

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



**Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de Master**

En :Génie Mécanique

Spécialité : ÉNERGÉTIQUE

Par :

- BOUZIANI Abdessamad
- BOUKLIKHA Houssameddine

**Sujet**

***Analyse numérique du comportement thermique  
des sondes géothermiques sous l'environnement  
Algérien***

**Soutenue publiquement, le 01 Juillet 2021 , devant le jury composé de :**

Mr. BENRAMDANE Mohammed	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mr. SAIM Rachid	Prof	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mr. BOUHACINA Benamar	Dr.	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur
Mme SAIB Hind	MAA	Univ. Tlemcen	Examinatrice

***Année universitaire 2020-2021***

## Dédicace

Nous sommes très heureux de dédier ce travail humble, comme un geste de  
gratitude:

À la personne qui a donné naissance à la douleur et à la joie, le symbole de  
l'amour:

Chères Mères

Pour ceux qui aiment et apprécient son soutien continu tout au long de notre  
étude:

Chers Pères

Pour nos frères, sœurs et tous les membres de notre famille.

Pour nos amis

## REMERCIEMENTS

En premier, nous remercions le Tout Puissant ALLAH, notre créateur qui nous a donné la force d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier vivement, le chargé du suivi de ce Mr SAIM Rachid, Professeur à l'université de Tlemcen et le Docteur BOUHACINA Benamar pour leurs encouragements, leurs conseils précieux et leurs disponibilités, et un grand remerciement au membre du jury Mr BENRAMDAN

Mohammed et Mme SAIB Hind

Nous présentons nos chaleureux remerciements aux enseignants du département Mécanique Energétique pour leurs aides et orientations durant notre formation en particulier.

Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

# **Résumé**

*Les études abordées dans ce mémoire de Master consistent en une simulation numérique de la convection forcée d'un fluide caloporteur s'écoulant à l'intérieur d'un échangeur vertical destiné au stockage de l'énergie solaire. Le fluide est considéré incompressible et instationnaire avec des propriétés constantes.*

*Les équations des phénomènes physiques basées sur le modèle  $k-\varepsilon$  standard, ont été intégrées et discrétisées selon l'approche des volumes finis.*

*La simulation de cette étude a été réalisée avec logiciel Fluent . Pour la validation du notre modèle, nous avons employé des travaux similaire très récents .*

*On a déterminé l'évolution de température et du flux de chaleur en fonction du temps (700 h) sur plusieurs types de terres , ainsi que l'influence des différents fluides caloporteur et leurs vitesse sur le comportement dynamique et thermique de l'échangeur.*

Mots clés : Stockage d'énergie, échangeur de chaleur bi-tubulaire, volume finis, écoulement, convection forcée, Energie solaire .



# **Abstract**

*The studies addressed in this Memory of master consist in a numerical simulation of the forced convection of a heat transfer fluid flowing inside a vertical heat exchanger intended for solar energy storage. The fluid is considered incompressible and unsteady with constant properties.*

*The equations of the physical phenomena based on the standard k- $\epsilon$  model, were integrated and discretized using the finite volume approach.*

*The simulation of this study was carried out with Fluent software. For the validation of our model, we have used similar very recent works.*

*The evolution of temperature and heat flow as a function of time (700 h) on several types of earth, as well as the influence of the different heat transfer fluids and their speed on the dynamic and thermal behavior of the exchanger were determined.*

Keywords : Energy storage, U-tube heat exchanger, finites volumes, fluid flow .

# ملخص

الأعمال المتناولة في هذه المذكرة تخص الدراسات الرقمية للتبادل الحراري لسائل يجري داخل مبدل حراري عمودي الشكل مستعمل لتخزين الطاقة الشمسية .

المعادلات الأساسية في هذه الظواهر الفيزيائية المستندة إلى النموذج المعياري ك-إيسيلون تم دمجهم و تحويلهم حسب طريقة الأحجام المنتهية

المحاكاة الرقمية للتغير الديناميكي و الحراري للسائل المستعمل وضع عن طريق برنامج فليمانت و للتحقق من نموذجنا قمنا بالمقارنة مع نماذج عمل حديثة .

تم دراسة تغير الحرارة و الانتقال الحراري في وقت 700 ساعة في 4 اراض مختلفة . فضلا عن تبين تأثير تغير نوع السائل و سرعته في السلوك الحراري للمبادل الحراري .

كلمات مفتاحية : حراري , أحجام المنتهية, تدفق السوائل, التبادل الحراري القيسي , تخزين الطاقة الشمسية

# ***LISTE DES FIGURES***

## ***Chapitre 1***

Figure 1.1: Répartitions des consommations énergétiques des foyers[1]

Figure 1.2: Bilan énergétique du capteur solaire [3]

Figure 1.3 : Schéma de le stockage thermique [4]

Figure 1.4: Echangeur à plaques [5]

Figure 1.5: Echangeur intégré [5]

Figure 1.6 : Installation d'une pompe a chaleur [6]

Figure 1.7 : Schéma de principe d'une PAC à compression de vapeur. [6]

Figure 1.8: Différentes applications de la chaleur géothermique [7]

Figure 1.9 : Système de pompe à chaleur géothermique en boucle fermée : (a) boucles de circulation horizontales et (b) boucles de circulation verticale [8]

Figure 1.10: Fonctionnement de chauffage et climatisation géothermiques [8]

Figure 1.11: Types des pompes à chaleur géothermiques [9]

## ***Chapitre 2***

Figure 2.1: Coupe transversale de tube lisse et tube avec des ailettes [10]

Figure 2.2: Section horizontal présentée déférence entre tube en U circulaire et elliptique [11]

Figure 2.3 : Énergie consommée du système d'échangeur de chaleur en utilisant différent fluides de circulation.[12]

Figure 2.4. Schéma d'un puits avec un échangeur de chaleur à tube en U [13]

Figure 2.5 Echangeur de chaleur géothermique vertical (à gauche) et d'un caloduc (à droite) [14].

Figure 2.6 : Modèle de l'échangeur de chaleur géothermique de tube en U (2D) [15]

Figure 2.7: Exemple de géométrie d'un double tube en U avec deux circuits indépendants[16]

Figure 2.8 : Structure d'un échangeur de chaleur en tube U et un échangeur de chaleur double tube [17]

Figure 2. 9 : Schéma de fonctionnement de l'échangeur de chaleur géothermique[18]

Figure 2. 10:fonctionnement de l'échangeur de chaleur géothermique [19]

Figure 2.11 :Schéma de l'échangeur de chaleur géothermique de tube en U [20]

Figure 2.12 : Maillage de tube en U et de sol [21]

Figure 2.13 : : Installation d'un forage sous a) le soleil direct en tout temps dans une zone sablonneuse non irriguée (BH-1) et b) une zone irriguée semi-ombragée près de plusieurs arbres [22]

Figure 2.15 : Présentation du maillage de section de sol [23]

Figure 2.16: Structure de tube en U[24]

Figure 2.17 :Maillage de sol [24]

### **Chapitre 3**

Figure 3.1 : Coupe de l'échangeur vertical enterré suivant le plan (y, z) [40]

Figure 3.2 : Coupe de l'échangeur vertical enterré suivant le plan (x, y) [40]

Figure3.3 : Arrangement des volumes de contrôle

Figure 3.4 : Volume de contrôle (V).

Figure 3.5 : Position des nœuds dans les volumes de contrôle.

Figure 3.6 : Position des nœuds dans les volumes de contrôle.

Figure 3.7 : Coordonnées double direction (diffusion).

### **Chapitre 4**

Figure 4.1 : Vue globale de Gambit.

Figure 4.2 : Menu principale de Gambit.

Figure 4.3: Construction de la géométrie

Figure 4.4 : Tube schématisé sur Gambit.

Figure 4.5: Coude du tube sur Gambit

Figure 4.6 : Maillage de l'échangeur vertical.

Figure 4.7 : Maillage de l'échangeur vertical.

Figure 4.8 : mode d'utilisation du logiciel fluent

Figure 4.9 : Vérification du maillage

Figure 4.10 : Vérification des unités de la première simulation.

Figure 4.11 : Vérification des unités de la deuxième simulation.

Figure 4.12 : Choix du solveur

Figure 4.13 : Activation de l'équation de l'énergie [35]

Figure 4.14 : Régime d'écoulement

Figure 4.15 : Propriétés du fluide

Figure 4.16 : Propriétés du solide

Figure 4.17 : Choix de la pression de référence.

Figure 4.18 : Valeurs des conditions aux limites.

Figure 4.19 : Choix de la solution.

Figure 4.20 : Critères de convergence

Figure 4.21: Choix du nombre des itérations

Figure 4.22: Allures de l'évolution des résidus de calcul.

## **Chapitre 5**

Figure 5.1 : Maillage structuré du domaine sous-sol (terre).

Figure 5.2: Maillage hybride des domaines de calcul.

Figure 5.3 : Différents domaines de calcul de l'échangeur vertical.

Figure 5.4 : Comparaison de l'évolution de la température de la paroi béton de l'échangeur vertical entre les différents modèles analytique et numérique.

Figure 5.5 : Contour de la température sur la surface

Figure 5.6 : Contour de la température sur la surface

Figure 5.7 : photo montrant le type de sol

Figure 5.8 : photo montrant le sable rivière

Figure 5.9 : Photo montrant le sable de désert

Figure 5.10 : Carte de répartition mondiale des affleurements de roches carbonatées (Calcaire-sédiment)

Figure 5.11 : Photo montrant le calcaire sédiment

Figure 5.12 : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique

Figure 5.13 : Evolution du flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique.

Figure 5.14 : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique

Figure 5.15 : Evolution du flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique

Figure 5.16 : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique.

Figure 5.17 : Evolution du flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique

Figure 5.18 : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique.

Figure 5.19 : Evolution du flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique

Figure 5.20 : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique dans les 4 terres .

Figure(5.21) : Evolution de flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique dans les 4 terres .

Figure (5.22) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique pour différents fluides caloporteurs.

Figure(5.23) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique pour différentes fluides caloporteur.

Figure (5.24) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique pour différentes vitesse du fluide caloporteur

## ***Liste des tableaux :***

Tableau 1.1: Dénomination commerciale des PAC géothermiques [7]

Tableau 3. 1 : Paramètres utilisés dans la simulation [40]

Tableau 3.2 : Conditions imposées sur le système étudié [40]

Tableau 3.3 : Termes de l'équation généralisée (III.2)

Tableau 4.1 : Caractéristiques des matériaux utilisés [18]

Tableau 5.1 : Caractéristiques des fluides utilisés [12]

# Nomenclature

## Acronyme des termes utilisés :

GHE : geothermal heat exchanger ( échangeur de chaleur géothermique )

PAC : pompe à chaleur

SSPG : systèmes du stockage saisonnier de l'énergie solaire par puits géothermique.

## Lettre grecques :

$\sigma$ : Constante de Stefan–Boltzmann  $5.67051 \times 10^{-8}$  [W.m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup> ]

$\Phi$  : Puissance totale rayonné dans l'espace.

$\rho$  : Masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>].

$\alpha$  : La diffusivité thermique [ m<sup>2</sup>/s]

$\lambda$  : Le coefficient de conductivité thermique [W/m.k]

$\mu$  : Viscosité dynamique [kg/m.s].

$\phi$  : La variable dépendante générale.

$\varepsilon$  : Le taux de dissipation de l'énergie cinétique.

$\Gamma\phi$  : Le coefficient de diffusion de  $\phi$ .

$\sigma_k$ : Le nombre de Prandtl turbulent pour  $k$  et  $\varepsilon$ .

$j$  : La sommation sur les noeuds en voisinage du noeud P ;

$\phi F$  : Valeur prescrite.

## Lettres latines :

$A_s$ : Surface totaux du soleil *comme* ( $6.0874 \times 10^{12}$  km<sup>2</sup>).

$Bx$  : La forme de volume dans la direction des  $x$

$b$  : Représente un part du terme source,  $S\phi$

COP : Coefficient de performance

$C_p$  : Capacité thermique massique [J/Kg.K].

$C_{1\varepsilon,2\varepsilon,3\varepsilon}$ : Constante constantes empiriques

$G_k$  : Représente la génération de l'énergie cinétique due au gradient de vitesse

$G_b$  : La génération de  $k$  due au décollement et des forces de volume

$h$  : L'enthalpie spécifique [j/kg].

$k$  : L'énergie cinétique de turbulence.

$M$  :Emittance [W.m<sup>-2</sup>]

$m$  : Débit massique de fluide frigorigène [KG/s]

$t$  : Le temps [s].

$T_s$  : Température du soleil [K]

$T_2$  : Température (en K) de la source chaude à l'entrée de l'échangeur de chaleur (condenseur),

$T_1$  : Température (en K) de la source froide à l'entrée de l'échangeur de chaleur (évaporateur).

$T$  : La température [K]

$P_{abs}$  : La pression absolue [pascal]

$P_{op}$  : La pression de référence [pascal].



$P_{Gauge}$  : La pression gauge pressure [pascal].

$P_t$  : La pression totale [pascal].

$Q$  : Production de chaleur [j/s]

$S_\phi$  : Le terme source.

$S_k, S_\varepsilon$  : Terme source

$S_p$  : Le taux volumétrique de génération de chaleur

$U$  : La vitesse du fluide caloporteur [m/s].

$u$  : Composante de la vitesse du fluide dans la direction x [m/s].

$v$  : Composante de la vitesse du fluide dans la direction y [m/s].

$w$  : Composante de la vitesse du fluide dans la direction z [m/s].

$V$  : Volume d'eau en [m<sup>3</sup>].

$Y_M$  : La contribution de la dilatation fluctuante dans La turbulence compressible pour ( $\varepsilon$ )

$a_j$  : Coefficient de l'équation qui tient compte des effets combinés de l'accumulation, le transport par convection et diffusion et du terme source

$W$  : Fonction de balance.

$\dot{W}$  : Travail mécanique [W]

# **Sommaire**

## Sommaire

Introduction générale .....	1
Introduction : .....	3
I.1 soleil source d'énergie : .....	4
I.2 Les capteurs solaires : .....	4
I.3 Ballon de stockage : .....	5
I.4Echangeurs de chaleur : .....	5
I.4.1 Applications spécifiques pour les échangeurs de chaleur : .....	6
I.5Les pompes a chaleur : .....	7
I.5.1 Le principe du pompe a chaleur dans un système réfrigérant : .....	7
I.6 Source froide sur le sol : .....	8
I.7 Les échangeurs de chaleur forme U .horizontal et vertical : .....	9
I.7.1 Principe de fonctionnement d'une PAC utilisant l'énergie du sol : .....	10
I.7.2 Système combiné de chauffage et de refroidissement : .....	12
I.8 Conclusion : .....	13
Introduction : .....	14
II.1 revue bibliographie : .....	14
II.2 Conclusion : .....	30
Introduction : .....	31
III.1.Géométrie du problème étudié : .....	31
III.2. Paramètres utilisés : .....	32
III.3. Hypothèses simplificatrices : .....	33
III.4. Système d'équations : .....	33
III.4.1 Equation de continuité : .....	33
III.4.2 Équation de quantité de mouvement : .....	33
III.4.3 Équation d'énergie : .....	34
III.4.4 Équations de turbulence : .....	34
III.4.5 Equation d'énergie cinétique turbulente k : .....	34
III.4.6 Equation d'énergie de dissipation $\epsilon$ : .....	34
III.5.Discrétisation des équations différentielles : .....	35
III.5.1.Méthodes de discrétisation : .....	35
III.5.2.Méthode des résidus : .....	36
III.5.3.Méthode des volumes finis : .....	36
III.5.3.1.Principe de méthode : .....	36

III.5.3.2.Définition des noeuds :.....	38
III.5.4 Condition initiale et aux limites :.....	39
III.5.4.1 Condition initiale :.....	39
III.5.4.2 Condition aux limites :.....	39
III.6.Conclusion : .....	39
Introduction :.....	40
IV.1.Outil de simulation Gambit et fluent : .....	41
IV.1.1. L’outil gambit : .....	41
IV.1.2 Construction d'un maillage : .....	41
IV.1.3.Notice d’utilisation de gambit :.....	42
IV. 2. Procédure de résolution :.....	42
IV. 2.1 Réalisation de la géométrie :.....	42
IV.2.2. Génération du maillage :.....	44
IV. 3. Conditions aux limites : .....	45
IV. 3.1. Résolution sous Fluent :.....	46
IV. 3.2.Choix de la session : .....	46
IV. 3.3. Importation de la géométrie (*.msh) :.....	47
IV. 3.4.Vérification du maillage importé :.....	47
IV. 3.5.Vérification de l’échelle :.....	47
IV. 3.6. Choix du solveur :.....	48
IV. 3.7. Activation de l’équation de l’énergie :.....	49
IV. 3.8.Choix du modèle de turbulence : .....	50
IV. 3.9. Définir les propriétés des matériaux : .....	50
IV. 3.10 Conditions d’opération : .....	52
IV. 3.11.Définir les conditions aux limites :.....	52
IV. 3.1.2 Choix de solution .....	53
IV. 3.13.Sauvegarde du fichier *.cas : .....	53
IV. 3.14.Choix des critères de convergence :.....	54
IV. 3.15. Exécution des calculs :.....	54
Introduction :.....	57
V.1.Effet du maillage : .....	57
V.2. Etude thermique pour validation :.....	58
V.2.1.Validation du modèle : .....	59

V.2.2.évolution de la température dans l'échangeur de chaleur vertical : .....	59
V.2.2.1. Evolution de la température du tube en U : .....	60
V.2.2.2.Distribution de température dans les surfaces intérieures : .....	60
V.3 Les types des terres : .....	60
V.3.1 La terre 1 : le sol.....	61
V.3.2 La terre2 : sable de rivière.....	61
V.3.3 La terre3 : Sable du désert.....	62
V.3.4 La terre4 : Calcaire-sédiment .....	62
V.4.Etude thermique de la simulation : .....	63
V.4.1 l'influence des différents types de terre sur le stockage thermique : .....	63
V.4.1.1 La terre 1 : .....	63
V.4.1.1.1 évolution de la température : .....	63
V.4.1.1.2 évolution de flux de chaleur : .....	64
V.4.1.2 La terre 2 : .....	65
V.4.1.2.1 évolution de la température : .....	65
V.4.1.2.2 évolution de flux de chaleur : .....	66
V.4.1.3 La terre 3 : .....	67
V.4.1.3.1.évolution de la température : .....	67
V.4.1.3.2.évolution du flux de chaleur : .....	68
V.4.1.4 La terre 4 : .....	69
V.4.1.4.1.évolution de la température : .....	69
V.4.1.4.2.évolution du flux de chaleur : .....	70
V.4.1.5 Comparaison de la variation de température dans les 4 terres : .....	71
V.4.1.6 Comparaison de la variation de flux dans les 4 terres : .....	71
V.4.2 influence des différents fluides caloporteurs utilisés dans le circuit : .....	73
V.4.2.1-Evolution de la température : .....	73
V.4.2.2-évolution de flux : .....	74
V.4.3 influence de la vitesse du fluide caloporteur : .....	75
V.5 Conclusion : .....	76
Conclusion générale : .....	77

# **Introduction générale**

## *Introduction générale*

Au cours des dernières décennies, le monde a souffert de la consommation très élevée en énergie électrique nécessaire pour chauffer l'air. Cette forte consommation apparaît clairement dans les zones froides.

Pour répondre à ces défis énergétiques, plusieurs techniques de chauffage utilisant les énergies alternatives peuvent être mises en œuvre. La géothermie est l'une des énergies renouvelables qui désigne l'énergie calorifique stockée dans le sous-sol, dans la mesure où l'énergie primaire est principalement consommée sous forme de chaleur et provenant du sous-sol. Cette énergie géothermique peut être exploitée à l'aide de différents outils pour le chauffage des serres agricoles et le confort thermique utilisant les échangeurs verticaux .

Un échangeur vertical est un système géothermique qui utilise de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique. Le principe du système consiste à injecter dans un habitat, la chaleur du rayonnement solaire provenant de l'extérieur que l'on force au préalable à circuler dans une canalisation enterrée à une profondeur dans le sol.

L'installation de tubes d'une manière verticale est généralement plus coûteuse que les boucles horizontales ou de tranchées en raison du fait que les forages doivent souvent être forés jusqu'à une profondeur de 100 m, ce qui est souvent impossible aux environnements urbains en raison de l'infrastructure souterraine existante.

Pour mieux comprendre et prédire les phénomènes intervenant dans le bâtiment, la communauté scientifique fait appel aux techniques de modélisation et de simulation numérique. Il en découle que les outils de simulation sont devenus quasiment incontournables pour toute étude en énergétique du bâtiment liées aux exigences de confort et de santé ainsi qu'aux questions économiques et aux impacts environnementaux.

La simulation est un outil important pour l'optimisation des systèmes aussi bien que pour vérifier leurs comportements à long terme.

Evidemment le but notre travail, est d'étudier numériquement et par voie de simulation le comportement dynamique et thermique d'un échangeur de chaleur géothermique destiné au

## ***Introduction générale***

---

stockage de l'énergie solaire sous l'environnement algérien utilisant différents types de matériaux.

Dans cette étude nous utilisons le logiciel **Ansys-Fluent**. Ce logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics) est utilisé pour la modélisation et la simulation du comportement dynamique et thermique d'un échangeur de chaleur bi-tubulaire vertical enterré destiné au stockage de l'énergie solaire

Ce mémoire est composé de 5 chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons présenté les généralités sur le stockage solaire Thermique et les échangeurs de chaleur souterrains. Le second chapitre présente une recherche bibliographique détaillée sur les travaux analytiques, numériques et expérimentaux des systèmes de stockage de l'énergie solaire. Dans le troisième chapitre, la géométrie étudiée, les équations gouvernantes du problème abordé, et le modèle physique sont ainsi présentés. Le quatrième chapitre expose la résolution numérique et les étapes suivies dans la programmation et la simulation élaborée. Dans le cinquième chapitre nous avons réuni les résultats de simulation, dont on a présenté la qualité du maillage utilisé. Ces résultats sont représentés sous forme de courbes, sont analysés et discutés. Finalement, nous avons achevé notre travail par une conclusion générale et les perspectives qui peuvent être dégagées de ce travail.

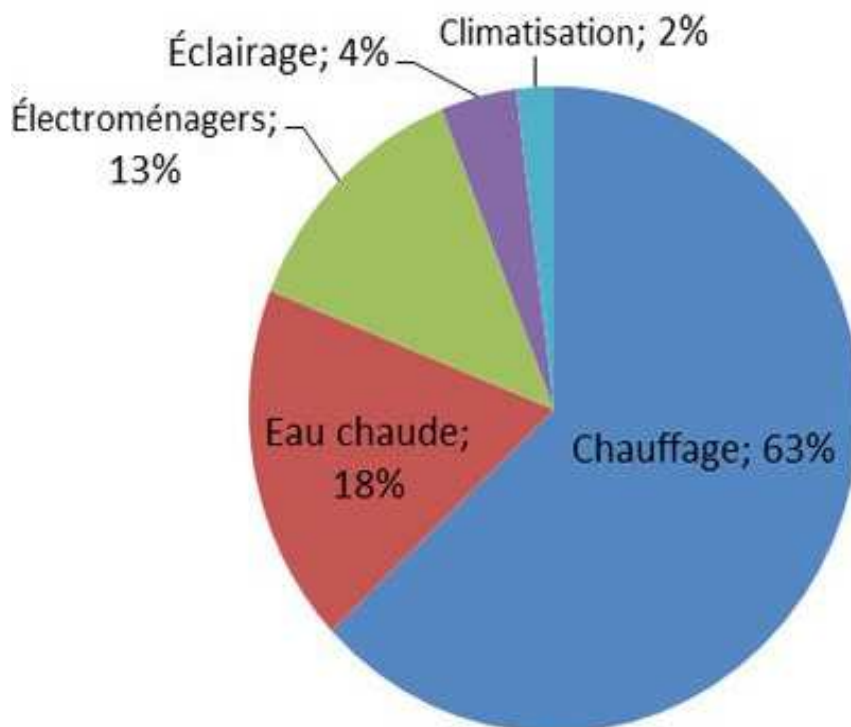


**CHAPITRE I**  
**Généralités sur les**  
**échangeurs de chaleur**  
**souterrains**

*Introduction :*

Le stockage thermique solaire permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire par la mise en œuvre de capteurs solaires qui transforment l'énergie solaire en chaleur transmise à un fluide caloporteur (parfois de l'air, le plus souvent de l'eau glycolée ).

On présente dans ce premier chapitre les bases importantes à la compréhension du sujet étudié, en premier lieu, nous traiterons quelques notions sur la source d'énergie que présente le soleil, nous décrirons ainsi les constituants de base de ce système, nous expliquerons leurs fonctionnement, pour ses emplois dans le domaine de chauffage et de climatisation.



**Figure (1.1): Répartitions des consommations énergétiques des foyers[1]**

### I.1 Soleil source d'énergie : [2]

Chaque jour, le soleil envoie une énorme quantité d'énergie, dépassant largement celle que nous utilisons en une année ; une énergie qui, à son tour, pourra être renouvelable.

### I.2 Les capteurs solaires : [3]

Un capteur solaire est un dispositif qui recueille et/ou concentre le rayonnement solaire. Ces dispositifs sont principalement utilisés pour le chauffage solaire actif et permettent le chauffage de l'eau. Ces collecteurs sont généralement montés sur le toit et doivent être très solides, car ils sont exposés à diverses conditions météorologiques.

L'utilisation de ces capteurs solaires offre une alternative au chauffage traditionnel de l'eau domestique à l'aide d'un chauffe-eau, réduisant potentiellement les coûts énergétiques au fil du temps. Ainsi que dans les environnements domestiques .

Il existe de nombreux types de capteurs solaires, mais tous sont construits avec la même base. En général, certains matériaux sont utilisés pour recueillir et concentrer l'énergie solaire et l'utiliser pour chauffer l'eau. Le plus simple de ces dispositifs utilise un matériau noir entourant les tuyaux que l'eau traverse. Le matériau noir absorbe très bien le rayonnement solaire, et comme le matériau chauffe l'eau qu'il entoure. C'est un design très simple, mais les captures peuvent devenir très complexes. Les plaques absorbantes peuvent être utilisées si une augmentation de température élevée n'est pas nécessaire, mais généralement les dispositifs qui utilisent des matériaux réfléchissants pour focaliser la lumière du soleil entraînent une augmentation de température.

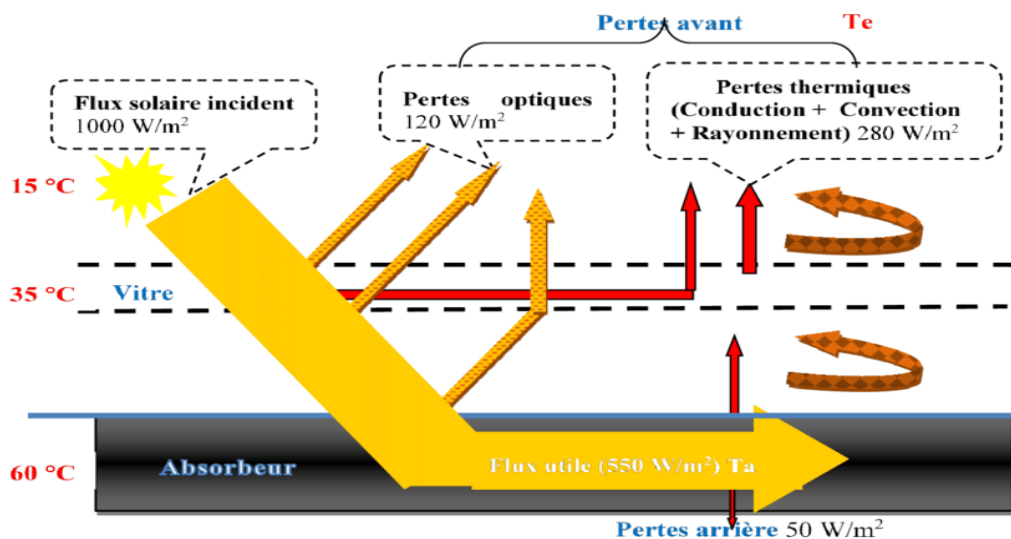


Figure (1.2): Bilan énergétique du capteur solaire [3]

### I.3 Ballon de stockage : [4]

Le stockage de l'énergie solaire dans un ballon de stockage permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire. L'accumulation de l'énergie dans le stockage se traduit par une élévation de sa température.

Pour apprécier l'efficacité d'un système de stockage, il faut rappeler que le rendement d'un capteur dépend essentiellement de la température moyenne du fluide qui le traverse, donc de la température du fluide au retour du stockage. L'une des caractéristiques essentielles de l'aptitude à l'emploi du stockage sera de fournir, à l'entrée des capteurs, un fluide dont la température sera la plus basse possible.

Le transfert de chaleur des capteurs vers le ballon s'effectue de deux façons différentes :

- par circulation forcée avec une pompe commandée par un dispositif de régulation.
- par circulation naturelle ou thermosiphon.

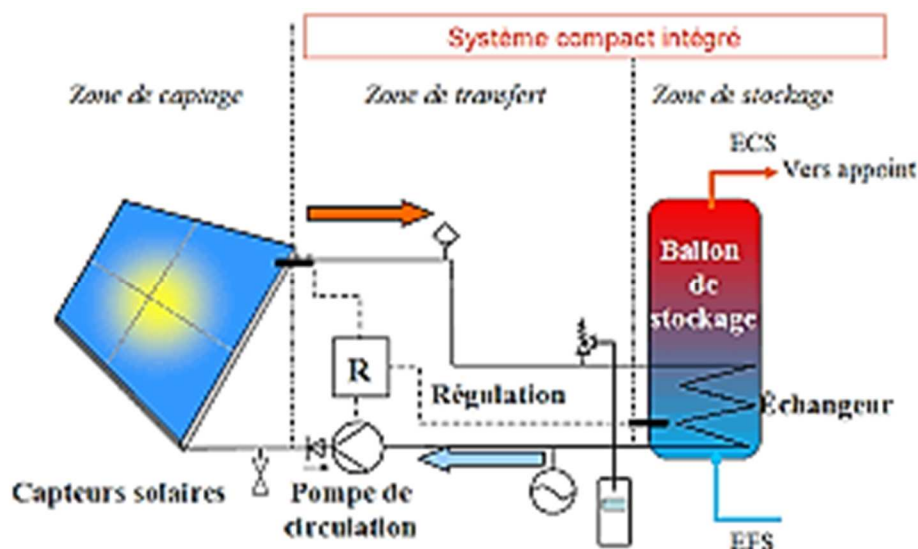


Figure (1.3) : schéma de le stockage thermique[4]

### I.4 Echangeurs de chaleur : [5]

Les échangeurs de chaleur sont utilisés pour transférer la chaleur d'un milieu à un autre. Ces milieux peuvent être un gaz, un liquide ou une combinaison des deux. Le milieu peut être séparé par une paroi solide pour empêcher le mélange ou peut être en contact direct. Les échangeurs de chaleur peuvent améliorer l'efficacité énergétique d'un système en transférant la chaleur des systèmes où elle n'est pas nécessaire à d'autres où elle peut être utilisée utilement.

Par exemple les utilisations courante des échangeurs de chaleur est de préchauffer un fluide froid entrant dans un système de procédé chauffé en utilisant la chaleur du fluide chaud

sortant du système. Cela réduit l'apport d'énergie nécessaire pour chauffer le fluide entrant à la température de travail.

#### ***1.4.1 Applications spécifiques pour les échangeurs de chaleur :***

Ces applications comprennent:

- Chauffage d'un fluide refroidisseur à l'aide de la chaleur d'un fluide plus chaud
- Refroidissement d'un fluide chaud en transférant sa chaleur dans un fluide plus frais
- Faire bouillir un liquide à l'aide de la chaleur d'un fluide plus chaud
- Faire bouillir un liquide en condensant un liquide gazeux plus chaud
- Condensation d'un fluide gazeux au moyen d'un fluide plus frais



**Figure I.4: échangeur à plaques[5]**

**Figure I.5: échangeur intégré[5]**

Les fluides dans les échangeurs de chaleur s'écoulent généralement rapidement, pour faciliter le transfert de chaleur par convection forcée. Ce débit rapide entraîne des pertes de pression dans les fluides. L'efficacité des échangeurs de chaleur se réfère à la façon dont ils transfèrent la chaleur par rapport à la perte de pression qu'ils subissent. La technologie moderne des échangeurs de chaleur minimise les pertes de pression tout en maximisant le transfert de chaleur et en atteignant d'autres objectifs de conception, comme résister aux pressions élevées des fluides, résister aux salissures et à la corrosion, et permettre le nettoyage et les réparations.

#### ***1.5 Les pompes à chaleur [6] :***

Une pompe à chaleur est un dispositif qui peut fournir le chauffage, le refroidissement et l'eau chaude sanitaire pour les applications résidentielles, commerciales et industrielles.

Elle transforme l'énergie de l'air, du sol et de l'eau en chaleur utile. Cette transformation se fait par le cycle du réfrigérant.



Figure (1.6) : l'installation d'une pompe à chaleur [6]

### I.5.1 Le principe de la pompe à chaleur dans un système réfrigérant : [6]

#### 1. *Evaporation* :

Une pompe à chaleur a toujours une source de chaleur extérieure et une sortie intérieure. Les sources extérieures peuvent être l'air ambiant, l'air d'échappement, la roche souterraine, les eaux souterraines, l'eau, etc. L'énergie de ces sources est infinie et donc renouvelable. Cette énergie représente environ 75 % de l'énergie utilisée pour alimenter la pompe à chaleur.

Le fluide dans les tuyaux souterrains absorbe la chaleur du sol. L'échangeur de chaleur extérieur (l'évaporateur) utilise l'énergie thermique de la source extérieure pour faire bouillir le frigorigène (le liquide de la pompe à chaleur) et le transforme en état gazeux.

#### 2. *Compression* :

Ensuite, le frigorigène arrive au cœur d'une pompe à chaleur : Le compresseur comprime le frigorigène - qui est à l'état gazeux - à une pression élevée, ce qui entraîne une élévation de la température.

Pour lancer le compresseur, une énergie supplémentaire est nécessaire : électricité, gaz ou énergie thermique. Cela représente 25% de l'énergie totale nécessaire pour faire fonctionner la pompe à chaleur.

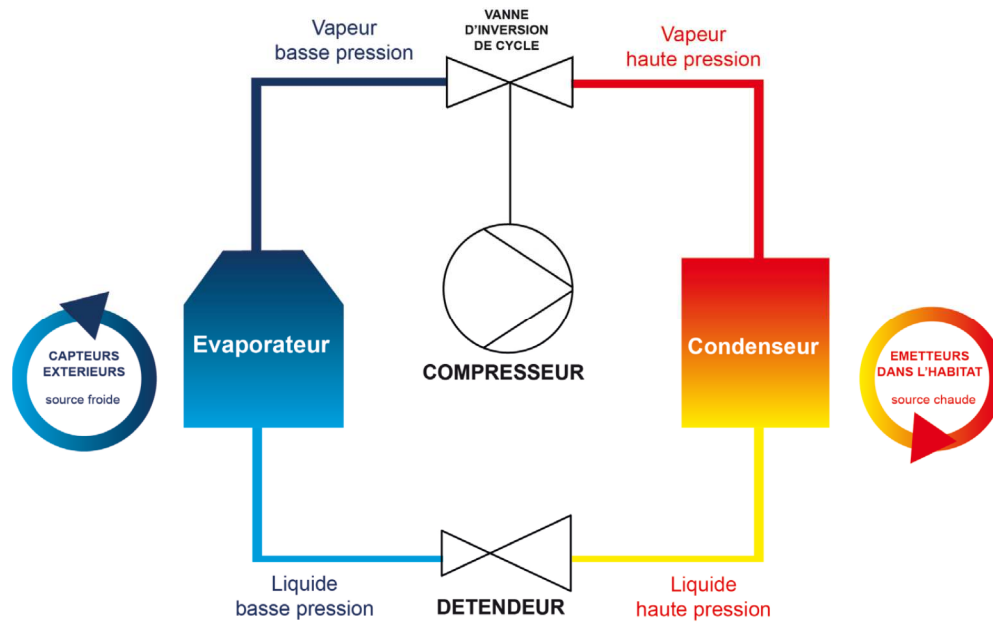
#### 3. *Condensation* :

Du côté de la décharge, la vapeur chaude et hautement pressurisée du compresseur passe par le deuxième échangeur de chaleur, appelé condenseur. Cet échangeur de chaleur permet au frigorigène de libérer la chaleur dans le système de chauffage de la maison (souffleur d'air,

chauffage au sol ou radiateurs), de sorte que le frigorigène se condense, c.-à-d. que le frigorigène passe de l'état gazeux à l'état liquide.

#### 4. La détente :

Le réfrigérant condensé passe ensuite par un dispositif d'abaissement de pression, la soupape d'expansion. Le réfrigérant liquide à basse pression entre alors dans un autre échangeur de chaleur, l'évaporateur, dans lequel le fluide absorbe la chaleur et fait bouillir. À partir de là, le cycle recommence.



**Figure (1.7) :Schéma de principe d'une PAC à compression de vapeur .[6]**

#### *1.6 Source froide sur le sol : [7]*

La chaleur terrestre est une source d'énergie durable pour la production de chaleur et d'électricité, qui ne dépend ni des conditions climatiques, ni de la saison ou du moment de la journée. La diversité des températures autorise une multitude de variantes d'utilisation. [10] sur la figure suivante on a entouré les applications qui nous intéressent par un carré Bleu, en fait ils sont choisis en fonction des profondeurs de leurs capteurs enterrés, allons de 5m à 150 m, cet intervalle de profondeur dans la terre se caractérise par une température constante allons de 10°C à 18° selon la position géographique du lieu (latitude, longitude), on parle dans ce cas de géothermie très basse énergie.



Alors l'utilisation de ces ressources géothermales dont la température est inférieure à 30 °C (cas des nappes superficielles ou nappes phréatiques et des nappes peu profondes), nécessite généralement l'emploi de pompes à chaleur, ce qui favorise le stockage de l'énergie, et leurs fonctionnements.

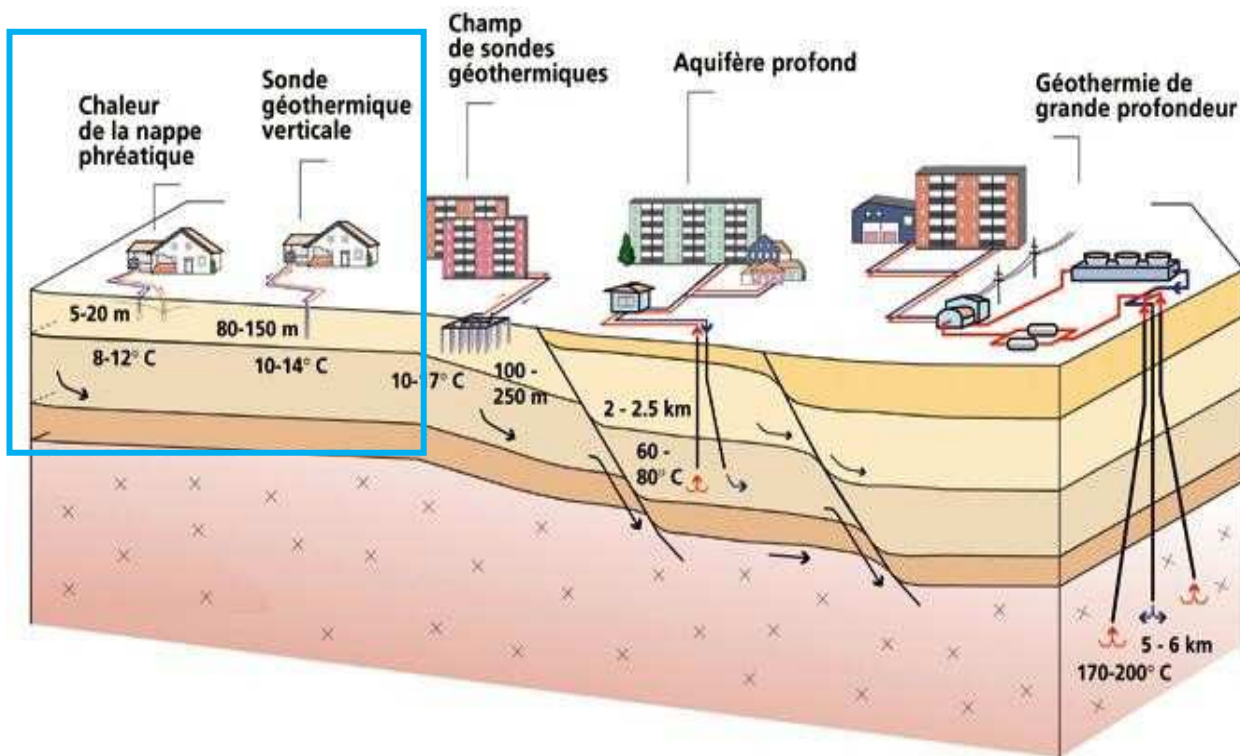
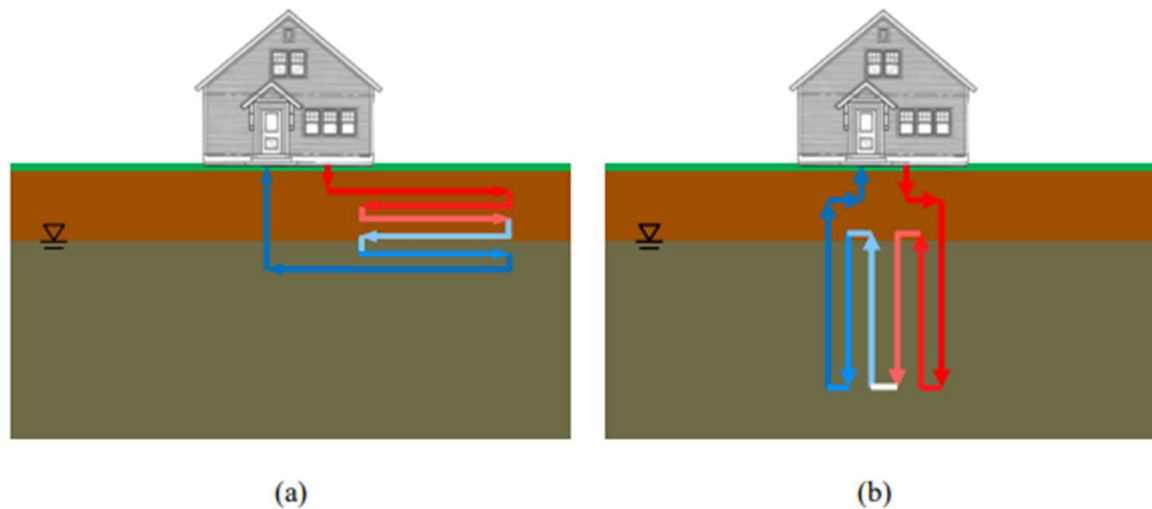


Figure (1.8): Les différentes applications de la chaleur géothermique [7]

### *1.7 Les échangeurs de chaleur forme U .horizontal et vertical : [8]*

Les systèmes fermés ne permettent pas au fluide de circulation (caloporteur) de sortir de la boucle de circulation. Dans certains cas, les tubes de circulation sont posés directement à l'intérieur du sol dans une orientation verticale ou horizontale, donc l'échange de chaleur se produit par le contact entre les parois de la circulation (les tubes) et le sol (figure ). Ces tubes sont souvent faits de plastiques durables comme le polyvinyle (PVC), ou polyéthylène haute densité (HDPE). Si l'on dispose de circuit de mise à la terre peuvent être posées dans des tubes horizontales à une profondeur relativement faible. Il faut prendre soin de s'assurer que les tube sont sous la profondeur de givre et encastrées sous le GWT, si possible.





**Figure I.9 :Système de pompe à chaleur géothermique en boucle fermée : (a) boucles de circulation horizontales et (b) boucles de circulation verticale[8]**

Si une grande superficie n'est pas disponible en raison des limites de la propriété ou des structures avoisinantes, les tubes peuvent être placés verticalement dans le sol. L'avantage d'une configuration verticale est que les tubes sont capables d'atteindre de plus grandes profondeurs où la température du sol est plus stable et d'avoir une surface de contact avec le sol plus importante.

L'installation de tubes verticalement est généralement plus coûteuse que les boucles horizontales ou de tranchée en raison du fait que les forages doivent souvent être forés jusqu'à une profondeur de 100 m, ce qui est souvent impossible aux environnements urbains en raison de l'infrastructure souterraine existante.

### ***1.7.1 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur utilisant l'énergie du sol [8]:***

Ces systèmes géothermiques exploitent la chaleur naturelle du sous-sol pour fournir du chauffage aux bâtiments. Les pompes à chaleur géothermiques sont utilisées depuis de nombreuses années. Maintenant, ils sont de plus en plus utilisés dans les maisons et les bâtiments commerciaux.

Les pompes à chaleur géothermiques sont constituées de trois éléments : un circuit d'échange de chaleur géothermique, une pompe à chaleur et un système de distribution au-dessus du sol. Les tuyaux de HDPE sont disposés sous terre. On peut estimer d'avoir un kilowatt d'énergie absorbé du sol pour chaque 10 mètres de tuyau. Le tuyau est habituellement posé dans des

tranchées horizontales à côté du bâtiment. S'il n'y a pas suffisamment d'espace dans le jardin, un forage d'une profondeur de 15 à 150 mètres peut être effectué.

Un mélange d'eau et d'antigel est ensuite pompé autour du circuit pour absorber la chaleur souterraine emprisonnée (environ 10 °C). Le mélange d'eau est ensuite comprimé et passe par un échangeur de chaleur, qui extrait la chaleur et la transfère à la pompe à chaleur.

La pompe à chaleur se compose d'un évaporateur, d'un condenseur de compresseur et d'une soupape d'expansion, et utilise les principes du cycle Carnot pour augmenter la pression et la température de vapeur (jusqu'à 50 °C). L'évaporateur convertit le liquide de travail en vapeur; le compresseur augmente considérablement sa température et sa pression; le condenseur transfère la chaleur au système de distribution du bâtiment; et puis la soupape d'expansion refroidit les choses pour qu'elles deviennent, une fois de plus, un mélange froid de liquide et de vapeur.

Les rendements maximaux dérivés de ce système sont par le chauffage par le sol ou de grands radiateurs à basse température. Si la pompe à chaleur doit atteindre une température plus élevée, l'efficacité est réduite.

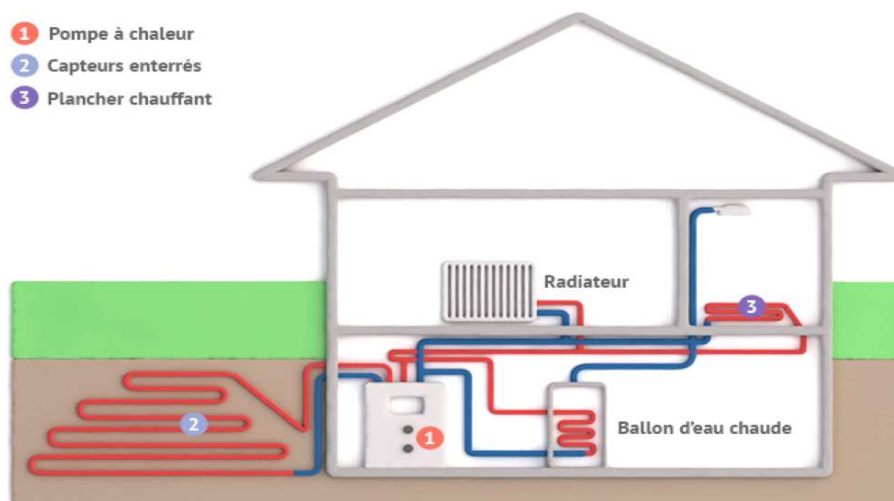


Figure (1.10): fonctionnement de chauffage et climatisation géothermiques [8]

### I.7.2 Système combiné de chauffage et de refroidissement : [9]

Les pompes à chaleur géothermiques sont utilisées depuis la fin des années 1940. Ils utilisent la température constante de la terre comme milieu d'échange au lieu de la température de l'air extérieur.

À quelques mètres sous la surface de la terre, le sol reste à une température relativement constante. Selon la latitude, les températures du sol varient de (7 °C) à (21 °C). Cette température du sol est plus chaude que l'air au-dessus pendant l'hiver et plus froide que l'air

en été. La pompe à chaleur géothermique en profite en échangeant de la chaleur avec la terre à travers un échangeur de chaleur au sol.

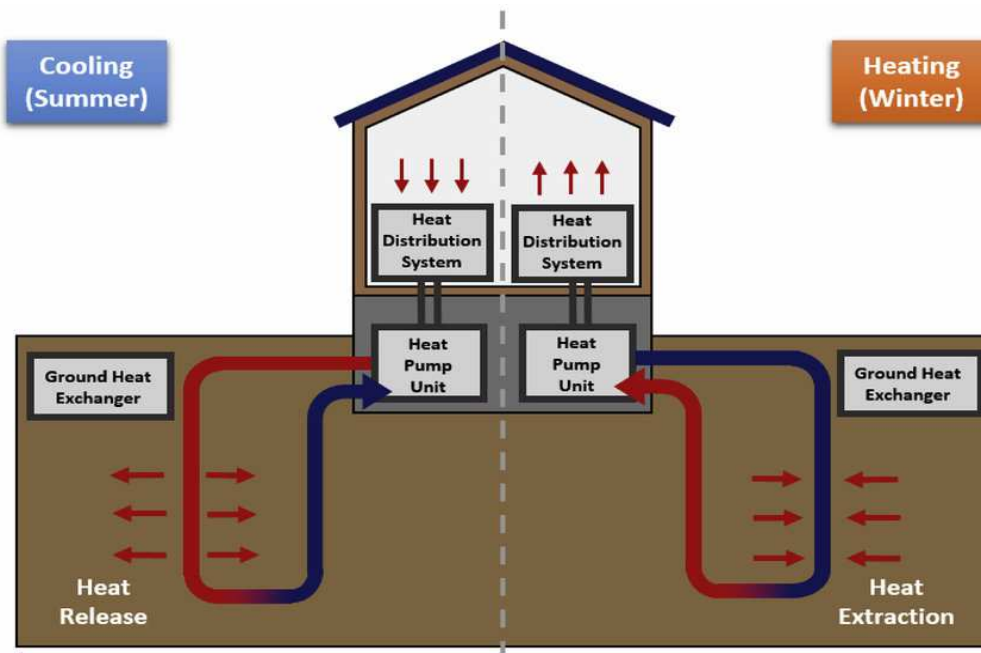


Figure (1.11): Les types des pompes a chaleur géothermiques [9]

Certains modèles de systèmes géothermiques sont disponibles avec des compresseurs à deux vitesses et des ventilateurs variables pour plus de confort et d'économies d'énergie. Par rapport aux thermopompes à air, elles sont plus silencieuses, durent plus longtemps, nécessitent peu d'entretien et ne dépendent pas de la température de l'air extérieur.

Une pompe à chaleur géothermique à double source combine une thermopompe à air et une thermopompe géothermique. Ces appareils combinent le meilleur des deux systèmes. Les thermopompes à double source ont un rendement plus élevé que les thermopompes à air, mais elles ne sont pas aussi efficaces que les thermopompes géothermiques. Le principal avantage des systèmes à double source est qu'ils coûtent beaucoup moins cher à installer qu'une seule unité géothermique, et fonctionnent presque aussi bien.

Même si le prix d'installation d'un système géothermique peut être plusieurs fois supérieur à celui d'un système à source d'air de la même capacité de chauffage et de refroidissement, les coûts supplémentaires vous sont remboursés en économies d'énergie dans 5 à 10 ans. La durée de vie du système est estimée à 12-15 ans pour les composants intérieurs et à plus de 50 ans pour l'échangeur géothermique.

Celons le mode de raccordement entre les échangeurs géothermiques et la pompe à chaleur, on distingue trois types de pompes à chaleur :

- 1- les PAC à détente directe, il n’y a qu’un seul circuit : le fluide frigorigène circule en circuit fermé dans la pompe, les capteurs et les émetteurs de chaleur.
- 2- les PAC mixtes, il y a deux circuits : celui du fluide frigorigène des capteurs et de la pompe à chaleur et celui de l’eau chaude des émetteurs.
- 3- les PAC à fluides intermédiaires, il y a trois circuits : le circuit frigorifique de la pompe à chaleur, le circuit des capteurs ou circule de l’eau additionnée d’antigel et le circuit qui alimente en eau chaude les émetteurs.

**Tableau (1.1): Dénomination commerciale des PAC géothermiques.[7]**

Pompe à chaleur géothermiques			
Denomination commercial	Capteurs enterrés horizontaux	Capteurs enterrés verticaux	Pompe à chaleur sur eau de nappe
Eau glycolée/eau	Pompe à chaleur à fluides intermediaries		
Eau/eau			Pompe à chaleur à fluides intermédiaires
Sol/sol	Pompe à chaleur à détente direct		
Sol/eau	Pompe à chaleur mixte		

***I.8 Conclusion :***

Afin de comprendre le système de stockage thermique et son fonctionnement on a présenté dans ce chapitre les caractéristiques thermiques de l’énergie solaire, ensuite on a analysé chaque composant d’une installation solaire-géothermique conçue pour le chauffage et le rafraichissement des habitations.

La terre comme source de chaleur a l’avantage d’avoir une température stable tout au long de l’année, cette fonctionnalité nous permet de l’utiliser comme milieu pour le stockage de l’énergie thermique solaire, ce stockage peut être saisonnier, donc extraction de la chaleur en hiver pour le chauffage des locaux et injection de la chaleur dans le sous-sol en été pour le rafraîchissement.

# **CHAPITRE II**

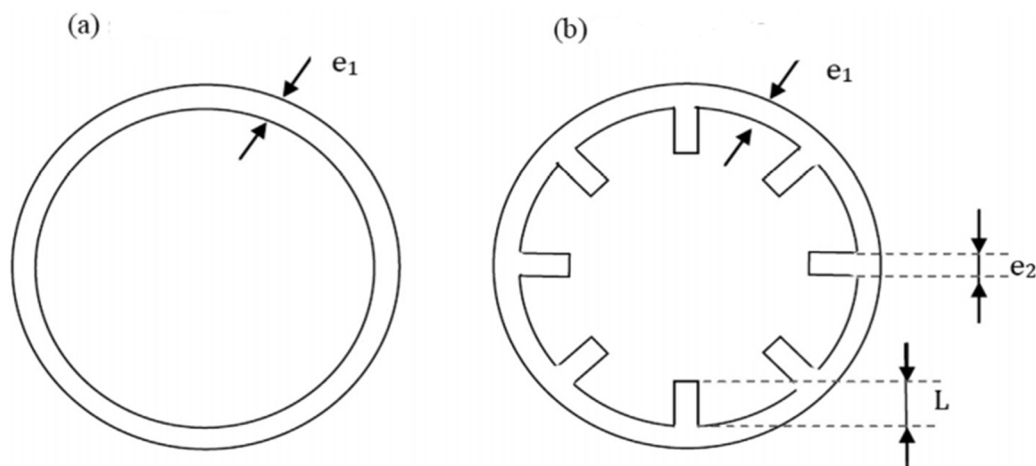
## **Recherche bibliographique**

**Introduction :**

Il est important de comprendre la répartition de la température du sol autour tube en U souterrains, car les conditions de fonctionnement de l'échangeur de chaleur géothermique sont étroitement liées au champ de température du sol autour des tuyaux. Il est possible de concevoir le meilleur échangeur de chaleur souterrain uniquement en comprenant la distribution de la température du sol avant et après le fonctionnement de l'échangeur de chaleur de la source de sol. Une conception raisonnable améliorera la performance du transfert de chaleur des tuyaux souterrains, améliorera le coefficient de performance et l'économie de fonctionnement du système de l'échangeur de chaleur de la source souterraine. Par conséquent simuler numériquement le transfert de chaleur du système peut nous aider à améliorer le modèle et le design de l'échangeur géothermique.

**II.1 revue bibliographique :**

**BOUHACINA et al.** [10] ont étudié par simulation numérique, la différence entre un échangeur de chaleur géothermique avec tube en U lisse et tube en U avec ailettes. L'étude a montré que la nouvelle conception avec ailettes est plus performante et la recharge et la décharge de l'énergie thermique solaire dans le sous-sol est améliorée.



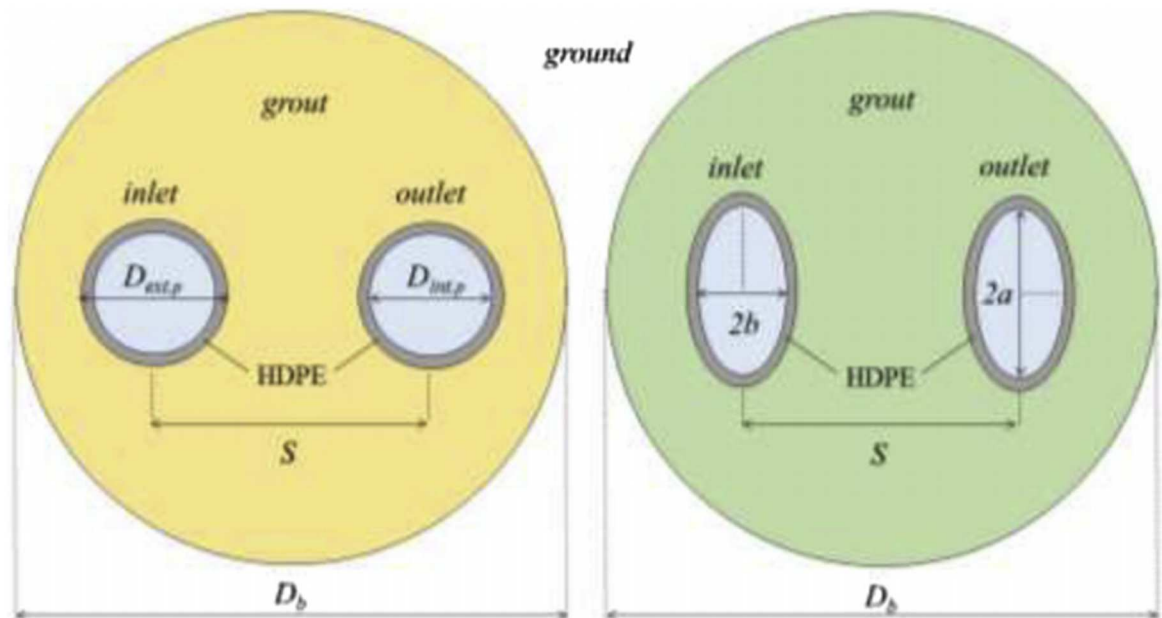
**Figure (2.1): coupe transversale de tube lisse et tube avec des ailettes [10]**

Après les expériences faites ils ont conclu que :

- La température du sol diminue en mode de chauffage et augmente au cours du processus de récupération de la température du sol dans un tube en U à ailettes GHE est plus rapide que le modèle équipé par tube en U lisse.

- l'extraction thermique du tube en U à ailettes est plus rapide ce qui permet de garder la propriété du sol en sécurité et la régénération de la température initial.
- L'extraction de chaleur en mode chauffage est plus efficace à 7% dans le tube en U à ailettes.
- L'évolution du flux thermique de la paroi de forage du tube en U à ailettes est plus grande que dans le tube lisse ce qui montre que le transfert est amélioré dans le tube en U à ailettes.

AMINHOSSEIN [11], a étudié les effets des différents tubes géométriques sur le transfert thermique et la quantité d'énergie transférée. Dans les expériences fait par AMINHOSSEIN compare entre les tubes en U circulaires et elliptiques .

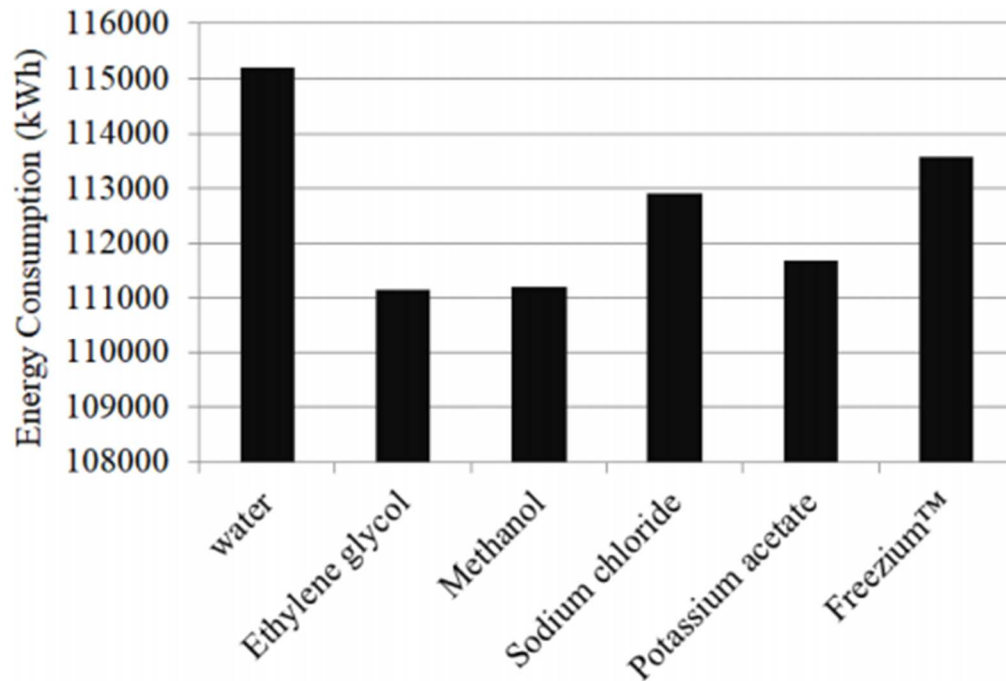


Figure( 2.2): section horizontal présenté la différence entre tube en U circulaire et elliptique [11].

Les résultats de AMINHOSSEIN ont montré une comparaison entre les tubes en U circulaires et elliptiques que :

- Un échangeur avec tube en U circulaire présente une variation de température plus élevée, par rapport à un échangeur avec tube en U elliptique .
- le tube en U elliptique donne une valeur inférieure de 3,25 % à la sortie température du fluide, par rapport à la température circulaire

**SOLTANI et al.** [12] ont étudié le comportement des différents fluides utilisés dans un échangeur du tube U et leurs effets sur la température et le flux de chaleur échangé. Dans les expériences réalisées, Monsieur **SOLTANE** compare les différents fluides: Eau, Freezium, Chlorure de sodium, Acétate de potassium, Méthanol et éthylène glycol. et observe leurs influence.



**Figure (2.3) : Énergie consommée du système d'échangeur de chaleur en utilisant différent fluides de circulation [12].**

En considérant la consommation d'énergie du l'échangeur, les performance, et la perte de performance de fluide circulant que l'éthylène glycol est sélectionné comme le meilleur fluide.

En 2018, **SHABNAM GHARIBI et al** [13], ont réalisé une étude par vois de simulation. Ils ont démontré la faisabilité d'utiliser un puits de pétrole abandonné comme ressource. Un modèle numérique tridimensionnel d'un échangeur de chaleur à tube en U est simulé à partir de données réelles sur le terrain d'un puits de pétrole abandonné situé dans le sud de l'Iran. Pour évaluer et optimiser la performance de l'échangeur de chaleur, les influences du débit massique, de la température d'entrée du fluide, de la longueur de l'isolant, et le diamètre de la conduite sont analysés.



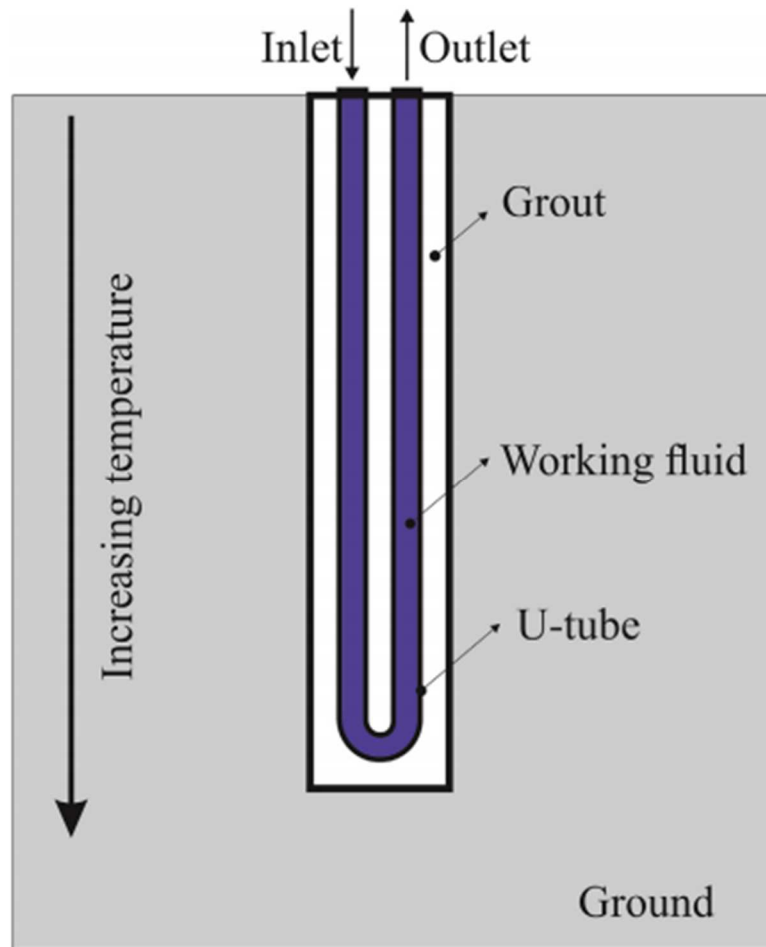


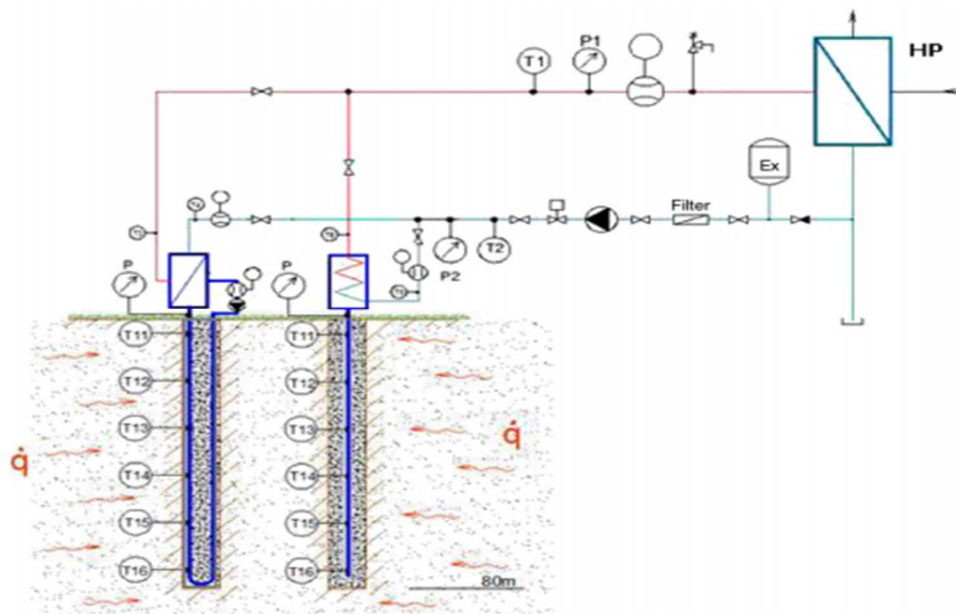
Figure (2.4) Schéma d'un puits avec un échangeur de chaleur à tube en U [13].

Les conclusions suivantes ont été tirées :

- Le grand avantage de l'échangeur de chaleur simulé est que il peut fonctionner régulièrement comme une production géothermique à long terme système dû au fait que la température de sortie du fluide ne change pas avec le temps
- Avec une température d'entrée de fluide de 288,16 K dans le tube et une vitesse de 0,03 m/s, la température de sortie est de 324,73 K à la première année d'exploitation et il diminue à 324,13 K après 5 ans.
- Parmi les différentes vitesses d'entrée de l'eau, la vitesse optimale, à laquelle la température de sortie maximale de 324,13 K peut être atteinte, est la suivante : température maximale de sortie de 324,13 K, est de 0,03 m/s pour une température d'entrée d'eau de 288,16 K.

**RICHARD et al** [14], ont réalisé une étude de l'acquisition d'énergie à faible potentiel à l'aide d'échangeurs de chaleur terrestres verticaux et de tubes en U gravitaires. Ces

deux systèmes font partie du dispositif (simulateur) pour le transport de la chaleur à faible potentiel à travers les changements de phase dans la partie de vaporisation et de condensation du tube à des températures inférieures à 0°C. Le dispositif permet donc un développement des activités de recherche lors de la vérification de la production technologique d'un caloduc adapté à l'utilisation de la chaleur terrestre à basse température en un environnement de laboratoire. Les composants individuels de l'appareil permettent une recherche de paramètres thermocinétiques de transport de la chaleur et une modélisation réaliste du flux de chaleur de la roche vers le fluide caloporteur.



**Figure (2.5) : un échangeur de chaleur géothermique vertical (à gauche) et d'un caloduc (à droite) [14].**

**ISMAEL et al** [15] ont étudié dans l'université polytechnique de valence (Espagne) une validation expérimentale d'un modèle hybride bidimensionnel (2D) pour un échangeur de chaleur sol à tube en U(vertical). Il est basé sur l'utilisation de l'analogie électrique pour modéliser le transfert de chaleur dans le pieux de forage et les facteurs de réponse thermique pour estimer le flux de chaleur vers le sol environnant.

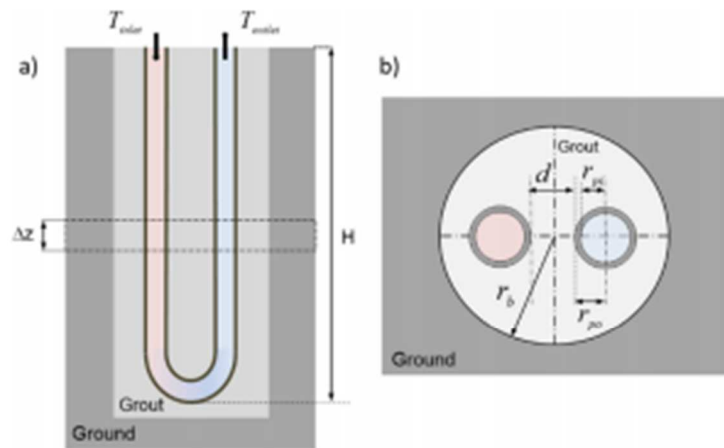


Fig. 1. Ground exchanger configuration: (a) longitudinal section; (b) transverse section.

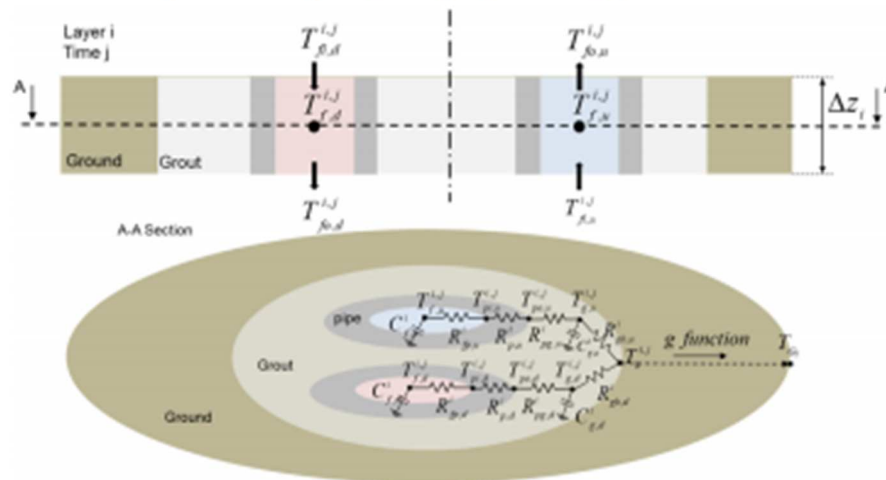


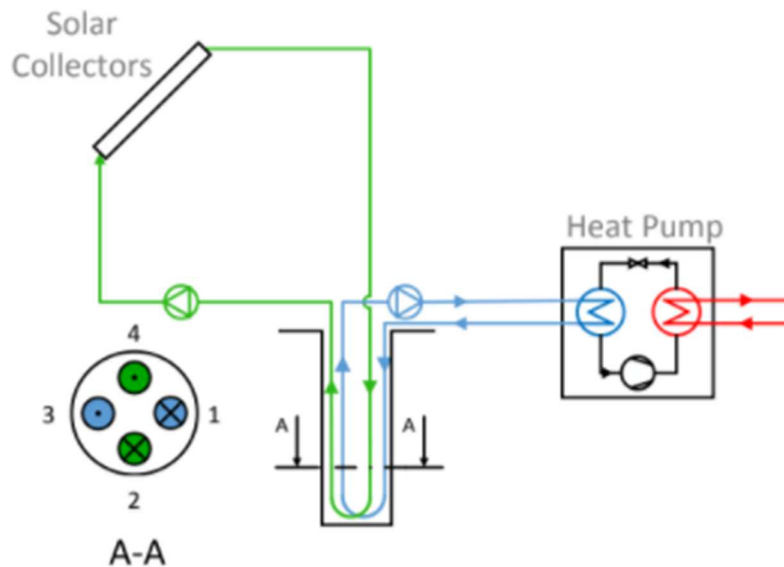
Figure (2.6) :Modèle de l'échangeur de chaleur géothermique de tube en U (2D)

[15].

Les résultats expérimentaux ont été obtenus à partir d'une installation expérimentale réelle (centrale GeoCool). Une durée de fonctionnement de quatre jours a été sélectionnée, pour laquelle la saturation thermique du sol a été évitée et les intervalles ON-OFF de la GSHP, qui a fonctionné en mode refroidissement, ont été pris en compte. Un modèle CFD raffiné de l'installation a également été développé pour comparaison. A température du fluide de sortie inférieures à 1 °C, ce qui n'est pas élevé, compte tenu des incertitudes rencontrées dans ce type d'installations. Le modèle a également été capable d'estimer la température du pieux de forage à différentes profondeurs avec une précision suffisante.

**BRUNO et al [16]**, ont présenté une validation expérimentale d'un modèle de résistance et de capacité thermiques pour des échangeurs à chaleur double tube en U avec deux circuits indépendants. Dans ce modèle , la section transversale du pieux de forage est divisée en

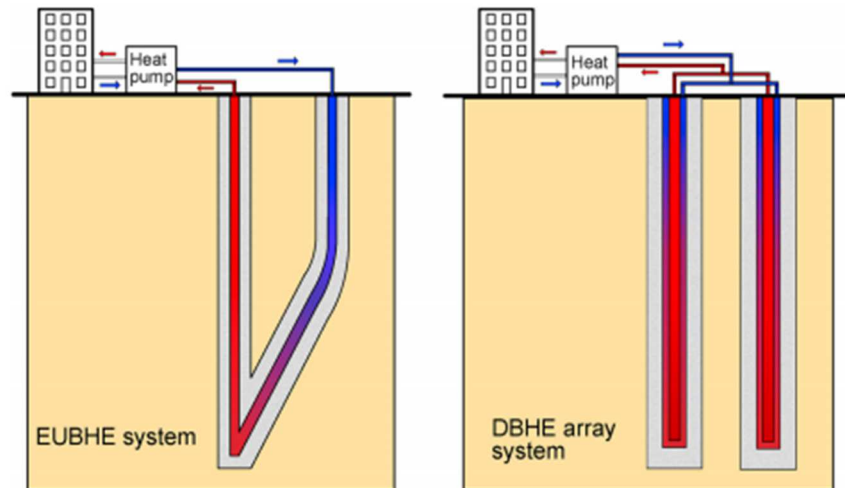
quatre quadrants. chacun avec deux nœuds représentant le fluide et le coulis, respectivement. Le transfert de chaleur du sol est évalué dans chacune des n sections verticales en utilisant la solution analytique de la source cylindrique infinie avec une superposition temporelle appropriée. Enfin, les résistances thermiques internes tube-tube et tube-pieux sont évaluées par la méthode multipolaire.



**Figure (2.7): Exemple de géométrie d'un double tube en U avec deux circuits indépendants[16].**

Le modèle proposé est limité au pieux de forage lui-même, tandis que le transfert de chaleur de la paroi du pieux de forage vers le champ lointain est calculé avec la solution de la source de chaleur cylindrique infinie avec une superposition temporelle appropriée pour gérer l'histoire thermique.

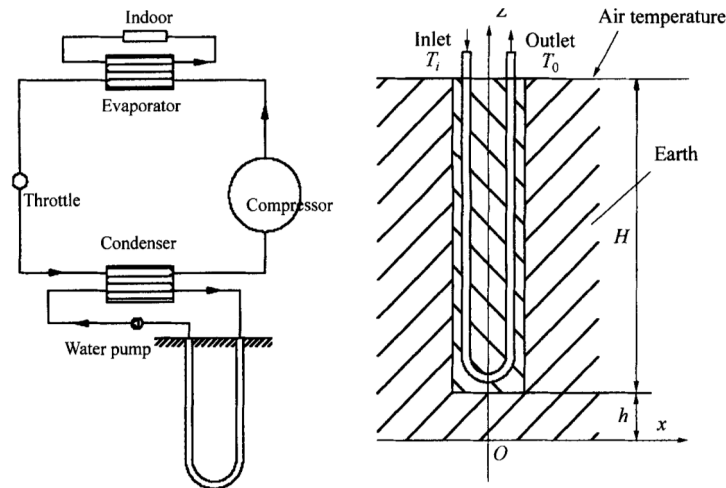
**CHAOFAN CHEN et al [17].** ont analysé par simulation numérique la capacité et l'efficacité d'un système d'échangeur de chaleur à tube en U grâce à l'utilisation de système en circuit fermée pour le chauffage des bâtiments, destiné à répondre à la forte demande de chauffage dans les quartiers à forte densité de population.



**Figure (2.8) : Structure d'un échangeur de chaleur en tube U et un échangeur de chaleur double tube [17]**

Dans ce travail, un système EUBHE profond a été introduit pour extraire l'énergie géothermique profonde pour le chauffage des bâtiments dans les quartiers à forte densité de population. Afin d'évaluer la capacité thermique et l'efficacité du système par rapport aux systèmes de réseaux 2-DBHE, un modèle numérique EUBHE 3D a été établi à l'aide du logiciel OGS sur la base des conditions géologiques du nord de la Chine. Pour une même longueur totale de puits de forage, la performance du système EUBHE peut être améliorée en augmentant la profondeur de la section verticale au lieu d'étendre la section horizontale. Cependant, il est à noter que, dans la conception actuelle, la section horizontale ne doit pas être inférieure à 55 m pour éviter toute interaction thermique entre les forages voisins. Le système EUBHE est plus efficace que le système à 2 modules DBHE lorsqu'il est couplé à une pompe à chaleur pour le chauffage des bâtiments, pour une même longueur totale de forage.

**LIU et al.[18]** ont étudié les performances thermiques d'un échangeur de chaleur vertical à tube en U. Ces derniers sont analysés en utilisant deux matériaux de remplissage de forage différents et le logiciel CFD. La température de surface du forage et la distribution de la température de l'eau ont été simulées dans des conditions de fonctionnement continu pendant 8 h en hiver, la température de l'eau d'entrée étant de 10 °C. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence évidente sur la performance de l'échangeur de chaleur entre les deux différents matériaux de remplissage de forage.



**Figure(2. 9) : Schéma de fonctionnement de l'échangeur de chaleur géothermique[18]**

L'étude a montré que :

- 1) Il n'y a presque aucune différence évidente sur la température de l'eau de sortie dans les deux cas. La température de sortie de l'eau augmente de 5 °C dans les conditions de simulation.
- 2) Il n'y a presque aucune différence évidente sur la performance de transfert de chaleur du stockage thermique des tubes en U et de la terre.
- 3) L'effet de résistance à la chaleur évidente est Les résultats de la simulation numérique doivent être prouvés par des expériences. Les résultats montrent que c'est un bon moyen de simplifier le processus de calcul en utilisant le programme CFD. Il fournit également une référence dans le choix des matériaux de remplissage de forage.

**ESWIASI et al** [19] , ont étudié les différents paramètres de construction et d'exploitation comme la configuration de la conduite, le diamètre de la conduite, le coulis, le taux d'injection de chaleur et le débit volumétrique , L'étude publiés indique que le rendement thermique augmente avec l'augmentation du diamètre du forage et du diamètre de conduite . ce document identifie également la portée d'augmenter l'efficacité thermique .

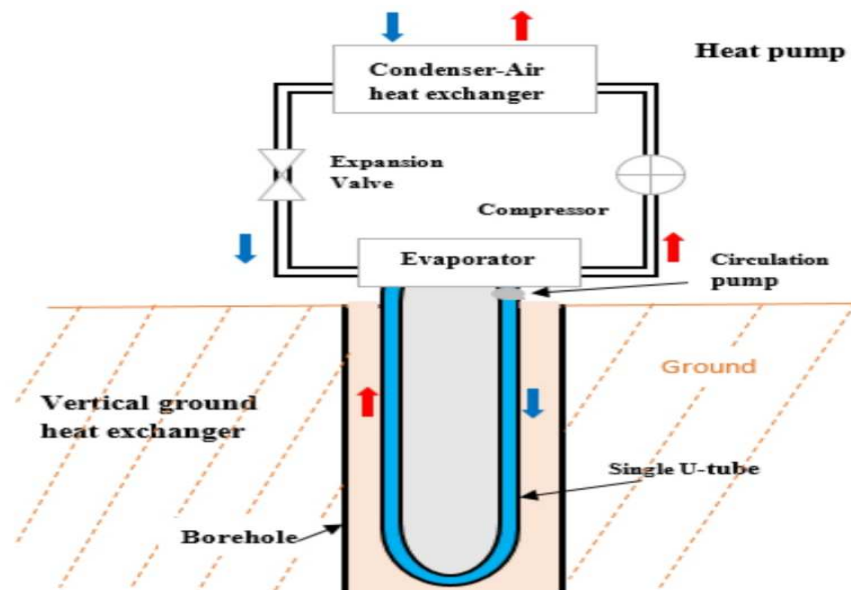


Figure (2.10): fonctionnement de l'échangeur de chaleur géothermique [19].

Les auteurs concluent que, afin d'améliorer le taux de transfert de chaleur toute tentative d'augmenter la surface du tube serait probablement une solution efficace et ils ont encore l'occasion de proposer de nouvelles configurations de tuyaux qui peuvent augmenter la surface de la conduite et le taux de transfert de chaleur dans les GES.

**ZEHAOLYU et al.** [20] ont analysé numériquement les caractéristiques d'un seul échangeur de chaleur en U dans un puits géothermique.

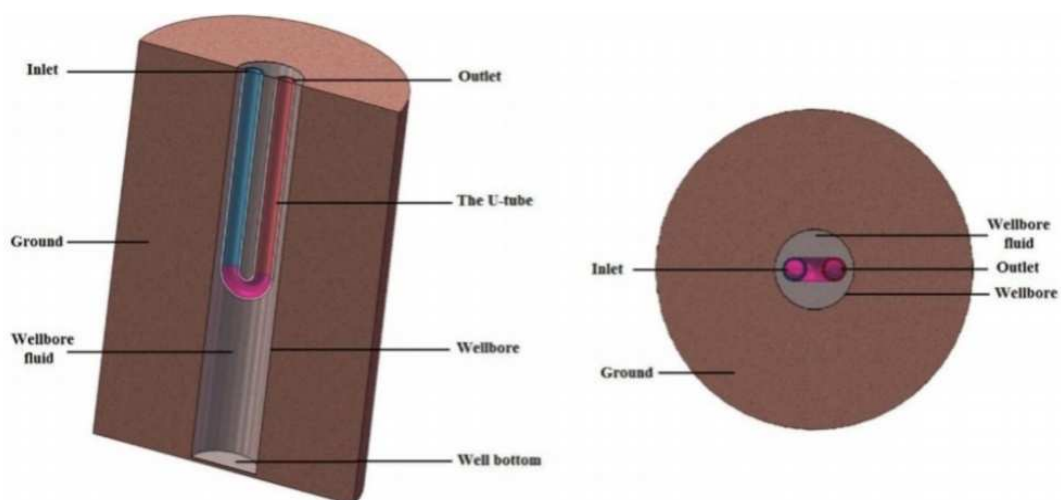


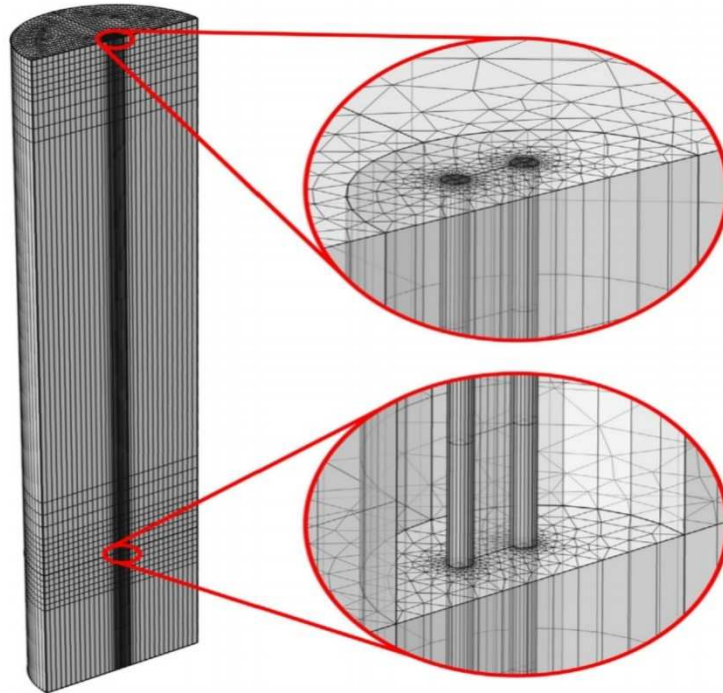
Figure (2.11) : Schéma de l'échangeur de chaleur géothermique de tube en U [20]

Dans cet article, la performance d'un seul tube en U dans le champ géothermique de Bazhou est analysée de manière exhaustive, à partir des aspects de profondeur, de porosité, de perméabilité et d'hétérogénéité. Les valeurs de simulation sont validées par les résultats des essais sur le terrain. Sur la base des résultats de cette étude, les conclusions suivantes sont tirées :

- 1) La vitesse globale du réservoir géothermique est très faible, principalement pour deux raisons. La première est que la force motrice est juste la différence de pression causée par la gravité en raison du changement de densité. La deuxième raison est que par rapport au puits, la résistance à l'écoulement est très élevée .
- 2) Dans la même condition de différence de température entre l'eau circulant dans le tube en U et le fluide de forage, la profondeur du champ géothermique a peu d'influence sur la température de sortie et le taux d'extraction de la chaleur.
- 3) La température de sortie diminue légèrement à mesure que la porosité augmente. En ce qui concerne le taux d'extraction thermique, il n'y a presque aucune différence entre les différentes porosités à chaque débit massique. Par conséquent, on peut conclure que la porosité du réservoir peut à peine affecter les performances du tube en U
- 4) Dans les conditions de cet article, les taux d'extraction de la chaleur sont presque les mêmes dans différentes formations géothermiques à perméabilité isotrope .

**OZUDOGRU et al.** [21] ont étudié le développement et la validation d'un modèle numérique 3D pour la simulation d'échangeurs géothermiques verticaux en U. ils ont utilisé un forage avec un seul tube en U et une pile d'énergie avec des tubes en U doubles. *Dans* chaque cas, on simule un chauffage constant suivi d'une période de récupération, afin de calculer les températures des fluides de façon analytique . La validation du modèle est effectuée en comparant les résultats numériques avec les résultats obtenus à partir du modèle analytique.





**Figure (2.12) : maillage de tube en U et de sol [21]**

Le modèle numérique est vérifié et les résultats suggèrent qu'il peut simuler avec succès le fonctionnement des échangeurs géothermiques verticaux. Le modèle numérique proposé ici est mis en œuvre pour analyser plusieurs essais de conductivité thermique sur le terrain .

**HANIN ATWANYA** et al. [22] ,ont étudié performance d'un échangeur de chaleur géothermique dans la ville de Sharjah aux Émirats arabes unis (EAU). Ils ont fait deux études expérimentales géothermiques peu profondes sur une période de sept mois .

La première étude évalue la distribution de la température du sol pour deux forages, Les résultats de la distribution de la température du sol ont montré que la température moyenne du sol est d'environ 32 C, soit 5°C de plus que la température ambiante moyenne annuelle .

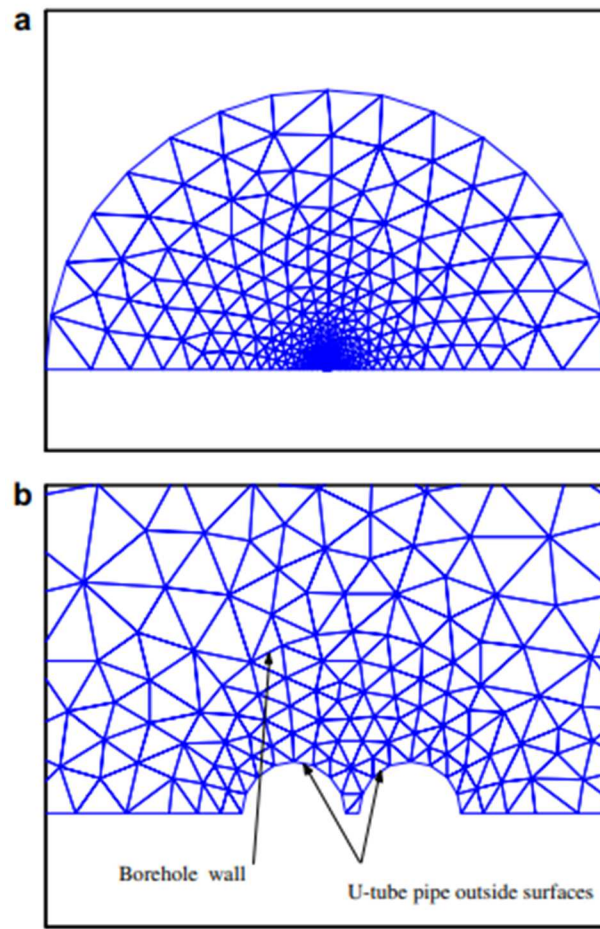
La deuxième étude examine la performance d'un échangeur de chaleur géothermique dans les conditions de la ville de Sharjah .



**Figure (2.13) : Installation d'un forage sous a) le soleil direct en tout temps dans une zone sablonneuse non irriguée (BH-1) et b) une zone irriguée semi-ombragée près de plusieurs arbres [22]**

Dans le cadre de cette étude Deux sondages effectués dans la ville de Sharjah ont montré que la température du sol est influencée par le type d'ombrage, cet effet est dramatique près de la surface du sol .

**ZHONGJIAN et al [23]**, ont étudié le développement d'un modèle numérique pour la simulation d'échangeurs de chaleur sol en U verticaux. Ils ont présenté un modèle de volume fini tridimensionnel non structuré. La température d'entrée du l'échangeur de chaleur géothermique est utilisée comme condition limite. Par conséquent, on peut tenir compte de la différence des transferts de chaleur entre les deux tubes et du sol .



**Figure (2.14) : présentation le maillage de section de sol [23]**

Les comparaisons horaires montrent une bonne concordance entre les prévisions du modèle et les données expérimentales. Le modèle, en théorie, peut être utilisé pour la simulation de l'échangeur de chaleur géothermique sous n'importe quelle taille d'étape de temps.

**ZONGHE** et al[24], Étudient sur la performance thermique des échangeurs de chaleur géothermique de tube vertical en U, ils ont basant sur les systèmes de pompes à chaleur géothermiques de la station Shenchi du chemin de fer Shuohuang .

La simulation numérique des éléments finis est réalisée grâce au logiciel MATLAB. Grâce à la méthode de simulation numérique, cette article analyse les changements de champ de température autour des échangeur de chaleur de différent façon , obtient la distribution des isotopes autour des tubes .

Les propriétés de transfert de chaleur entre le tube en U et le sol dépendent de la conductivité thermique du sol et de la capacité calorifique de sol .



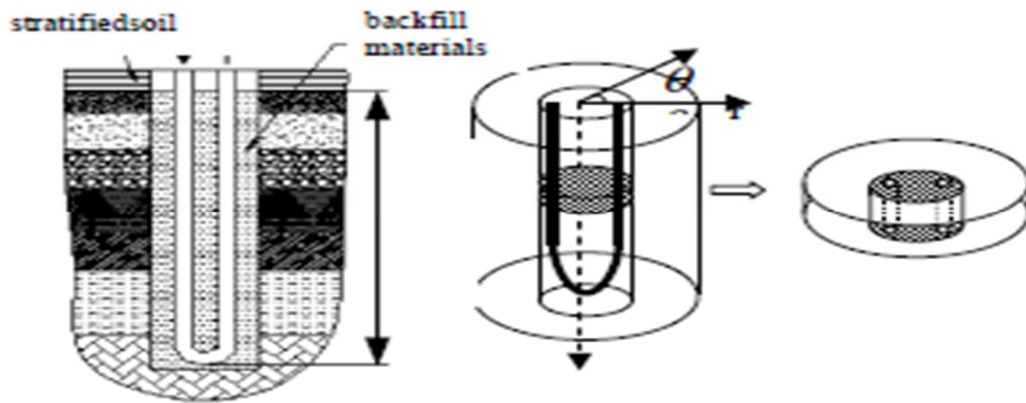


Figure 2.15 : Structure de tube en U [24]

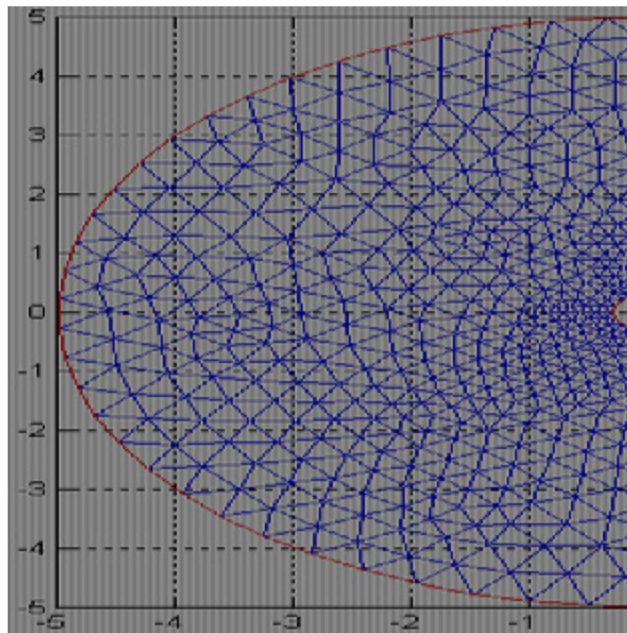


Figure (2.16) :le maillage de sol [24]

La différence de température générée dans l'état argileux est plus élevée que dans les conditions de sable, En même temps le sol qui a un grand coefficient de conductivité thermique et une grande capacité calorifique volumétrique est idéal .

### **II.2 Conclusion :**

Nous avons exposé dans ce chapitre les différentes expériences et études des performances thermiques et dynamiques des échangeurs thermiques géothermiques. Après analyse des différents résultats des études faites dans ce domaine, on peut résumer les plus importants résultats dans les point suivants :

- L'ajout des ailettes peut être une solution très efficace pour améliorer le transfert thermique dans les échangeurs de chaleur géothermiques.

- L'ajout des différents fluides a des effets différents sur le transfert thermique.
- La forme géométrique de tube circulaire et elliptique influence le transfert thermique .
- La quantité de chaleur stockée dépend du type de sol et de sa capacité thermique.
- La vitesse de fluide dans le tube influence le temps de transfert de chaleur .

## **CHAPITRE III**

**Géométrie, équations  
gouvernantes, modèle  
physique**

**Introduction :**

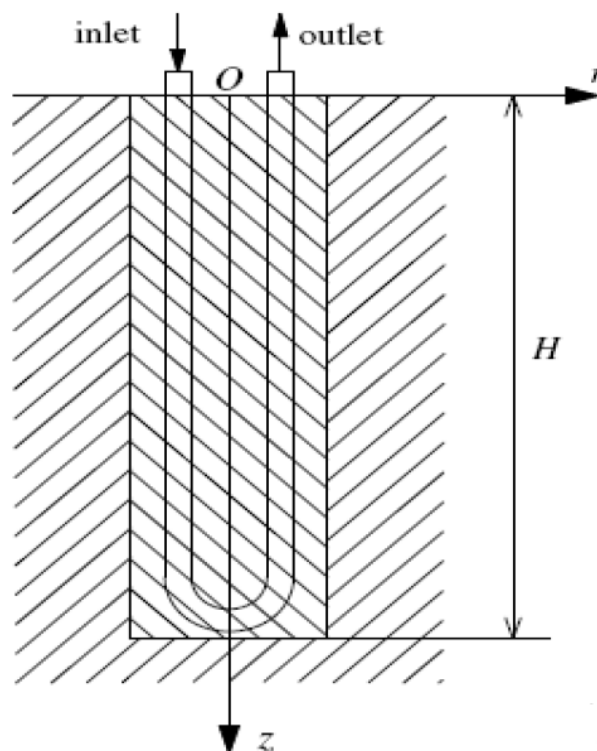
Dans ce chapitre, nous introduisons les formes géométriques et les formules mathématiques du problème étudié. Dans ce dernier, différentes conditions aux limites seront utilisées concernant les équations qui contrôlent le phénomène de convection forcée à l'état turbulent dans le tube cylindrique et la conduction thermique dans le solide.

Les équations de conservation sont :

- Equations de quantité de mouvement.
- Equation de continuité.
- Equation de turbulence.
- Equation de l'énergie.

**III.1.Géométrie du problème étudié [40]:**

La géométrie considérée est une partie de 5 mètres d'un échangeur de chaleur enterré destiné au stockage de l'énergie solaire constitué d'un tube en U ajouté dans un forage de 0,055 mètres de diamètre, réalisée dans la terre et remplie de béton.



Figure( 3.1) : Coupe de l'échangeur vertical enterré suivant le plan (y, z) [40].

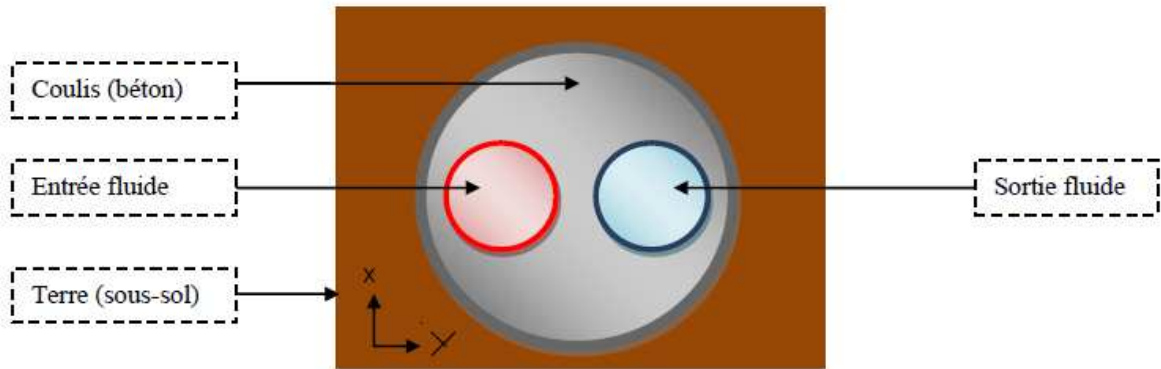


Figure (3.2) : Coupe de l'échangeur vertical enterré suivant le plan (x, y) [40].

### III.2. Paramètres utilisés [40] :

Pour les simulations que nous exposons dans cette mémoire ainsi que pour les études recherchées dans la construction du modèle numérique, les paramètres physiques et géométriques dont les conditions initiales et aux limites tirés des travaux de **BOUHACINA** [40] sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau (3. 1) : Paramètres utilisés dans la simulation [40]

Paramètres	valeur	Unité
Diamètre du forage	0.110	m
Diamètre extérieur des tuyaux U	0.032	m
Distance entre centre des tuyaux	0.060	m
Nombre de tuyaux dans un forage	2	/
Conductivité du sol	3.5	W/m.K
Conductivité du coulis	1.3	W/m.K
Diffusivité du sol	$1.62 \times 10^{-6}$	$m^2/s$
Diffusivité du coulis	$3.33 \times 10^{-7}$	$m^2/s$
Pas de temps	1	h

Tableau (3.2) : Conditions imposées sur le système étudié [40]

Températures initiales du sol	°C	<b>10</b>
Températures en haut et en bas	°C	10
Températures initiales du fluide	°C	27

Nous savons que pour certains types d'écoulement simples, des solutions analytiques précises peuvent être utilisées. Pour le cas général de la turbulence, compte tenu de la non-linéarité de l'équation et de la contrainte de Reynolds turbulente due aux nouvelles inconnues dans l'équation de transport, les équations de turbulence de Navier-Stokes ne



peuvent pas être résolues directement. Le système d'équations est fermé à l'aide des modèles de turbulence.

Dans l'espace de contrôle du débit dans le tube en U de l'échangeur de chaleur, équations différentielles développées dans ce chapitre décrit

Le principe du conservation de la masse, de quantités de mouvement et de l'énergie.

### ***III.3. Hypothèses simplificatrices :***

Pour construire des modèles suffisamment détaillés et précis, certaines hypothèses sont prises en compte. Pour cela, nous supposons :

- les propriétés thermo-physiques ( $C_p, \mu$ ,  $\lambda$  et  $\rho$ ) du fluide et du solide sont constantes, et la température du fluide à l'entrée du tube est constante.
- Dans cette étude on travaille sur une tranche de 5m de l'échangeur vertical.
- En néglige le transfert de chaleur en rayonnement.

### ***III.4. Système d'équations :***

Ces équations définissent le phénomène de la convection forcée dans le tube en U de l'échangeur de chaleur, et la conduction thermique entre le tube et le volume de béton et le sol.

#### ***III.4.1 Equation de continuité [25] :***

Au sein d'un volume élémentaire autour d'un point, pendant un laps de temps donné, la variation de la masse est égale au flux de matière entrant dans ce volume moins le flux sortant.

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III. 1})$$

Avec  $u_i$  la composante du champ de vitesse dans les directions axiale (x,y,z).

**III.4.2 Équation de quantité de mouvement [27] :**

Au sein d'un volume élémentaire autour d'un point, pendant un laps de temps donné, la variation de la quantité de mouvement est égale au flux de quantité de mouvement entrant dans ce volume moins le flux sortant, additionné de la somme des forces agissant sur ce volume.

L'équation de quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + v_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (III. 2)$$

**III.4.3 Équation d'énergie[26] :**

L'équation de conservation de l'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique qui met en relation les différentes formes d'énergie.

L'équation de conservation d'énergie s'écrit :

$$\frac{\partial (u_i T)}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \frac{v}{Pr} + \frac{v_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (III. 3)$$

**III.4.4 Équations de turbulence [25] :**

Le modèle k-ε réalisable est et recommandé dans les cas de présence des chicane ou bien des obstacles est pour les écoulements complexes. Ce modèle suppose que le régime de turbulence est pleinement établi dans tout le domaine et que les effets de la viscosité moléculaire sont négligeables par rapport à ceux de la viscosité turbulente loin de la paroi.

Le modèle k-ε est défini par deux équations de transport, une pour l'énergie cinétique turbulente k, et l'autre pour le taux de dissipation spécifique ε sont obtenir à partir des équations suivantes :

**III.4.4.1 Equation d'énergie cinétique turbulente k [25] :**

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \Gamma - \varepsilon \quad (III. 4)$$

**III.4.4.2 Equation d'énergie de dissipation  $\varepsilon$  [25] :**

$$u_i \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \Gamma \varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (III.5)$$

La viscosité turbulente définit par :

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (III.6)$$

La production de l'énergie cinétique turbulente définit par :

$$\Gamma = -\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (III.7)$$

Les constantes empiriques du modèle sont :

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\mu}{(\mu_t + 5)} \right], C_2 = 1.9, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, \text{ et } Pr_t = 0.09.$$

Le nombre de Reynolds, le coefficient de frottement, le nombre de Nusselt et le flux de chaleur sont donnés par les relations suivantes :

- Le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\dot{m}}{A_s} \left( \frac{D_e}{\mu_s} \right) \quad (III.8)$$

**III.5 Discrétisation des équations différentielles [27]:**

Après avoir sélectionné les équations différentielles à résoudre, il est nécessaire de transformer ces équations différentielles en équations algébriques ou les variations continues des variables de l'écoulement sont représentées par des valeurs à des points discrets dans le temps et dans l'espace.

**III.5.1 Méthodes de discrétisation [27] :**

La procédure de discrétisation fait des approximations aux dérivées dans le temps et dans l'espace des variables de l'écoulement présente dans l'équation (III.2), à chaque nœud de la grille, a en fonctions algébriques des variables dans le nœud considéré et les nœuds en son voisinage.

La discrétisation se fait en suivant l'une des quatre méthodes :

- Méthode des différences finies.
- Méthode des volumes finis

- Méthode des éléments finis
- Méthode des spectrales.

$$\alpha_p \cdot \phi_p = \sum_j \alpha_j \cdot \phi_j + b \quad (III.9)$$

$\sum_j$  : Représenté la sommation sur les nœuds en voisinage du nœud P ;

$\alpha_j$  : Coefficient de l'équation qui tient compte des effets combinés de l'accumulation, le transport par convection et diffusion et du terme source dans l'équation (III.2).

$b$  : représente un part du terme source,  $S\phi$ .

### III.5.2 Méthode des résidus [25] :

La méthode des résidus est une méthode numérique très puissante et efficace qui permet la résolution des équations différentielles.

Soit une équation différentielle représentée par :

$$L(\phi) = 0 \quad (III.10)$$

Supposant  $\phi$  comme une solution approchée de l'équation (III.16) qui contient un nombre de paramètres ( $a_i$ ) ; par exemple :

$$\phi = a_0 + a_1 + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m \quad (III.11)$$

La substitution de (III.17) dans (III.16) donne un résidu tel que :

$$L(\phi) = R \quad (III.12)$$

L'objectif est de maintenir le résidu proche de zéro. Donc on considère une fonction de balance  $W$  telle que :

$$\int W \cdot R \cdot \partial x = 0 \quad (III.13)$$

### III.5.3. Méthode des volumes finis [25] :

La méthode des volumes finis ou volume de contrôle est une version spéciale de la méthode des résidus.

Le domaine de calcul est subdivisée en sub domaines ou à des volumes de contrôle finis ; Il suffit de poser la fonction de balance,  $W$ , égale à l'unité ( $W=1$ ) dans un su domaines et égale à zéro ( $W = 0$ ) ailleurs. L'intégration de l'intégration de l'équation (III.14) donnant le résidu  $R$  doit être égal à zéro, dans un volume de contrôle.

#### III.5.3.1. Principe de méthode [25] :

L'équation à discrétiser est :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot U \cdot \phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma\phi \cdot \frac{\partial\phi}{\partial x}) + S\phi \quad (III.14)$$

La méthode consiste à subdiviser le domaine de calcul (volume géométrique de l'écoulement) en petits volumes de contrôle tel que chaque nœud est entouré par un seul volume de contrôle.

Considérons le cas d'un écoulement à une dimension :

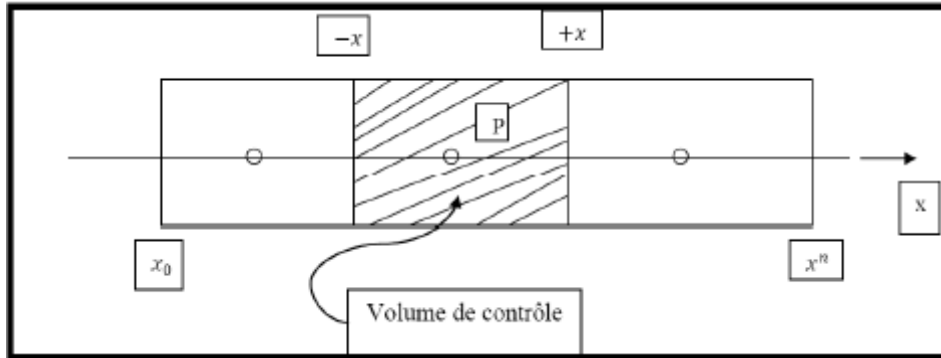


Figure (3.3) : Arrangement des volumes de contrôle.

La discrétisation de l'équation (III.15) ne s'obtient pas par substitution des expressions des différences dans l'équation différentielle (III.15). Par contre, cette équation est intégrée le long du volume de contrôle ; d'où :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-x}^{+x} \rho\phi dx + [(\rho U\phi)_+ - (\rho U\phi)_-] = \left[ \left( \Gamma\phi \frac{\partial\phi}{\partial x} \right)_+ - \left( \Gamma\phi \frac{\partial\phi}{\partial x} \right)_- \right] + \int_{-x}^{+x} S_\phi dx \quad (III.15)$$

L'équation (III.16) est une équation « intégral – différentielle » exacte qui exprime une balance entre les flux convectif et le flux diffusif.

La source et le taux d'accumulation en volume intégré. Ceci constitue une propriété importante de cette approche, qui est la conservation.

Une généralisation du cas à une dimension considéré ici s'obtient comme suit :

Ecrivant l'équation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla\vec{V}\phi - \nabla(\Gamma\phi \text{ grad}\phi) = S\phi \quad (III.16)$$

L'intégration sur un volume de contrôle donne :

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho\phi dv + \iiint \nabla(\vec{V}\phi - \Gamma\phi \text{ grad}\phi) dv = \iiint S\phi dv \quad (III.17)$$

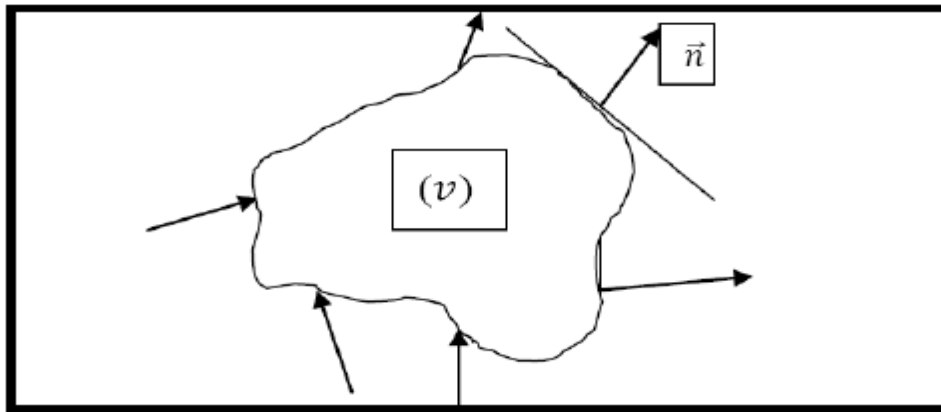


Figure (3.4) : Volume de contrôle (V).

Le théorème de Gauss est utilisé pour transformer les intégrales de volume en intégrales de surface :

$$\iiint \nabla \vec{A} \, dv = \iint \vec{A} \vec{n} \, ds \tag{III.18}$$

**III.5.3.2. Définition des nœuds :**

Du à la présence du flux de diffusion  $\left(\Gamma \phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)$  la valeur de la variable  $\phi$  dans un nœud est influencée par les valeurs des nœuds voisinant .

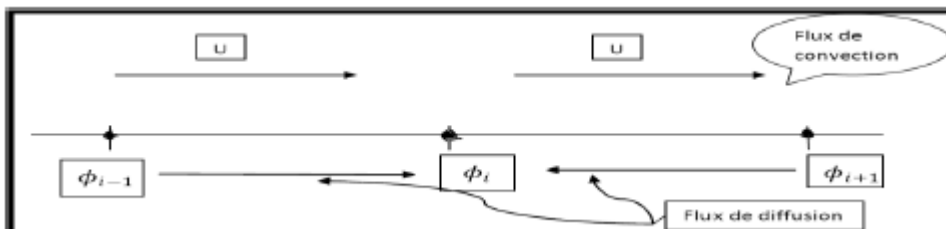


Figure (3.5) : Position des nœuds dans les volumes de contrôle.

Les nœuds sont placés au centre de chaque volume de contrôle

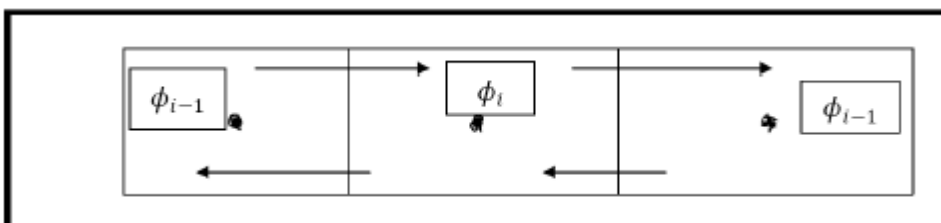


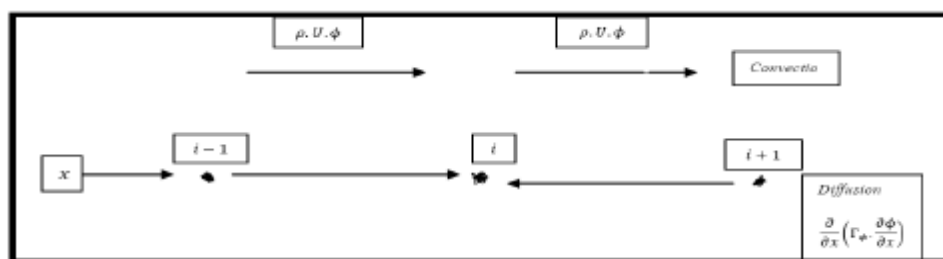
Figure (3.6) : Position des nœuds dans les volumes de contrôle.

**III.5.4 Condition initiale et aux limites [25] :****III.5.4.1 Condition initiale :**

La température initiale de fluide à l'entrée est 300k et la température de béton et la terre sont 283k et une vitesse initiale de fluide dans l'échangeur de chaleur en tube U est 0.373 m/s

**III.5.4.2 Condition aux limites :**

La présence de la diffusion rend les coordonnées spatiales  $x$ , des coordonnées en double direction, et par la suite le problème est considéré comme un problème aux frontières.



**Figure (3.7) : Coordonnées double direction (diffusion).**

Donc les conditions aux limites doivent être prescrites. En général, les conditions aux limites se divisent en deux catégories :

- valeur prescrite aux frontières  $\phi F$
- dans le cas de transfert de chaleur avec un flux de chaleur :  $J\phi = -(T_\infty - TF)$

L'indice F représente la frontière .

**III.6 Conclusion :**

Donc , le modèle mathématique se compose d'un ensemble d'équations et est complété par des conditions aux limites. C'est un système complexe composé des équations de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Par conséquent, l'équation d'équilibre est connue.

La résolution analytique de ces équations est en fait irréalisable .

Le chapitre suivant expliquera le processus et les étapes suivies ainsi que tous les détails de la simulation.

# **CHAPITRE IV**

## **Présentation du code de calcul**



***Introduction :***

Les outils de simulation numérique occupent une place prépondérante dans les études en physique du bâtiment. La démarche de conception optimale qui résulte de l'épuisement des ressources énergétiques et du souci de préservation de l'environnement, n'a fait qu'amplifier leur utilisation.

La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

La modélisation et la simulation interviennent pour :

- a) La compréhension de la structure et des interactions à l'intérieur d'un système (déterminer le rendement, la performance...)
- b) L'étude du comportement du système par rapport à son environnement extérieur (consommation énergétique/cout...)
- c) La prédiction du comportement d'un système pour des situations nouvelles ou extrêmes.
- d) La conception de nouveaux dispositifs/ composants, étude de système (composant) avant la création de prototype et mise en œuvre de procédés nouveaux (stratégies et algorithmes de contrôle).
- e) L'optimisation des solutions lors de la conception.

La simulation ne supplante pas l'expérimentation mais la complète. Elle permet d'effectuer l'analyse du problème dans des conditions réalistes (reproduire des tests que l'on fait en expérimentation pour mieux les comprendre et à moindre cout) ou au contraire dans des conditions d'essais extrêmes/marginales (climats extrêmes, défauts d'installations...).

Ces dernières ne peuvent être faites par l'expérimentation (raison de couts...). Ainsi, la simulation accroît le champ des tests pour un système.

A travers la simulation, le système étudié devient plus flexible. On peut plus facilement faire des études paramétriques. L'utilisation peut aussi faire varier l'échelle de temps pour une étude, ce qui est impossible par ailleurs.

La simulation se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatiques. Ces derniers sont couramment appelés des environnements de simulation.

### *IV.1. Outil de simulation Gambit et fluent :*

#### *IV.1.1. L'outil gambit :*

**GAMBIT** est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous **FLUENT**.

Le meilleur est un prétraitement au logiciel de simulation. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

#### **IV.1.2 Construction d'un maillage :**

Pour construire un maillage, il est bon de suivre la démarche suivante:

- définir la géométrie.
- réaliser le maillage.
- définir les paramètres des zones de calcul.

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler: coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques x et y ou indices I et J.

Par ailleurs, il peut être avantageux de définir des points intermédiaires qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées pour raffiner le maillage près des parois par exemple ou bien pour épouser au mieux la forme des obstacles, parois ou autres...

### IV.1.3. Notice d'utilisation de gambit :

Ce logiciel est utilisé pour définir et créer le modèle d'étude (surface ou volume) et de le mailler suivant le bon vouloir de l'utilisateur. Les différentes étapes d'utilisation de GAMBIT sont définies dans la notice suivante.

## IV. 2. Procédure de résolution

### IV. 2.1 Réalisation de la géométrie :

La géométrie est construite en 3D, par le 1er nœud l'interface Gambit, ce qui a permis d'obtenir des volumes.

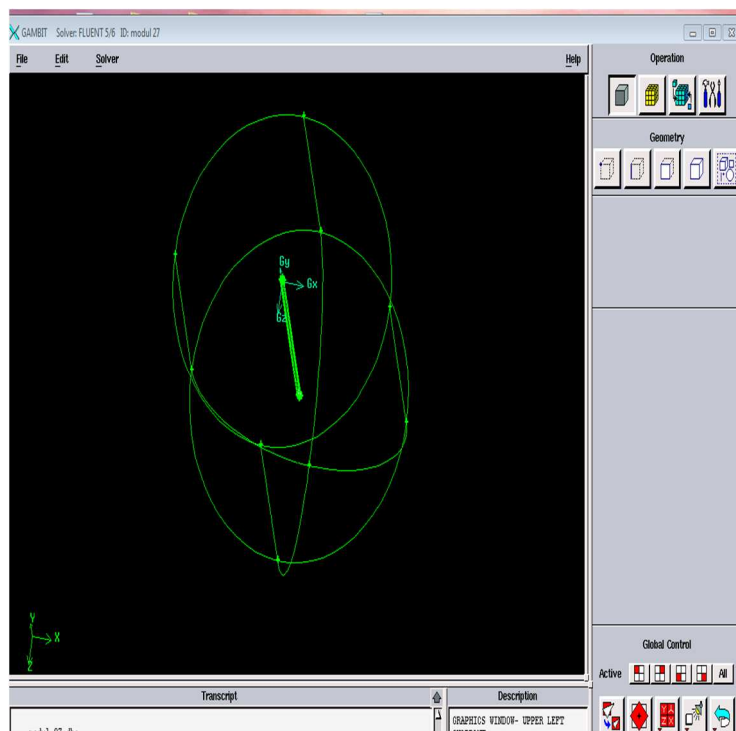


Figure (4.1) : construction de la géométrie

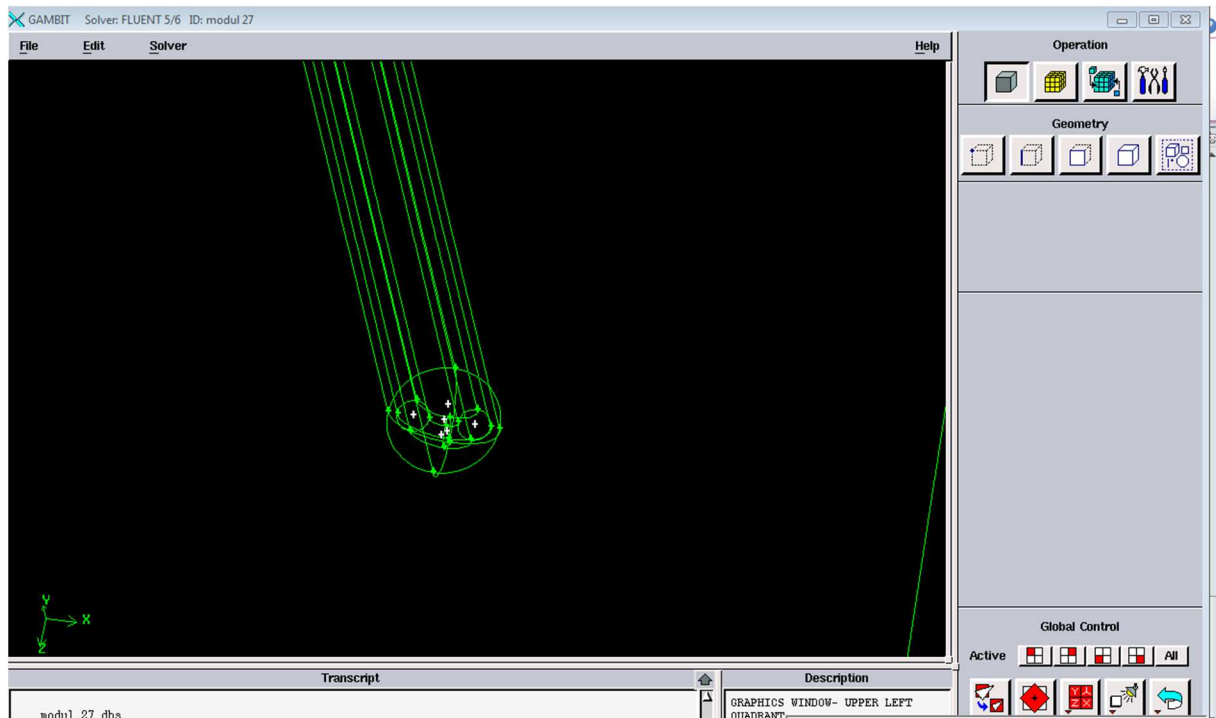


Figure (4.2): construction de la géométrie

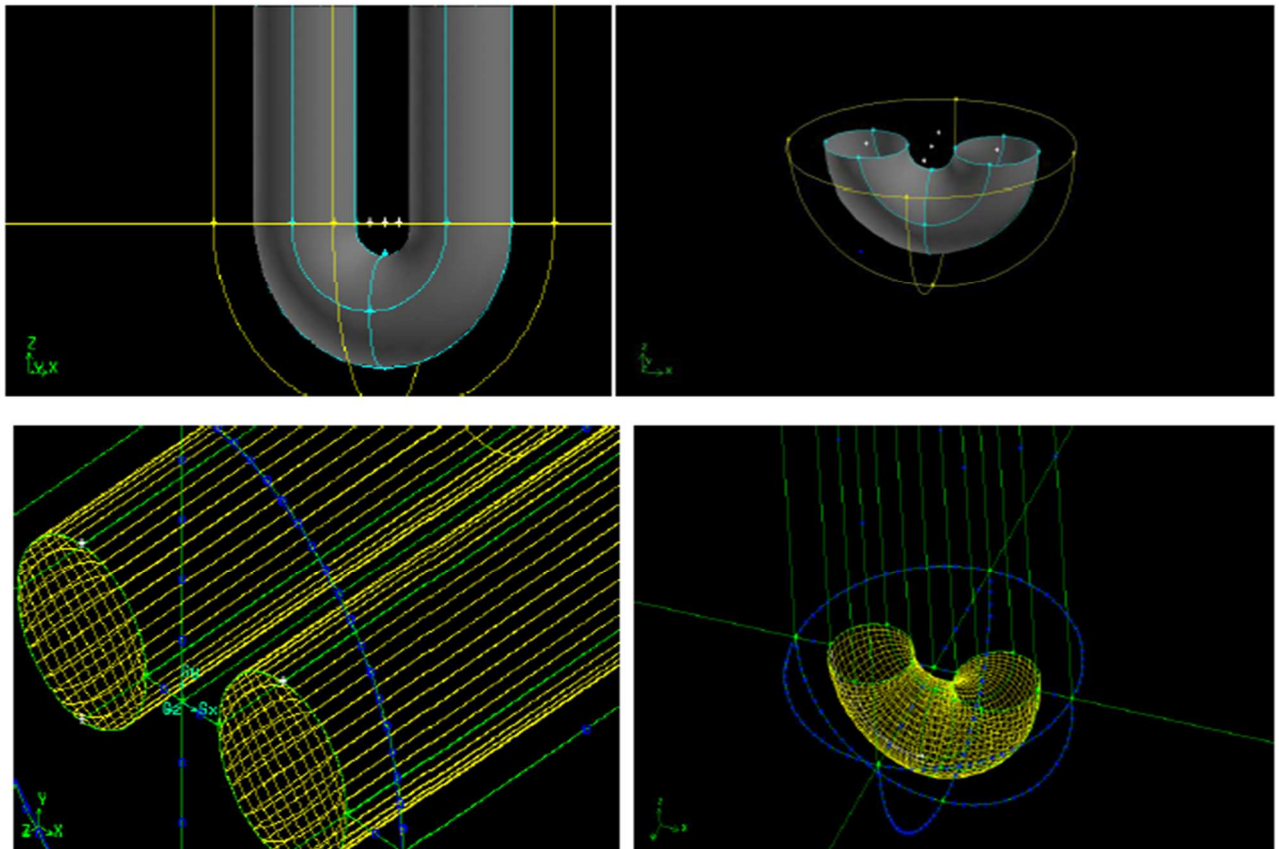
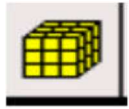


Figure (4.3) : Tube schématisé sur Gambit

Figure (4.4): Coude du tube sur Gambit

### IV.2.2. Génération du maillage :



Il est obtenu grâce au 2eme menu

Le maillage est une discrétisation de l'espace à étudier. Support des calculs CFD, il est constitué d'un ensemble de mailles (ou cellules) dans lesquelles les équations du problèmes ont résolues.

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD.

La complexité de la géométrie étudiée impose un maillage hybride (mixte).

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour assurer la convergence des calculs.

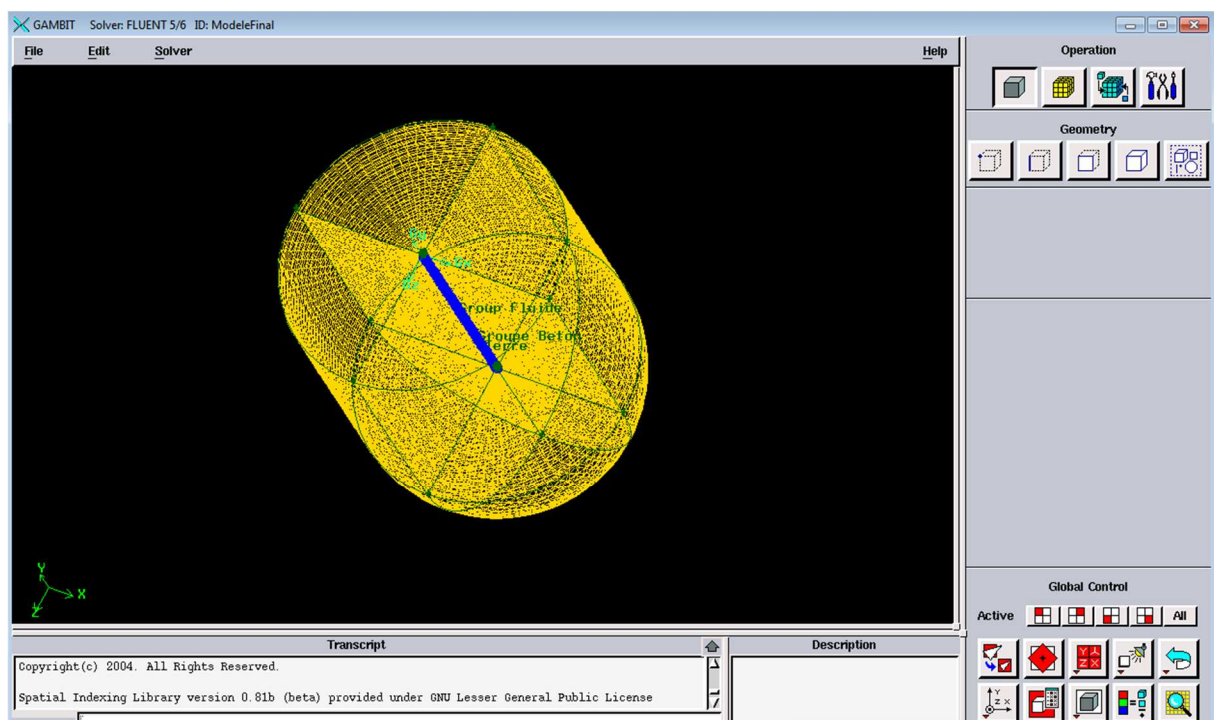


Figure (4.5) : Maillage de l'échangeur vertical.

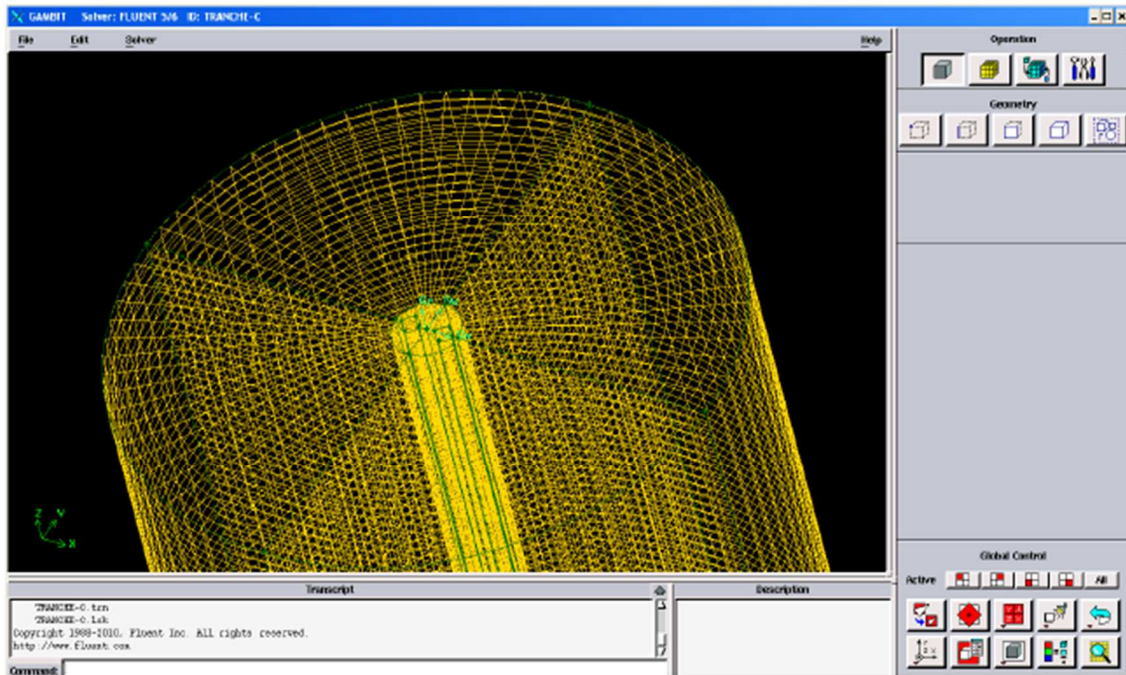


Figure (4.6) : Maillage de l'échangeur vertical.

### IV. 3. Conditions aux limites :

La définition des conditions aux limites se fait dans ce menu



à l'entrée de l'échangeur, en utilisant la condition **masse flow inlet**, et à la sortie la condition **outflow**, dans toutes les parois en utilisant la condition **wall** est imposée pour délimiter les régions solides des régions fluides.

#### IV. 3.1. Résolution sous Fluent :

Dans toutes ses versions, "Fluent" propose deux modes de calcul: le mode "double précision" et le mode "simple précision". Le revers de cette précision est que le premier mode nécessite plus de mémoire. De plus, pour les écoulements qui impliquent de réduire la longueur de l'échelle, il est recommandé d'utiliser le mode «double précision»: car la géométrie est 3D, et la longueur de la géométrie est grande, et l'épaisseur du tube est inférieure à la reste. Dans le domaine de l'informatique, le choix de la 3D double précision semble être le plus adapté à notre simulation, les choix sont donc les suivants

### IV. 3.2. Choix de la session :

Dans toutes ses versions, « Fluent » offre deux modes de calcul : le mode « double précision » et le mode « simple précision ». Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. En outre, Le mode « double précision » est préconisé, entre autres, pour les écoulements impliquant des longueurs d'échelles réduites : puisque la géométrie est en 3D, et que la géométrie est d'une longueur importante et que le tube a une épaisseur petite par rapport au reste du domaine de calcul, le choix du 3D double précision semble le plus approprié à notre simulation, il est donc choisi comme suit : [30]

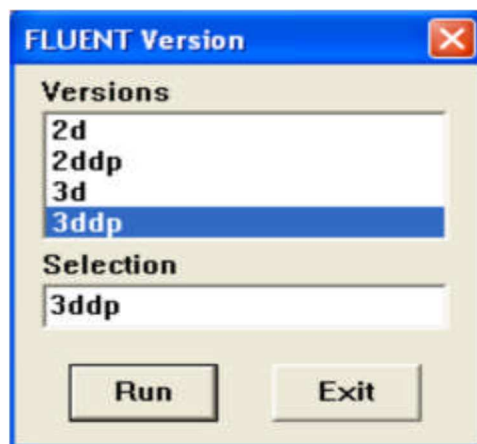


Figure (4.7) : mode d'utilisation du logiciel fluent

### IV. 3.3. Importation de la géométrie (\*.msh) :

Il faut importer le fichier (\*.msh) généré ou Gambit.

File > Read > Case...

### IV. 3.4. Vérification du maillage importé :

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes «négatifs».

Grid > Check



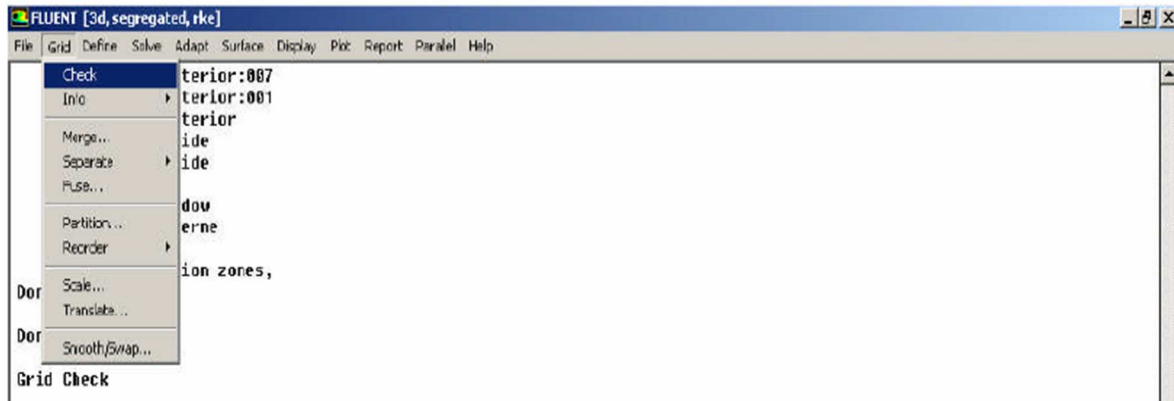


Figure (4.8) : Vérification du maillage

### IV. 3.5. Vérification de l'échelle

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

Grid>Scale

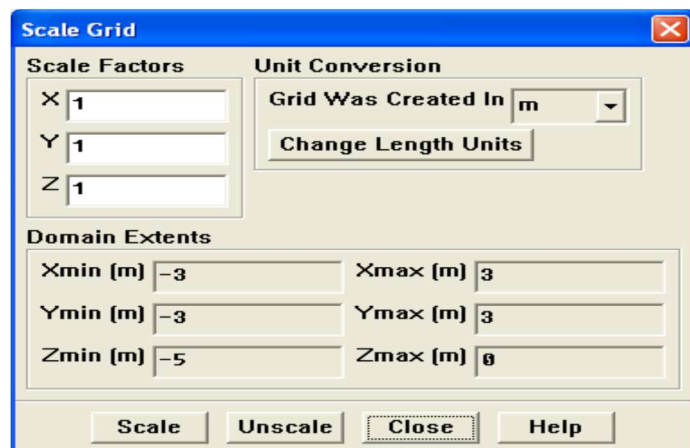


Figure (4.9) : Vérification des unités de la première simulation.



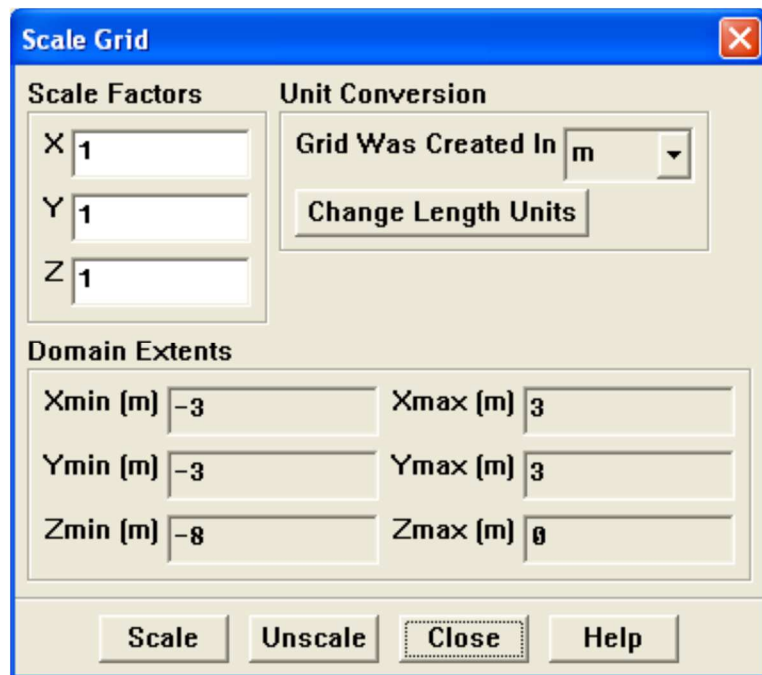


Figure (4.10) : Vérification des unités de la deuxième simulation.

#### IV. 3.6. Choix du solveur [31],[32] :

Define>Models>Solver

Pour ce cas, le segregated solver est le plus approprié vu que l'écoulement est incompressible, et le régime instationnaire est imposé.

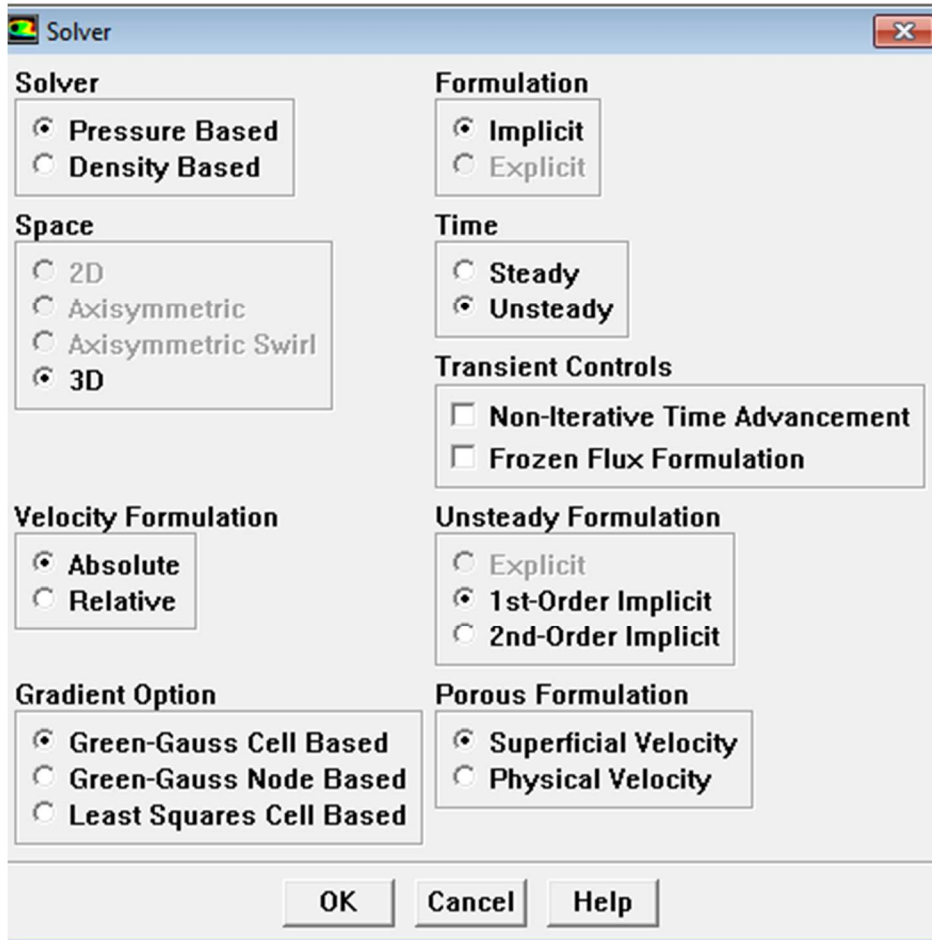


Figure (4.11) :choix du solveur

#### IV. 3.7. Activation de l'équation de l'énergie :

Define>Models>Energy

Elle doit être activée pour l'étude des champs Thermiques

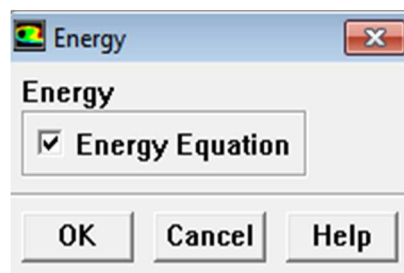


Figure (4.12) :Activation de l'équation de l'énergie [33]

### IV. 3.8.Choix du modèle de turbulence [34],[35] :

Define>Models>Viscous

Puisque l'écoulement est turbulent, le modèle K-epsilon est approprié pour ce cas.

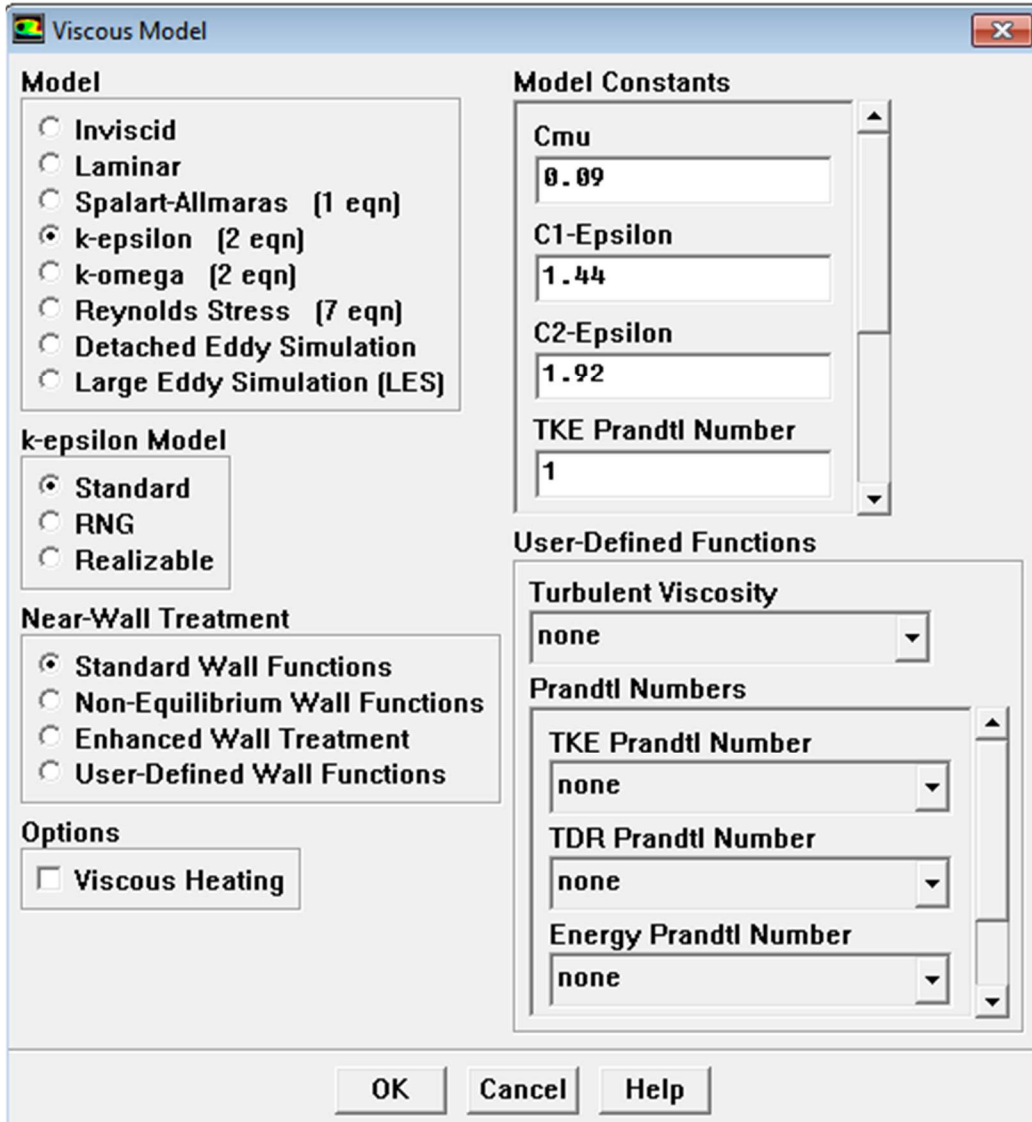


Figure (4.13) : régime d'écoulement

### IV. 3.9. Définir les propriétés des matériaux [36], [37] :

Define>Materials....

C'est le choix du fluide ou solide utilisé avec l'introduction des données concernant les propriétés physiques.

**Pour le fluide :** Le fluide mis en jeu est l'eau

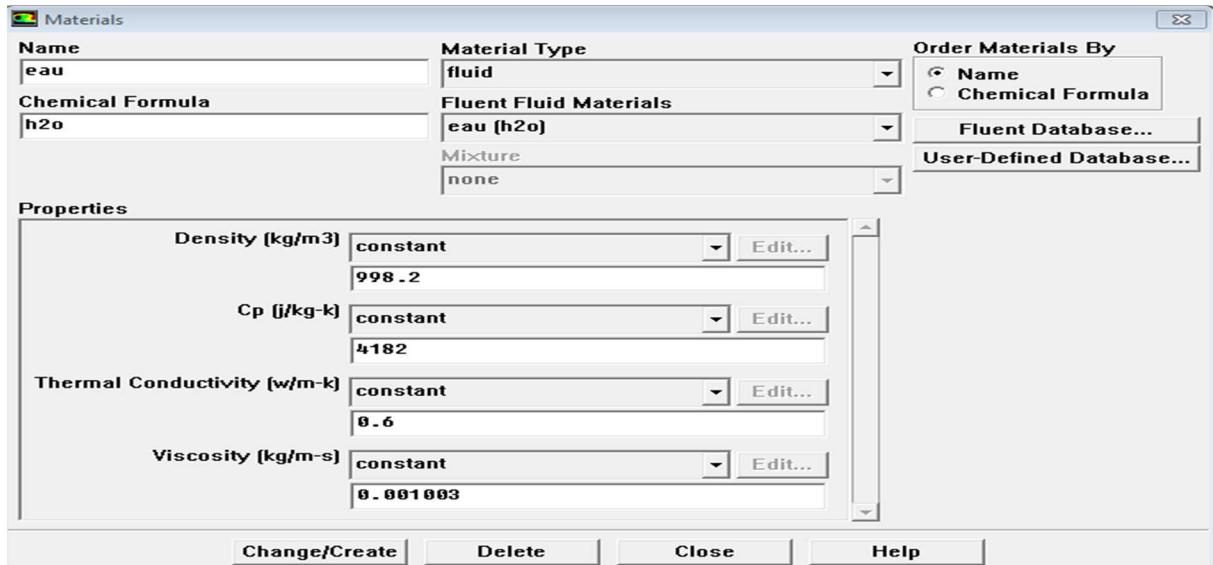


Figure (4.14) : propriétés du fluide

**Pour le solide :** C'est le sol( Sous-Sol,Soil,Riversand, Limestone sediment) et le béton et le HDPE qui représente la partie Solide

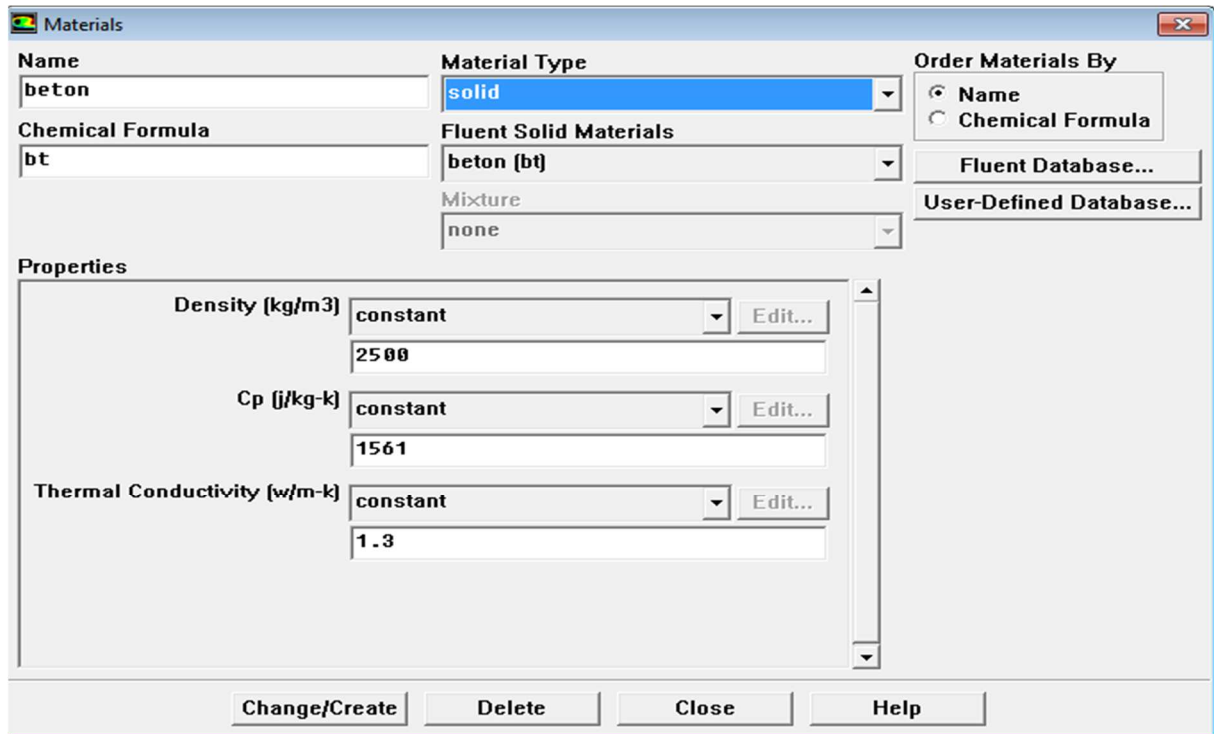


Figure (4.15) : propriétés du solide

Les caractéristiques des matériaux sont données dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : Caractéristiques des matériaux utilise [18]

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.k)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique massique (j/kg.k)	Viscosité (kg/m.s)
Sous-sol	3.5	2360	915	/
Coulis (béton)	1.3	2500	1561	/
HDPE	0.48	1100	1465	/
Eau	0.6	998.2	4182	0.001003
Sable du désert	2.035	2400	921.1	/
sable de rivière	0,26	2650	920	/
Calcaire-sédiment	2,2	2650	867,9	/

Ces propriétés chargées dans les panneaux matériaux du logiciel FLUENT.

#### IV. 3.10 Conditions d'opération : [38]

Define> Operating conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir la pression de référence

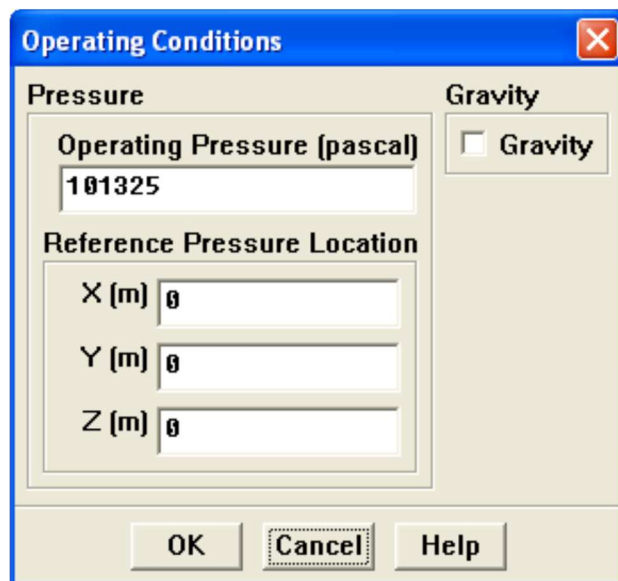


Figure (4.16) : Choix de la pression de référence.

#### IV. 3.11. Définir les conditions aux limites :

Define>Boundary Conditions...

Les conditions aux limites seront définies avec la fenêtre Boundary condition. On sélectionne alors

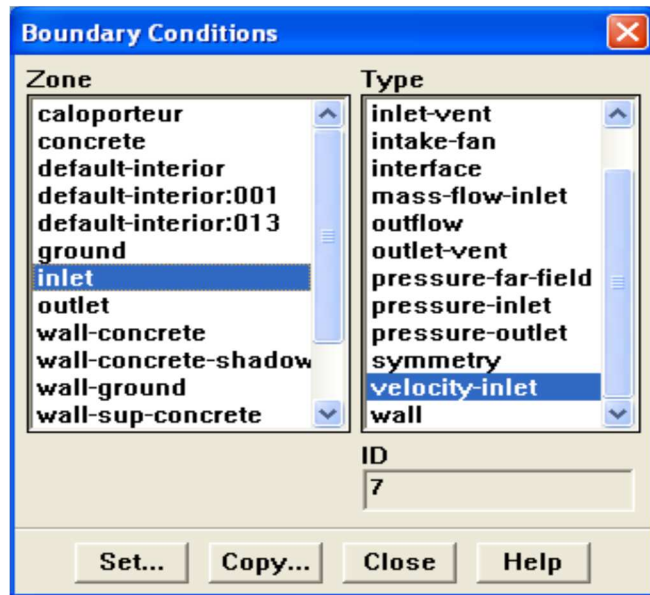


Figure (4.17) : Valeurs des conditions aux limites.

**IV. 3.12.Choix de solution**

Solve>Controls> Solution

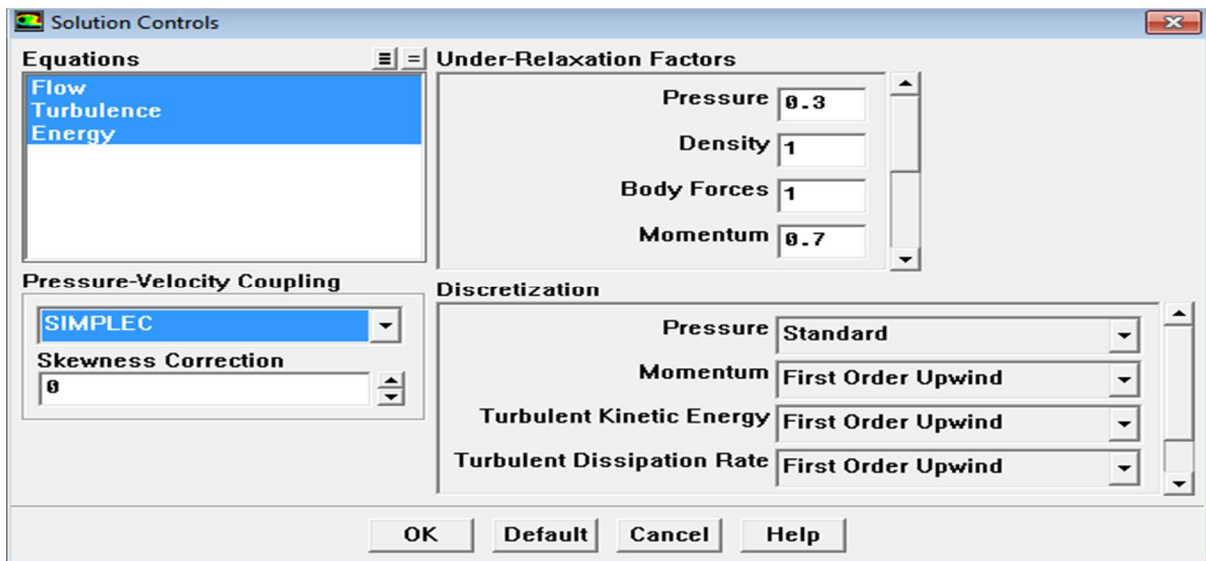


Figure (4.18) : choix de la solution.

**IV. 3.13.Sauvegarde du fichier \*.cas :**

File >write>case

**IV. 3.14.Choix des critères de convergence :**

La convergence du processus itératif est appréciée à travers l'évolution des résidus. Cette étape .

Solve> Monitors >Residual...

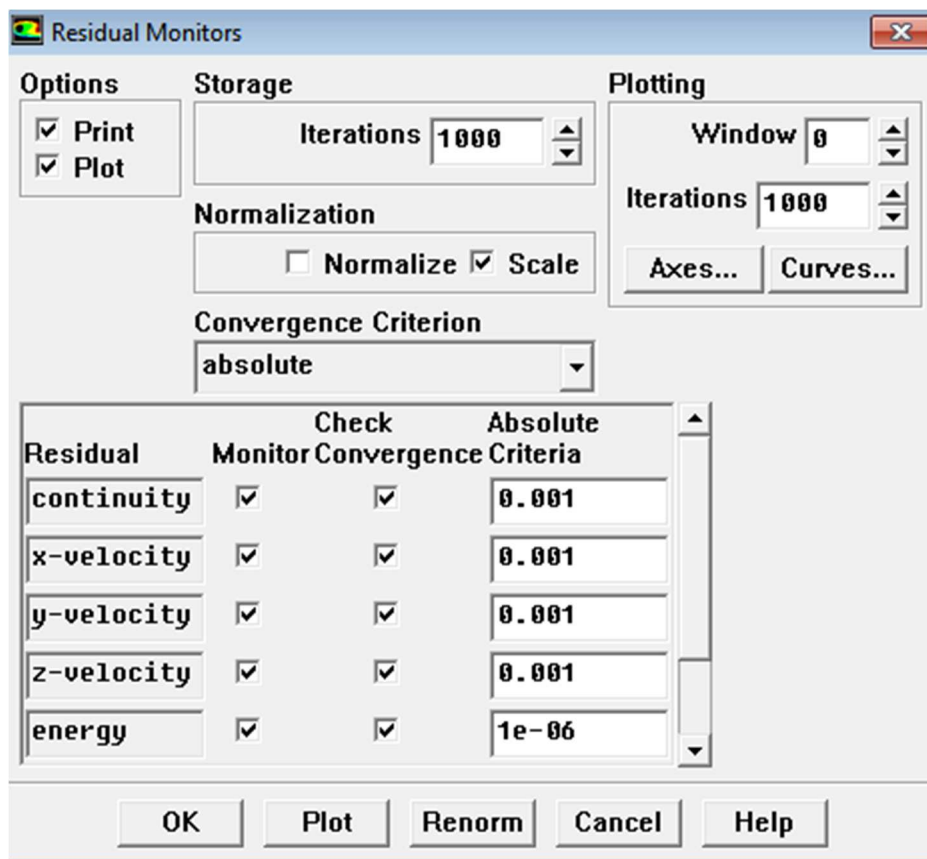


Figure (4.19) : critères de convergence

Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot

#### IV. 3.15. Exécution des calculs :

Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations Le temps de notre calcul est de 700h avec un pas de 1h soit 3600s .

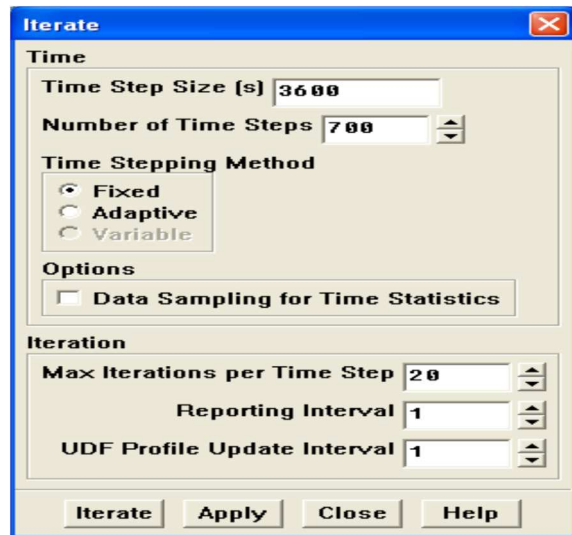
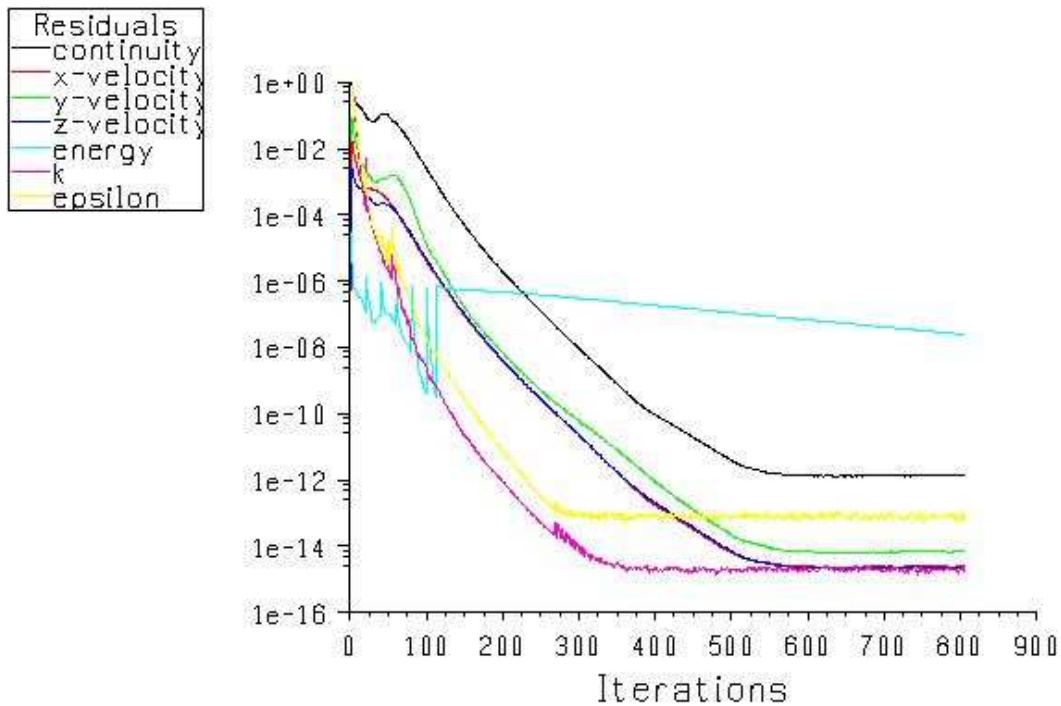


Figure (4.22): Choix du nombre des itérations.



Scaled Residuals (Time=2.5200e+06) Apr 20, 2021  
 FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

Figure (4.23): Allures de l'évolution des résidus de calcul.

**Remarque importante :**

Le résidu est calculé en fonction de la valeur de correction dans la variable; la pression, la vitesse, la température ... du problème entre cette itération et l'itération précédente. Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans FLUENT (erreur résiduelle) est



suffisant. Lorsque le résidu atteint  $10^{-3}$ , la solution converge. Cependant, dans certains cas, il est nécessaire de pousser le calcul à  $10^{-4}$ , voir  $10^{-6}$ . Il n'y a donc pas de règle universelle .

# **CHAPITRE V**

## **Résultats et Interprétations**

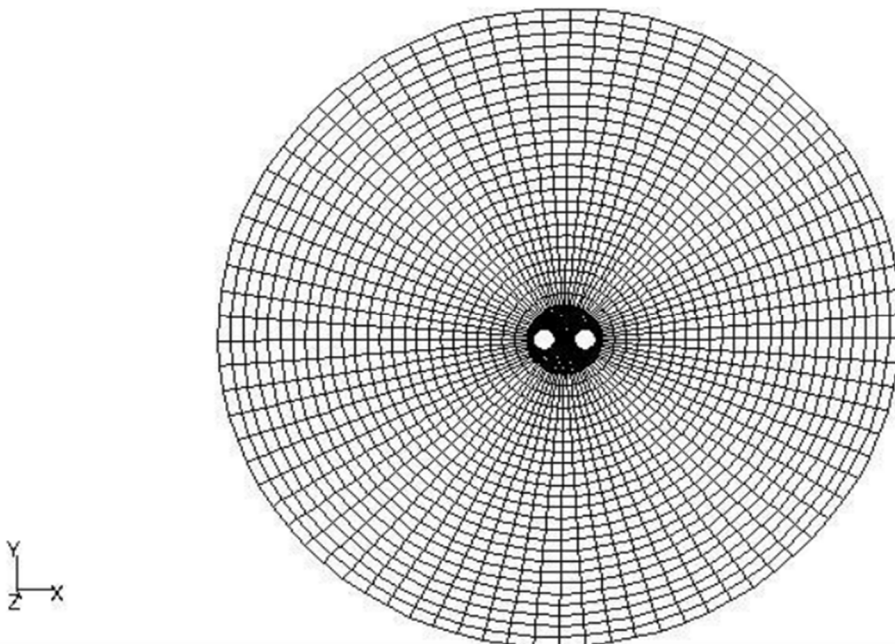
**Introduction :**

L'échangeur d'énergie vertical est une structure à comportement thermique, à cause de l'interaction avec le sol, qui ne peut pas être une science exacte, à cause des faibles différences de températures auxquelles on a affaire.

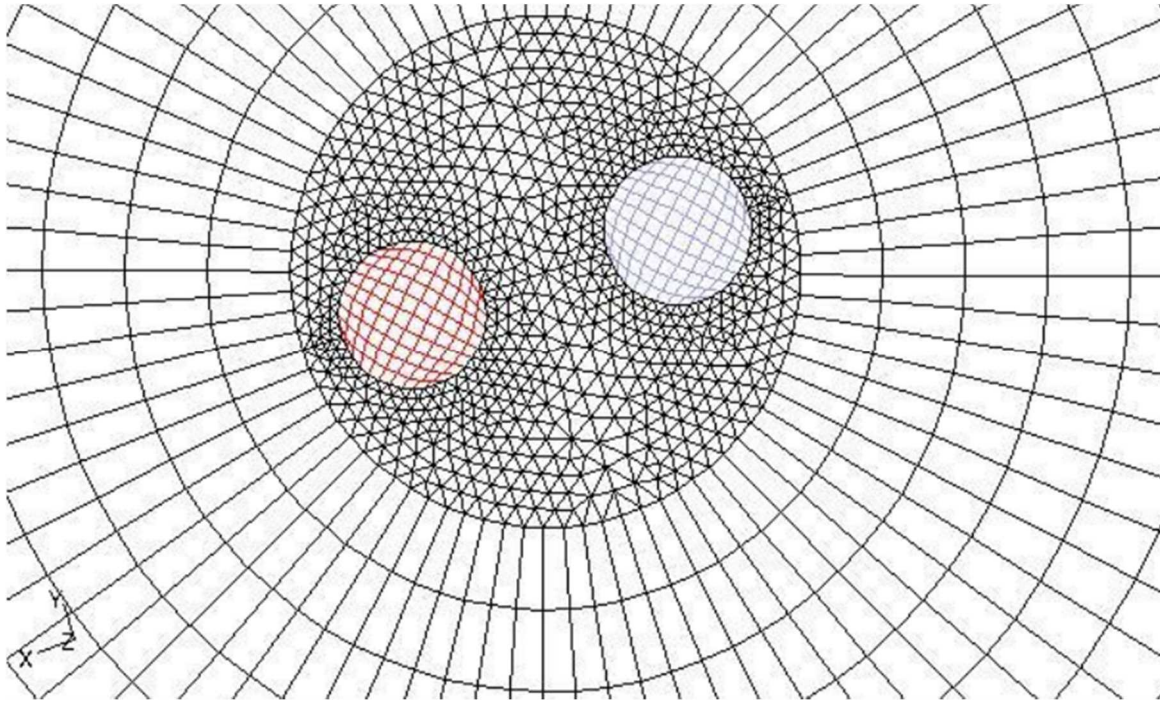
Le logiciel Fluent bien réputé et connue pour sa précision a donc était choisi pour faire l'étude numérique au sein du capteur vertical. Les résultats exposés dans ce chapitre, sont issues donc de deux simulations réalisées, une première pour la validation de notre modèle qui est purement thermique, et une deuxième simulation qui est thermique et dynamique.

**V.1.Effet du maillage :**

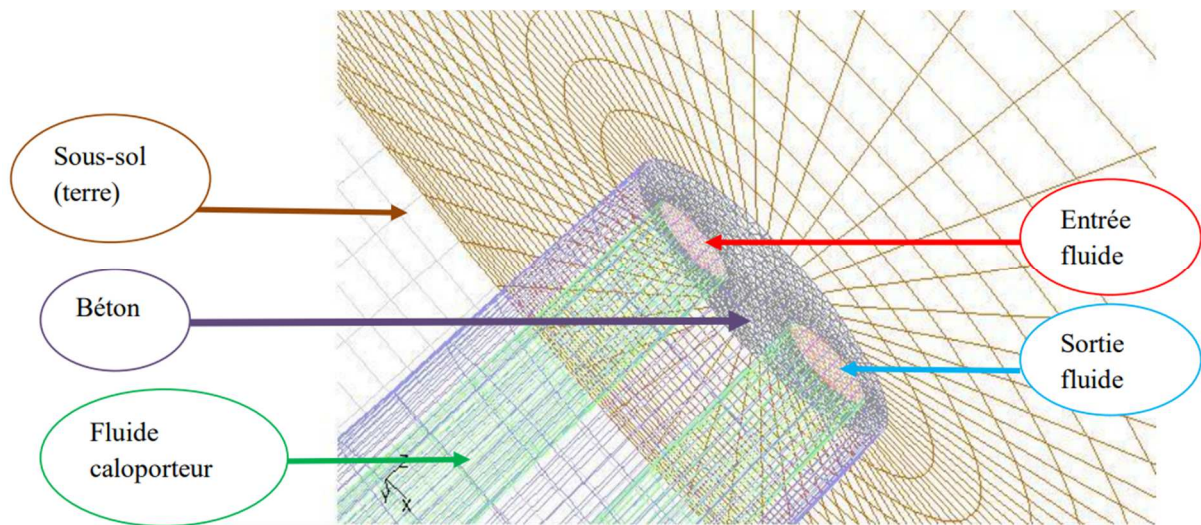
On a choisit à représenter tous les matériaux, chacun par un domaine de calcul. Le maillage adopté est hybride triangulaire et quadrilatéral représenté sur les figures suivantes. Ce type de maillage a été utilisé par des chercheurs suédois dans l'étude numérique de la convection naturelle dans un échangeur de chaleur vertical géothermique avec courant des nappes d'eau souterraine.



**Figure (5.1) : Maillage structuré du domaine sous-sol (terre).**



*Figure(5.2): Maillage hybride des domaines de calcul.*



*Figure (5.3) : Les différents domaines de calcul de l'échangeur vertical.*

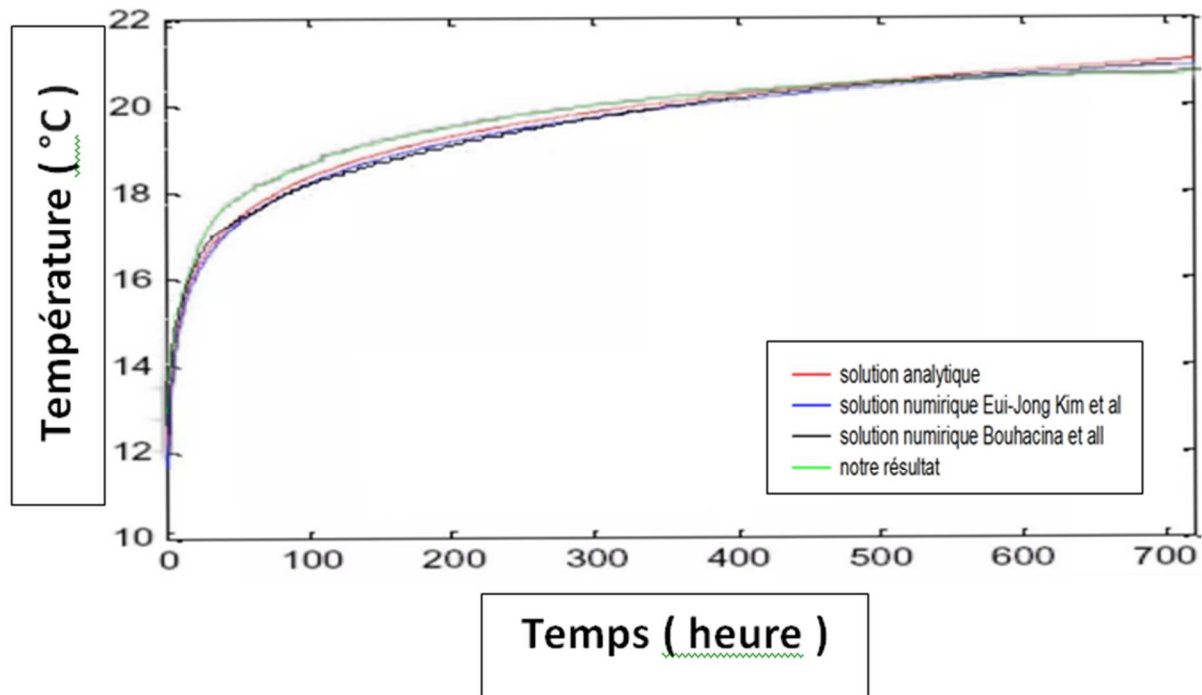
### ***V.2. Etude thermique pour validation :***

Concernant l'analyse du modèle 3D élaboré sous Fluent, nous avons considéré dans un premier temps un modèle sans le domaine de calcul du fluide caloporteur et un champ de 3 m de rayon de terre avec un seul forage et un tube en U en son centre.

Le régime est obtenu après 1 mois, ou la température initiale du béton et de la terre est de 10°C.

### V.2.1. Validation du modèle :

Nous avons calculé l'évolution de la température de la paroi de béton du pieu énergétique dans une durée de 700 h (1mois), l'en comparons avec celle de Eui - Jong **Kim** et al. [41] et avec celle de **BOUHACINA** et al.[42], en prenant la même échelle sur le même graphe. Ce qui est remarqué, c'est qu'il y a une très bonne concordance entre les différents résultats présentés.



**Figure (5.4) : Comparaison de l'évolution de la température de la paroi béton de l'échangeur vertical entre les différents modèles analytique et numérique.**

### V.2.2. Evolution de la température dans l'échangeur de chaleur vertical :

La figure (5.5) présente l'évolution de la température dans l'échangeur vertical. Nous remarquons que la température diminue du rouge au bleu donc le rouge représente la zone la plus chaude de la paroi du tube en forme de U dans ce cas, et le bleu représente la zone la plus froide.

#### V.2.2.1. Evolution de la température du tube en U :

Par rapport à la température de la paroi en béton de l'échangeur de chaleur (21 ° C) après le temps de calcul, la température moyenne du tube en U monte à 25 ° C après 700 heures. La chaleur se propage dans le sens horizontal et la température diminue à mesure qu'elle s'éloigne du centre du forage.



### V.2.2.2. Distribution de température dans les surfaces intérieures :

Plus pratique encore pour étudier la distribution de la température sur une surface perpendiculaire au tube, on a créé 2 surfaces sous fluent suivant le plan (y, z) et (x, z) situé au centre de la tranche tel que l'axe des z est le centre des deux surfaces comme est montré sur les figures suivantes :

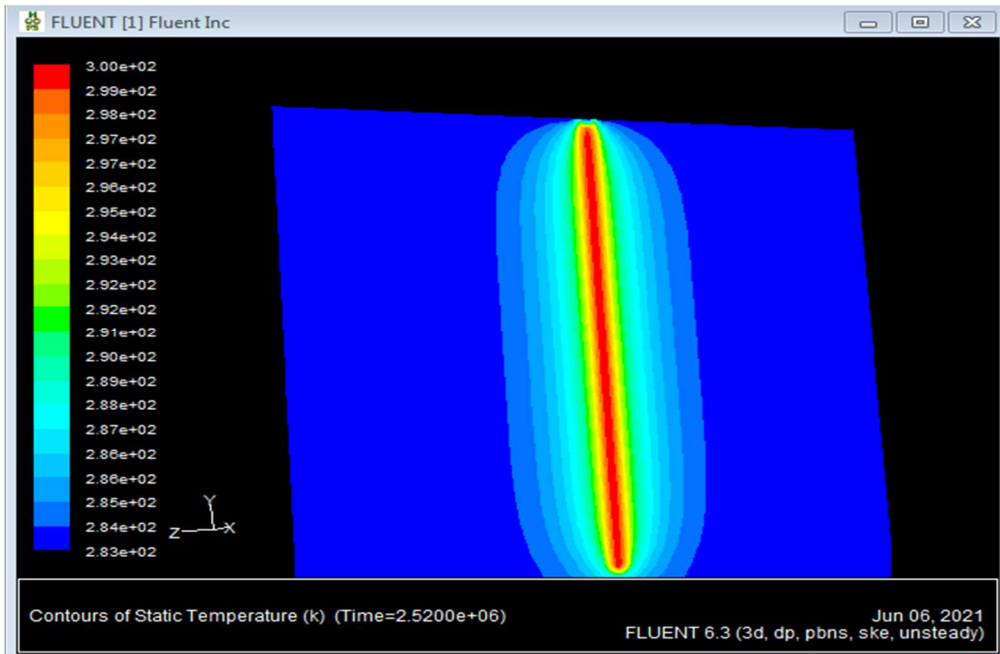


Figure (5.5) : Contour de la température sur la surface

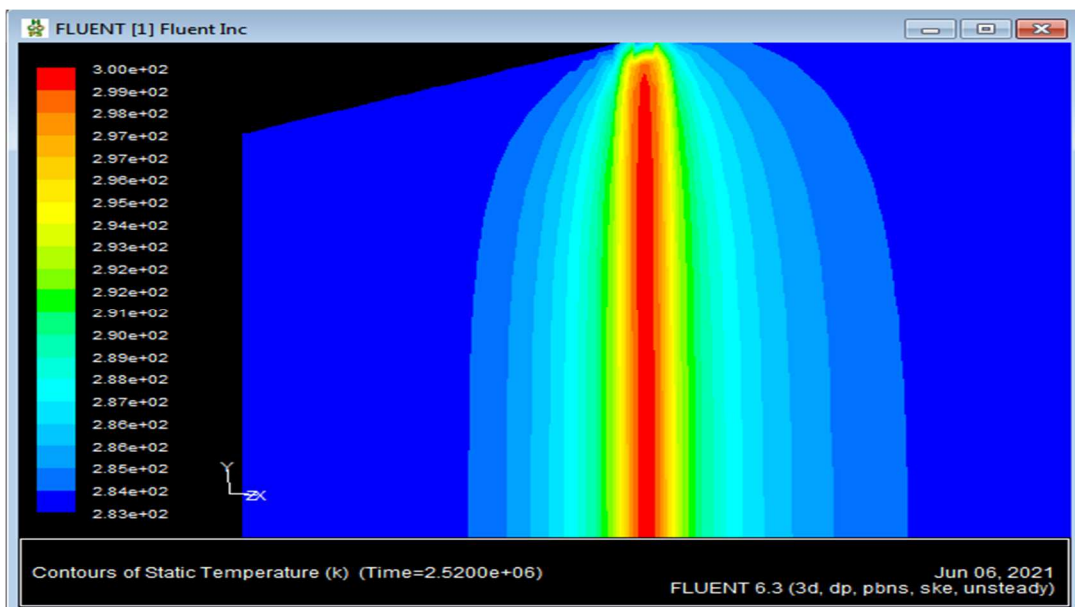


Figure (5.6) : Contour de la température sur la surface

### V.3 Les types des terres utilisées :

Dans cette simulation nous avons utilisé des différents types de terre afin de voir la meilleure terre pour le stockage thermique, et parmi les types de terres que nous avons représenté sont les suivantes :

### V.3.1 Terre 1 : le sol

Le sol est la partie vivante de la géosphère, constituant la couche la plus externe de la croûte terrestre. La couche superficielle de la terre avec une épaisseur de 0.30 m ; la couche de 0.30 à 0.60 m est le sous-sol.



**Figure (5.7) : Photo montrant le type de sol**

### V.3.2. Terre 2 : sable de rivière

Sable des rivières ou sable alluvionnaire. Il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.



**Figure (5.8) : Photo montrant le sable rivière**

### V.3.3. Terre 3 : Sable du désert

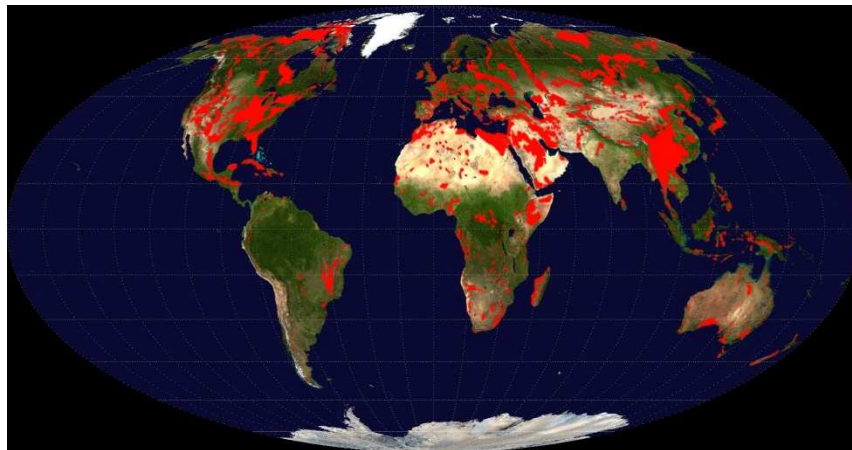
Le sable du désert est constitué de grains trop ronds et trop fins, qui possèdent surtout une surface trop lisse



**Figure (5.9) : Photo montrant le sable de désert**

#### **V.3.4 Terre 4 : Calcaire-sédiment**

Les calcaires sont des roches sédimentaires, tout comme les grès ou les gypses, facilement solubles dans l'eau



**Figure (5.10) : Carte de répartition mondiale des affleurements de roches carbonatées (Calcaire-sédiment)**





**Figure (5.11) : photo montrant le calcaire sédiment**

#### ***V.4. Etude thermique :***

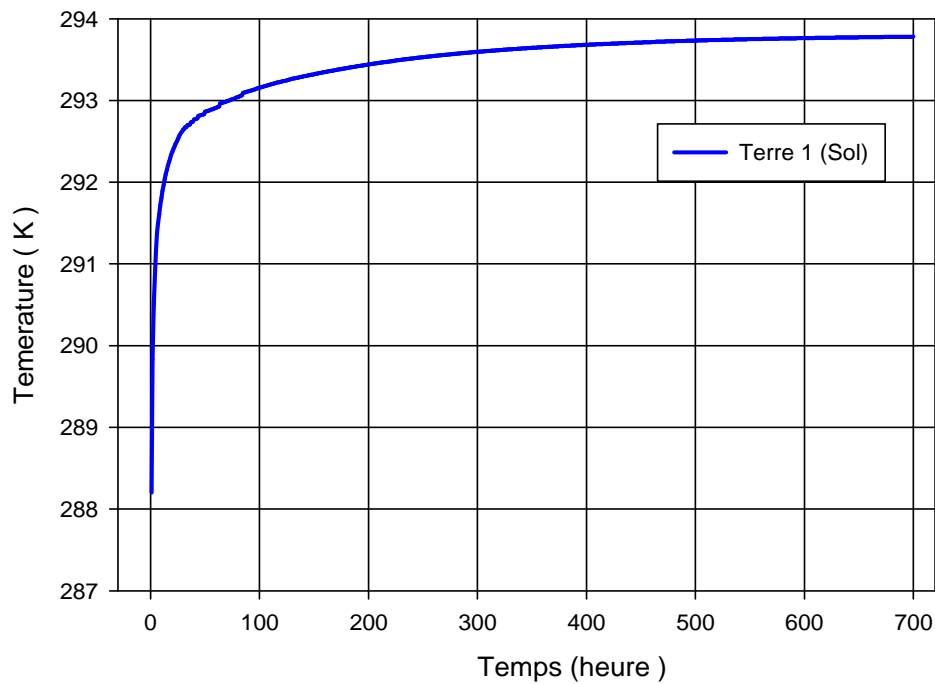
##### ***V.4.1 l'influence des différents types de terre sur le stockage thermique :***

Dans cette étude, il Ya une variation de transfert thermique dans les 4 terres, parce que la conductivité thermique et la densité et la capacité thermique sont différentes. On a présenté la variation de température et le flux de chaleur dans une durée de 1 mois (700 heures).

##### ***V.4.1.1 La terre 1 :***

##### ***V.4.1.1.1 Evolution de la température :***

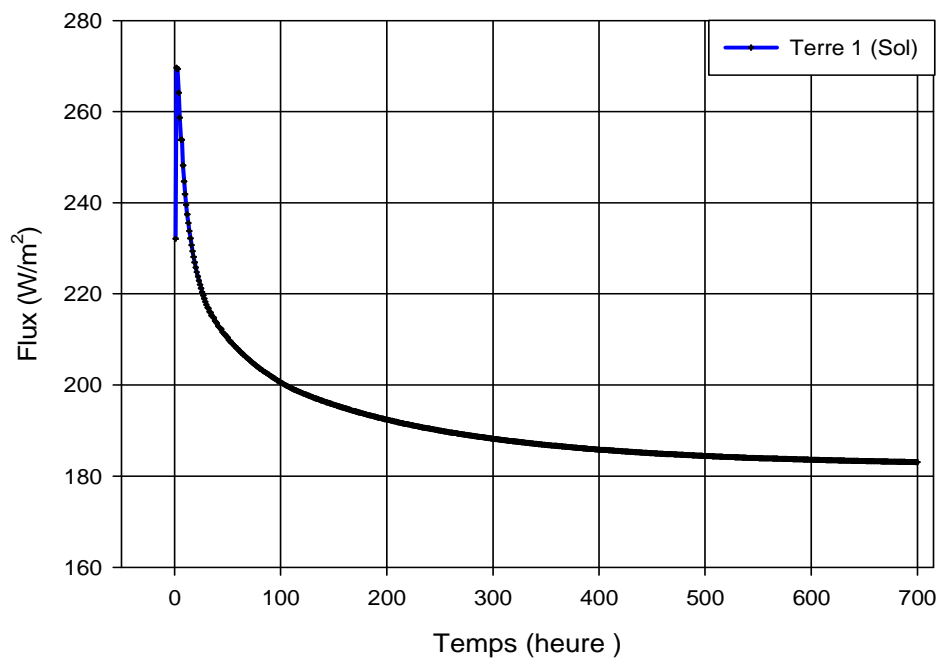
On remarque sur la courbe de l'évolution de température qu'elle a la même allure que celle de la courbe de validation, et que la température augmente de 288°K (15°C) jusqu'à une température de 293.78°K (20.78°C) ou elle se stabilise.



**Figure (5.12) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique**

#### *V.4.1.1.2 évolution de flux de chaleur :*

Le flux de chaleur de la paroi béton, diminue de  $270 \text{ W/m}^2$  jusqu'à la valeur de  $183.08 \text{ W/m}^2$  et se stabilise.

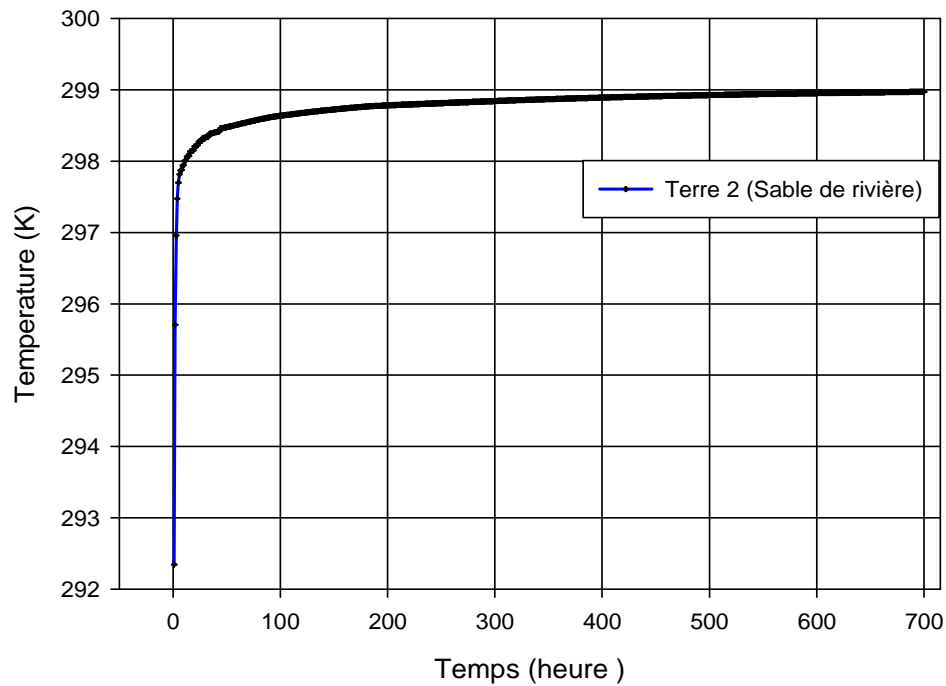


**Figure (5.13) : Evolution du flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique.**

### V.4.1.2 La terre 2 :

#### V.4.1.2.1 évolution de la température :

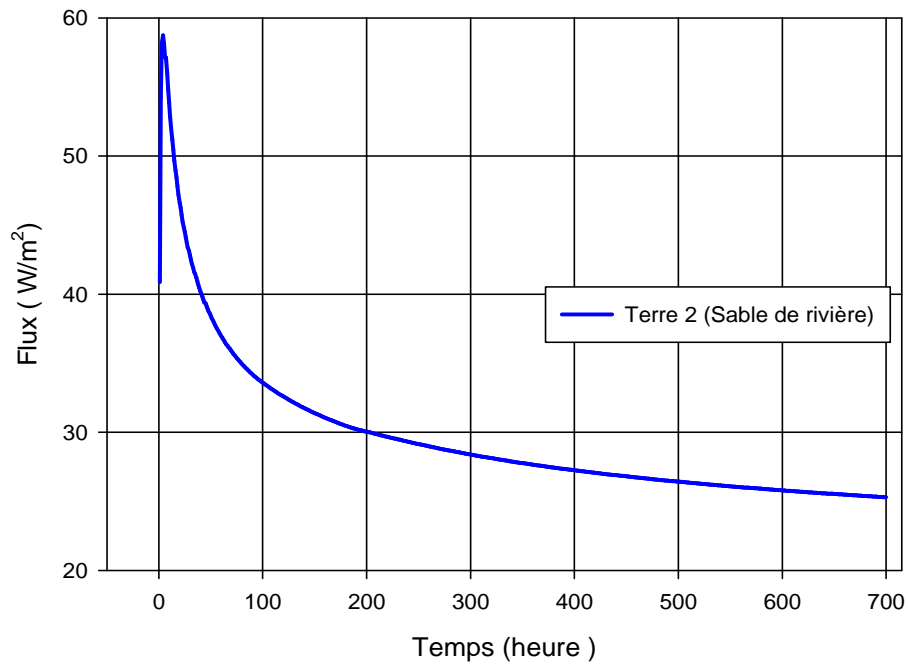
On remarque sur la courbe que la température de la paroi béton augmente de 292°K (19°C) jusqu'à une température de 298.97°K (25.97°C) et se stabilise.



**Figure (5.14) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique**

#### V.3.1.3.2 évolution de flux de chaleur :

De ce qui est évolution du flux de chaleur, celui-ci diminue de 58 W/m<sup>2</sup> jusqu'à la valeur de 25.30 W/m<sup>2</sup> ou elle se stabilise.

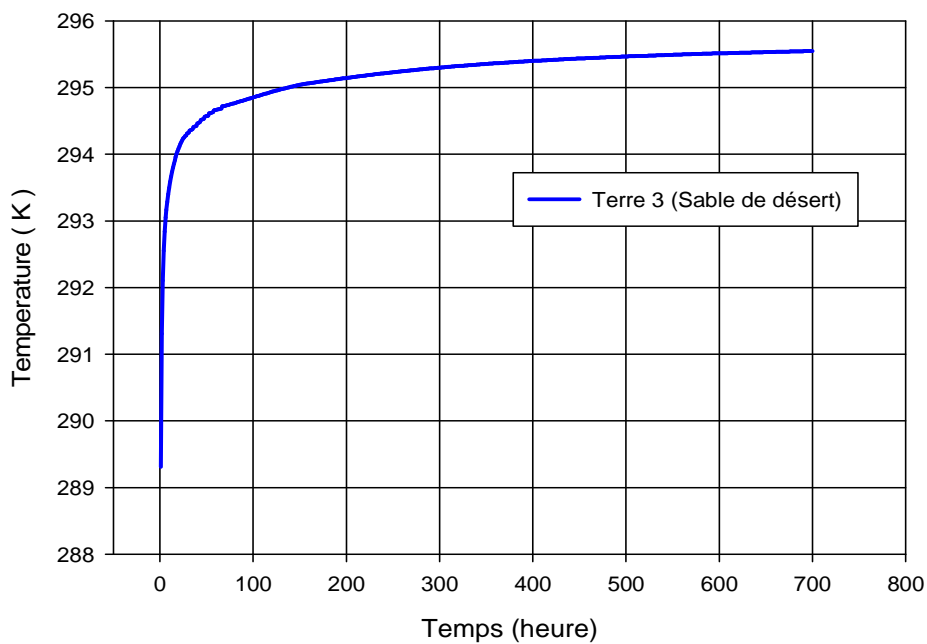


**Figure (5.15) : Evolution du flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique**

#### V.4.1.3 La terre 3 :

##### V.4.1.3.1.évolution de la température :

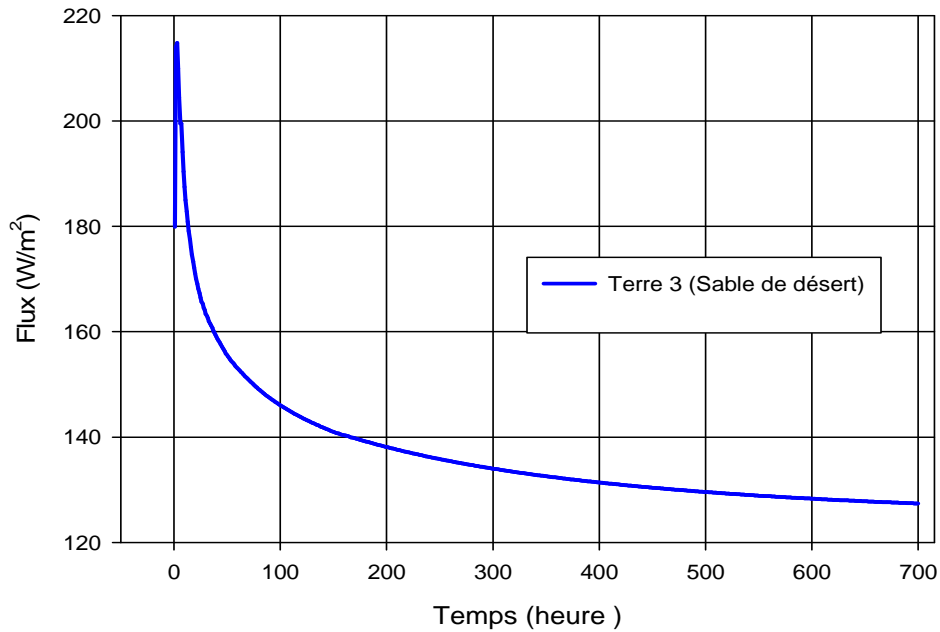
On remarque sur la courbe de l'évolution de température qu'elle la température augmente de 283°K (10°C) jusqu'à une température de 295.54°K (22.54°C) ou elle se stabilise.



**Figure (5.16) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique.**

**V.4.1.1.2.évolution du flux de chaleur :**

Le flux de chaleur de la paroi béton, diminue de 179.87 W/m<sup>2</sup> jusqu'à la valeur de 127.38 W/m<sup>2</sup> et se stabilise.



*Figure (5.17) : Evolution du flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique*

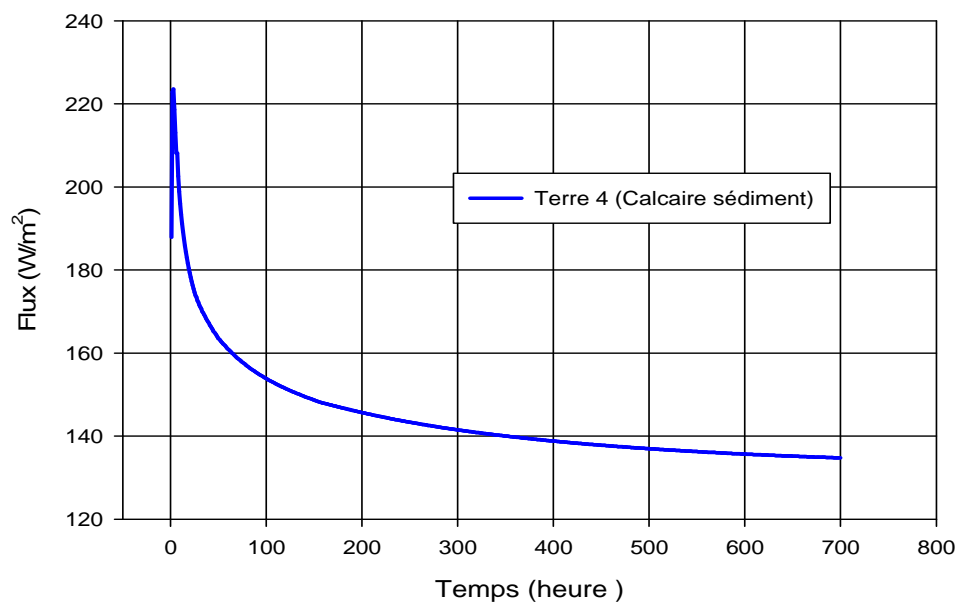
**V.4.1.4 La terre 4 :****V.4.1.4.1.évolution de la température :**

On remarque sur la courbe de l'évolution de température que la température augmente de 283°K (10°C) jusqu'à une température de 295.31°K (21°C) ou elle se stabilise.

**Figure (5.18) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique.**

***V.4.1.1.2.évolution du flux de chaleur :***

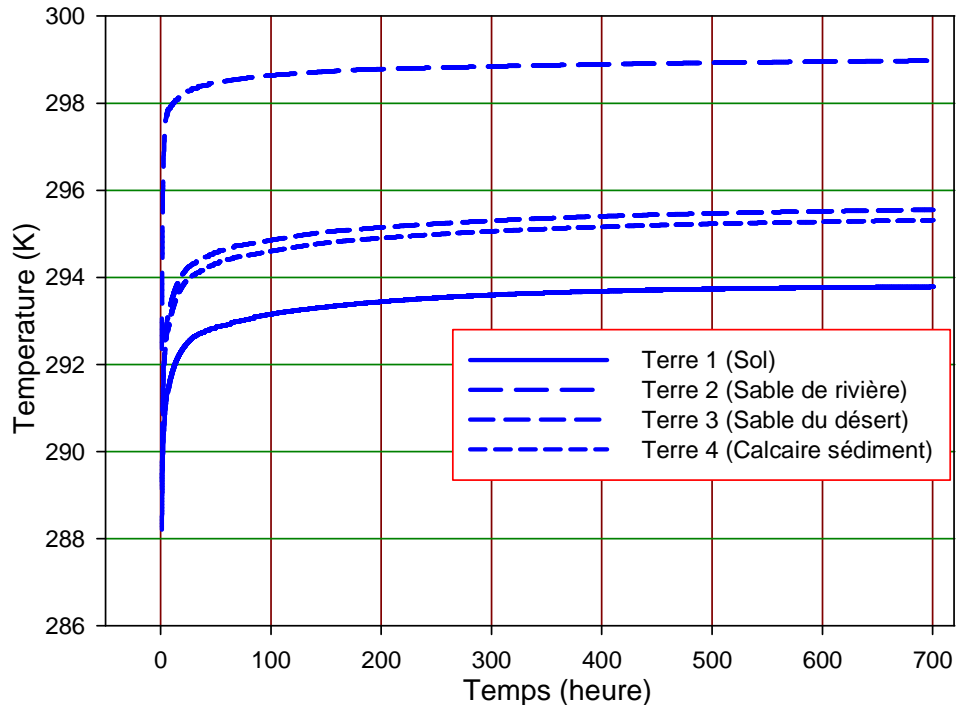
Le flux de chaleur de la paroi béton, diminue de  $187.90 \text{ W/m}^2$  jusqu'à la valeur de  $134.77 \text{ W/m}^2$  et se stabilise.



**Figure (5.19) : Evolution du flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique**

#### V.4.1.5 Comparaison de la variation de température dans les 4 terres :

Dans les 4 terres en remarque que il y a une différence significative entre les températures atteintes après 700h.



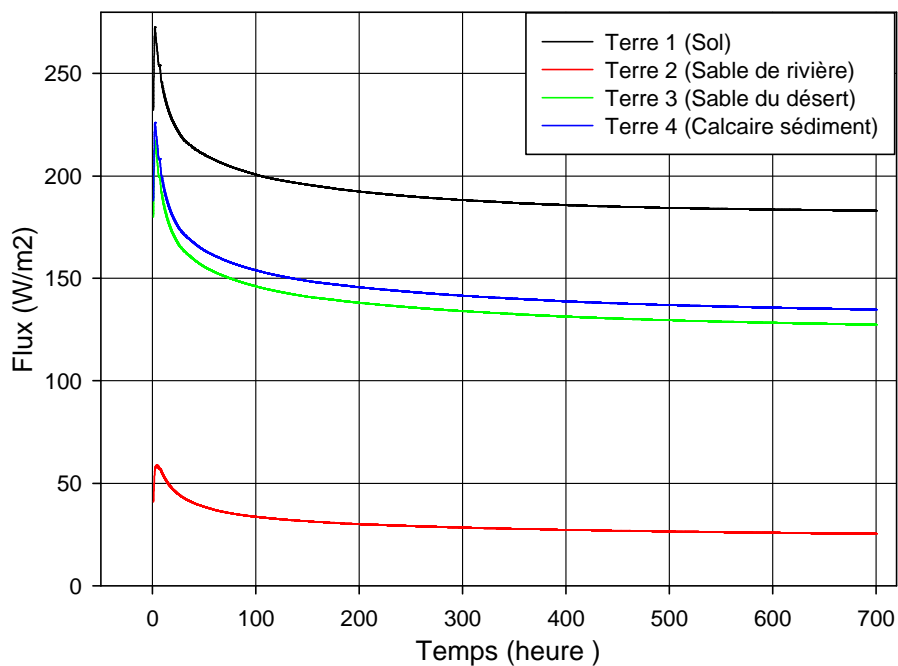
Figure(5.20) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique dans les 4 terres .

#### Remarque :

D'après, la figure (5.15) de l'évolution de température en remarque que la terre sable de rivière reçoit de la chaleur plus que les autres terres.

#### V.4.1.6 Comparaison de la variation de flux dans les 4 terres :

Dans les 4 terres, en remarque que il y a une différence significative de flux, parce que il y a une diversité dans les caractéristiques des terres et cela affecte le transfert thermique dans ces pieux énergétiques différents.



**Figure(5.21) :Evolution de flux de chaleur de la paroi béton de l'échangeur énergétique dans les 4 terres .**

**Remarque :**

En remarque dans le graphe que la terre de sable de rivière est la plus efficace du stockage thermique solaire du système de l'échangeur de chaleur géothermique, et les autre terres le sont moins .

**V.4.2 influence des différents fluides caloporteurs utilisés dans le circuit :**

Dans cette partie nous avons utilisé différents fluides avec diverses propriétés physiques et spécifications. Ona résumé ces caractéristique dans le tableau suivant :

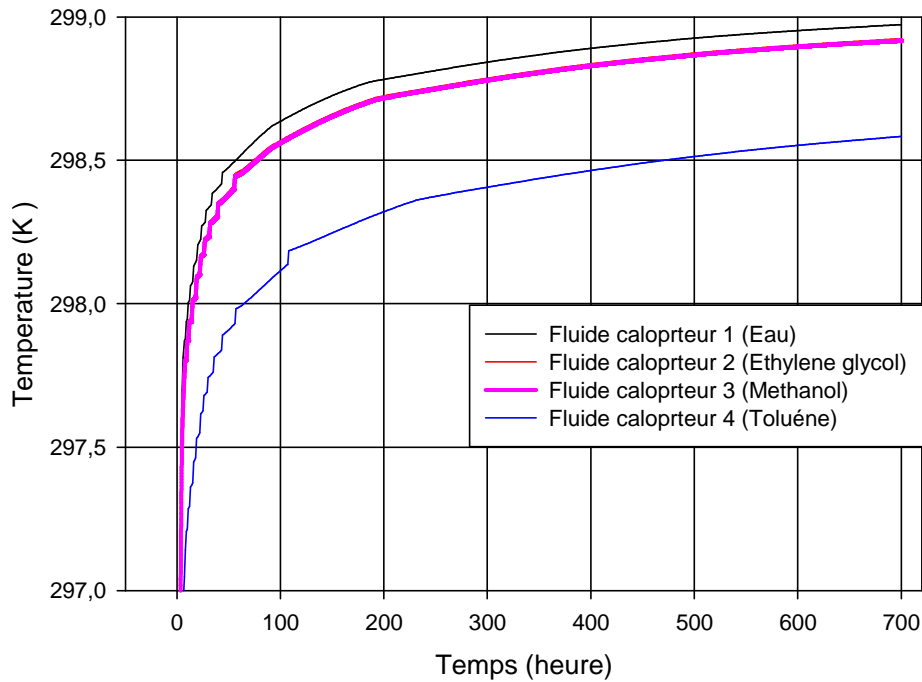
**Tableau (5.1) : les caractéristiques des fluides utilise[12]**

Fluides	Conductivité thermique (W/m.k)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique massique (j/kg.k)	Viscosité (kg/m.s)
eau	0.6	998.2	4182	0.001003
Ethylène glycol	0.471	1035	3953	0.00353
méthanol	0.462	373	3962	0.00323
toluène	0.134	869.9	1693	0.000526



Ensuite on a calculé la température de la paroi du béton de l'échangeur énergétique vertical et celle du tube en U les résultats trouvés sont sur les figures suivantes :

#### V.4.2.1-Evolution de la température :

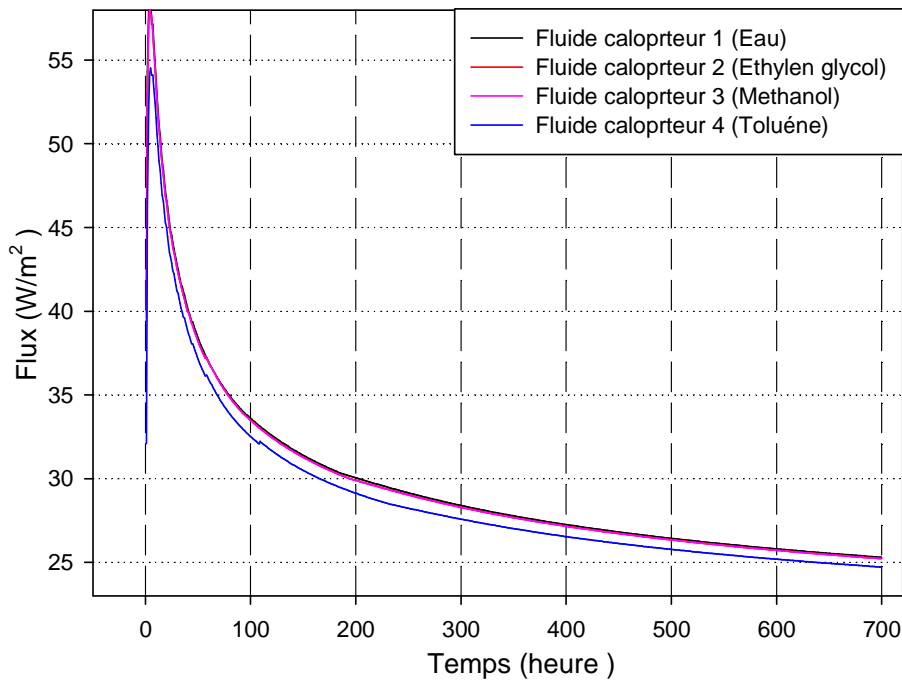


**Figure (5.22) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique pour différents fluides caloporteurs.**

#### *Remarque :*

par rapport aux autres fluides, tandis que la température du toluène est la plus basse. La courbe de l'éthylène glycol et méthanol sont identiques parce qu'ils ont presque les mêmes caractéristiques.

#### V.4.2.2-Evolution de flux :



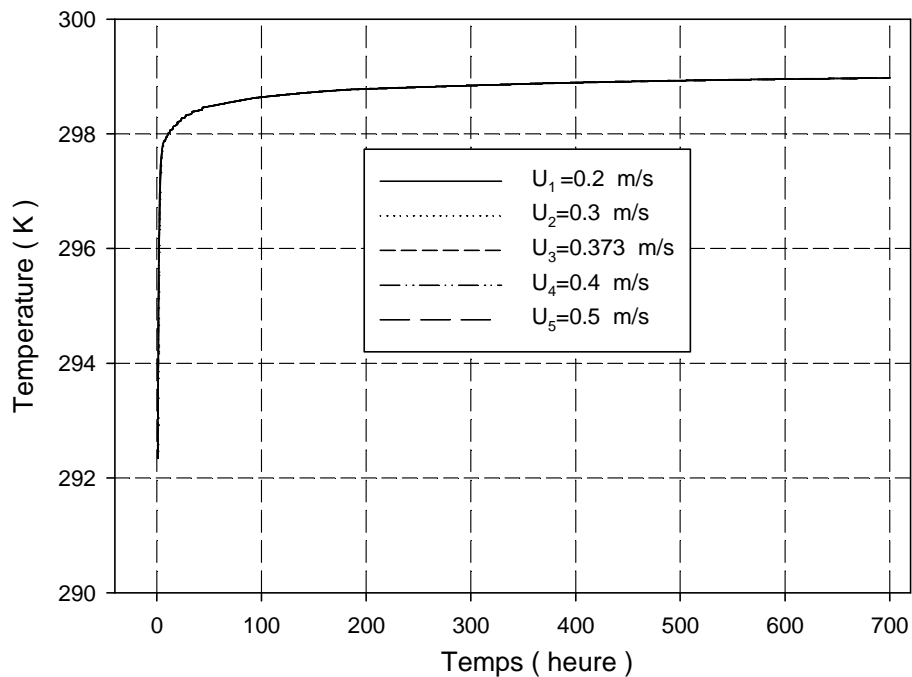
**Figure (5.23) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique pour différents fluides caloporteur.**

**Remarque :**

D'après les graphes, on observe que le flux de l'eau est la plus grande par rapport aux autres fluides, tandis que le flux du toluène est le plus bas. Les courbes d'éthylène glycol et méthanol sont identiques parce qu'ils ont presque les mêmes caractéristiques.

**V.4.3 influence de la vitesse du fluide caloporteur :**

Pour étudier l'influence de la vitesse du fluide sur la recharge thermique du sol, on a fait les calculs pour 5 vitesses différentes :  $U_1=0.2\text{m/s}$  ,  $U_2=0.3\text{m/s}$  ,  $U_3=0.373\text{m/s}$  ,  $U_4=0.4\text{m/s}$  ,  $U_5=0.5\text{m/s}$ . Ensuite on a calculé la température de la paroi du béton de l'échangeur énergétique vertical et celle du tube en U les résultats trouvés sont sur les figures suivantes :



**Figure (5.24) : Evolution de la température de la paroi béton de l'échangeur énergétique pour différentes vitesse du fluide caloporteur**

**Remarque :**

Sur ces courbes, on remarque que toutes les dépendances sont presque identiques, parce que cette augmentation de la vitesse n'est pas importante, ce qui nous conduit à dire que l'utilisation d'une vitesse faible pour la recharge du sol, est plus recommandée dans la mesure où l'énergie consommée par la pompe de recirculation est moins importante.

**V.5 Conclusion :**

Au cours de ce chapitre nous avons pu voir les résultats de 3 simulations, La première purement thermique qui consiste à étudier 4 terres avec des caractéristiques physiques différentes et dans la deuxième on a étudié l'influence de changement le fluide qui circule dans l'échangeur de chaleur géothermique .

Pour les simulations effectuées, les remarques qu'on peut faire sont les suivantes :

- L'évolution de la température en fonction de la position montre que le béton dans un échangeur vertical géothermique est indispensable que pour la stabilité et la rigidité du tube en U

- Le changement du sol autour du tube en U a un effet sur le transfert thermique, nous avons conclu de cette étude que la terre sable de rivière est la meilleure pour le transfert de chaleur avec le tube en U et l'augmentation de l'efficacité du stockage thermique solaire du system SSPG.
- Le remplacement des différents fluides à des effets différent sur le transfert thermique, dans notre simulation nous concluons que l'eau est le meilleur en termes de transfert de chaleur et de coût par rapport aux autres fluides.
- En cas de fuite de méthanol ou éthylène ou toluène de tube en U, cela peut causer des problèmes de pollution des nappes souterraines car il s'agit de substances toxiques.
- L'augmentation de la vitesse du fluide dans un tube en U dans l'objectif d'augmenter l'échange thermique n'est pas significative.
- La recharge du sol est très lente, ceci à cause des valeurs de la conductivité thermique du béton et du sous-sol qui sont relativement faibles.

# **Conclusion**

## *Conclusion générale :*

Les activités humaines affectent la composition chimique de l'atmosphère et entraînent l'apparition d'un effet de serre, de notre temps nous sommes obligés de trouver une solution de chauffage respectueuse de l'Environnement. Il existe divers solutions, donc nous devons abaisse les effets du Réchauffement climatique.

Dans le cadre de cette étude le système de stockage de l'énergie thermique solaire par les échangeurs de chaleur verticaux est une solution valable qui respectentl'environnement.

Cette méthode se caractérise par une réduction de consommation énergétique etdiminution des gaz polluants.

Le travail présenté dans cette mémoire est une simulation numérique d'un systèmed'échanges de chaleur géothermique, L'objectif principal de cette étude c'est pour atteindre la meilleure efficacité thermique possible dans un échangeur géothermique.

Nous avons pu voir les résultats de 3 simulations distinctes, la première purement thermique qui consiste à étudier 4 terres avec des caractéristiques physiques différentes et dans la deuxième on a étudié l'influence de changement le fluide qui circule dans l'échangeur de chaleur géothermique .

La simulation numérique est faite par le logiciel CFD en utilisant un module qui permet de prévoir l'influence de plusieurs paramètres sur l'état de fonctionnement de l'échangeur. L'emploi de ce logiciel dans l'approche numérique est simple et facile d'utilisation et très peu couteux en temps de calcul, il permet de résoudre et d'analyser rapidement les géométries complexes, et de simulé l'influence de différents paramètres sur les performances thermiques de l'échangeur.

A la suite de cette simulation numérique, il nous semble utile de rappeler quelque conclusion importante obtenue au cours de ce travail :

- Le changement du sol autour du tube en U à un effet sur le transfert thermique, nous avons conclu de cette étude que la terre de sol est la meilleure pour le transfert de chaleur.

- Le remplacement des différents fluides à des effets différent sur le transfert thermique, nous concluons que l'eau est le meilleur en termes de transfert de chaleur et de coût par rapport aux autres fluides.
- L'augmentation de la vitesse du fluide dans un tube en U dans l'objectif d'augmenter l'échange thermique n'est pas significative.
- La recharge du sol est très lente, ceci à cause des valeurs de la conductivité thermique du béton et du sous sol qui sont relativement faibles.

Enfin, les développements dans ce domaine sont toujours en cours et l'amélioration de cette source d'énergie incombe principalement aux ingénieurs civil et énergéticiens et pouvoirs publique . Les taches étaient variées , notamment : il faut localiser les ressource géothermique qualifiées, utiliser des pompes à chaleur du rendement élevé pour une consommation totale d'énergie, il faut en même temps former les professionnels . Concurrément, nous devons inventer, pour améliorer les capacités du système et diminuer les frais .

# **Références bibliographiques**



## *Références bibliographiques*

- [1] <https://www.ecohabitation.com/guides/2741/electromenagers-leur-part-dans-la-consommation-énergétique-de-la-maison/>  
(Consulté le 13/05/2021)
- [2] <https://www.need.org/Files/curriculum/guides/EnergyfromtheSunStudentGuide.pdf>  
(Consulté le 13/05/2021)
- [3] [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar\\_collector#:~:text=A%20solar%20collector%20is%20a,of%20water%20for%20personal%20use.](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_collector#:~:text=A%20solar%20collector%20is%20a,of%20water%20for%20personal%20use.)  
(Consulté le 14/05/2021)
- [4] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12000242>  
(Consulté le 14/05/2021)
- [5] <https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/efficient-use-of-heat/heat-exchangers/>  
(Consulté le 14/05/2021)
- [6] <https://www.ehpa.org/technology/>  
(Consulté le 18/05/2021)
- [7] La géothermie quel technologies pour quels usage ? livre publié avec l'aide de L'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'énergie ADEME édition BRGM, collection « les enjeux des géosciences ». novembre 2008.
- [8] [https://www.researchgate.net/figure/3-Closed-loop-ground-source-heat-pump-system-a-horizontal-circulation-loops-and-b\\_fig3\\_265873347?hcb=1](https://www.researchgate.net/figure/3-Closed-loop-ground-source-heat-pump-system-a-horizontal-circulation-loops-and-b_fig3_265873347?hcb=1)
- [9] <https://www.bellevuecollege.edu/sustainability/sustainbc/renewable-energy/ground-source-heating/>  
(Consulté le 21/05/2021)
- [10] BenamarBouhacina , RachidSaim , Hakan F. Oztop, “Numerical investigation of a novel tube design for the geothermalborehole heat exchanger”, Applied Thermal Engineering, Vol. 79, 2015, Pages 153-162  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.027>
- [11] Aminhossein Jahanbin, “Thermal performance of the vertical ground heat exchanger with a novel elliptical single U-tube”, Geothermics, Volume 86, July 2020, 101804  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101804>

**[12]** Soltani ,PooyaFarzanehkhameneh , FarshadMoradiKashkooli , Armughan Al-Haq , JatinNathwani , “Optimization and energy assessment of geothermal heat exchangers for different circulating fluids”, Energy Conversion and Management , Volume 228, 2021, 113733

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113733>

**[13]**Shabnam Gharibi ,EmadMortezazadeh , SeyedJalaledinHashemiAghchehBodi , Ali Vatani, “Feasibility study of geothermal heat extraction from abandoned oil wells using a U-tube heat exchanger”, Energy Volume 153, 15 June 2018, Pages 554-567

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.003>

**[14]** Richard Lenhard, Milan Malcho “Numerical simulation device for the transport of geothermal heat with forced circulation of mediaMathematical and Computer ModellingVolume 57, Issues 1–2, January 2013, Pages 111-125

<https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.011>

**[15]** Ismael R. Maestre, Francisco Javier González Gallero, PascualÁlvarez Gómez, Juan Luis FoncubiertaBlázquez, “experimental validation of a hybrid model for vertical ground heat exchangers under on-off operation conditions” Energy and Buildings; Volume 204, 1 December 2019, 109517

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109517>

**[16]** Bruno Marcotte, Michel Bernier, Experimental validation of a TRC model for a double U-tube borehole with two independent circuitsApplied Thermal EngineeringVolume 162, 5 November 2019, 114229

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114229>

**[17]**Chaofan Chen, WanlongCai, Dmitri Naumov , Kun Tu , Hongwei Zhou , Yuping Zhang , Olaf Kolditz , Haibing Shao , “Numerical investigation on the capacity and efficiency of a deep enhanced U-tube borehole heat exchanger system for building heating”Renewable Energy Volume 169, May 2021, Pages 557-57

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.033>

**[18]**Liu, F, Guo, T, Wang Y. et al. “Numerical simulation on heat transfer performance of vertical U-tube with different borehole fill materials”. J Cent. South Univ. Technol. 13, 234–237 (2006).

<https://doi.org/10.1007/s11771-006-0137-y>

**[19]** Adel ESWIASI and PhalguniMukhopadhyaya, “Critical Review on Efficiency of Ground Heat Exchangers in Heat Pump Systems, Clean Technol. 2020, 2(2), 204-224;

<https://doi.org/10.3390/cleantechnol2020014>

**[20]** Zehao Lyu, Xianzhi Song, Gensheng Li, Yu Shi, Zihan Mu “Numerical analysis of characteristics of a single U-tube downhole heat exchanger in a geothermal well”  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.10.012>

**[21]** Tolga Y. Ozudogru, C. Olgun, A. Şenol, “3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers”, *j.geothermics*, Volume 51, July 2014, Pages 312-324  
<http://dx.doi.org/10.1016/j>

**[22]** Hanin Atwany, Mohammad O. Hamdan, Bassam A. Abu-Nabah, Abdul Hai Alami Mousa Attom, “Experimental evaluation of ground heat exchanger in UAE”, *Renewable Energy*, Volume 159, October 2020, Pages 538-546  
<https://doi.org/10.1016>

**[23]** Zhongjian Li, Maoyu Zheng, Development of a numerical model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers, *Applied Thermal Engineering* Volume 29, Issues 5–6, April 2009, Pages 920-924  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.04.024>

**[24]** Zonghe Zheng, Weixiao Wang, Chao Ji, “A Study on the Thermal Performance of Vertical U-Tube Ground Heat Exchangers”, *Energy Procedia* Volume 12, 2011, Pages 906-914  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.119>

**[25]** Matene Elhacene, Simulation numérique des écoulements turbulents à travers les conditionneurs. Projet de fin d’étude, Centre Universitaire de Khemis Milliana 2009.

**[26]** D. Fedela, Simulation numérique des écoulements internes dans les turbo machines, manuel de cours, laboratoire d’énergétique et de mécanique des fluides interne ENSAM, CER Paris, Octobre 2007.

**[27]** Elizabeth M. Marshall and André Bakker, Computational Fluid Mixing, technical notes, Fluent Lebanon, Janvier, 2001.

**[28]** Ahmad M.I. Husaundee, « Modélisation des installations de génie climatique en environnement de simulation graphique », Thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées, France, juin 2002

**[29]** Ansys Fluent 6.3 User’s Guide, Lebanon, (2006).

**[30]** Balima Olivier, Fontfreyde Thomas, George Erwin, Marinhas Sandrine, RezguiAzdine, , Etude de la convection naturelle dans une cavité carrée en 2d et 3d sous fluent et gambit, projet de fin d'étude école supérieur d'ingénieur de Poitiers 2003.

**[31]** <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node256.htm>  
(consulté le 29/05/2021)

**[32]** <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node568.htm>  
(Consulté le 29/05/2021)

**[33]** <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node568.htm#sec-hxfer-theory>  
(Consulté le 29/05/2021)

**[34]** <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node1192.htm>  
(Consulté le 29/05/2021)

**[35]** <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node572.htm>  
(Consulté le 29/05/2021)

**[36]** <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node569.htm>  
(Consulté le 29/05/2021)

**[37]** <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node570.htm>  
(Consulté le 29/05/2021)

**[38]** <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node1355.htm>  
(Consulté le 29/05/2021)

**[39]** Eui-Jong Kim , Jean-Jacques Roux , Gilles Rusaouen , FrédéricKuznik, Numerical modelling of geothermal vertical heat exchangers for the short timeanalysis using the state model size reduction technique, Applied Thermal Engineering, Volume 30, Issues 6-7, May 2010, Pages 706-714  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.11.019>

**[40]** BOUHACINA Bénamar, “simulation numérique du comportement dynamique et thermique d'un échangeur de chaleur bi tubulaire destiné pour le stockage d'énergie solaire” mémoire de magister, Université de Tlemcen ; 2015.