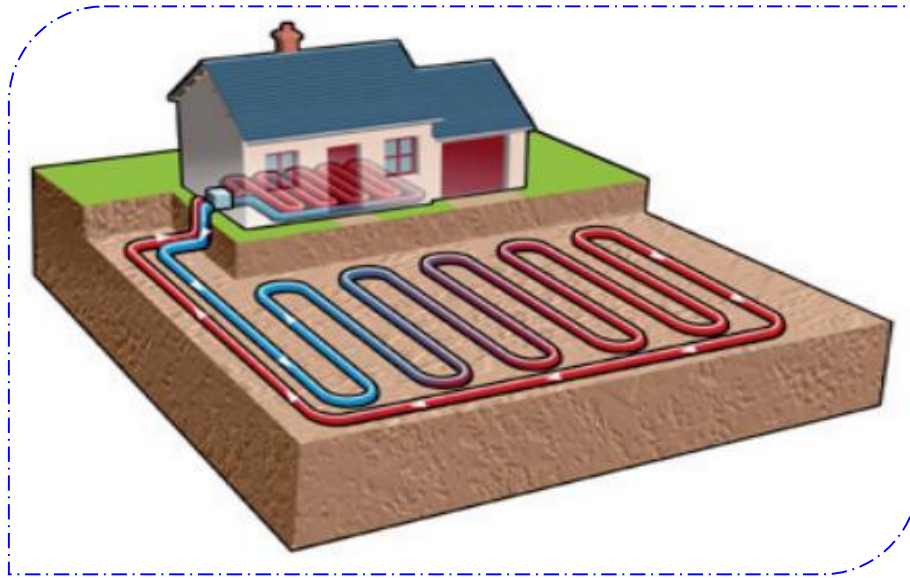


Figure II-3 : principe de chauffage géothermie horizontale

### II.5.2. Géothermie Verticale :

#### le principe

100 mètres de profondeur la température est généralement de 15°C. Une circulation d'eau glycolée dans des tubes en polyéthylène remonte cette chaleur sur une thermopompe. Cet appareil multiplie cette énergie grâce à un compresseur et la transfère dans le plancher chauffant de l'habitation.

Le chauffage complet d'une maison peut ainsi être assuré. Cette technique est très répandue en Allemagne et en Suisse. Le terrain reste disponible pour des plantations ou des aménagements ultérieurs. La sonde géothermale est introduite dans un forage réalisé par nos équipes.

Il est ainsi possible de récupérer jusqu'à 75% des calories nécessaires au chauffage par ce moyen.[9]

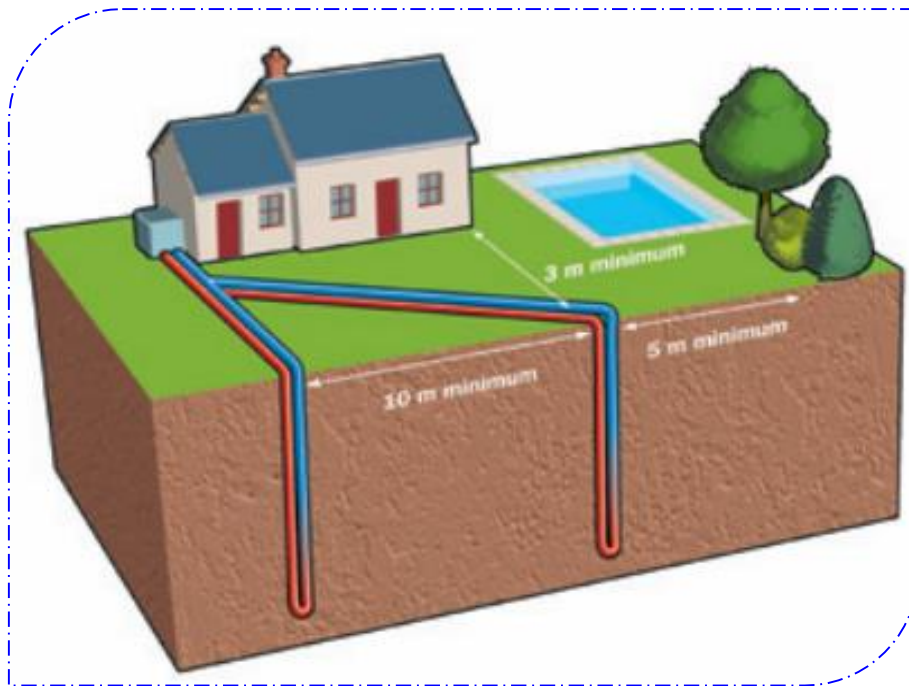


Figure II-4 : principe de chauffage géothermie verticale

## II.6. POMPES A CHALEUR GEOTHERMIQUE (PAC)

Le rayonnement du soleil et les conditions climatiques ont une influence sur la température terrestre des premiers mètres du sous-sol. Le sol et l'eau dont il est gorgé sont donc réchauffés. Ce n'est pas très chaud, mais c'est suffisant pour pouvoir chauffer une maison... à condition d'installer une pompe à chaleur géothermique. Il s'agit d'un équipement qui fonctionne exactement comme le réfrigérateur qui trône dans ta cuisine, mais à l'envers. La pompe à chaleur géothermique, elle, capte la chaleur du sol pour la ramener à l'intérieur des bâtiments. Cependant, pour bien fonctionner tout au long de l'année, il faut qu'elle soit installée dans une zone où la température du sous-sol est stable (c'est-à-dire qu'elle reste la même tout au long de l'année).

Au final, le bilan reste intéressant car même si elle nécessite un peu d'électricité pour fonctionner, la pompe à chaleur géothermique peut fournir jusqu'à 60 % des besoins en énergie pour chauffer une maison.[10]

alors les (PAC) ce sont des appareils capable de capter de la chaleur d'une source de température plus basse. Ils sont essentiellement composés d'un circuit fermé, dans lequel est comprimé et détendu en permanence, un fluide spécifique.

À chaque compression et à chaque détente (c'est à dire à chaque cycle de travail), le fluide prend un peu de chaleur à la source froide et la cède à la source chaude.

En inversant le cycle de travail, ces appareils peuvent être utilisés aussi bien pour le chauffage que pour le rafraîchissement.

Les performances des PAC sont généralement définies par deux coefficients  $\varepsilon$  données par les Constructeurs : (1) le coefficient correspondant au seul fonctionnement du compresseur et (2) le coefficient COP, correspondant au fonctionnement du compresseur et des organes auxiliaires.

Par exemple, si la valeur du COP est égale à 4, cela veut dire que pour 1 kW d'énergie électrique absorbée par le compresseur, on récupère (de la source froide à la source chaude) 4 kW de chaleur.

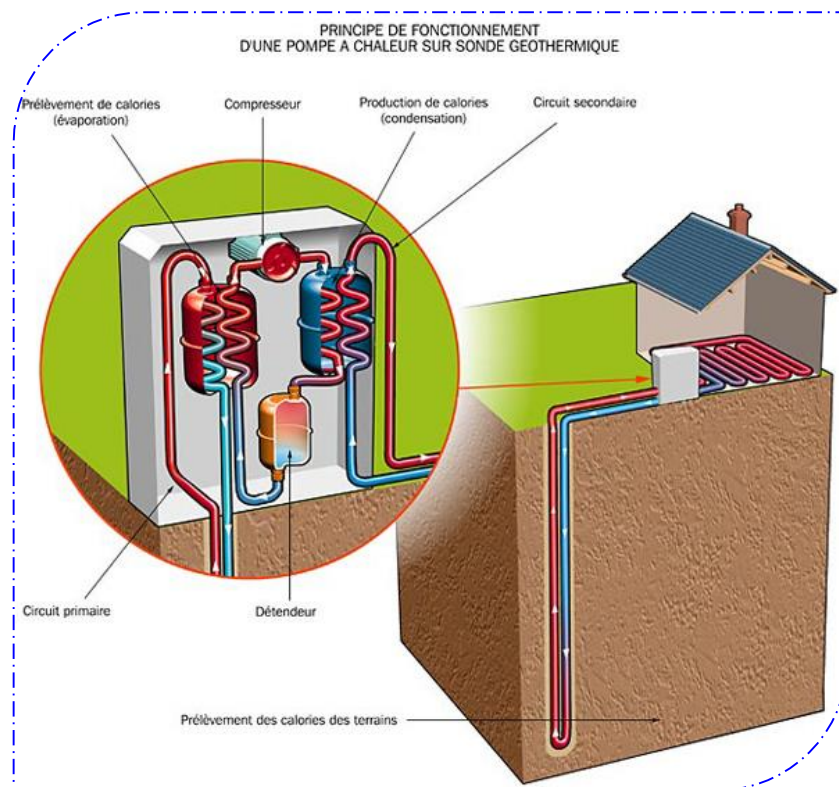


Figure II-5 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur [10]

## II.7. LES TYPES DES ÉCHANGEURS (LES CAPTEURS) GÉOTHERMIQUE: [13]

### II.7.1. CAPTEURS POUR FAIBLES PROFONDEURS

Ces capteurs sont réalisés avec des tubes plastiques. Leur profondeur varie entre 0,8 et 4,0 m.

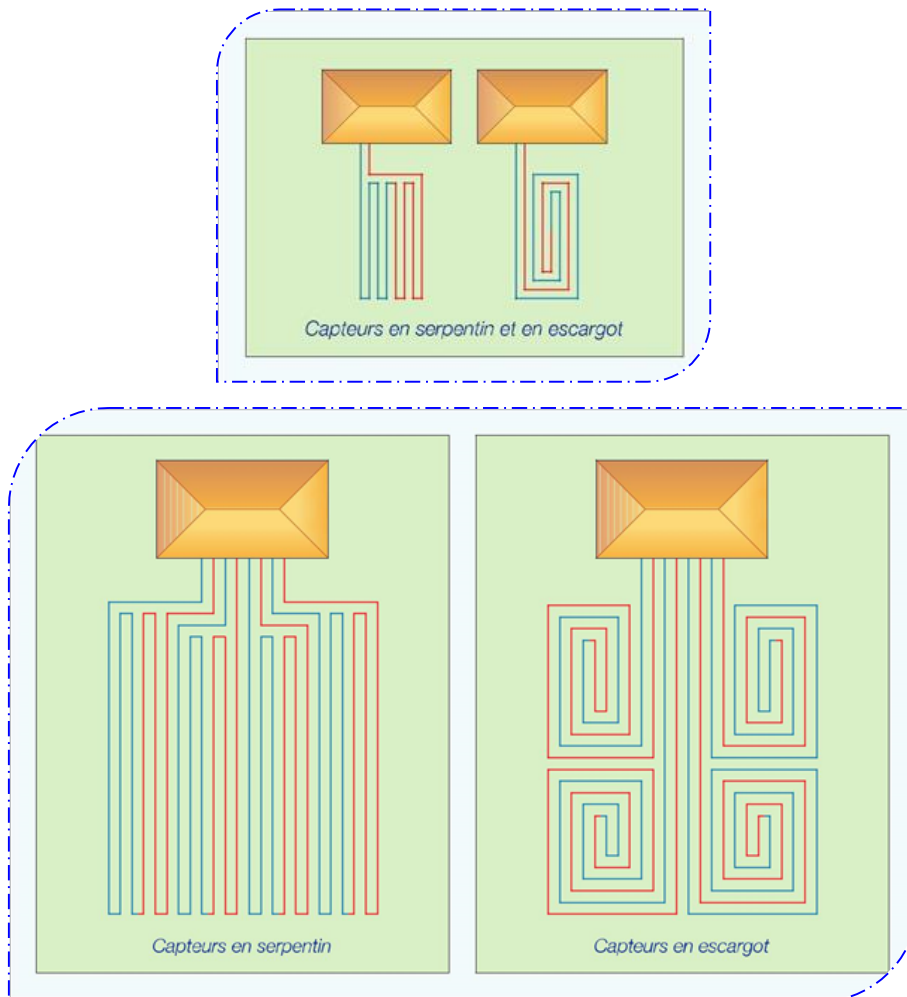
Par rapport aux capteurs pour grandes profondeurs, ils ont un faible impact environnemental et un faible coût d'installation. En outre, étant donné qu'ils se posent à des profondeurs correspondant à d'autres structures de bâtiments (sous-sols, caves, etc.), il n'y

a pas, en général, d'autorisation spécifique à demander aux Autorités compétentes pour procéder à leur pose.

Par contre, ces capteurs requièrent des superficies d'exploitation très étendues : cette exigence restreint, en pratique, leur utilisation pour les petites ou moyennes installations.

Leurs principales géométries d'exploitation peuvent être classifiées ainsi :

- Capteurs en serpentín ou en escargot,



*Figure II-6 : Capteurs en serpentín ou en escargot*

➤ Capteurs en anneau,

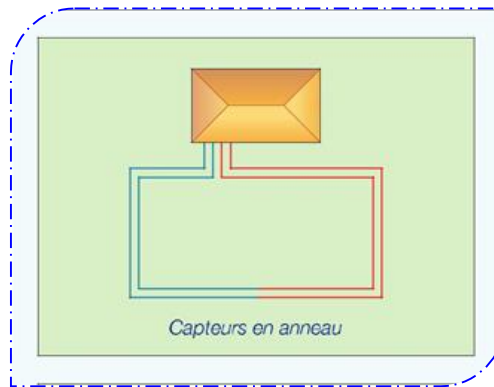


Figure II-7 : Capteurs en anneau

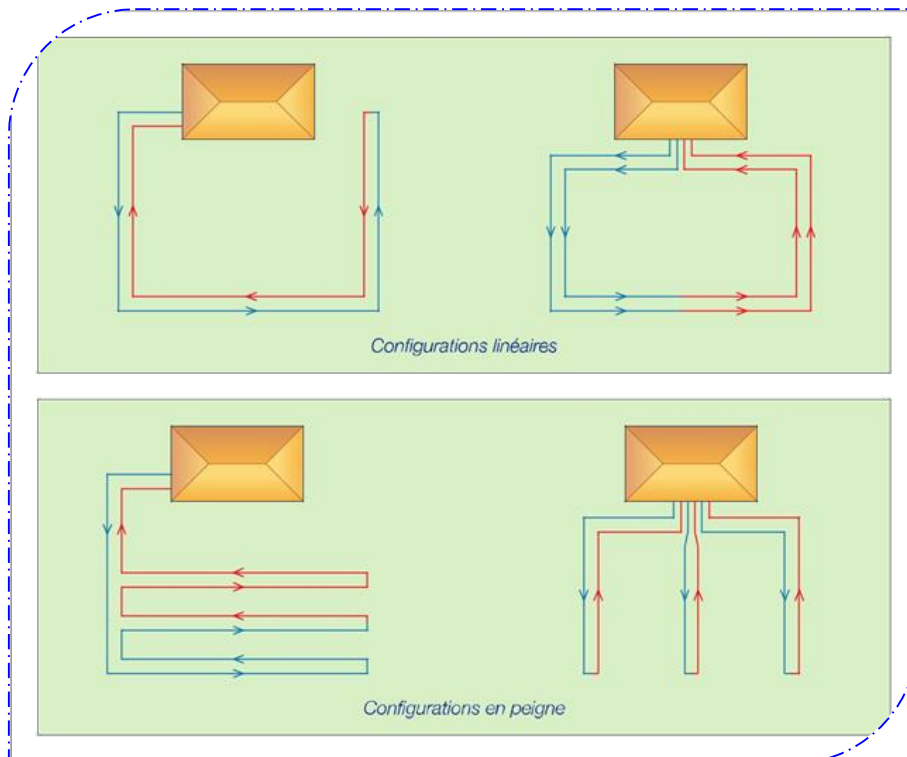


Figure II-8 : Capteurs en anneau (linéaires et en peigne)

➤ Capteurs en spirale,

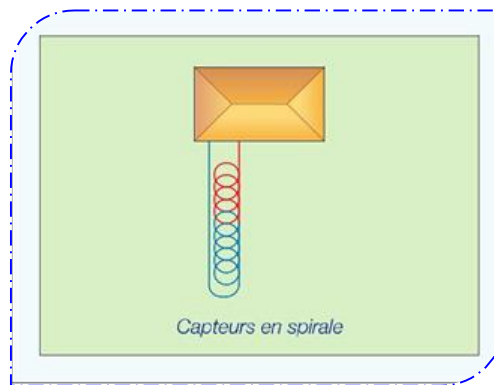


Figure II-9 : Capteurs en spirale

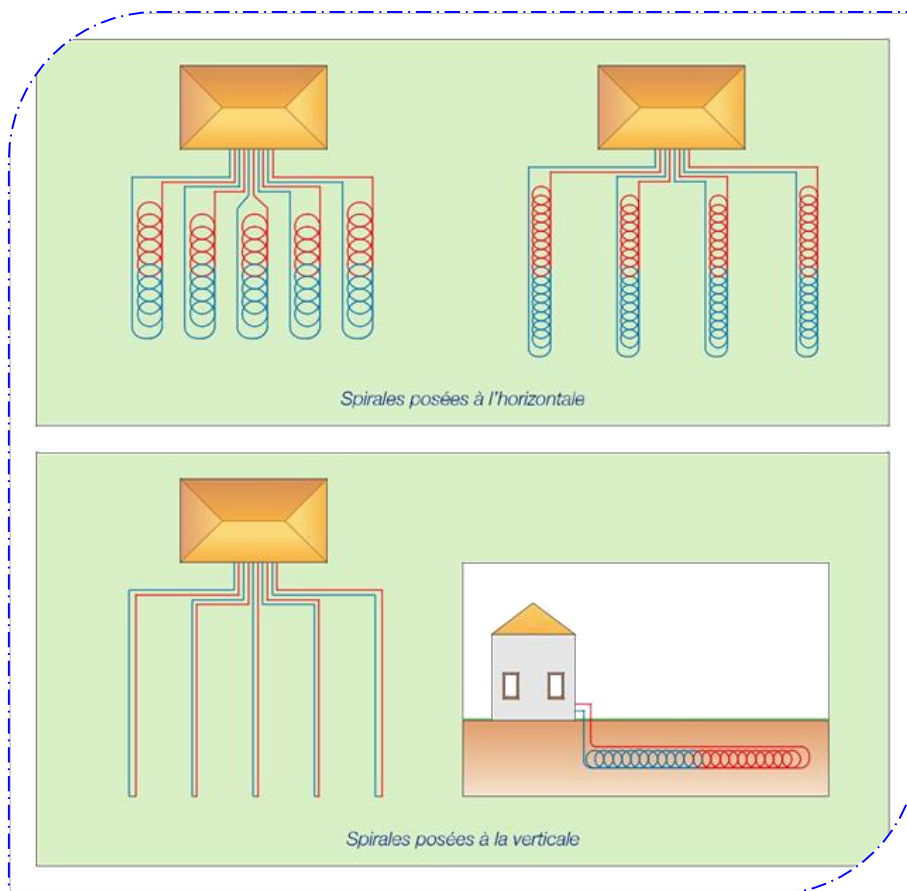


Figure II-10 : Capteurs en spirale (posées à l'horizontale ou à la verticale)

➤ Capteurs en corbeille.

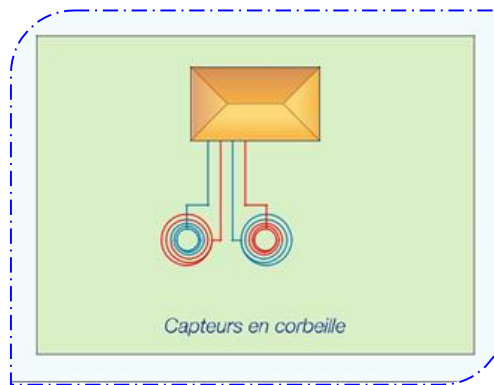


Figure II-11 : Capteurs en corbeille

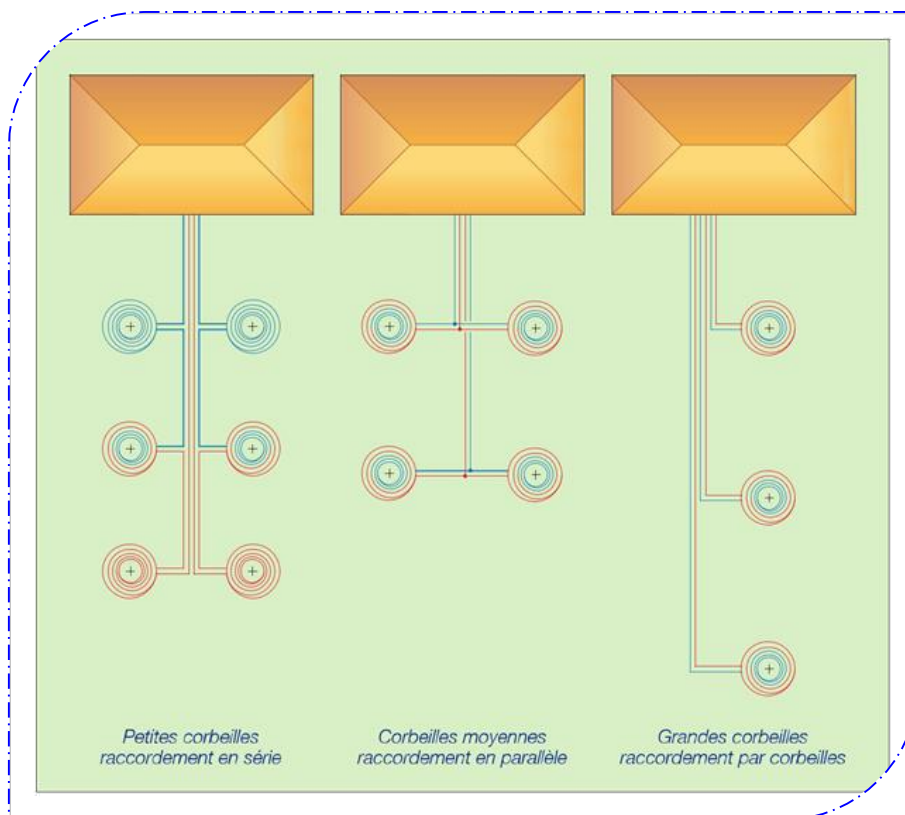


Figure II-12 : Les différents types des capteurs en corbeille

Le choix du type d'exploitation le plus adapté dépend de différents facteurs, parmi lesquels (1) la nature du terrain, (2) ses zones d'ombre, (3) le type de végétation à déplanter ou à conserver. En effet, la superficie où seront posés les capteurs, doit être dépourvue de plantes et de tout autre type de végétation pouvant créer de l'ombre.

Pour la pose des tubes, soit on déblaie, soit on creuse des tranchées dans le terrain. À l'exception des cas où le déblaiement du terrain est prévu pour réaliser d'autres travaux, il est préférable de recourir aux tranchées car :

- c'est plus simple et moins coûteux,
- on obtient une meilleure profondeur de pose, donc une température plus élevée du fluide d'échange et, par conséquent, un meilleur rendement de l'installation.

comme nous avons précédemment, la chaleur cédée aux capteurs est surtout due aux apports du soleil et de la pluie. Ils doivent donc être posés dans des zones où le soleil et la pluie peuvent arriver sans obstacle. C'est pourquoi, la superficie que l'on souhaite exploiter ne doit pas être couverte par des constructions ou autres obstacles, tels que : garages, préfabriqués, portiques, terrasses, revêtements imperméables.

De plus, la zone exploitée par les capteurs doit être à une distance d'au moins 2 m des zones d'ombre dues aux bâtiments, aux murs d'enceinte, aux arbres et aux haies.

Pour éviter les interférences et pour faciliter les opérations de maintenance, il est conseillé de respecter, lors de la pose, les distances minimales suivantes :

- 1,5 m des réseaux enterrés des installations non hydrauliques : réseaux électriques, de téléphone et de gaz ;
- 2,0 m des réseaux enterrés des installations hydrauliques : réseaux d'eau sanitaire, d'eau de pluie et d'évacuation ;
- 3,0 m des fondations, des clôtures, des puits, des fosses sceptiques, des écoulements et similaires.

Avec les capteurs de chaleur pour faibles profondeurs, il ne faut pas récupérer trop de chaleur au terrain (voir notes relatives au dimensionnement des simples capteurs). Si cela devait arriver, on s'expose à deux risques : (1) un "écroulement" de la puissance de l'installation, et (2) la destruction de la végétation qui vit sur la zone où les capteurs sont posés (herbe) ou proche de cette zone (plantes, haies, etc ...).

Le possible “écroulement” de la puissance de l’installation est causé par des températures trop basse du fluide d’échange. La PAC travaille alors avec un COP très réduit et donc, avec une puissance thermique ne permettant pas de satisfaire les besoins.

Un autre aspect à considérer est celui du contact entre les capteurs de chaleur et le terrain.

Les terrains sablonneux ne présentent pas de problèmes particuliers. Par contre, avec les terrains argileux, il est souvent nécessaire de les broyer avant de remplir les tranchées. En effet, les terrains argileux tendent à former de plus ou moins grosses mottes, selon les machines effectuant les tranchées.

Les terrains très hétérogènes (avec du gravier et des cailloux) peuvent requérir l’utilisation d’un mélange de contact formé de sable, de ciment et d’eau. Avec ce mélange, on recouvre d’environ 10 cm les capteurs. Puis, avec le matériel de remblayage, on effectue le remplissage de la tranchée.

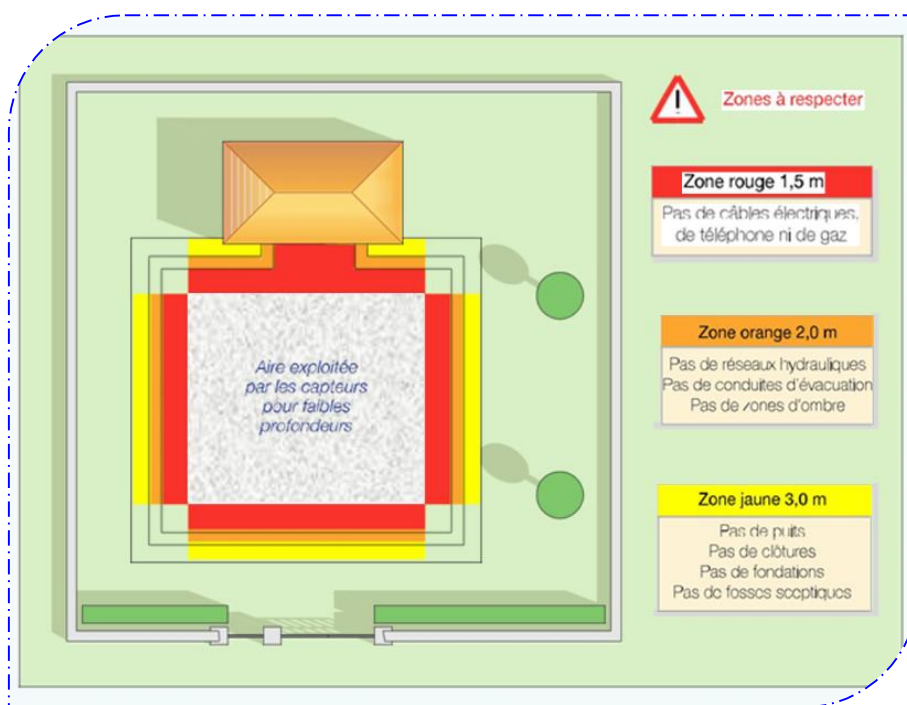


Figure II-13 : les zones à respecter pour faire un réseau géothermique

### **II.7.2. CAPTEURS POUR MOYENNES PROFONDEURS**

Ils peuvent être réalisés avec des tubes, métalliques ou en polyéthylène, installés à la verticale jusqu'à une profondeur de 25-30 m.

Dans certains cas, ils peuvent représenter une solution alternative aux autres types de capteurs, surtout lorsque les superficies utilisables pour pouvoir poser des capteurs à faibles profondeurs sont insuffisantes vis à vis des besoins thermiques, ou lorsqu'il est difficile d'obtenir des permis pour installer des sondes plus profondes.

Ces capteurs peuvent être réalisés avec des sondes coaxiales ou avec des tubes noyés dans des piliers de fondation.

### **II.7.3. SONDES COAXIALES**

Elles sont essentiellement réalisées avec deux tubes coaxiaux. Le tube interne véhicule le fluide de retour de la PAC, tandis que le tube externe permet l'échange de chaleur avec le sol.

Pour augmenter l'échange thermique et protéger les nappes aquifères, les sondes coaxiales sont "chemisées" d'un enduit de ciment et de béton.

Dans des versions plus élaborées, les sondes sont conçues avec des tubes externes en acier inox et des tubes internes en polyéthylène à haute densité.

Les tubes externes en acier inox empêchent la corrosion due au ruissellement et offrent une bonne résistance mécanique contre les mouvements de terrain.

Les rendements thermiques de ces sondes sont comparables à celles des sondes pour les grandes profondeurs.

### **II.7.4. PILIERS DE FONDATION**

On a recours aux piliers lorsqu'il est possible d'exploiter les fondations du bâtiment.  
Par exemple

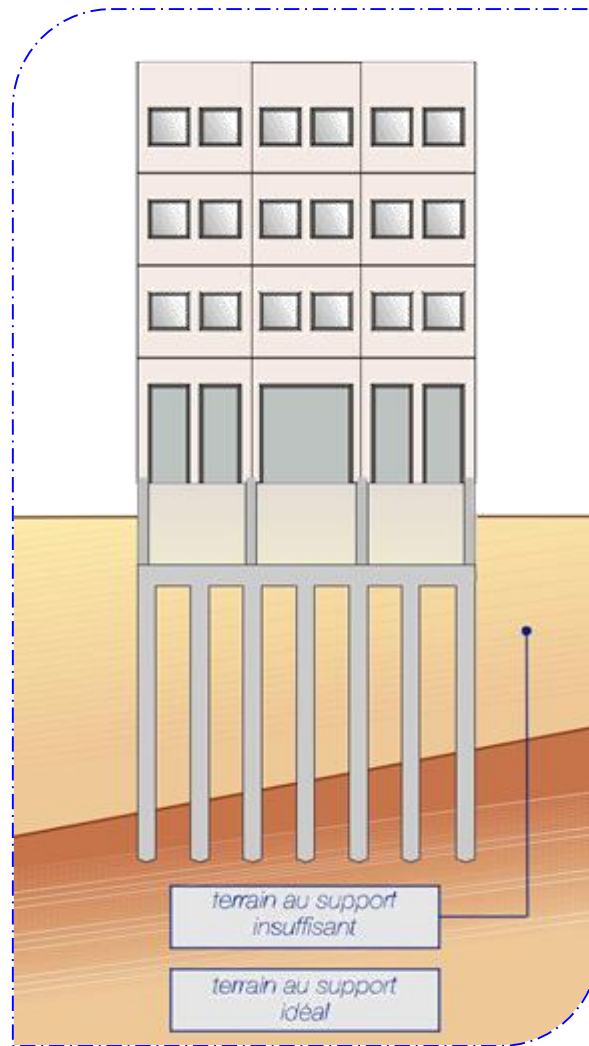


Figure II-14 : le terrain idéal des capteurs à moyennes profondeurs.

lorsque la superficie du terrain n'est pas en mesure de supporter les opérations de forage, ou lorsque le terrain est sujet à des phénomènes qui en modifient, périodiquement ou occasionnellement, les caractéristiques physiques.

Pour pouvoir être utilisés comme capteurs de chaleur, des tubes en U ou en spirale sont insérés dans les piliers de fondation : les tubes, sont ensuite raccordés aux PAC, en série ou en parallèle.

Cette technologie est simple et peu onéreuse.

Une seule partie des piliers peut être utilisée, en fonction des besoins thermiques du bâtiment.

Les rendements thermiques des piliers de fondation avec tubes en double U, sont comparables à ceux des sondes pour les grandes profondeurs.

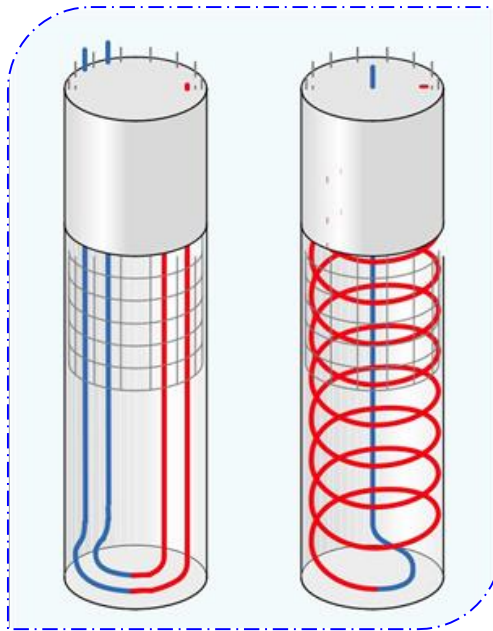


Figure II-15 : capteurs en corbeille moyennes profondeurs

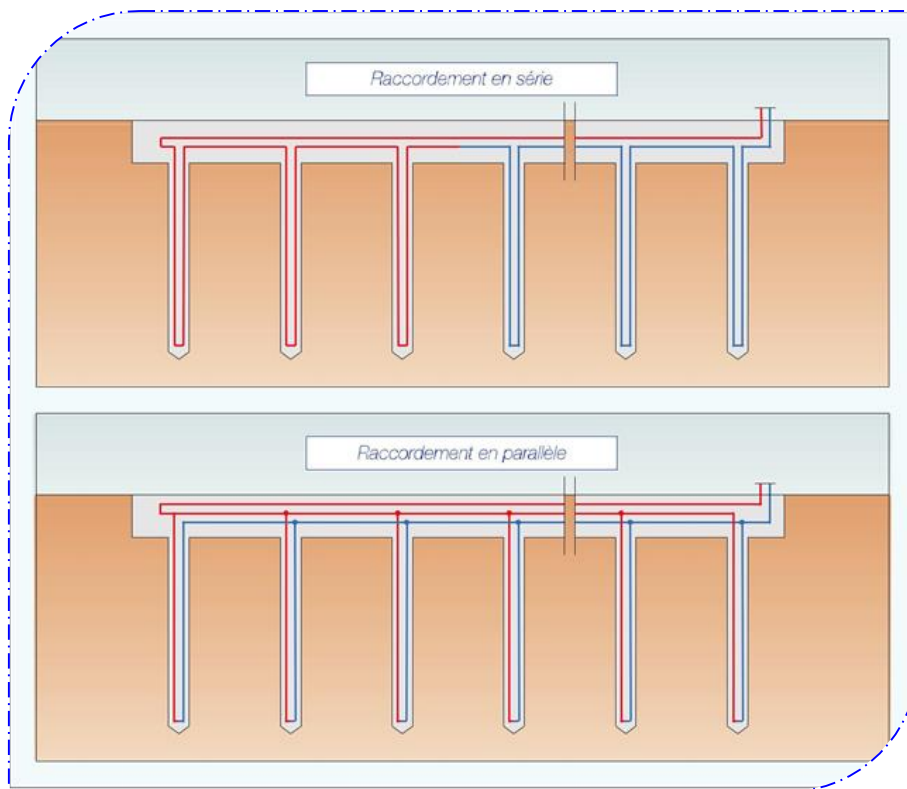


Figure II-16 : Les différents types de raccordement des capteurs

### II.7.5. CAPTEURS POUR GRANDES PROFONDEURS

Ces capteurs (appelés sondes géothermiques) sont réalisés avec des tubes installés à la verticale jusqu'à une profondeur de 100-120 m, mais ils peuvent descendre à des profondeurs de plus de 200 m.

Le rendement thermique des sondes augmente en fonction de la profondeur. En dessous de 20 m (grâce à la chaleur produite par la terre) la température du sous-sol augmente d'environ 3°C tous les 100 m.

Ces capteurs sont posés par forage avec des diamètres variant entre 100 et 150 mm.

Dans ces forages sont insérés un ou deux circuits en U, réalisés avec des tubes en

PE-Xa, spécifique pour ces applications particulièrement contraignantes, compte tenu des pressions élevées à ces profondeurs et donc, du risque d'écrasement.

Pour faciliter l'insertion des tubes dans les forages, on utilise un lest d'environ 15-20 Kg. De plus, pour maintenir une bonne distance entre les tubes, des entretoises sont posées tous les 7-8 m.

Le vide présent entre les parois du forage et les tubes, est rempli d'un mélange à base de ciment et de substances inertes. Ce mélange est injecté du bas vers le haut, à l'aide d'un tube supplémentaire inséré dans le forage de la sonde.

Pour ne pas causer de dommages aux fondations, les sondes géothermiques doivent être posées à une distance d'au moins 4-5 m du bâtiment. En outre, s'il y a plusieurs sondes, elles doivent

être espacées entre elles d'une distance supérieure à 8 m, pour éviter les interférences thermiques : c'est à dire pour éviter que les sondes échangent réciproquement de la chaleur, ce qui risquent de diminuer le rendement thermique global.

Le tableau ci-dessous est une reprise de la norme allemande VDI 4640 et indique les rendements des sondes géothermiques à double U, selon les types de sol. Les rendements thermiques des sondes sont données en [W/m] et ont été définis dans les conditions indiquées dans ce tableau.

Pour l'étude de ces capteurs et de leurs circuits de raccordement aux PAC.

**Note :**

Les opérations de forage et de remplissage peuvent gravement contaminer le terrain et être une cause d'autres interférences (spécialement sur les nappes aquifères) très dangereuses pour l'état du sous-sol.

Ces opérations doivent donc respecter rigoureusement les normes en vigueur et n'être confiées qu'à des entreprises habilitées.

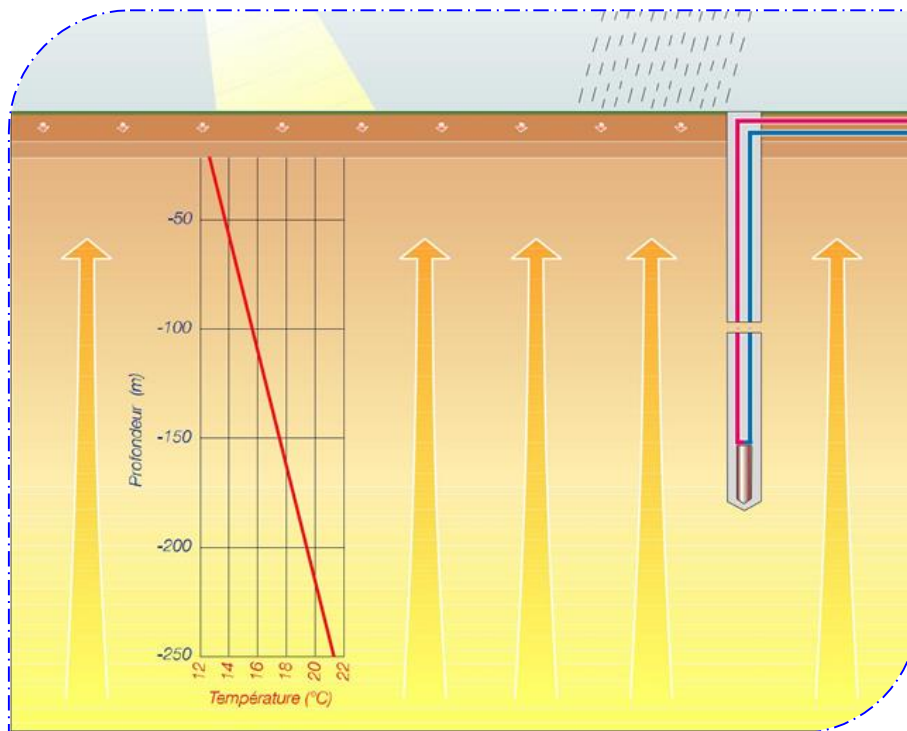


Figure II-17 : Le rendement thermique des sondes augmente en fonction de la profondeur

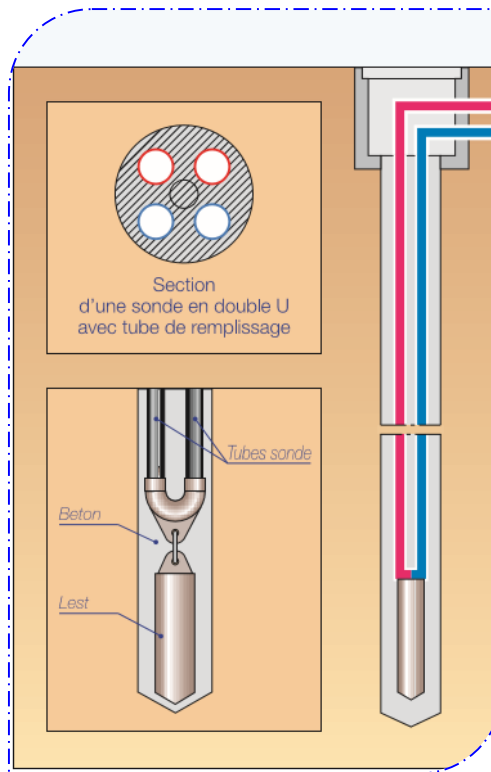


Figure II-18 : sondes géothermiques à double U

## II.8. CONCLUSION

Cette partie intéressé à les types des échangeurs tous-terrains qui permet d'échanger de la chaleur avec le sol et récupérer cette chaleur pour l'utilisation, et les procédés techniques de l'installation des ces échangeurs et leurs applications.

## *CHAPITRE III:*

*Modélisation de type d'échangeur  
qui étudié*

---

### III.1. LES EQUATIONS ANALYTIQUES

Le calcul de la quantité de chaleur qui peut être emmagasinée et dissipée dans le sol dépend de plusieurs paramètres qui sont difficiles à évaluer. Celle-ci découle du type de sol et des mouvements d'eau souterrains. Afin d'évaluer l'impact du sol sur le puits géothermique, trois modèles analytiques sont principalement utilisés. Le premier est la ligne source infinie de Kelvin, le second est la ligne source cylindrique, et la dernière est la ligne source finie. Dans la prochaine section, ces modèles analytiques seront développés. Afin de conserver la même hypothèse de calcul pour tous les modèles, la charge de chaleur en chauffage, donc le moment où l'on cherche à retirer la chaleur du sol, la charge est considérée positive. Alors qu'en période de chauffage. [7].

#### III.1.1. Model de ligne Source

**Kelvin (1882)** [8] Le modèle de source de ligne a été développé sur la base de Kelvin théorie de la ligne source Si l'ensemble de forage est considéré comme une source de ligne semi-infiniment longue, on peut obtenir la température du sol entourant le trou de forage à tout rayon et tout point à tout moment. Le flux de chaleur au niveau du point de la source est considérée comme flux de chaleur constant radiale perpendiculaire à la longueur de la source, transfert de la chaleur de la source de ligne à un milieu homogène infini qui l'entoure. En supposant une température initiale uniforme et un flux de chaleur constant par la profondeur de l'unité à rayon nul, l'expression donnée par Ingersoll (1954) pour la température à tout moment à tout rayon peut être écrit comme :

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} \int_x^\infty \frac{e^{-\beta}}{\beta} d\beta = \frac{Q}{2\pi k} I(X) \quad (III.1)$$

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha(t-t')}} \quad (III.2)$$

$$X = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (III.3)$$

où

$T$  : est la température du sol au rayon  $r$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_0$  : est la température initiale du sol ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$Q$  : est le flux de chaleur par unité de longueur de trou de forage ( $\text{W} / \text{m}$ ),

$r$  : est le rayon de la ligne source ( $\text{m}$ ),

$k$  : est la conductivité thermique du sol ( $\text{W}/\text{mK}$ ),

$\alpha$  : est la diffusivité thermique du sol ( $m^2/s$ ),

$t$  : est le temps écoulé depuis le début de l'opération (s).

### III.1.2. model de source cylindre

**Carslaw et Jaeger, (1947)** [7] Considérant les deux conduites comme une infiniment long tuyau, et coaxial avec le trou de forage d'une longueur infinie, la solution source de cylindre peut être utilisée pour calculer la distribution de température du sol infini à la température initiale qui entoure le trou de forage à tout moment. En supposant un flux de chaleur constant le long du trou de forage, l'équation qui régit un problème de transfert de chaleur dimensions peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad r_0 < r < \infty \quad (III.4)$$

tandis que les conditions aux limites et conditions initiales peut être exprimée comme:

$$-2\pi \cdot r_0 \cdot k \frac{\partial \theta}{\partial r} = Q \quad (III.5)$$

$$r = r_0, t > 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \quad (III.6)$$

$$r = 0$$

$$\theta = 0 \quad t = 0, r > r_0$$

où est

$\alpha = T - T_0$  la différence de température entre la température du sol à la distance radiale  $r$  de la source de à l'instant et la température initiale ( $^{\circ}C$ ).

En prenant la transformée de Laplace et la transformée de Laplace inverse, la solution peut être exprimée comme suit:

$$\theta(r, t) = \frac{2Q}{\pi k} \int (1 - e^{-\alpha u^2 t}) \frac{J_0(u, r) Y_1(u\alpha) - Y_0(ur) J_1(u\alpha)}{u^2 [J_1^2(u\alpha) + Y_1^2(u\alpha)]} du \quad (III.7)$$

### III.1.3. linéique finie (SLF)

Comme mentionné précédemment dans la revue de littérature, la méthode SLF est utilisée pour calculer la température  $T$  en un point dans un domaine semi-infini. Les hypothèses et la description de la méthode sont mentionnées dans la section. En régime transitoire, l'ecart de température entre le sol non perturbé et un point situe à une distance radiale  $r$  du centre du puits et une profondeur  $z$  est donné par l'équation :

$$\Delta T(r, t, z) = \frac{q}{4\pi k_s} \int_0^L \left( \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(h)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(h)} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d'(h)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d'(h)} \right) dh \quad (III.8)$$

où

$q$  : est le taux de transfert de chaleur par unité de longueur (W/m)

$$d(h) = \sqrt{r^2 + (z - h)^2} \quad (III.9)$$

$$d'(h) = \sqrt{r^2 + (z + h)^2} \quad (III.10)$$

$h$  : est la variable d'intégration

$z$  : est la profondeur (m) du point où l'on veut la température

$r$  : est la distance à partir du centre du puits (m)

$\Delta T$  : est la différence de température entre le sol non perturbé et le point à la distance  $r$  du puits (°C)

$L$  : est la longueur du puits géothermique (m).

## III.2. BILAN THERMIQUE DE L'ÉCHANGEUR

### III.2.1. Hypothèses géométriques et thermique simplificatrice

1. L'écoulement du fluide (l'eau) est considéré laminaire et unidirectionnelle tout le long du conduit
2. L'échange thermique se fait en régime stationnaire.
3. Le sol entourant le tuyau est considéré homogène et isotrope, avec conductivité thermique homogène dans toute les points de sol.
4. on suppose que la température de sol égal à la température de source géothermique

### III.2.2. Description du problème et géométrie

La géométrie du notre problème considère, est un échangeur de chaleur enterrer eau/sol cette échangeur consiste en une boucle fermée de conduites sous-sol à une profondeur de  $Z$  comme indiqué sur la Figure III 1 Ce tuyau a un diamètre intérieur  $d=0.011$  m. et épaisseur  $e=0.006$  m , avec une longueur  $L$ . Le matériau de la conduite a une conductivité thermique  $0,4$  W / m K. Ces tuyaux transportent un débit d'eau verrier de  $(0.02 - 0.04$  kg /s) en utilisant une pompe a eau, l'eau entrée dans la conduit avec une température  $T_{ee}$  et sortie avec une température  $T_{es}$  La géométrie du système est représentée sur la Figure III 1

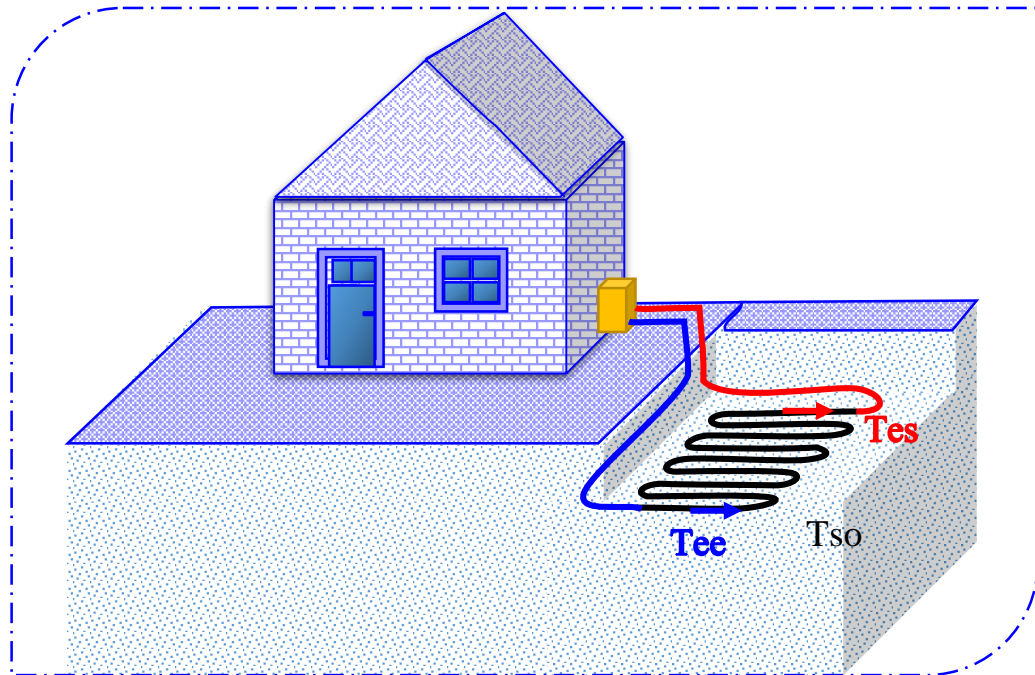


Figure III-1 : Géométrie de l'échangeur eau-Sol étudié

### III.2.3. Résistance thermique de conduction :

La résistance thermique de conduction  $R_{cd}$ , d'un élément exprime sa résistance au passage d'un flux de conduction thermique. Cette résistance s'applique aux solides. Considérons un tube tel que celui représenté sur la (Figure III 2 ).

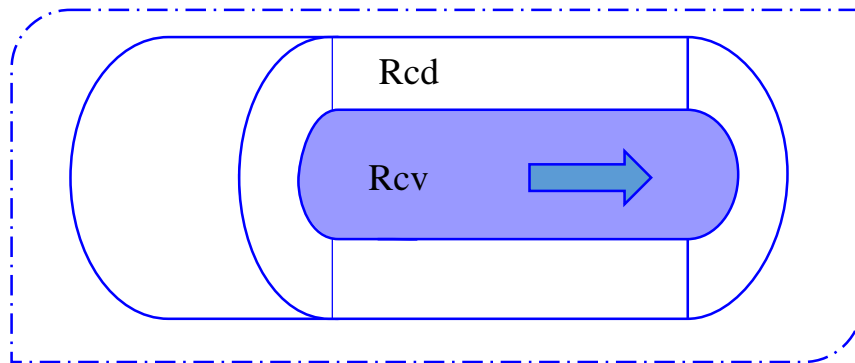


Figure III-2 : Résistances thermiques

Pour calculer le flux de chaleur passant de l'intérieur du tube vers l'extérieur, on va revenir à la loi de Fourier. Le tube est représenté en coupe sur la Figure III 2 et on va considérer le flux passant entre deux surfaces cylindriques de rayons  $R_{in}$  et  $R_{ex}$ . Lorsqu'on est en régime permanent et pour les mêmes raisons que ci-dessus, le flux de chaleur entrant dans la masse du tuyau est le même que le flux sortant. On peut même ajouter que le flux sera le même à travers n'importe quelle surface cylindrique de rayon  $r$  dans la masse du tuyau.

Le flux s'écrit :

$$\varphi = -\lambda S \frac{dT}{dr} = -\lambda(2\pi r L) \frac{dT}{dr} \quad (III.11)$$

où L est la longueur du tube. Le flux étant constant, on a là une équation différentielle très simple qui se résout par intégration après avoir séparé les variables:

$$\varphi = -\lambda S \frac{dT}{dr} = -\lambda(2\pi r L) \frac{dT}{dr} \quad (III.12)$$

ce qui donne:

$$T_{ex} - T_{in} = \varphi \cdot 2\pi\lambda l \cdot \ln\left(\frac{r_{ex}}{r_{in}}\right) \quad (III.13)$$

On en déduit immédiatement l'expression de la résistance thermique par conduction dans cette géométrie

S'il y a plusieurs couches cylindriques, les résistances thermiques s'additionneront comme dans le cas précédent.

**note:**

$$R_{cd} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ex}}{r_{in}}\right)}{2\pi\lambda l} \quad (III.14)$$

#### III.2.4. Evaluation du coefficient d'échange par convection

La résistance thermique de convection d'un élément exprime sa résistance thermique au passage d'un flux de chaleur d'origine convective. Dans le cas du tube présenté sur la figure (Figure III 3).il existe aussi une résistance de convection sur la face intérieure du tube. De même que précédemment, la loi de Newton conduit immédiatement à

$$R_{cv} = \frac{1}{hS} = \frac{1}{h \cdot 2\pi r_{in} \cdot l} \quad (III.15)$$

Le nombre adimensionnel de Nusselt donne la relation entre le coefficient de convection et le coefficient de conduction de l'eau  $\lambda_{eau}$  et le diamètre du tube d

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad (III.16)$$

Alors le coefficient de transfert de chaleur par convection (h) est déterminé comme suit :

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (III.17)$$

Le régime et turbulent d'où :

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

où, nombre de Nusselt , Nu en termes de nombre de Prandtl (Pr) pour divers motifs d'écoulement de l'eau définie par le nombre de Reynolds, sont donnés ci-dessous.

nombre de Reynolds est donné par la relation suivante :

$$Re = V \cdot d_h \cdot \rho / \mu \quad (III.19)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (III.20)$$

$$Re = \frac{V_m D}{\nu} \quad (III.21)$$

la vitesse maximale

$$V_m = Qv \cdot \frac{4}{\pi \cdot d^2} \quad (III.22)$$

$$Qv = \dot{M} / \rho \quad (III.23)$$

Le nombre de Prandtl est donné par

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda} \quad (III.24)$$

Tel que :  $\mu_{eau} = 1.12 \cdot 10^{-3} \text{ pa.s}$  et  $C_{p_{eau}} = 4183 \text{ J/kgK}$  et  $\lambda_{eau} = 0,613 \text{ W/mK}$

$\rho$  : est la masse volumique du fluide (kg / m<sup>3</sup>)

$V_m$  : est la vitesse maximale de l'objet par rapport au fluide (m/s)

$D$  : diamètre (m)

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide

$\nu$  : est la viscosité cinématique ( $\frac{m^2}{s}$ )

$Q_v$ : Débit volumique ( $\frac{m^3}{s}$ )

$\dot{M}$ : Débit massique ( $\frac{Kg}{s}$ )

### III.2.5. Température de l'eau dans le tube

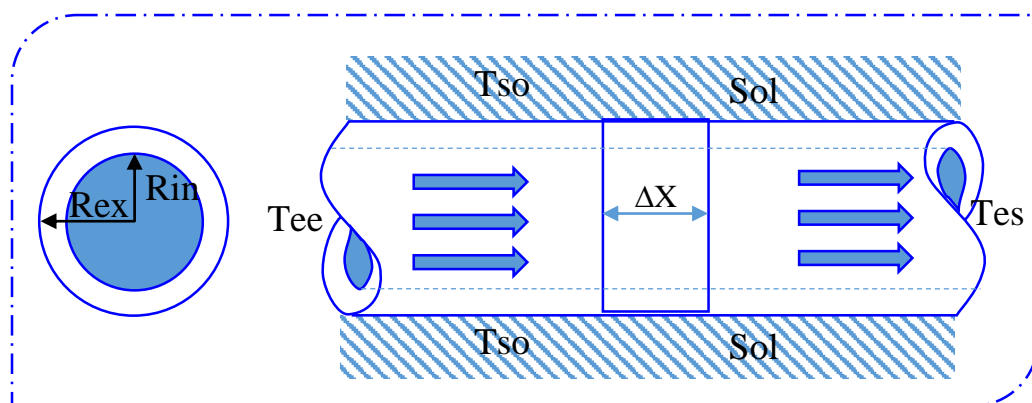


Figure III-3 : Tranche du tube de l'échangeur tubulaire eau/sol

Le bilan thermique pour un élément de la conduite ( Figure III 3), de surface donne

$$M C_p dT = \frac{1}{R_{totale}} (T_{so} - T(x)) \cdot dx \quad (III.25)$$

la résistance thermique total ( $R_{tot}$ ) devient

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{cv}+R_{cd}} = \frac{1}{\frac{1}{h \cdot 2\pi R_{in} \Delta x} + \frac{Ln\left(\frac{R_{ex}}{R_{in}}\right)}{2\pi\lambda\Delta x}} \quad (III.26)$$

Soit :  $R'_{tot}$  la résistance thermique totale par unité de longueur. ( $\Delta x = 1$ ).

$$Avec \quad R'' = \frac{1}{R'_{tot}} = \frac{1}{R_{cv}+R_{cd}} = \frac{1}{\frac{1}{h \cdot 2\pi r_{in}} + \frac{Ln\left(\frac{R_{ex}}{R_{in}}\right)}{2\pi\lambda}} \quad (III.27)$$

L'intégration de (III.25) donne :

$$\int_{T_{ee}}^{T(x)} \frac{dT}{T_{so}-T(x)} = \int_0^X \frac{R''}{M \cdot C_p} \cdot dX \quad (III.28)$$

Soit :

$$\ln \frac{T(x)-T_{so}}{T_{ee}-T_{so}} = \frac{R''}{M \cdot C_p} X \quad (III.29)$$

La température de l'eau à l'abscisse x s'écrit alors :

$$T(x) = (T_{ee} - T_{so}) e^{-\frac{R''}{M \cdot C_p} X} + T_{so} \quad (III.30)$$

### III.2.6. Le flux de chaleur dans le tube

Le flux de chaleur échangé dans la conduite s'écrit :

$$\Phi(x) = \dot{M} \cdot C_p \cdot (T(x) - T_{ee}) \quad (III.31)$$

$$\text{Soit : } \Phi(x) = \dot{M} \cdot C_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{R''}{M \cdot C_p} X}\right) (T_{so} - T_{ee}) \quad (III.32)$$

Tenant compte de (III.32), la longueur est donnée par :

$$L = \frac{M \cdot C_p}{R''} \cdot \ln \left(1 - \frac{\Phi}{\dot{M} \cdot C_p (T_{ee} - T_{so})}\right) \quad (III.33)$$

### III.2.7. Le profil de Température sur le tube

On considère le cylindre creux fait d'un matériau homogène

Pour  $\Delta x \approx 0$ , la conduction est donnée unidimensionnelle et présente un gradient de température radiale

$$\nabla T = 0 \Rightarrow \frac{d}{dr} \left( \frac{rdT}{dr} \right) = 0 \Rightarrow \frac{rdT}{dr} = C^{ste} \quad (III.34)$$

L'intégration de (III.34) donne :  $T = C_1 \ln r + C_2$

$$\begin{aligned} \text{C. A. L} &\Rightarrow \begin{cases} T(r = R_{in}) = T_{in} \rightarrow T_{in} = C_1 \ln r_{in} + C_2 \\ T(r = R_{ex}) = T_{ex} \rightarrow T_{ex} = C_1 \ln r_{ex} + C_2 \end{cases} \\ \Rightarrow T(r) &= \frac{T_{ex} - T_{in}}{\ln \left( \frac{r_{ex}}{r_{in}} \right)} \ln \left( \frac{r}{r_{in}} \right) + T_{in} \quad (III.35) \end{aligned}$$

**Dans cette partie nous calculons le modèle mathématique qui modélise le type d'échangeur qui étudié ce modèle nécessaires pour la simulation dans le prochain chapitre**

# *CHAPITRE IV:*

## *Calcul numérique et résultats de simulation*

---

**IV.1. INTRODUCTION :**

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer notre modèle d'échangeur eau-sol, cette évaluation est présentée sous deux aspects. d'abord, une validation du modèle est réalisée à partir de la confrontation de nos résultats de simulation. Ensuite, une analyse d'influence des différents paramètres (longueur du puits, diamètre de la conduite, débit d'eau) sur la performance de notre modèle, cela permet de dimensionner un modèle de puits propre aux conditions climatiques de la ville de Biskra. Cette modèle tient compte l'ensemble des conclusions et remarques du chapitre III.

Tous les simulations sont faites à l'aide d'un logiciel FORTRAN pour les calculs numériques et le logiciel de Tecplot pour la présentation graphique.

**IV.2. LES DONNEES DE BASE :**

**IV.2.1. Données géographique :**

Ces données ont été réalisé dans le Laboratoire de Génie Mécanique LGM à l'Université de Biskra (latitude de 34°48' N, longitude de 5°44'E)

**IV.2.2. Données Métrologiques de la ville de Biskra :**

*Tableau IV-1 : Données Métrologiques de la ville de Biskra [9]*

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Spt	Oct	Nov	Déc
Tem.moy (°C)	11.9	13.7	16.2	20.0	25.2	29.9	33.5	32.7	27.1	22.1	16.5	12.8
Humi.rel.moy	0.57	0.52	0.44	0.40	0.37	0.31	0.29	0.31	0.40	0.49	0.57	0.60
Vventmoy(m/s)	3.70	4.18	4.59	4.82	4.78	4.34	3.70	3.82	3.58	3.82	3.60	3.65
Rayon.so.moy	211.7	295.5	411.7	489	511.2	533.5	525.1	476	389.8	304	219.2	177

**IV.2.3. Données géothermiques :**

**IV.2.3.1. Les Propriétés physiques du sol de la région de Biskra (nature de sol : limon argilo sableux)**

*Tableau IV-2 : Les Propriétés physiques du sol de la région de Biskra [9]*

Masse Volumique $\rho_{sol}(kg/m^3)$	Capacité calorifique $C_{psol}(J/Kg.k)$	Conductivité thermique $\lambda_{sol}(w.m/k)$	Diffusivité Thermique $a(m^2/s)$	Profondeur de Pénétration $\delta(m)$	Albédo ( $\alpha$ )
1800	1340	1.5	6.22x10 <sup>-7</sup>	2.5	0.35

**IV.2.3.2. la température dans le sol :**

Les résultats de l'étude de la répartition de la température dans le sol pour la région considérée menée par [MABROUKI DJAMEL et N.MOUMMI,(11)] sont illustrés par le graphe de la Figure IV 1 .

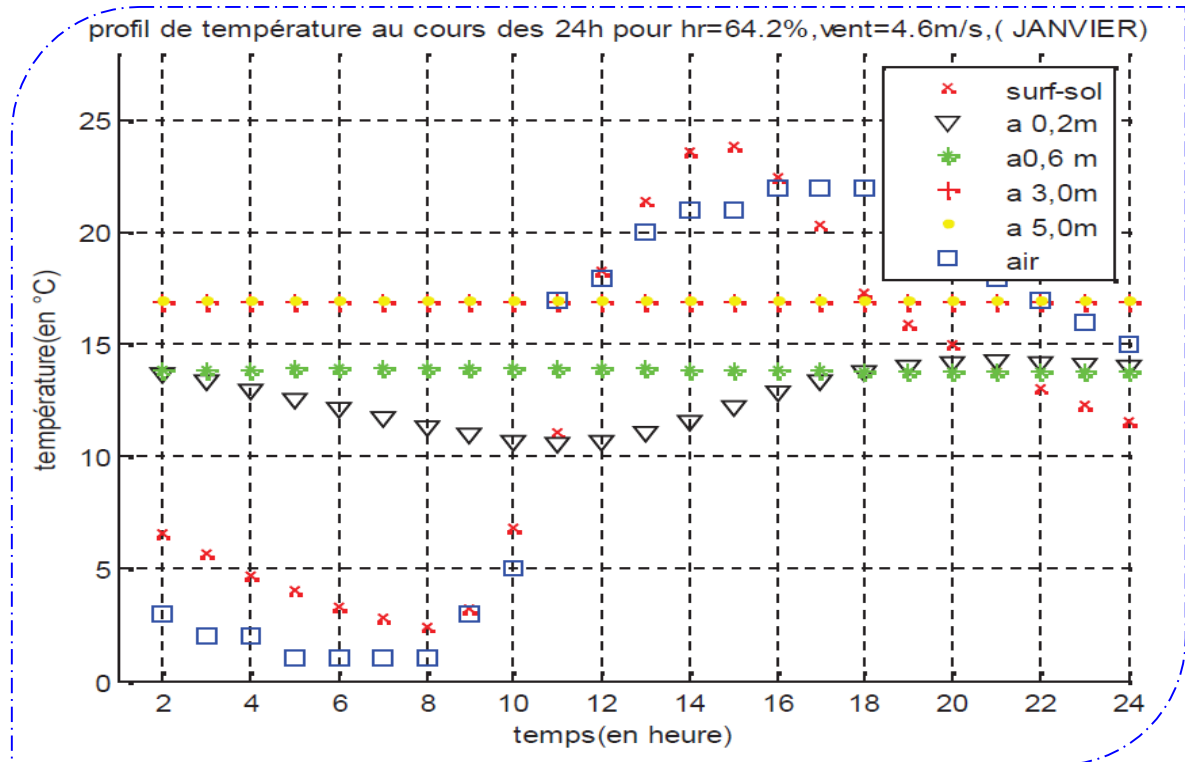


Figure IV-1 : Gradient géothermique pour la région de biskra [14]

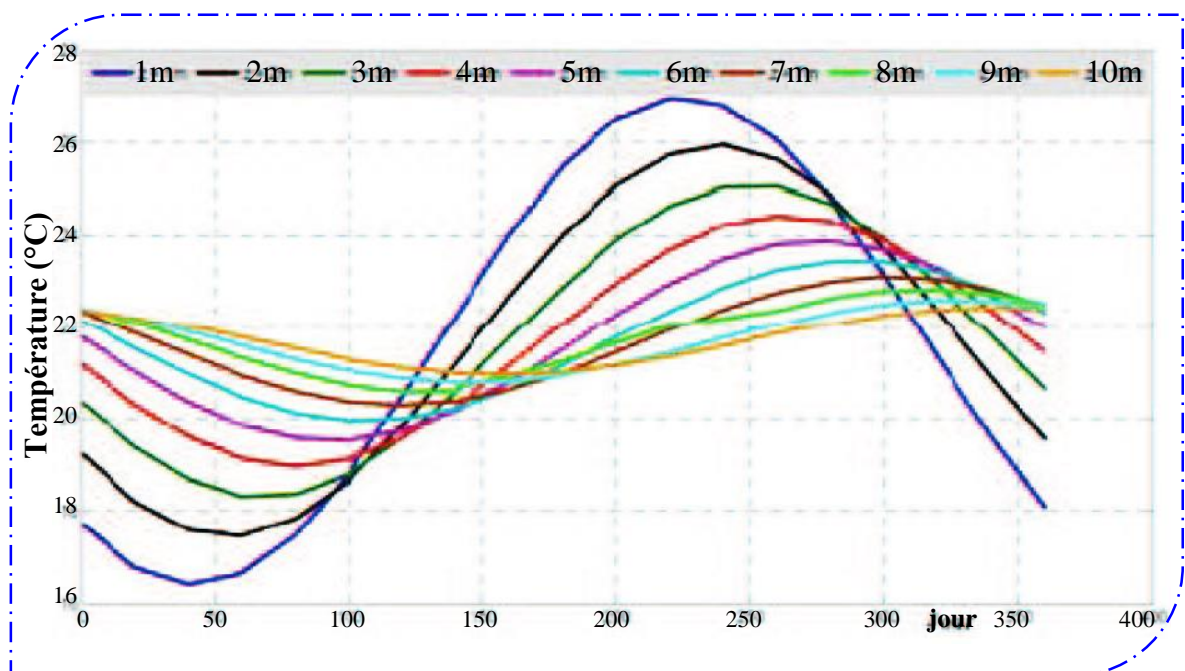


Figure IV-2 : Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes profondeurs [14]

**IV.3. STRUCTURE DU CODE DE CALCUL :**

Pour atteindre nos objectifs nous avons élaboré un code de calcul en maillage simple 3D du conduit écrit en langage Fortran pour simuler la variation de la température dans l'échangeur horizontale. (Voir annexe A)

*Les equations pour le maillage de l'échangeur*

*Pour un cylindre*

$$x(h,o,r) = r \cos(o)$$

$$y(h,o,r) = h$$

$$z(h,o,r) = r * \sin(o)$$

*Pour un coude*

$$x(p, o, r) = (RG + r * \cos(o)) * \cos(p)$$

$$y(p, o, r) = (RG + r * \cos(o)) * \sin(p)$$

$$z(p, o, r) = r * \sin(o)$$

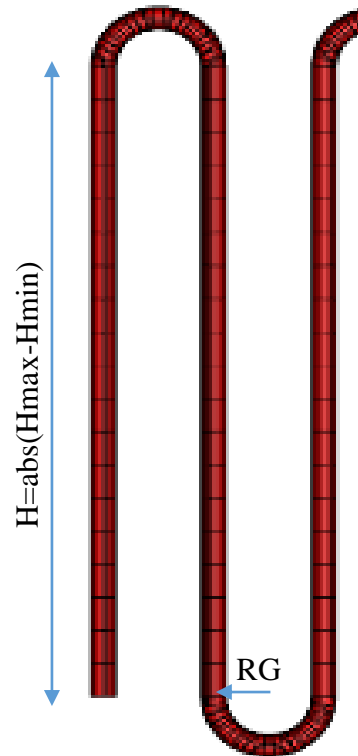
*avec*

$$0 \geq p \geq \pi$$

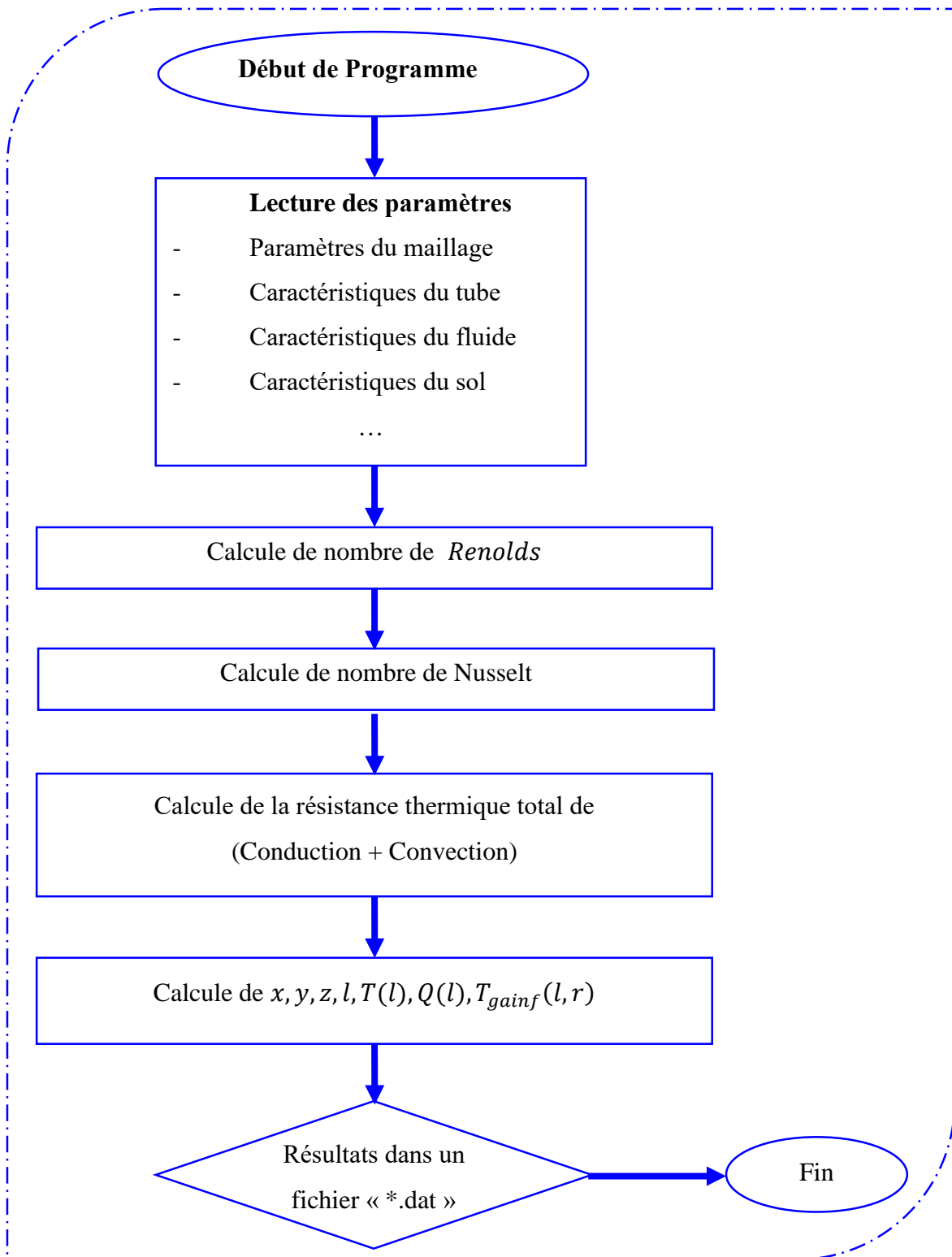
$$0 \geq o \geq 2\pi$$

$$Rin \geq r \geq Rex$$

$$Hmin \geq h \geq Hmax$$



**IV.3.1. Algorithme du programme**



**IV.3.2. Sortie des résultats.**

Nous avons calculé à chaque nœud le champ de température et le flux de chaleur échangé entre l'eau entrant et les parois de la gaine pour les différentes longueurs, diamètres, profondeurs et débits volumiques. Est enregistré dans un fichier « \*.dat »

#### IV.4. RESULTATS DE SIMULATIONS :

Après avoir écrit les résultats selon notre program dans un fichier texte "Grid\_3D.dat", nous visualisons les résultats en fonction de programme graphique (Tecplot focus 2018 R1)

##### IV.4.1. Effet du débit

Pour voir l'influence de débit de l'eau sur la température de sortie de l'échangeur de chaleur, nous présentons dans la Figure IV 3 . l'évolution de la température de l'eau T à la sortie de l'échangeur pour différents débits. On constate que tous les graphes sont prend une allure exponentielle (Eq.IV.10) croissante, cette croissante est signifié que le fluide est chauffée par l'énergie géothermique du sol, on remarque aussi que le meilleur chauffage est obtenu pour des débits faible de l'eau pompé, c.à.d. le transfert de chaleur est meilleur pour des débits faible.

dans ces figures on choiser  $L=60$  m et trios valeurs de debit :

( $m_1=0.02$  kg/s ,  $m_2=0.03$  kg/s,  $m=0.04$  kg/s).

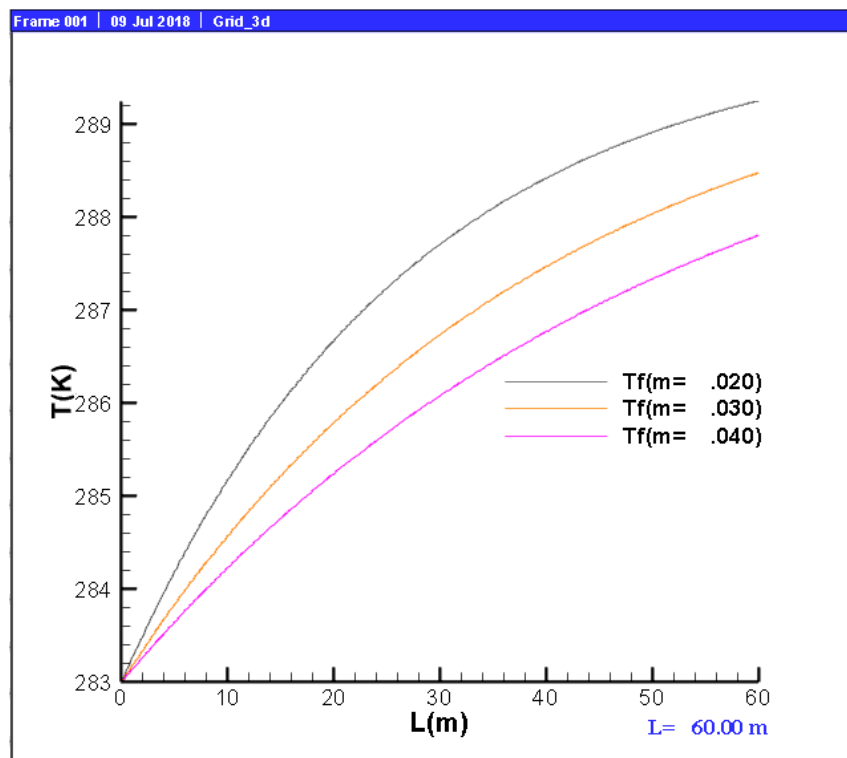


Figure IV-3 : Variation de la température de l'eau le long de l'échangeur  $L=60$ m pour différents débits d'eau, pour  $T_{e,e}=10^{\circ}\text{C}$ ,

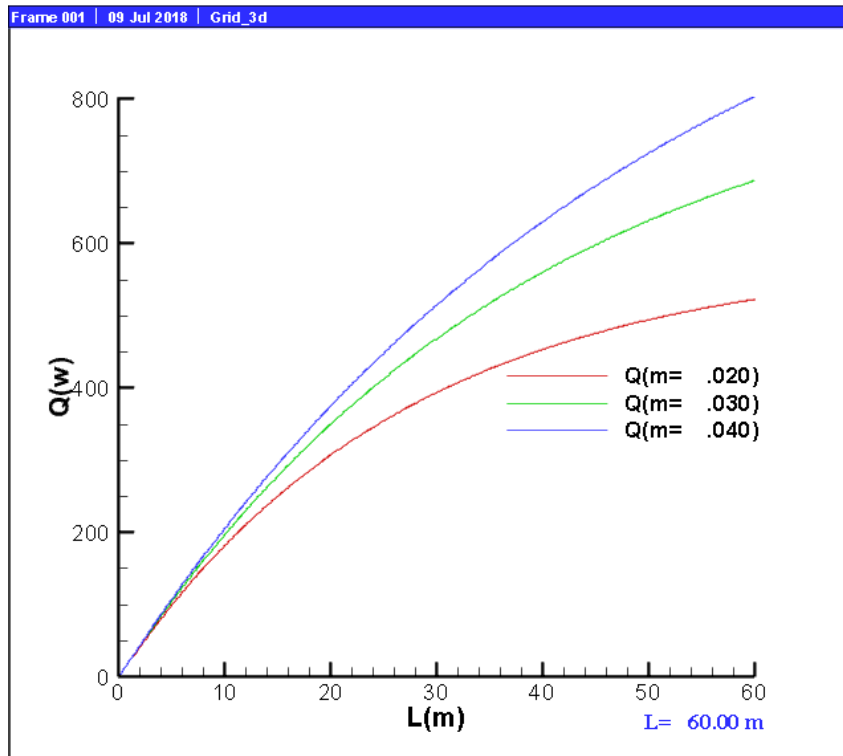


Figure IV-4 : Variation du flux récupéré  $Q$  du sol en fonction de la longueur  $L=60m$  pour différents débits.

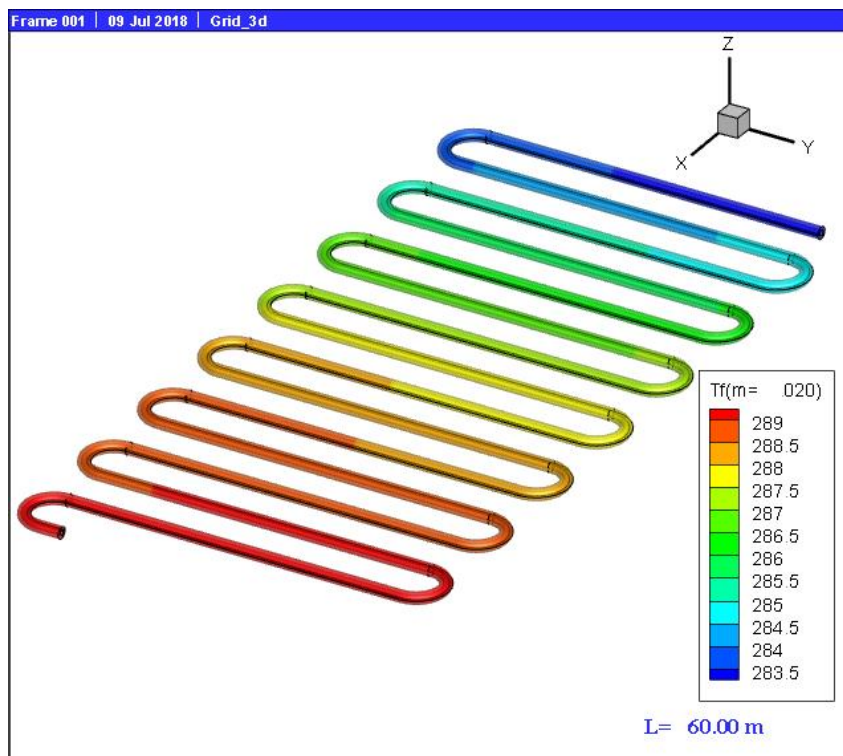


Figure IV-5 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=60m$  et débit  $m=0.02$  kg/s.

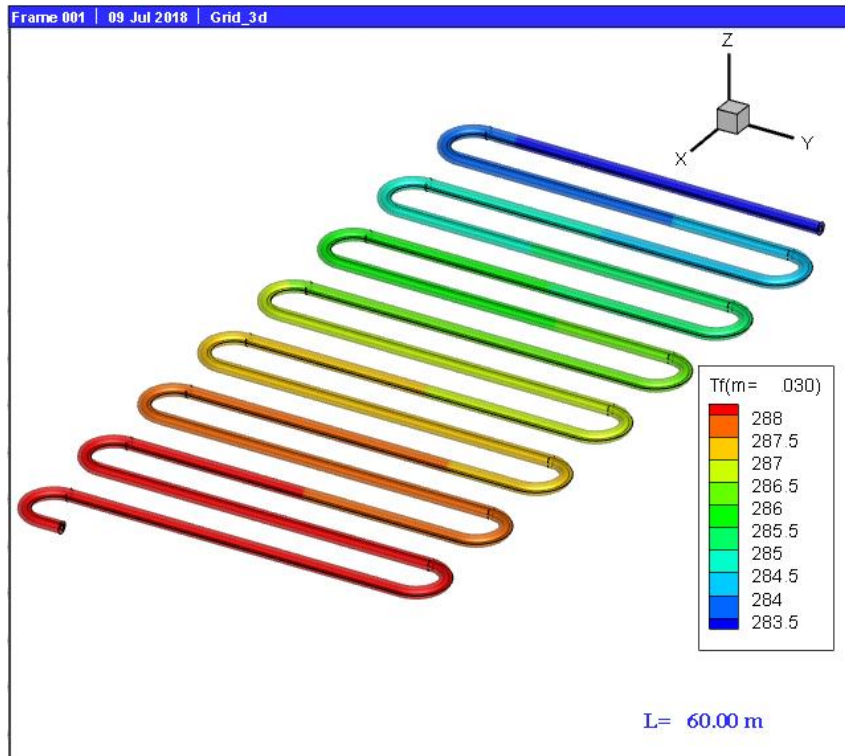


Figure IV-6 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=60m$  et débit  $m=0.03$  kg/s.

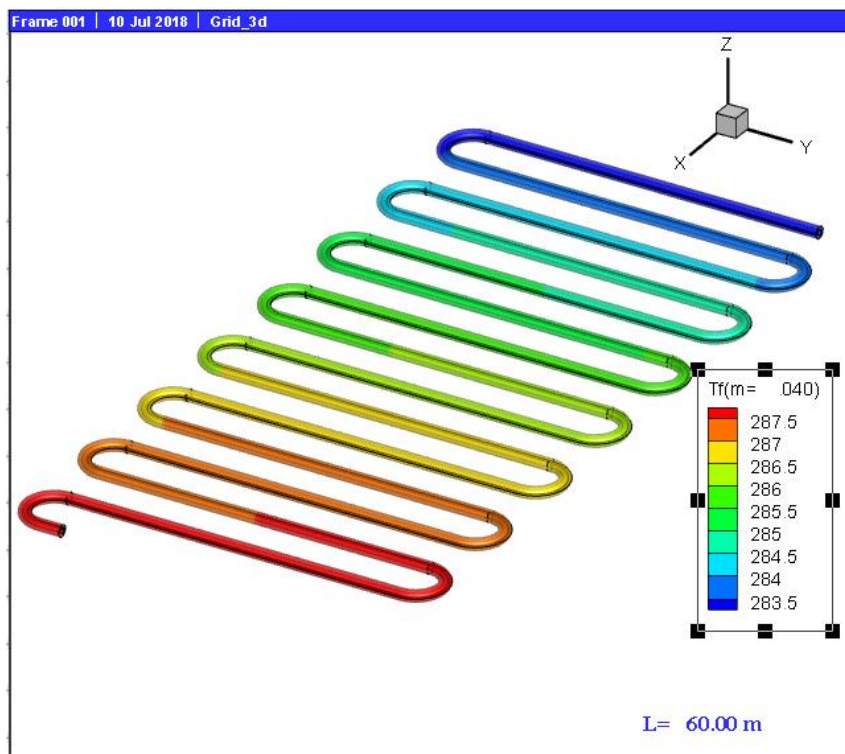


Figure IV-7 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=60m$  et débit  $m=0.04$  kg/s.

#### IV.4.2. Effet de la longueur sur température de sortie de l'échangeur

Pour voir l'influence de la longueur sur la température de sortie de l'échangeur de chaleur, nous présentons dans la figure, l'évolution de la température de sortie de l'échangeur pour différentes longueurs de l'échangeur ( $L=40\text{m}$  et  $L=20\text{m}$ ). On constate la même allure, c'est-à-dire une croissance exponentielle de la température de l'eau pour toutes les différentes longueurs étudiées.

On remarque aussi, que la température de l'eau est augmentée au fur et mesure en augmentant longueur pour un débit et diamètre et température entrée fixe, le meilleur transfert de chaleur dans cette effet est correspond toujours a une grand longueur,

- dans ces figures on choiser deux longueurs  $L=40\text{ m}$  et  $L=20\text{ m}$  et trois valeurs de debit : ( $m_1=0.02\text{ kg/s}$  ,  $m_2=0.03\text{ kg/s}$  ,  $m=0.04\text{ kg/s}$ )

Pour  $L=40\text{m}$  et  $T_{e,e}=10^\circ\text{C}$

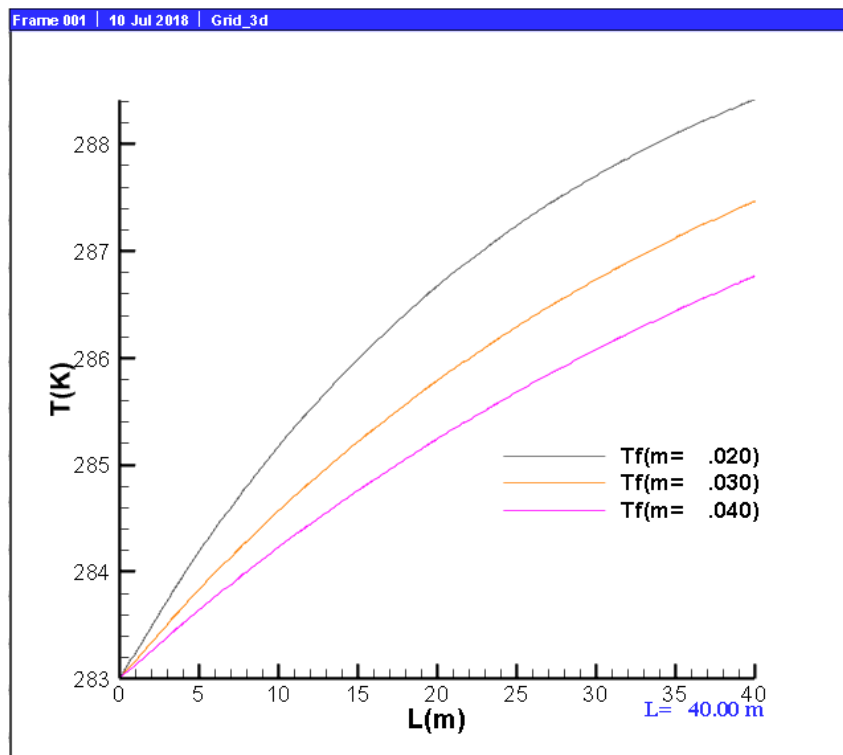


Figure IV-8 : Variation de la température de l'eau le long de l'échangeur  $L=40\text{m}$  pour différents débits d'eau, pour  $T_{e,e}=10^\circ\text{C}$ ,

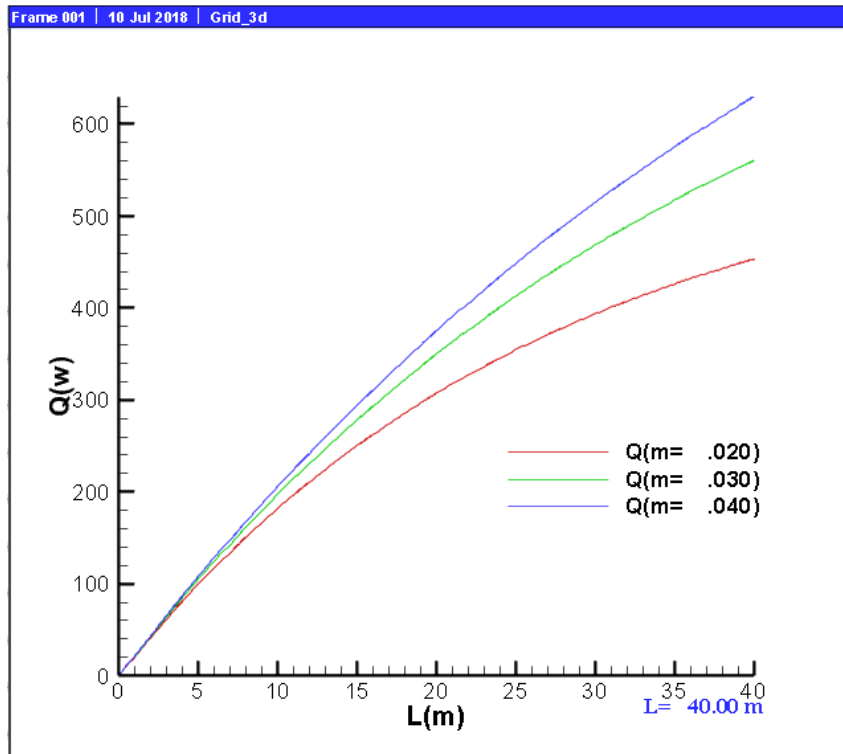


Figure IV-9 : Variation du flux récupéré  $Q$  du sol en fonction de la longueur  $L=40\text{ m}$  pour différents débits.

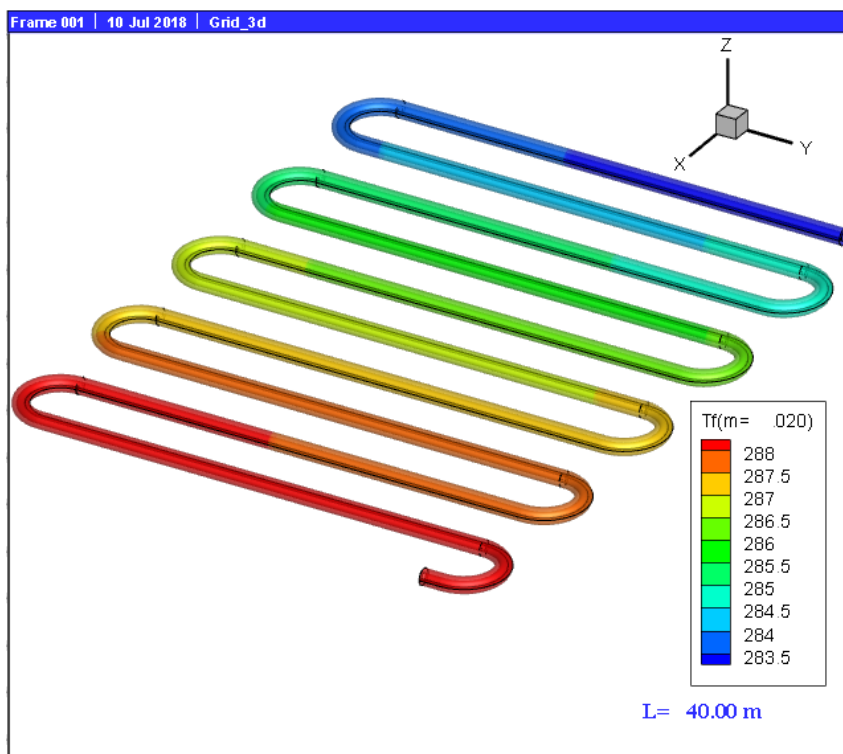


Figure IV-10 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=40\text{ m}$  et débit  $m=0.02\text{ Kg/s}$ .

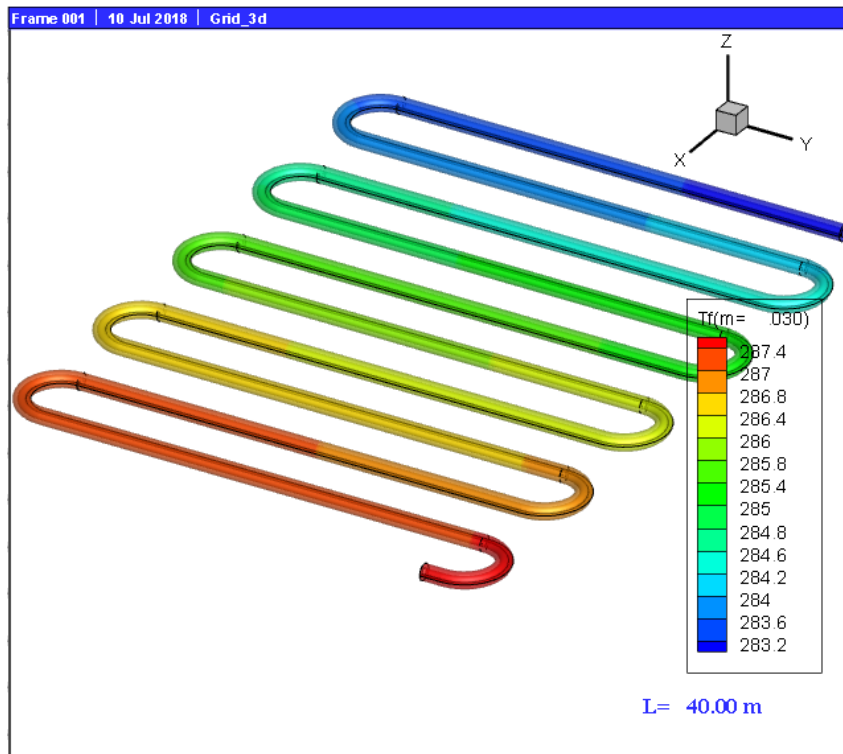


Figure IV-11 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=40m$  et débit  $m=0.03$  kg/s

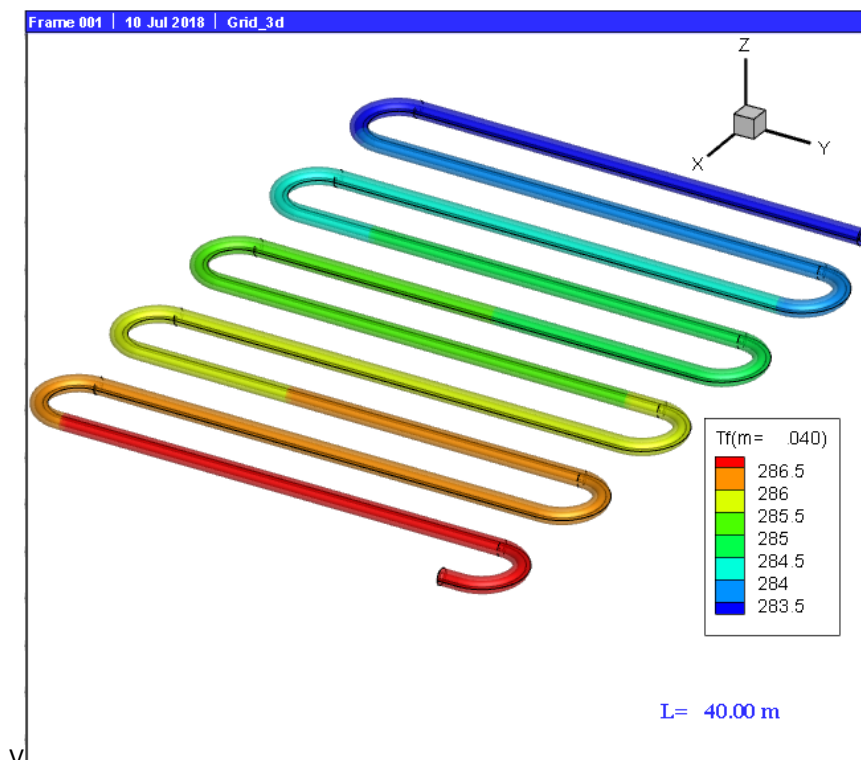


Figure IV-12 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=40m$  et débit  $m=0.4$  kg/s.

Pour  $L=20\text{ m}$  et  $T_{e,e}=10^{\circ}\text{C}$

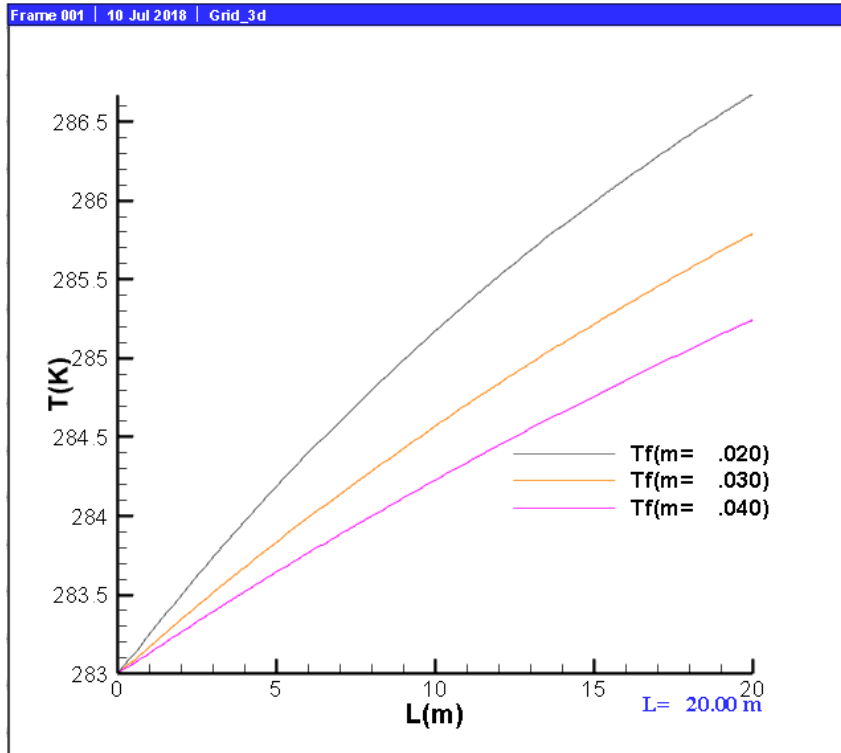


Figure IV-13 : Variation de la température de l'eau le long de l'échangeur  $L=20\text{m}$  pour différents débits d'eau, pour  $T_{e,e}=10^{\circ}\text{C}$ ,

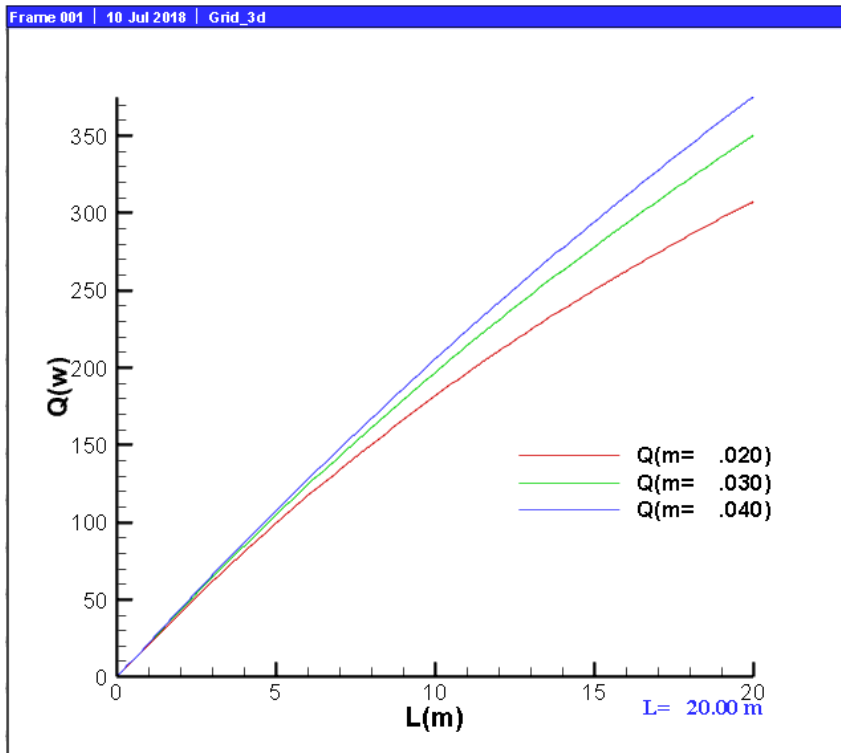


Figure IV-14 : Variation du flux récupéré  $Q$  du sol en fonction de la longueur  $L=20\text{m}$  pour différents débits.

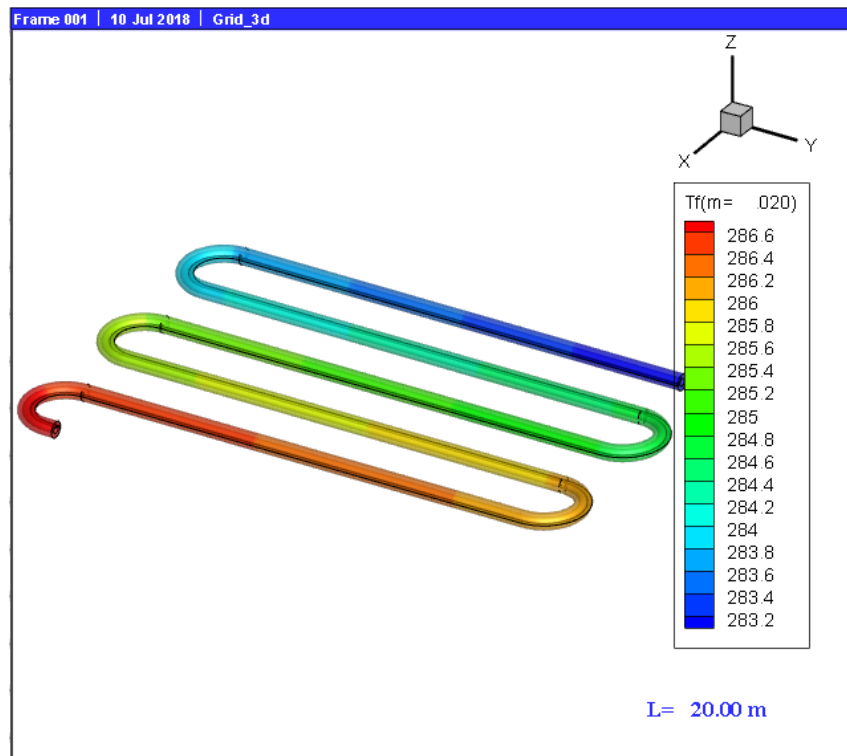


Figure IV-15 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=20m$  et débit  $m=0.02$  kg/s.

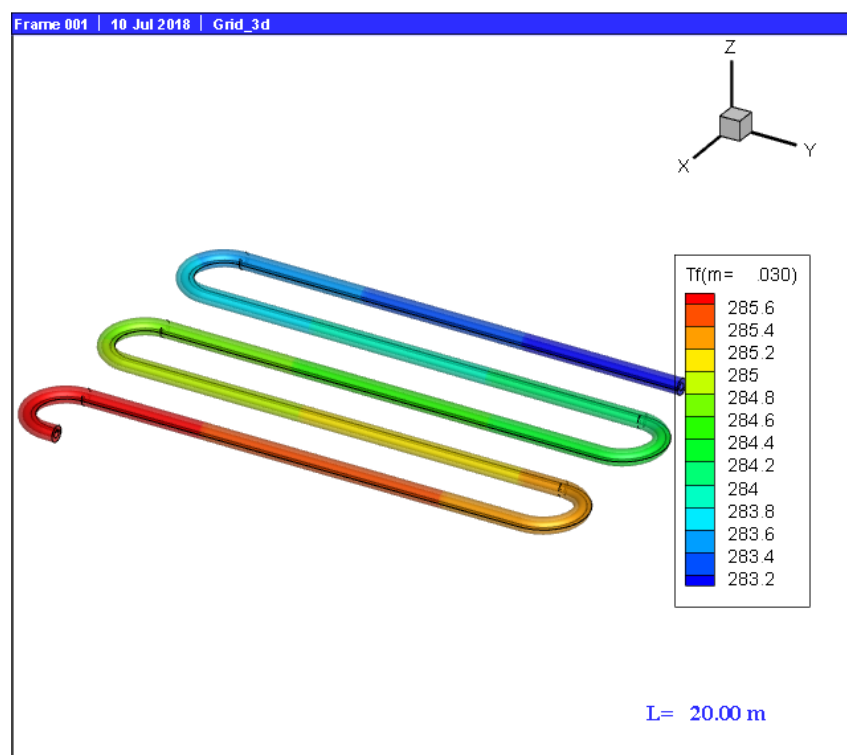


Figure IV-16 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=20$  m et débit  $m=0.03$  kg/s

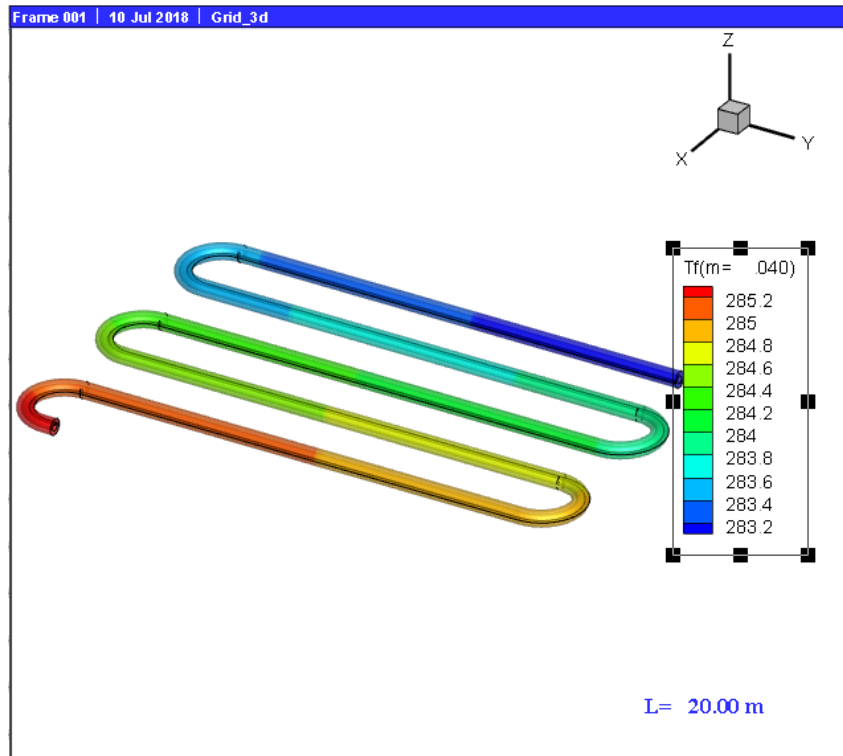


Figure IV-17 : Distribution de la température dans l'échangeur pour  $L=20m$  et débit  $m=0.04$  kg/s.

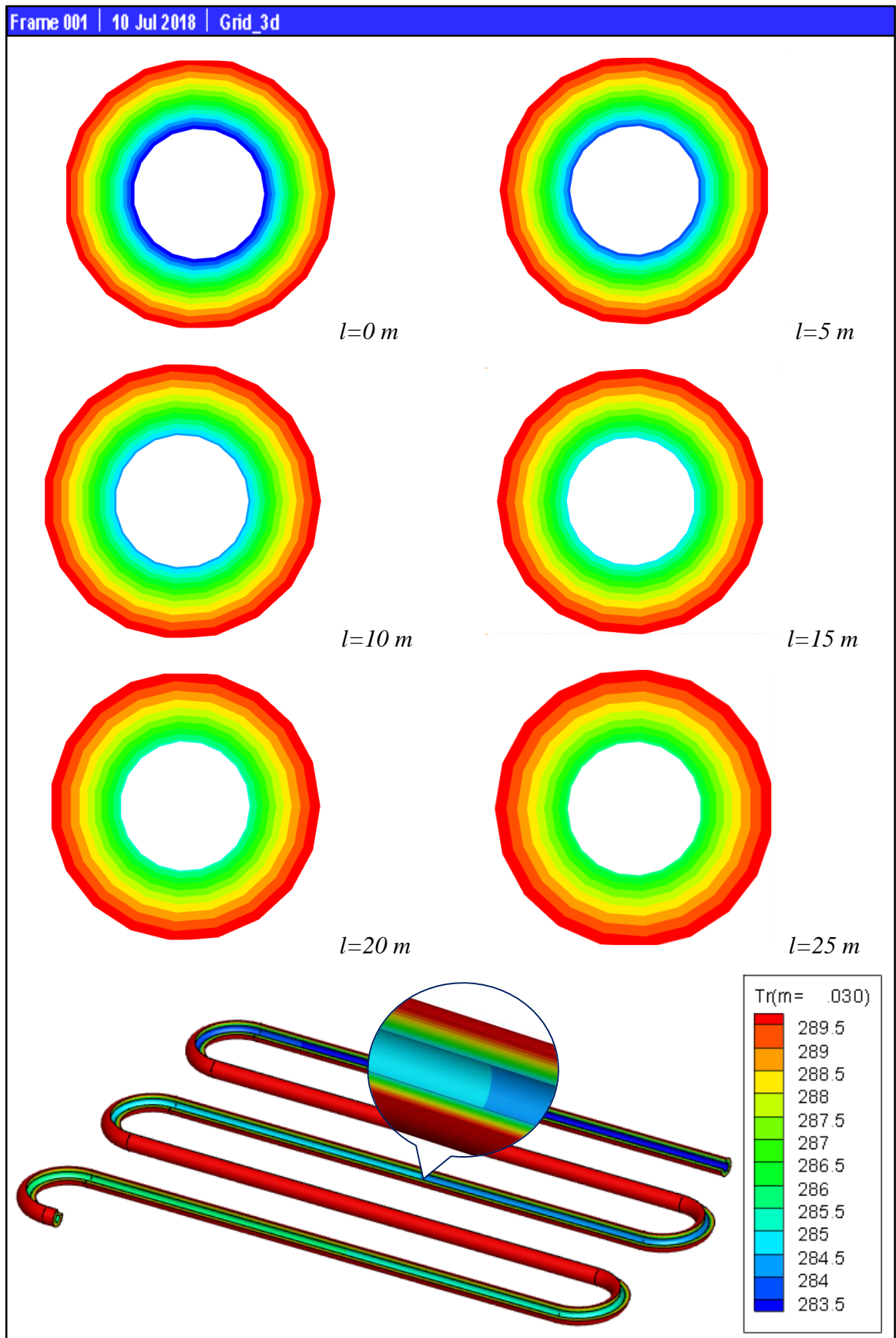


Figure IV-18 : Distribution de la température sur le tube pour  $L=20\text{m}$  et débit  $m=0.03\text{kg/s}$ .

**IV.4.3. Effet de la température en durant toute l'année**

Tableau IV-3 : Valeur de la température de sortie et la variation du flux récupéré Q du sol en fonction de la longueur  $L= 40$  m et débit  $m=0,03\text{kg/s}$  pour une profondeur de 3 mètres en durant toute l'année (avec  $T_{ee}$  = la température de l'air ambiant)

Période	$T_{ee}(^{\circ}\text{C})$	$T_{so}$ moyen( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{ee}-T_p$	$T_{es}(^{\circ}\text{C})$	Flux(w)
Jan	11,9	20	-8,1	15,13	404,84
Fév	13,7	18,5	-4,8	15,61	239,9
Mars	16,2	18,5	-2,3	17,12	114,95
Avr	20	20	0	20	0
Mai	25,2	21	4,2	23,53	-209,91
Juin	29,9	23	6,9	27,15	-344,86
Juil	33,5	24	9,5	29,72	-474,81
Aout	32,7	24	8,7	29,24	-434,82
Spt	27,1	24,5	2,6	26,06	-129,95
Oct	22,1	24	-1,9	22,86	94,96
Nov	16,5	22	-5,5	18,69	274,89
Déc	12,8	21	-8,2	16,07	409,83

# *CONCLUSION GENERALE*

---

## CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail nous avons présenté:

Une culture générale sur les énergies renouvelables et en particulier l'énergie géothermique et quelques connaissances sur l'extraction de l'énergie à partir du sol: soit un gain de chaleur ou de rafraichissement pour le confort thermal de l'habitat. Les pays froids comme le Canada et la France et d'autres, se sont intéressés à l'extraction de la chaleur.

Notre objectif de ce travail présenté en deuxième partie si l'énergie géothermique et leurs types des échangeurs tous-terrains qui permet d'échanger de la chaleur avec le sol et récupérer cette chaleur pour l'utilisation, et les procédés techniques de l'installation des ces échangeurs et leurs applications. et La troisième partie intéressé à la modélisation mathématique de type d'échangeur qui étudié et calcul numérique et résultats de simulation. D'après ces résultats on à vu que l'influence des paramètres tel que le débit d'eau, la longueur de tube et l'épaisseur de tube, à un effet significatif sur l'efficacité de l'échangeur eau/sol et donc une influence sur le chauffage.

Pour les résultats obtenus on a conclu que :

- La diminution de débit est augmente la température de l'eau à la sortie de l'échangeur de chaleur eau/sol
- L'augmentation de diamètre influe directement sur la température de l'eau à la sortie de l'échangeur de chaleur eau/sol.
- La température maximale à la sortie de l'échangeur de chaleur est correspond à longueur maximale du tube de l'échangeur.
- La température de l'eau est chauffée rapidement pour le tube qui a une épaisseur petite.
- Les résultats montrent également que l'effet de la différence entre la température de  $T_{ee}$  et  $T_p$  conduit à une efficacité accrue l'changeur, donc nous en Algérie intéressons l'extraction du froid.





```

write(43,121) m
write(43,122) m
write(43,123) m
write(43,124) d,e,Nr,No,(Nh+Np)*(NM+1)
121  FORMAT (1X,"Tf(m=',F8.3,')")
122  FORMAT (1X,"Q(m=',F8.3,')")
123  FORMAT (1X,"Tr(m=',F8.3,')")
124  FORMAT (1X,'zone t="zone d=',F8.3,' e=',F8.3,'" ,DATAPACKING=POINT
      +,j=',I3,' ,j=',I3' ,k=',I8,")
!C===== Boucle NM(nombre de cylindre (ou bien ccoude))=====
do 100 NN=1,NM+1
!-----Pour changer les coordonner de cylindres et de coudes-----
if (NN .GE. 2) then
HH=Hmax
Hmax=Hmin
Hmin=HH
Pmax=-Pmax
Pmin=-Pmin
Omax=-Omax+Pi
Omin=-Omin+Pi
endif
!-----Pour ne dépassent pas largueur du domaine de calcul Lmax --
if ((Lmax-L0) .LE. abs(Hmax-Hmin)) then
Hmax=Hmin+((Hmax-Hmin)/abs(Hmax-Hmin))*(Lmax-L0)
endif
!Cylindre(1)-----
do 10 i=1,Nh
do 10 j=1,No
do 10 k=1,Nr
Uh(i)=dUh*(i-1)
Uo(j)=dUo*(j-1)
Ur(k)=dUr*(k-1)
o=Uo(j)*(Omax-Omin)+Omin
r=Ur(k)*(Rmax-Rmin)+Rmin
x(i,j,k)= r*Rzom cos(o) +2.*RG*NN
y(i,j,k)=Uh(i)*(Hmax-Hmin)+Hmin
z(i,j,k)= r*Rzom *sin(o)
L(i)=L0+ abs(Hmax-Hmin)*Uh(i)
Tf=(Tee-Tso)* exp(-((Rtot)/(m*Cpeau))*L(i))+Tso
Tr=((Tso-Tf)/log(Rmax/Rmin))*Log(r/Rmin)+Tf
Q=M*Cpeau*(Tf-Tee)
write (43,*) x(i,j,k),y(i,j,k),z(i,j,k),L(i),Tf,Q,Tr
10 continue
!-----Pour ne dépassent pas largueur du domaine de calcul Lmax --
L0=L0+abs(Hmax-Hmin)
if (abs(Lmax-L0) .LE. 0.) then
Pmax=Pmin

```

```

elseif ((Lmax-L0) .LE. abs(Pmax-Pmin)*RG) then
Pmax= (Hmax-Hmin)/abs(Hmax-Hmin)*(Lmax-L0)/RG+Pmin
endif
!Coude(1)-----
do 20 i=1,Np
do 20 j=1,No
do 20 k=1,Nr
Up(i)=dUp*(i-1)
Uo(j)=dUo*(j-1)
Ur(k)=dUr*(k-1)
p=Pi-(Up(i)*(Pmax-Pmin)+Pmin)
o=Pi-(Uo(j)*(Omax-Omin)+Omin)
r=Ur(k)*(Rmax-Rmin)+Rmin
x(i,j,k)=(RG+ r*Rzom *cos(o))*cos(p) +RG +2.*RG*NN
y(i,j,k)=(RG+ r*Rzom *cos(o))*sin(p) +Hmax
z(i,j,k)= r*Rzom *sin(o)
L(i)=L0+(abs(Pmax-Pmin)*Up(i)*RG)
Tf=(Tee-Tso)* exp(-((Rtot)/(m*Cpeau))*L(i))+Tso
Tr=((Tso-Tf)/log(Rmax/Rmin))*Log(r/Rmin)+Tf
Q=M*CPeau*(Tf-Tee)
write (43,*) x(i,j,k),y(i,j,k),z(i,j,k),L(i),Tf,Q,Tr
20 continue
!-----
L0=L0+abs(Pmax-Pmin)*RG
!-----
100 continue
write (43,125) Lmax
125 FORMAT (1X,'TEXT X=75,Y=6,F=TIMES-BOLD, C=BLUE, T="L=',F8.2,' m"')
write (*,126) m
126 FORMAT (1X,'m=',F8.2,' Kg/s')
write (*,127) Re
127 FORMAT (1X,'Re=',F8.2,'')
write (*,128) Tf-273.
128 FORMAT (1X,'Tes=',F8.2,'')
write (*,129) Q
129 FORMAT (1X,'Q=',F8.2,' Kg/s')
501 stop
end

```



## *Références bibliographiques*

- [1] Anonyme. La Géothermie et l'Aérothermie. Avenir-Énergie.
- [2] Jacques VARET. Géothermie basse énergie, usage direct de la chaleur. Masson. 1982
- [3] Lys Air Mécanique Inc Entreprise. La référence en matière de gestion de l'air au Québec. 2006-2012.
- [4] S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en géophysique, Université Boumerdès, Mars 2006
- [5] <http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/index.html>.
- [6] <http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/04-applications-01.html>.
- [7] Loubna Benyahya. Modélisation statistique de la température de l'eau en rivière et en régime non-hivernal.2007
- [8] Philippe HUDON. Modélisation de puits géothermiques par charges horaires.2012
- [9] <http://www.chauffage-geothermique.fr/principe-chauffage-geothermique.htm>
- [10] BRGM / ADEME (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) /( Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) ;Principes de fonctionnement et usages de la géothermie
- [11] BE 8 590v2 – 23 par Philippe LAPLAIGE et Jean LEMALE : Centre français d'exploitation.
- [12] steve\_corps\_6 Cléo Lismonde TFE Quentin DuspeauxLes énergies renouvelables
- [13] HYDRAULIQUE N°5 ; INSTALLATIONS DE POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES ; Jérôme Carlier , Roland Meskeln Eloi Dujardin, Renzo Planca ; 5 novembre 2010
- [14] Étude de l'influence des paramètres climatiques sur la température du sol (application au site de Biskra) ; Mémoire de Fin d'Etudes par MABROUKI DJAMEL ; Université de Biskra : Juin 2013

---

## Résumé :

Dans cette étude on s'intéresse au l'exploitation de la température de terre, une technique qui est Jusqu'à présent non exploitée dans notre pays. Elle permet de réduire la consommation de l'énergie utilisée dans la climatisation des bâtiments sans causer des impacts environnementaux.

Cette technique exploite l'inertie thermique de sol dont un échangeur eau/sol cette puits est utilisé pour chauffer ou refroidit l'eau qui circule dans des tubes enterrés à quelques mètres de profondeur de sol .

Le but de ce travail est d'évaluer un système échangeur eau-sol horizontale propre à des zones à climat chaud. Pour réaliser notre projet on a procédé à une simulation numérique d'un écoulement turbulent dans l'échangeur eau-sol, on utilise le logiciel FORTRAN pour le calcul numérique et le logiciel de Tecplot pour la présentation graphique.

**Mots clés :** Energie renouvelables, géothermie, confort thermique, échangeur eau/sol.

## Summary :

In this study, we are interested in exploiting the Earth's temperature, a technique that has hitherto not been exploited in our country. It reduces the energy consumption used in building conditioning without causing environmental impacts.

This technique exploits the thermal inertia of soil of which a water / soil heat exchanger this well is used to heat or cool the water which circulates in tubes buried to a few meters of soil depth.

The purpose of this work is to evaluate a horizontal water-soil exchanger system specific to hot climate zones. To realize our project we proceeded to a numerical simulation of a turbulent flow in the water-ground heat exchanger, one uses the software FORTRAN for numerical computation and then displayed in the Tecplot graphical program.

**Key words:** Renewable energy, geothermal energy, thermal comfort, water / soil heat exchanger.

---

## الخلاصة

في هذه الدراسة اهتمنا باستغلال درجة الحرارة الأرضية، وهي تقنية غير مستغلة حتى الآن في بلدنا إذ انها تقلل من استهلاك الطاقة المستخدمة في التكييف الحراري دون التسبب في تأثيرات بيئية. تستغل هذه التقنية القصور الحراري للتربة الذي يستخدم من خلال مبادل حراري مياه / تربة يقوم هذا المبادل بتسخين او تبريد الماء الذي يدور في أنابيب مدفونة تحت بضعة أمتار داخل التربة.

الغرض من هذا العمل هو تقييم مبادل حراري مائي افقي خاص بالمناطق المناخية الساخنة. ولتحقيق مشروعنا، شرعنا في محاكاة عددية لتدفق مضطرب في المبادل الحراري الأرضي والماء، باستخدام أحد البرامج الحاسوبية. FORTRAN ومن ثم عرضها ببرنامج رسومي. Tecplot

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة المتجددة ، الطاقة الحرارية الأرضية التكييف الحرارية ، مبادل حراري للمياه / التربة

---