

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Énergétique

**Présenté par** : KAHOUADJI Ahmed Younes et HABRI Mohammed Yassine

### **Sujet**

***Etude et Simulation de la récupération de l'énergie géothermique***

Soutenu publiquement, le 29 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M KHOUANE Meftah  
Mme KHALDI Souheyla  
M ALIANE Khaled  
M HENAOUI Mustapha

Professeur Université de Tlemcen  
MCB Université de Tlemcen  
Professeur Université de Tlemcen  
Docteur Université de Tlemcen

Président  
Examinatrice  
Encadreur  
Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 / 2022

# *REMERCIEMENTS*

On voudrait dans un premier temps remercier, notre directeur de mémoire Mr ALIANE Khaled professeur à l'université de Tlemcen, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.

Un remerciement chaleureux est adressé à notre co-directeur de mémoire Monsieur M. HENAOUI, Docteur à l'Université de Tlemcen pour ces conseils et sa précieuse aide durant la rédaction de notre mémoire.

Un remerciement distingué aux membres du jury président de cette soutenance Mr. KHOUANE Meftah, et l'examinatrice Mme. KHALDI Souhaila qui ont accepté d'examiner notre mémoire et ont œuvré pour le bon déroulement du mémoire,

On remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de Tlemcen et les intervenants professionnels responsables de notre formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

# *Dédicaces*

Nous dédions ce modeste travail à toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de master, plus particulièrement : A nos très chers parents, à toute la famille HABRI et KAHOUADJII sans oublier nos amis.

## ملخص:

في هذا العمل ، يدرس نوعان من المبادلات الحرارية الجوفية المخصصة لتهوية المباني. أولاً ، نقدم المضخة الحرارية الجوفية والحرص على استخدام الأرض كمصدر للحرارة الساخنة أو الباردة لتوفيرها احتياجات التدفئة والتبريد.

الغرض من هذا المستند هو تحديد حجم نظام تهوية تضمن درجة حرارة مناسبة للراحة الحرارية.

كان الهدف دراسة تدفق الهواء المنفوخ في شكلين هندسيين (أنبوب وبنر الكندية) لتحقيق كفاءة التهوية.

نظام المعادلات التفاضلية الجزئية التي تحكم المشكلة (حفظ الكتلة والزخم والطاقة) عددًا بواسطة طريقة الحجم المحدود.

k-epsilon نموذج الاضطراب المستخدم هو نموذج

نتائج المحاكاة هي: السرعة ، الضغط ، الطاقة الحركية ، و توزيع درجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: التهوية ، المبادلات الحرارية الجوفية ، طريقة الحجم المحدود ، نموذج الاضطراب

k-epsilon.

## Résumé :

Dans ce travail, on étudie deux types d'échangeurs géothermiques destinés pour la ventilation des locaux et bâtiment. Dans un premier temps, on présente la pompe à chaleur géothermique et l'intérêt d'utiliser le sol comme source de chaleur chaude ou froide pour subvenir aux besoins en chaleur et en froid.

La présente d'étude a pour objectif de dimensionner et de sélectionner un système de ventilation garantissant une température adéquate pour un confort thermique.

L'objectif était d'étudier le flux de l'air insufflé dans deux géométries (tube en U, puits canadien) pour obtenir une ventilation efficace.

Le système d'équations aux dérivées partielles qui régit le problème (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) est résolu numériquement par la méthode des volumes finis. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle k-epsilon.

Les résultats de la simulation sont : la vitesse, la pression, l'énergie cinétique et la distribution de la température.

**Mots clés :** ventilation, échangeurs géothermiques, la méthode des volumes finis, Le modèle de turbulence k-epsilon.

## **ABSTRACT:**

In this work, we study two types of geothermal heat exchangers intended for ventilation premises and buildings. First, we present the geothermal heat pump and the interest of using the ground as a source of hot or cold heat to provide heating and cooling needs.

The purpose of this document is to size and select a system of ventilation guaranteeing an adequate temperature for thermal comfort.

The objective was to study the flow of blown air in two geometries (U-tube, well Canadian) to achieve ventilation efficiency.

The system of partial differential equations that governs the problem (conservation of mass, momentum and energy) is solved numerically by the finite volume method. The turbulence model used is the k-epsilon model.

The simulation results are: velocity, pressure, kinetic energy, and temperature distribution.

**Keywords:** ventilation, geothermal heat exchangers, finite volume method, k-epsilon turbulence model.

# Sommaire

## REMERCIEMENTS

Dédicaces

Résumé

ABSTRACT

ملخص

## NOMENCLATUR

INTRODUCTION GENERALE .....	01
<b>I. CHAPITRE I : Généralité sur la Géothermique</b>	
I.1.Introduction .....	03
I.2. Type d'utilisation de l'énergie géothermique .....	03
I.2-1 Haute énergie.....	05
I.2-2 Moyenne énergie.....	05
I.2-3 Basse énergie.....	05
I.2-4 Très basse énergie.....	06
I.3. La géothermie en Algérie .....	07
I.3-1 Le continental intercalaire .....	08
I.4. Utilisation de l'énergie géothermique .....	09
I.4-1 Utilisation de l'énergie géothermique dans le monde .....	11
I.5. La géothermie dans l'avenir .....	11
I.6. La chaleur de la terre .....	12
I.6-1 La structure interne du globe .....	12
I.6-2 Le gradient géothermal .....	13
I.6-3 L'origine de la chaleur.....	13
I.6-4 Température du sol non perturbé .....	14
I.7. Croissance de la production de chaleur par géothermie .....	15

I.8. Classification des systèmes géothermiques.....	15
I.8-1 Système géothermiques volcaniques .....	15
I.8-2 Dans les systèmes convectifs par fracture .....	15
I.8-3 Les systèmes géothermiques sédimentaires .....	16
I.8-4 Les systèmes à géo-pression .....	16
I.8-5 Les systèmes géothermiques à roches sèches chaudes (RSC) ou stimulés (modifiés) (EGS)	16
I.9. Avantages et inconvénients .....	18
I.10. Conclusion.....	18
 <b>II. CHAPITRE II : Pompe à chaleur géothermique</b>	
II.1. Pompe à chaleur.....	21
II.1-1 Propriétés du sol.....	22
II.1-2 Pompe à chaleur et sol.....	23
II.2. Pompe à chaleur géothermique.....	25
II.2-1 Composants.....	25
II.2-2 Types.....	27
II.2-3 Fonctionnement.....	29
II.3. Les échangeurs de chaleur.....	31
II.3-1 Définition .....	31
II.3-2 Principal but et fonctions d'un échangeur thermique.....	32

II.3-3 Les différents types d'échangeurs thermiques.....	33
II.4. Les échangeurs de chaleur géothermique .....	34
II.4-1 Boucle fermée horizontal .....	34
II.4-2 Boucle fermée vertical .....	37
II.4-3 Boucle fermée de l'étang et du lac .....	37
II.5. Méthodes de récupération de l'énergie Géothermique .....	38
II.5-1 L'extraction.....	38
II.5-2 Centrale géothermique.....	40
<b>III. CHAPITRE III : Modélisation et Simulation Numérique</b>	
III.1. Modélisation de la géométrie .....	43
III.1-1 Géométrie et conditions aux limites.....	43
III.1-2 Maillage.....	44
III.2 Equation.....	45
III.2-1 Equation de Navier-Stokes incompressible .....	45
III. 2-2 Modélisation de la turbulence .....	46
III.3 Simulation numérique .....	47
III.3-1 Gambit.....	47
III.3-2 Fluent.....	57
<b>IV. CHAPITRE IV : Résultats et Dépouillement</b>	
IV.1 Validation.....	72

IV.2 Contour (vitesse, température, pression) .....	72
IV.2-1 Contour de la vitesse .....	72
IV.2-2 Contour de la température .....	73
IV.2-3 Contour de pression.....	81
IV.3 Profil de température.....	87

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## **BIBLIOGRAPHIE**

# NOMENCLATURE

## Lettres latines :

$C_p$	Chaleur spécifique à pression constante	[J/kg.K]
$k$	Energie cinétique de turbulence	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$L$	Largeur du canal	[m]
$P$	Pression	[Pa]
$P_{atm}$	Pression atmosphérique	[Pa]
$Pr$	Nombre de Prandtl	
$Re$	Nombre de Reynolds	
$t$	Temps	[s]
$T$	Température	[K]
$U$	Vitesse d'écoulement	[m/s]
$\bar{U}$	Vitesse moyenne	[m/s]
$u'$	Vitesse fluctuante	[m/s]
$u,v,w$	Composante de vitesse suivant x,y,z	[m/s]
$x,y,z$	Coordonnées spatiales	[m]

## Lettres grecques :

$\omega$	Fréquence turbulente	[1/s]
$\rho$	Masse volumique du fluide	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	Grandeur physique	
$\kappa$	Constante Von Karman	

$\mu$	Viscosité dynamique	[Pa.s]
$\lambda$	Conductivité thermique du fluide	[W/m.K]
$\varepsilon$	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\tau_p$	Contrainte visqueuse	[kg/m.s <sup>2</sup> ]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I :

**Figure 1-1** : Schéma expliquant la géothermie haute énergie

**Figure 1-2** : Schéma expliquant la géothermie basse énergie

**Figure 1-3** : Schéma expliquant la géothermie très basse énergie

**Figure 1-4** : Situation géographique de la région d'étude

**Figure 1-5** : Carte représentant les nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal

**Figure 1-6** : Capacité installée (MWT)

**Figure 1-7** : Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures

**Figure 1-6** : Le mouvement des plaques lithosphériques

**Figure 1-9** : Modèle conceptuel de champ à haute température dans un système volcanique fissuré

**Figure 1-10** : Vue schématique d'un bassin sédimentaire à réservoir géothermique situé à 2-4 km de profondeur

## CHAPITRE II :

**Figure 2-1** : Schéma d'une pompe à chaleur

**Figure 2-2** : Flux solaire vers la terre

**Figure 2-3** : Écarts de températures : pompe à chaleur à air et système géothermique

**Figure 2-4** : les Principaux composants d'une pompe à chaleur géothermique

**Figure 2-5** : Exemple de pompe à chaleur sol/sol

**Figure 2-6** : Exemple de pompe à chaleur sol/eau

**Figure 2-7** : Exemple de pompe à chaleur eau glycolée/ eau

**Figure 2-8** : Potentiel de récupération de chaleur pour une journée

**Figure 2-9** : Système en boucle fermée horizontale

**Figure 2-10** : Type étendu de bobine Slinky

**Figure 2-11** : Type de chevauchement de bobine Slinky

**Figure 2-12** : Système vertical en boucle fermée

**Figure 2-13** : Système de boucle fermée d'étang

**Figure 2-14** : Centrale géothermique

### **CHAPITRE III :**

**Figure 3-a** : Première configuration

**Figure 3-b** : Deuxième configuration

**Figure 3.1** : Une partie de maillage

**Figure 3.2** : Maillage raffiné

**Figure 3-3** : Vue globale de GAMBIT

**Figure 3-4** : Commande géométrie

**Figure 3-5** : Commande volume et création de cylindre

**Figure 3-6** : Création du premier cylindre

**Figure 3-7** : la Commande copy

**Figure 3-8** : Création du cylindre de la conduite horizontal

**Figure 3-9** : la géométrie

**Figure 3-10 et 3-11** : la commande Unite Real Volume

**Figure 3-12** : La création de la géométrie

**Figure 3-13 et 3-14** : Les commandes de maillage

**Figure 3-15** : Création de la géométrie maillée

**Figure 3-16** : La commande des conditions aux limites

**Figure 3-17** : La commande définition de fluide

**Figure 3-18** : Fenêtre de dialogue

**Figure 3-19** : Importation de la géométrie

**Figure 3-20** : Vérification du maillage sous Fluent

**Figure 3-21** : Vérification des unités de simulation

**Figure 3-22** : Choix du solver sous fluent

**Figure 3-23** : Activation des équations de l'énergie

**Figure 3-24** : Choix de la nature de l'écoulement

**Figure 3-25** : Définition des propriétés de l'air

**Figure 3-26** : Choix de la pression de référence

**Figure 3-27** : Les valeurs des conditions aux limites

**Figure 3-28 et 3-29** : Définition des conditions à l'entrée

**Figure 3-30 et 3-31** : Valeurs des conditions aux limites au niveau de la paroi et de la pression

**Figure 3-32** : Choix de la solution

**Figure 3-33** : Initialisation de solution

**Figure 3-34** : Précision des résultats.

**Figure 3-35** : Démarrage de calcul

**Figure 3-36** : L'itération à 5s

**Figure 3-37** : L'itération à 15s

**Figure 3-38** : Affichage du maillage

**Figure 3-39** : Affichage de la géométrie et maillage sur FLUENT

**Figure 3-40** : Affichage des contours

**Figure 3-41** : La création des courbes

## **CHAPITRE IV :**

**Figure 4-1 :** Contour de vitesse configuration 1

**Figure 4-2 :** Contour de vitesse configuration 2

**Figure 4-3 :** Contour de température à 5seconds à l'entrée configuration 1

**Figure 4-4 :** Contour de température à 5seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-5 :** Contour de température à 5seconds à l'entrée géométrie 2

**Figure 4-6 :** Contour de température à 5seconds à la sortie géométrie 2

**Figure 4-7 :** Contour de température à 10seconds à l'entrée configuration 1

**Figure 4-8 :** Contour de température à 10seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-9 :** Contour de température à 10seconds à l'entrée configuration 2

**Figure 4-10 :** Contour de température à 10seconds à la sortie configuration 2

**Figure 4-11 :** Contour de température à 15seconds à l'entrée configuration 1

**Figure 4-12 :** Contour de température à 15seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-13 :** Contour de température à 15seconds à l'entrée configuration 2

**Figure 4-14 :** Contour de température à 15seconds à la sortie configuration 2

**Figure 4-15 :** Contour de pression à 5seconds à l'entrée configuration 1

**Figure 4-16 :** Contour de pression à 5seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-17 :** Contour de pression à 5seconds à l'entrée configuration 2

**Figure 4-18 :** Contour de pression à 5seconds à la sortie configuration 2

**Figure 4-19 :** Contour de pression à 10seconds à l'entrée configuration 1

**Figure 4-20 :** Contour de pression à 10seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-21 :** Contour de pression à 10seconds à l'entrée configuration 2

**Figure 4-22** : Contour de pression à 10seconds à la sortie configuration 2

**Figure 4-23** : Contour de pression à 15seconds à l'entrée configuration 1

**Figure 4-24** : Contour de pression à 15seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-25** : Contour de pression à 15seconds à l'entrée configuration 2

**Figure 4-26** : Contour de pression à 15seconds à la sortie configuration 2

**Figure 4-27** : Profil de température à l'entrée configuration 1

**Figure 4-28** : Profil de température à l'entrée configuration 2

**Figure 4-29** : Profil de température à 5seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-30** : Profil de température à 5seconds à la sortie configuration 2

**Figure 4-31** : Profil de température à 10seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-32** : Profil de température à 10seconds à la sortie configuration 2

**Figure 4-33** : Profil de température à 15seconds à la sortie configuration 1

**Figure 4-34** : Profil de température à 15seconds à la sortie configuration 2

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I

**Table 1-1:** Classification des réservoirs géothermique

**Table 1-2 :** Caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie

**Table 1-3 :** Une comparaison entre la géothermie et les autres énergies

## CHAPITRE II

**Tableau 2-1 :** Températures minimales types de sources de chaleur en mode chauffage

## CHAPITRE III

**Tableau 3-1 :** la commande de création de maillage

**Tableau 3-2 :** Les conditions aux limites dans GAMBIT

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## Introduction Générale :

Les sources d'énergie renouvelables sont des ressources énergétiques qui peuvent être régénérées et sont donc considérées comme inépuisables. Ils sont une alternative au modèle énergétique mondial, limité à l'utilisation d'énergies fossiles. L'obtention de ses énergies fossiles entraîne des impacts environnementaux négatifs.

Les énergies renouvelable, disponibles dans la nature et qu'elles aient moins d'impacts négatifs sur l'environnement, sont peu utilisées, car elles nécessitent des investissements technologiques plus importants pour rendre leur utilisation économiquement viable.

Des exemples de sources d'énergie alternatives sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, les biocarburants, l'énergie marine et l'énergie géothermique.

L'énergie géothermique provient de la chaleur générée à l'intérieur de la planète. Cette énergie peut chauffer les maisons, produire de l'électricité, et elle sert aussi au rafraîchissement de l'air. On utilise un échangeur air/sol pour le chauffage et la climatisation des locaux, système appelé communément puits canadien.

Le puits canadien, également appelé puits provençal, est un système dit de géothermie de surface, qui consiste à profiter de l'inertie thermique du sol pour préchauffer l'air destiné au bâtiment.

L'air frais extérieur circule dans des canalisations souterraines grâce à un ventilateur, avant d'être soufflé dans le bâtiment. En hiver, l'air se réchauffe au contact du sol pour atteindre une température hors gel. En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour maintenir une bonne qualité de l'air intérieur grâce à une ventilation adéquate et à fournir un confort thermique.

Le puits canadien s'inscrit dans une démarche bioclimatique. Il permet d'atteindre une gamme de confort en combinant température, humidité et vitesse de l'air.

# **CHAPITRE I**

## **GISEMENT GEOTHERMIQUE**

## **1. Introduction :**

La géothermie est une énergie renouvelable connue et couramment utilisée. Elle consiste comme sa racine latine l'indique à utiliser l'énergie de la terre ('géo') pour produire ou évacuer de la chaleur ('thermo').

L'énergie géothermique est généralement définie comme la chaleur stockée dans la Terre (et ses fluides internes) [1]. Cela comprend la chaleur stockée à la fois dans la roche solide et dans les fluides de ses vides, et la distingue de la chaleur stockée dans les masses d'eau de surface telles que les rivières, les lacs et les océans. Cette énergie est stockée sous forme de chaleur sensible ou latente. Fourni par des sources internes et externes, il représente un vaste approvisionnement qui commence seulement à être exploité par l'humanité pour le chauffage des locaux, la chaleur industrielle, et la production d'énergie électrique, qui ne dépend ni des conditions climatiques, ni de la saison ou du moment de la journée. Les options et les défis liés à la transformation de ce potentiel prometteur en technologies opérationnelles, efficaces et économiques font l'objet de cette évaluation.[2]

## **2. Type d'utilisation de l'énergie géothermique :**

L'énergie géothermique peut être utilisée directement, sans autre conversion, sous forme de chaleur. L'application directe de la chaleur géothermique est appelée utilisation directe. Alternativement, la chaleur géothermique peut être convertie en d'autres types d'énergie au détriment d'une certaine quantité d'énergie pour la conversion. Production d'énergie électrique nécessite une conversion en électricité. L'utilisation directe exploite la ressource plus efficacement que la conversion de l'énergie car aucune énergie n'est perdue lors de la conversion de la chaleur en électricité. Cependant, la chaleur ne peut pas être transmise sur des distances de plus de quelques kilomètres au plus sans réduction notable d'efficacité en raison des pertes de chaleur inévitables. Il existe une longue tradition d'utilisation directe de la chaleur géothermique dans diverses cultures humaines sur plusieurs millénaires, principalement associées (mais sans s'y limiter) aux sources chaudes.

Bien qu'il n'y ait pas de date de début exacte pour l'utilisation directe de la chaleur géothermique, on sait bien quand la chaleur géothermique a été fournie pour la première fois à un système de chauffage urbain à grande échelle : en Islande en 1930 [3]. Depuis, l'Islande est devenue indépendante des combustibles fossiles pour le chauffage, éliminant les graves problèmes de pollution antérieurs liés à la combustion du charbon noir en hiver. En revanche

pour une utilisation directe, on sait exactement où et quand la chaleur géothermique a été convertie pour la première fois en énergie électrique :

À Lardarello, en Italie, en 1904, il y a un siècle, lorsque l'ingénieur comte Piero Ginori Contia réussi à produire suffisamment d'électricité à partir de vapeur géothermique pour alimenter cinq ampoules électriques.

Différentes technologies sont utilisées pour produire de la chaleur géothermique. Ils sont basés sur la conduction thermique ou advection : (1) Dans la production de chaleur par conduction, la chaleur se diffuse dans un échange de chaleur souterrain isolé, système sans aucun échange de substance. Cette technique est utilisée en utilisation directe, principalement pour les systèmes de production de chaleur peu profonds. (2) Chaleur advection la production est basée sur la production de fluides chauds, principalement des saumures, à partir de réservoirs souterrains à profondeurs appropriées. Cette technique est utilisée à la fois pour une utilisation directe et à la production d'électricité en basse enthalpie et champs de moyenne ou haute enthalpie, respectivement, en fonction de la température des fluides produits,

(Tableau 1-1).

Type	Ressource	Ecart de température(°C)	Contenue énergétique
Dominé par l'eau	Eau chaude Vapeur humide	< 100 100 - 150	Basse enthalpie Moyenne enthalpie
Dominé par la vapeur	Vapeur sèche	<b>No table of figures entries found.&gt; 150</b>	Haute enthalpie

**Table 1-1:** Classification des réservoirs géothermique [4]

Sur environ 100 systèmes hydrothermaux étudiés dans le monde, moins de 10 % sont secs et dominés par la vapeur, 60 % sont des champs de vapeur humides dominés par l'eau et 30 % produisent de l'eau chaude. [4]

Ainsi, y a d'autres types de géothermie :

## 2-1. Haute énergie :

Les gisements à haute températures concernent les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150 °C. Dans les zones instables à gradient géothermique élevé, les réservoirs sont généralement localisés entre 1 500 et 3 000 mètres de profondeur. Ces zones correspondent aux régions volcaniques situées à proximité des frontières des plaques tectoniques : "ceinture de feu" du Pacifique, arc des petites Antilles, arc méditerranéen ou encore grand rift africain. Le fluide peut être capté sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production d'électricité. Les réservoirs géothermiques à haute température sont utilisés essentiellement pour la production d'électricité, (Figure 1-1).

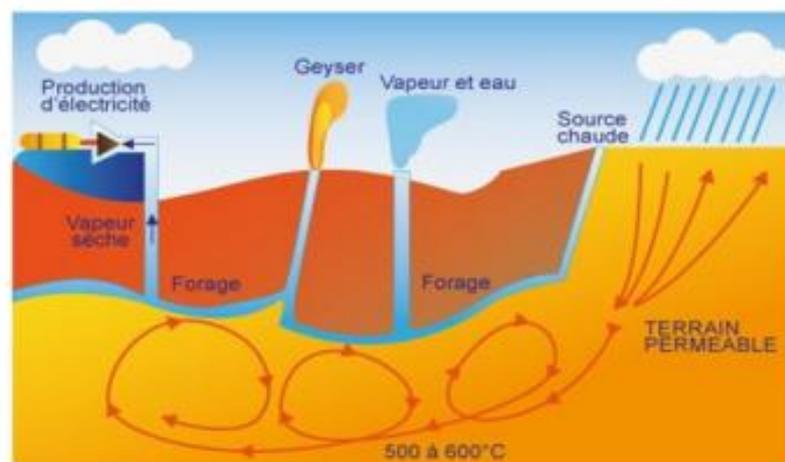


Figure 1-7 : Schéma expliquant la géothermie haute énergie [5]

## 2-2. Moyenne énergie :

Les ressources de moyenne température se présentent sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 °C et 150 °C. Elles sont associées aux zones volcaniques et aux bassins sédimentaires. Elles peuvent être utilisées pour produire de l'électricité ou pour des usages directs. [6]

## 2-3. Basse énergie :

Ce sont des réservoirs situés généralement à des profondeurs entre 1500 et 2500 mètres et dont la température varie entre 30° C à 90° C. Nous les rencontrons dans des zones relativement stables, la majorité des réservoirs exploités dans le monde sont localisés dans les

bassins sédimentaires, à titre d'exemple, nous citons le réservoir de l'Albien en Algérie capté par forges avec une température en tête de forge de l'ordre de 55° C, (Figure 1-2). [6]

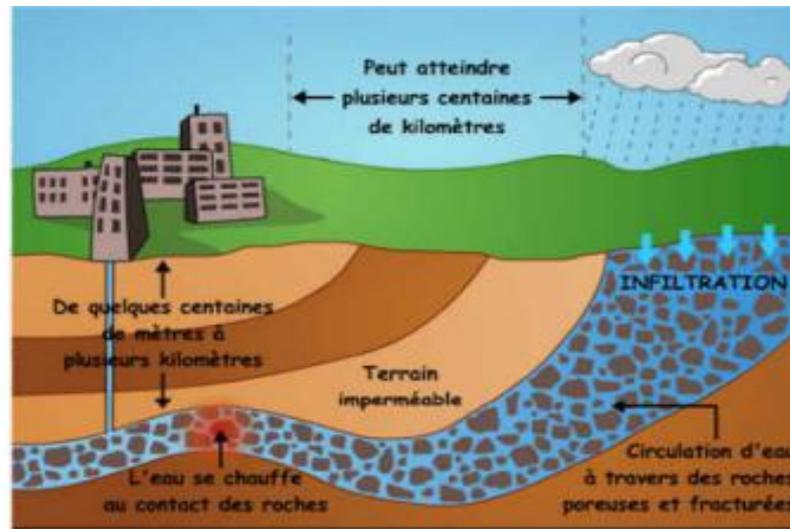


Figure 1-8 : Schéma expliquant la géothermie basse énergie [5]

#### 2-4. Très basse énergie :

Elle concerne les aquifères peu profonds avec des températures inférieures à 30° C. Actuellement, avec l'usage de pompes à chaleur, ce type de ressources est de plus en plus utilisé pour le chauffage et la climatisation, (Figure 1-3).

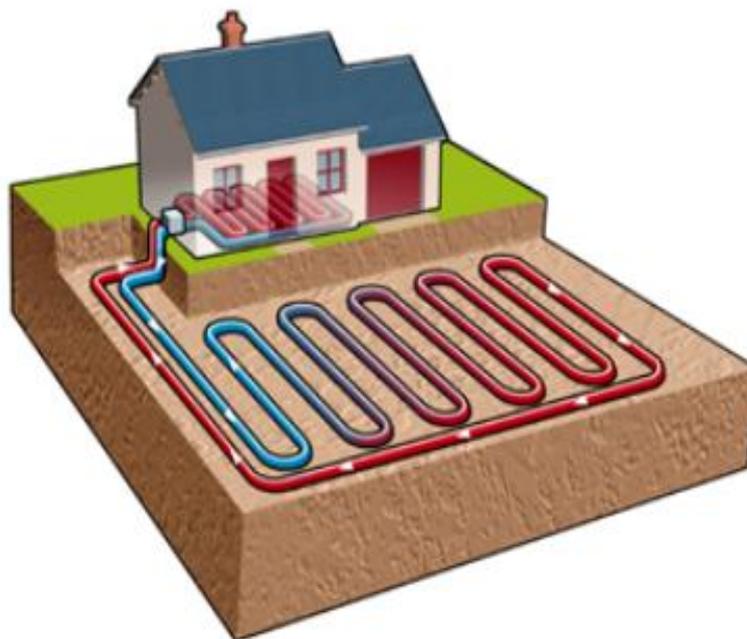


Figure 1-9 : Schéma expliquant la géothermie très basse énergie [5]

### 3. La géothermie en Algérie :

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien, ‘Carte Géothermique Préliminaire du Nord de l’Algérie’, au 1/100 000 [7]. Ces études montrent que le Nord de l’Algérie compte un nombre important de sources thermales.

Près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nord algérien, majoritaires au Nord-Est (Tableau 1-2). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskhoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre Nord de l’Algérie, plus particulièrement dans les régions de l’Oranie, de la Kabylie et du Constantinois, (Figure 1-4).[8][9]

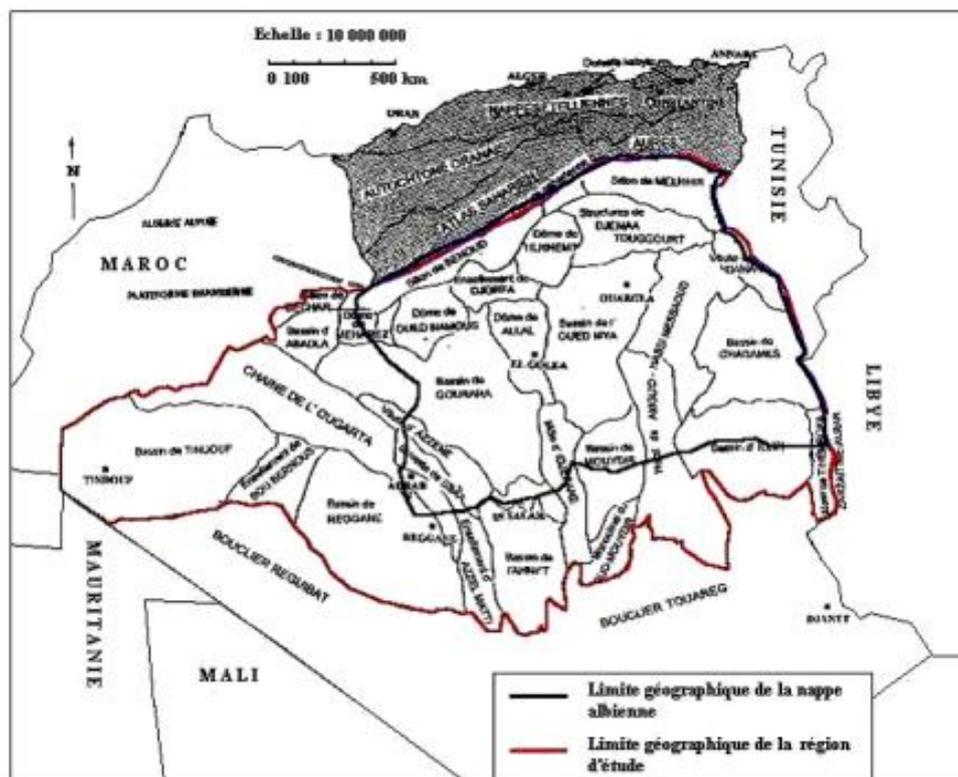


Figure 1-10 : Situation géographique de la région d'étude [10]

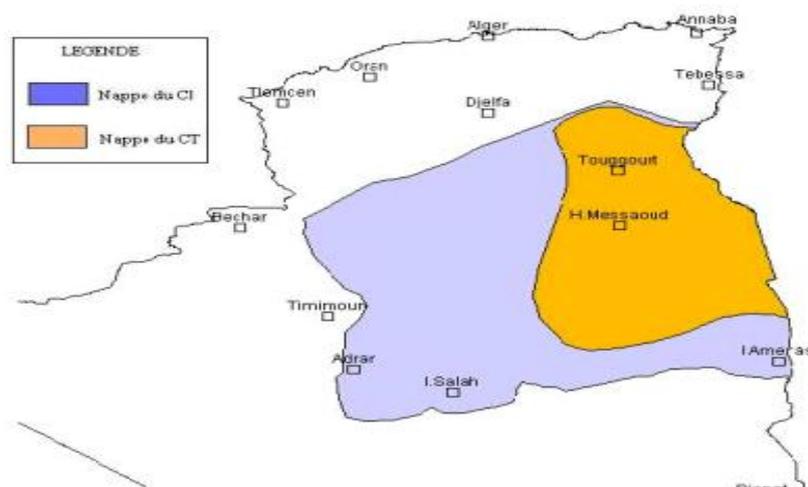
Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidus secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (litre/seconde)
H. Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H. Bou Hadjar	Ain Témouchent	Chloruré sodique	3210	66.5	-
H. Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	-
H. Boutaleb	Sétif	Chloruré sodique	3416	52	-
H. Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
H. Salhine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
H. Sidi Bou Abdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H. Delaa	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	-
H. Rabi	Saïda	Chloruré sodique	1524	47	-
H. Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
H. Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

**Table 1-2 :** Caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie [7]

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional, une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du continental intercalaire (Figure 1-5).

### 3-1. Le continental intercalaire :

Dans la région d'étude, l'aquifère du continental intercalaire se présente sous forme d'une nappe artésienne, et elle constitue la plus grande réserve d'eau souterraine dans le Sahara algérien. Cette nappe est surmontée par celle du complexe terminal qui se présente sous forme d'une nappe libre, (Figure 1-5).



**Figure 1-12 :** Carte représentant les nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal [10]

On définit l'aquifère du Continental Intercalaire comme les formations continentales du Crétacé inférieur, comprises entre l'Albien et le Néocomien, constituées de sables, de grès avec intercalations d'argiles dont la profondeur du toit varie de 700 à 1200 m environ.

Le Continental Intercalaire est surmonté par les dépôts du crétacé supérieur à savoir : Cénomaniens, Turonien et Sénonien salifère qui peut atteindre une épaisseur de l'ordre de 220 m. Le réservoir aquifère du Continental Intercalaire est particulier par son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600.000 km<sup>2</sup> et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. De grandes quantités d'eau y ont été stockées pendant les périodes pluvieuses du Quaternaire. [7]

#### **4. Utilisation de l'énergie géothermique :**

Bien que l'utilisation de l'énergie géothermique date des époques anciennes, ce n'est que récemment que l'application de cette forme d'énergie s'est développée. Cette application peut être directe ou indirecte, tout dépend du fait que cette énergie soit utilisée dans sa forme originale de chaleur ou si elle est transformée en d'autres formes d'énergies. Le premier cas peut être réalisé dans des régions à flux thermique normal dans le chauffage des maisons. Le deuxième cas permet la production de l'électricité. Il est possible dans des régions à forte anomalie de flux et seulement à grande profondeur (> 1500m) pour les régions normales. Plusieurs secteurs industriels sont susceptibles d'intégrer une utilisation des ressources géothermiques : le textile, l'industrie papetière, l'industrie du cuir ...etc. La géothermie trouve aussi son application dans l'industrie agro-alimentaire. Il a été prouvé que les serres, la pisciculture et l'aquaculture ont des rendements beaucoup plus élevés lorsque la production est faite en présence d'eau chaude, (Figure1-6).[11]

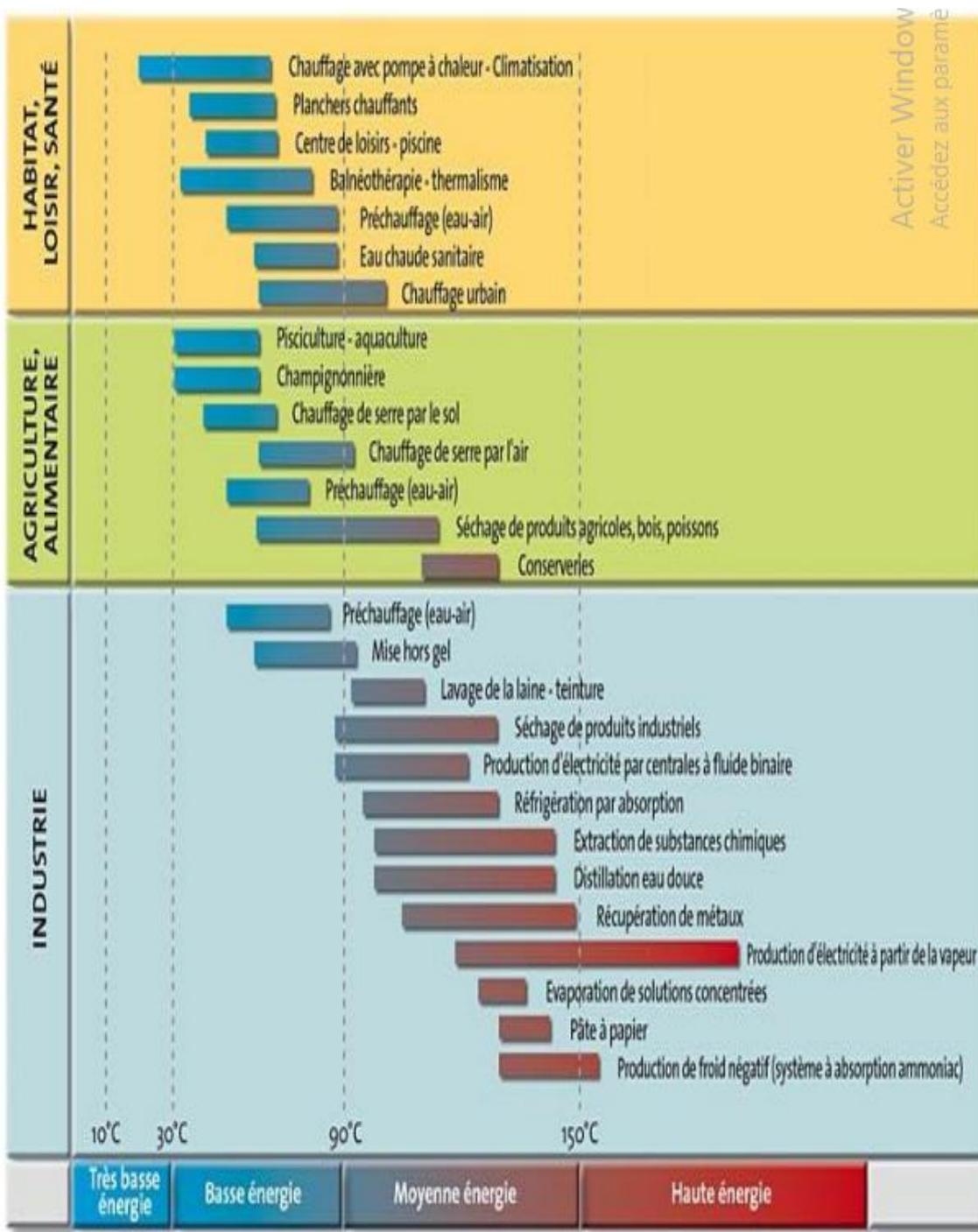


Figure 1-6 : Capacité installée (MWT) [12]

#### 4-1. Utilisation de l'énergie géothermique dans le monde :

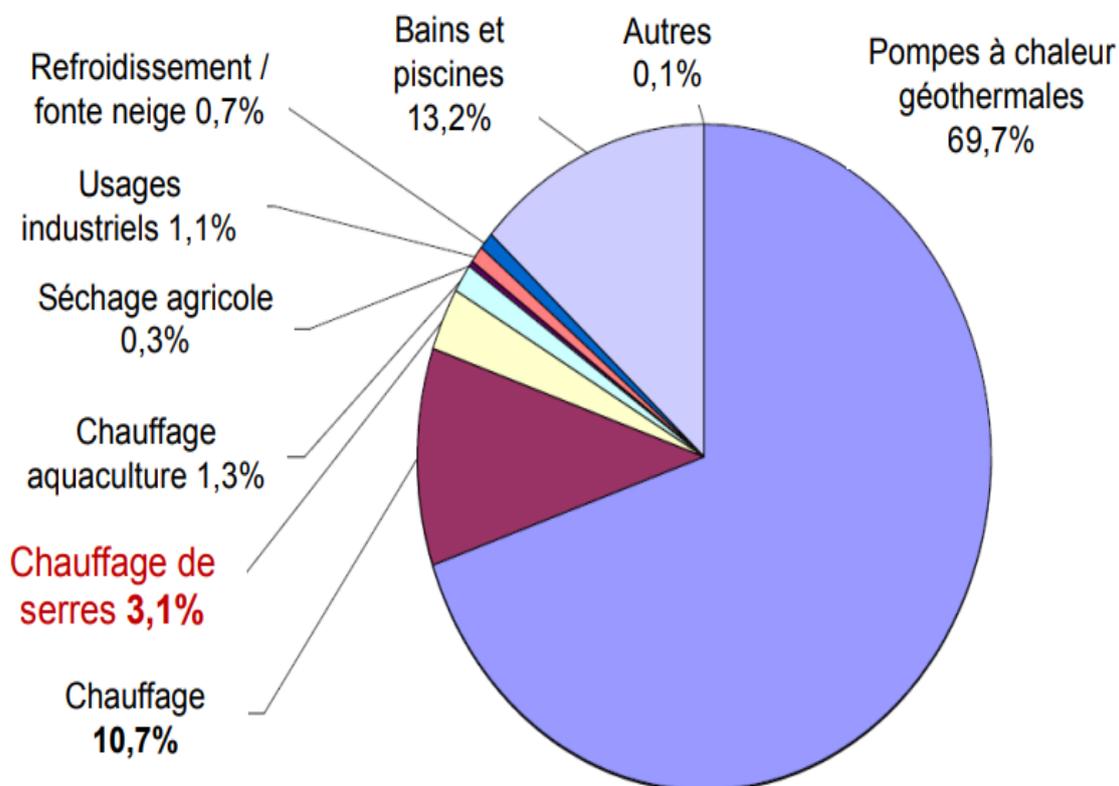


Figure 1-7 : Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures [11]

#### 5. La géothermie dans l'avenir :

La géothermie est en pleine expansion, car c'est une énergie renouvelable et à rendement conséquent. Elle aura donc sa place après la baisse des énergies fossiles (pétrole, gaz...). Comme toute énergie renouvelable, sa croissance mondiale sera fulgurante. L'énergie géothermique est placée au 5ème rang des énergies à « potentiel futur », (Tableau 1-3).

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

**Table 1-4 :** Une comparaison entre la géothermie et les autres énergies [13]

## **6. La chaleur de la terre :**

Ce n'est pas sans raison que les anciens ont placé l'enfer et son feu purificateur au centre de notre planète. Sous nos pieds, la Terre est chaude, et même de plus en plus chaude à mesure que l'on s'enfonce dans ses entrailles. [14]

### **6-1. La structure interne du globe :**

On distingue trois enveloppes principales dans la structure du globe. Au centre, sur un rayon de 3 470 km, un alliage de fer et de nickel, solide au cœur et liquide autour, forme le “noyau”, qui représente seulement 16 % du volume total mais 67 % de la masse terrestre. Il est entouré du “manteau” sur une épaisseur de 2 900 km. Riche en silicate de fer et magnésium, le manteau représente plus de 80 % du volume du globe. Enfin, vient l'écorce ou “croûte”, enveloppe moins dense dont l'épaisseur varie grandement, puisqu'elle atteint entre 30 et 70 km dans les zones continentales pour seulement 20 km sous les océans, et seulement quelques kilomètres au niveau des dorsales et des rifts. L'écorce et la partie supérieure du manteau constituent la lithosphère. Cet ensemble rigide, divisé en plusieurs plaques, flotte sur une couche inférieure du manteau : l'asthénosphère.

## **6-2. Le gradient géothermal :**

Expérimenté concrètement par des générations de mineurs de fond, la hausse de température liée à l'augmentation de la profondeur est appelée "gradient géothermal". Il augmente en moyenne de 3,3°C par 100 mètres. Le flux d'énergie thermique à l'origine de ce gradient est de l'ordre de 60 milliwatts\* par m<sup>2</sup> (mW/m<sup>2</sup>). Mais ces valeurs peuvent être nettement supérieures dans certaines zones instables du globe, et même varier de façon importante dans les zones continentales stables.

## **6-3. L'origine de la chaleur :**

Contrairement à une idée largement répandue, l'essentiel de la chaleur dégagée par notre globe n'a pas pour principal responsable le refroidissement de son noyau, les roches intermédiaires étant de très mauvais conducteurs de chaleur. On considère en fait, qu'il existe deux phénomènes principaux qui expliquent l'origine de la chaleur rencontrée dans la croûte terrestre : la désintégration des éléments radioactifs présents dans les roches et – dans une beaucoup plus faible mesure – le refroidissement correspondant à la dissipation de l'énergie dite primitive accumulée lors de la formation de la Terre. On estime que la désintégration des éléments radioactifs présents dans la croûte terrestre – uranium, thorium, potassium, etc.

Représente à elle seule plus de 90 % de l'énergie dissipée. La chaleur émise par la fission varie avec la composition chimique des roches : elle est environ trois fois plus élevée, par exemple, pour les granites que pour les basaltes. Elle varie aussi selon l'âge des roches, raison pour laquelle les gradients géothermiques sont plus élevés dans les plates-formes jeunes, (Figure 1-8).

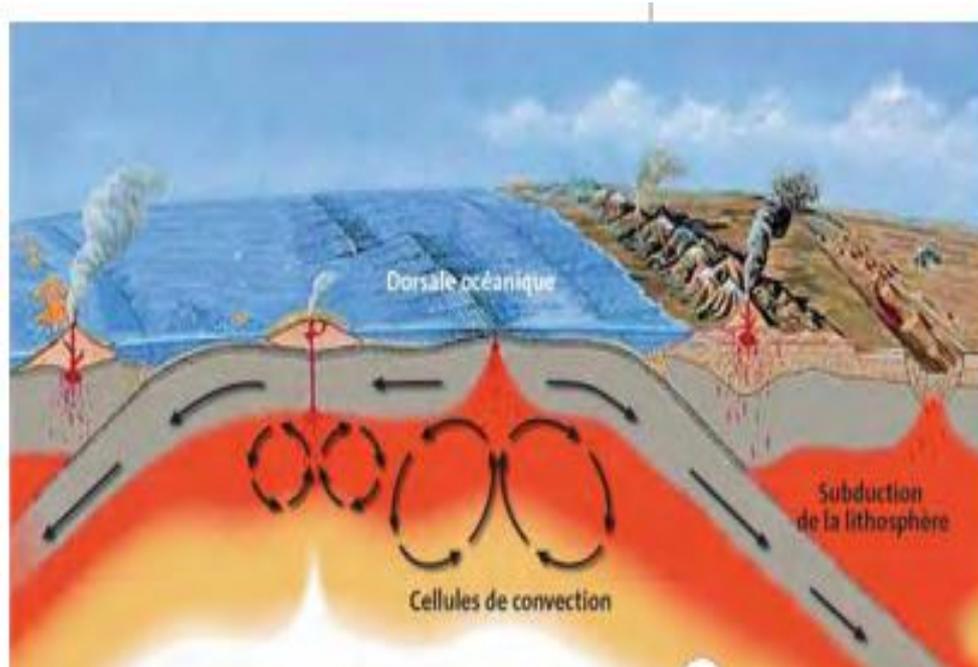


Figure 1-14 : Le mouvement des plaques lithosphériques [14]

#### 6-4. Température du sol non perturbé :

On appelle température du sol non perturbé la température moyenne du sol avant qu'il ne soit influencé par les échangeurs géothermiques. La température à laquelle les puits sont exposés à un effet important sur la longueur de forages nécessaire, qui est inversement proportionnelle à la différence de température entre le sol et le fluide à l'entrée de la pompe à chaleur. [15]

Le sol non perturbé peut être séparé en trois grandes zones [16] :

- Le premier mètre, qui est la zone de surface dans laquelle les températures sont très influencées par le climat à court terme.
- Entre 1 et 8-20 m, la température dépend en grande partie du cycle saisonnier.
- Après 8-20 m, la température est constante et proche de la température moyenne annuelle du lieu. Elle varie alors lentement avec la profondeur selon le gradient géothermique. Il s'agit de la zone profonde.

Certains facteurs peuvent toutefois augmenter la température du sous-sol : chauffage solaire indirect par des structures urbaine, pertes de chaleur anthropogéniques, changement d'utilisation des terres, etc. [17]

## **7. Croissance de la production de chaleur par géothermie :**

La production annuelle mondiale de chaleur par géothermie est estimée à plus de 6 millions de tonnes d'équivalent pétrole. Répartie dans 70 pays, cette activité a connu ces dernières années un taux de progression d'environ 5 % par an. Ce taux devrait s'accroître dans les années à venir avec l'intérêt grandissant qui est observé pour les techniques géothermiques avec pompes à chaleur. En Europe, l'accroissement des capacités installées ces dernières années (hors pompe à chaleur géothermiques), est de l'ordre d'une centaine de MW par an, ce qui devrait porter rapidement la capacité totale installée en Europe à 3 000 MW. Si l'on intègre les pompes à chaleur géothermiques et si le rythme de progression du marché de ces produits reste élevé (plus de 20 % par an), la puissance thermique installée pour l'ensemble des applications thermiques de la géothermie pourrait vite atteindre les 18 000 MW.[18]

## **8. Classification des systèmes géothermiques :**

Les ressources géothermiques sont classifiées de diverses manières : en fonction de la source de chaleur, du type de transfert de chaleur, de la température du réservoir, de l'état physique, de l'utilisation et des caractéristiques géologiques. Lorsqu'elles sont définies en fonction de la nature du système géologique où elles prennent source, les différentes catégories sont les suivantes :[19]

### **8-1. Système géothermiques volcaniques :**

Ils sont associés d'une manière ou d'une autre à l'activité volcanique. Les sources de chaleur de ces systèmes sont les intrusions chaudes ou le magma. Ils sont le plus souvent situés à l'intérieur ou à proximité de formations volcaniques, par exemple des calderas, dans la majorité des cas aux frontières des plaques mais parfois dans des zones de points chauds. Dans les systèmes volcaniques, ce sont principalement les zones perméables des fractures et des failles qui contrôlent l'écoulement des eaux (figure 1-9).

### **8-2. Dans les systèmes convectifs par fracture :**

La source de chaleur est la croûte chaude profonde dans les zones tectoniquement actives, avec un flux thermique supérieur à la moyenne. Là, l'eau géothermique a circulé à très grande

profondeur ( $> 1$  km), principalement au travers de fractures verticales et a « capté » la chaleur des roches.

### **8-3. Les systèmes géothermiques sédimentaires :**

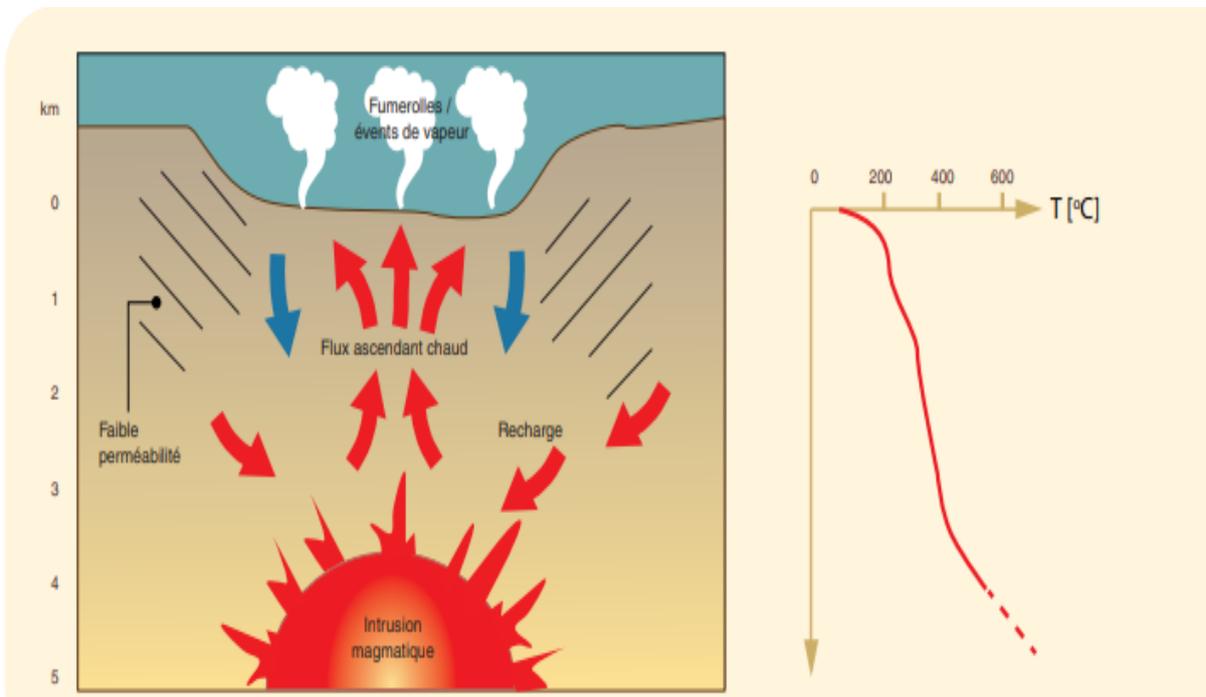
Se trouvent dans la plupart des grands bassins de sédimentation du globe. Ces systèmes doivent leur existence à la présence de couches sédimentaires perméables à de grandes profondeurs ( $> 1$  km) et à des gradients géothermiques supérieurs à la moyenne ( $> 30^\circ \text{C}/\text{km}$ ). Ces systèmes sont de nature conductive, plutôt que convective, même si les fractures et les failles peuvent jouer un rôle dans certains cas. Certains systèmes convectifs (comme les systèmes convectifs par fracture) peuvent être cependant enfermés dans des roches sédimentaires (figure 1-10).

### **8-4. Les systèmes à géo-pression :**

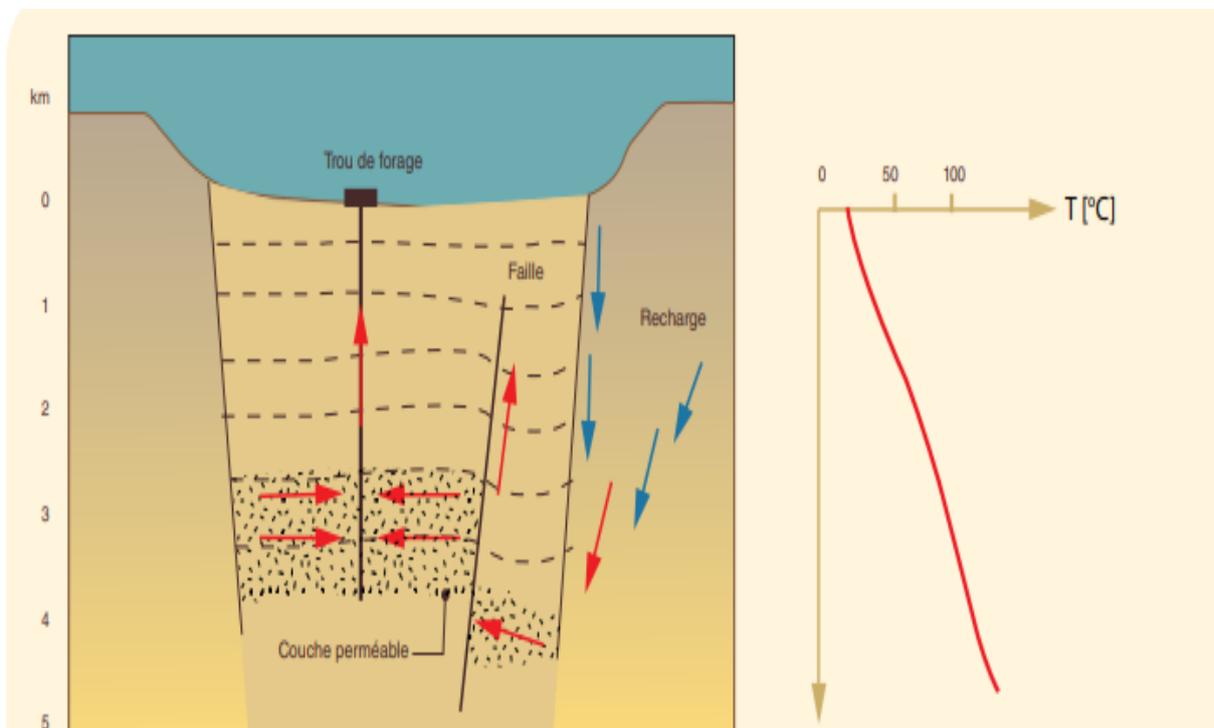
Sont analogues aux réservoirs de pétrole et de gaz dans lesquels le fluide captif retenu dans les pièges stratigraphiques peut être soumis à des pressions proches des valeurs litho-statiques. Ces systèmes sont généralement situés à une relativement grande profondeur.

### **8-5. Les systèmes géothermiques à roches sèches chaudes (RSC) ou stimulés (modifiés) (EGS) :**

Sont constitués de masses rocheuses qui ont été chauffées par l'activité volcanique ou par des flux de chaleur anormalement élevés, mais qui présentent une faible perméabilité ou sont presque imperméables ; de ce fait, ils ne peuvent pas être exploités de manière conventionnelle. Toutefois, des expériences ont été réalisées sur plusieurs sites pour utiliser la fracturation hydraulique, aussi appelée « hydro-fracturation », dans le but de créer des réservoirs artificiels au sein de tels systèmes ou pour valoriser des réseaux de fractures existants. Les systèmes de ce type seront essentiellement utilisés sous forme de doublets de production ou de réinjection. [20]



**Figure 1-9** : Modèle conceptuel de champ à haute température dans un système volcanique fissuré [21]



**Figure 1-10** : Vue schématique d'un bassin sédimentaire à réservoir géothermique situé à 2-4 km de profondeur [21]

## 9. Avantages et inconvénients :

Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermique dans notre vie actuelle peuvent être résumés comme suit :

- **Avantages :**

- Très faible émission de CO<sub>2</sub>.
- Charges environnementales relativement faibles.
- Très peu d'occupation des sols : installations de production sous la surface de la Terre.
- Installations discrètes pour une utilisation directe et comparables aux installations conventionnelles en ce qui concerne à la production d'électricité.
- Bien adapté pour fournir des charges de base thermiques et électriques ; ne souffre pas de grands pics qui nécessitent une mise en mémoire tampon lorsqu'ils sont introduits dans des grilles.

- **Inconvénients :**

- La production d'énergie électrique actuellement limitée essentiellement aux régions disposant de réservoirs naturels de vapeur.
- HDR et technologie géothermique améliorée pas encore standard dans l'industrie ; des recherches plus poussées pour générer.
- Localisation des fractures nécessaires.
- Compétitivité de la chaleur à usage direct entravée par les sources existantes de chaleur (perdue) avec les difficultés d'éviction et de pénétration du marché.
- Une plus grande utilisation dans les régions dépourvues de réservoirs naturels de vapeur souvent entravée par des informations insuffisantes sur propriétés thermiques et hydrauliques des roches.

## 10. Conclusion :

Déjà aujourd'hui, l'énergie géothermique est une source importante d'énergie électrique dans de nombreux pays. Il est particulièrement précieux pour de nombreuses économies nationales en développement et émergentes car il s'agit d'une source indigène d'énergie assurant une certaine indépendance vis-à-vis de la variabilité du prix des hydrocarbures. Même dans certaines des économies développées, il contribue de l'ordre de 0,5 % à 16 % à la production

nationale d'énergie électrique. Dans les pays dépourvus de réservoirs naturels de vapeur, il n'en est qu'au début de son développement.

Les années à venir montreront si le potentiel existant peut être exploité économiquement. Utilisation directe de la chaleur géothermique est plus omniprésente. Plutôt que des conditions géologiques et économiques, son utilisation dépend sur l'accès au marché, la pénétration et, en partie, l'éviction d'autres sources de chaleur disponible. Quelques pays ont fait des progrès considérables dans l'utilisation directe de la chaleur géothermique, à la fois dans les pays développés et économies émergentes. Semblable à la conversion en énergie électrique, l'utilisation directe de la chaleur géothermique bénéficie d'une hausse du prix des énergies fossiles, en particulier des hydrocarbures, qui peut être anticipée pour l'avenir en fonction du développement historique et de la limitation naturelle de la base de ressources.

En résumé, la géothermie apparaît comme une source d'énergie attractive, prometteuse, propre et renouvelable.

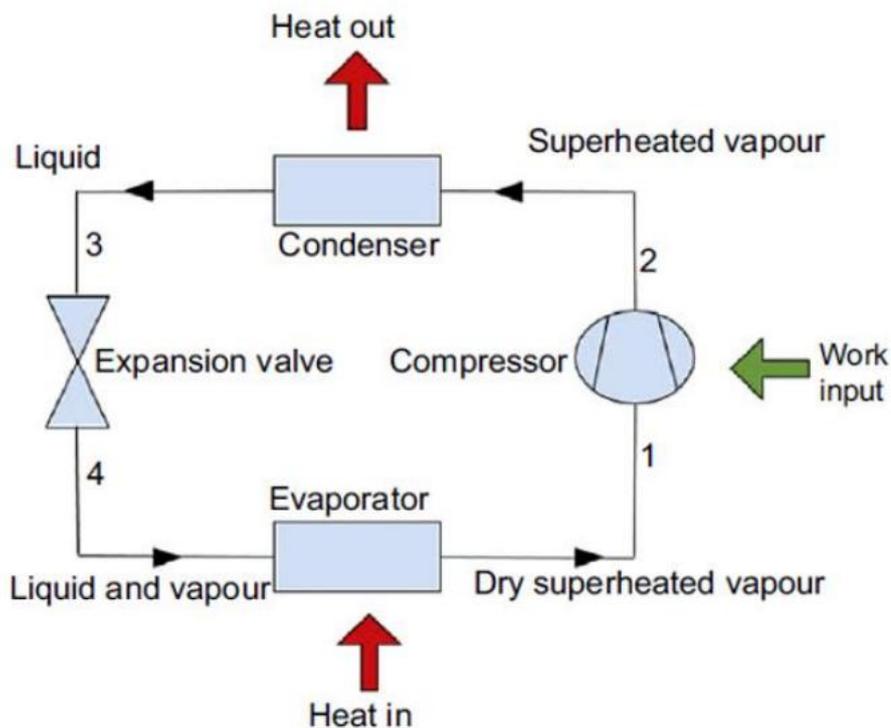
**CHAPITRE II**

**LA POMPE A CHALEUR**

**GEOOTHERMIQUE**

## 1- Les pompes à chaleur :

La pompe à chaleur est une machine thermique qui, en utilisant du travail mécanique, peut fournir de la chaleur à haute température à base de chaleur à basse température [22]. Elle est très utilisée dans le domaine de la climatisation des bâtiments. La principale raison de son utilisation est son efficacité de transfert de chaleur. En effet l'effort à fournir est moins important que l'énergie que l'on souhaite récupérer [22]. Une pompe à chaleur se compose de quatre organes principaux : un compresseur, une vanne d'expansion (ou détendeur), et deux échangeurs de chaleur (évaporateur et condenseur). Ces composants forment un circuit fermé dans le quel circule un fluide caloporteur changeant de phase selon sa position dans le circuit. La figure (2-1) représente un modèle classique de pompe à chaleur avec les différents états du fluide tout au long du cycle.



**Figure 2-1 :** Schéma d'une pompe à chaleur [22].

Chaque pompe à chaleur se caractérise par un indicateur de performance énergétique. C'est le ratio de l'énergie utile récupérée au niveau de l'un des échangeurs sur l'énergie entrante au niveau du compresseur. Si la pompe à chaleur fonctionne pour fournir de la chaleur on parlera de coefficient de performance (COP), c'est le ratio de l'énergie utile au niveau du condenseur (kW) sur l'énergie électrique consommée par le compresseur (kW). Si elle est utilisée au but de fournir du froid on

parlera d'un coefficient d'efficacité frigorifique connu plus sous sa traduction anglaise « energy efficiency ratio » (EER), qui traduit le ratio entre l'énergie utile au niveau de l'évaporateur (kW) et l'énergie électrique consommée par le compresseur (kW). Ces indicateurs permettent de comparer différentes machines, plus l'indicateur est élevé plus la machine est meilleure. La thermodynamique, permet de calculer un COP théorique maximal (souvent appelé COP de Carnot) d'une pompe à chaleur en fonction des températures des deux sources chaude et froide. Il s'exprime comme suit pour une production de chaleur : [22]

$$COP = \frac{T_{chaude}}{T_{chaude} - T_{froide}} \quad (2-1)$$

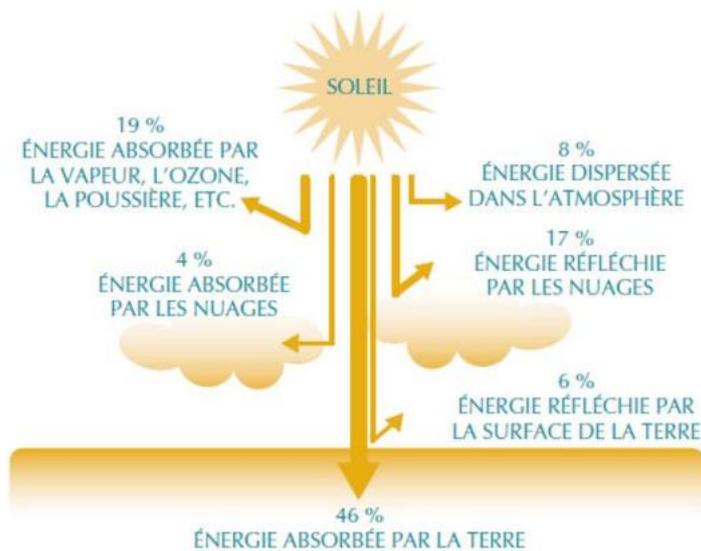
Pour avoir une pompe à chaleur avec un bon COP nous avons besoin de garder l'écart de température entre la source chaude et la source froide le plus faible possible. De nombreuses pompes à chaleur fonctionnent avec l'air ambiant comme source ou réservoir (puits) de chaleur. Vu la variation significative de la température de l'air, l'écart de température entre l'air et la température souhaitée n'est pas toujours petit (cas de l'hiver) d'où l'intérêt d'avoir une source et/ou réservoir dont la température est plus stable dans le temps. Une source de chaleur est un réservoir d'énergie thermique qui peut fournir une quantité d'énergie sans qu'il change significativement de température [23]. Un puits de chaleur est un endroit dans lequel on évacue la chaleur extraite depuis une source de chaleur. [24]

### 1-1 Propriétés du sol :

Depuis plusieurs années, on a pensé à coupler les pompes à chaleur avec le sol. La température du sol à quelques mètres de profondeur est plus proche des températures que l'on souhaite avoir à l'intérieur des bâtiments.

Une autre propriété du sol est la stabilité de la température à longue durée. Plus on va en profondeur, plus la température est stable et indépendante du temps. On peut dire qu'on a un environnement isolé quelques mètres en dessous de nos pieds. Cela est dû à la résistivité thermique du sol [25]. Cette propriété propre au sous-sol permet d'assurer un environnement assurant de la chaleur en période de chauffe, et assurant du froid en saison de climatisation [25]. Les températures obtenues à la même profondeur, dans les différents pays, sont assez différentes. Cela est dû à la

différence des conditions climatiques des différents pays. Un autre avantage qui compte pour le sol est la quantité d'énergie solaire qu'il absorbe. En fait la terre est un grand réservoir de l'énergie solaire. 46 % de l'énergie provenant du soleil est absorbé par la terre [25]. La figure (2-2) représente la distribution de l'énergie solaire vers la terre.



**Figure 2-2** : Flux solaire vers la terre [25]

Ceci nous permet de dire que la terre nous assure une importante quantité d'énergie gratuite et disponible sur place. [25]

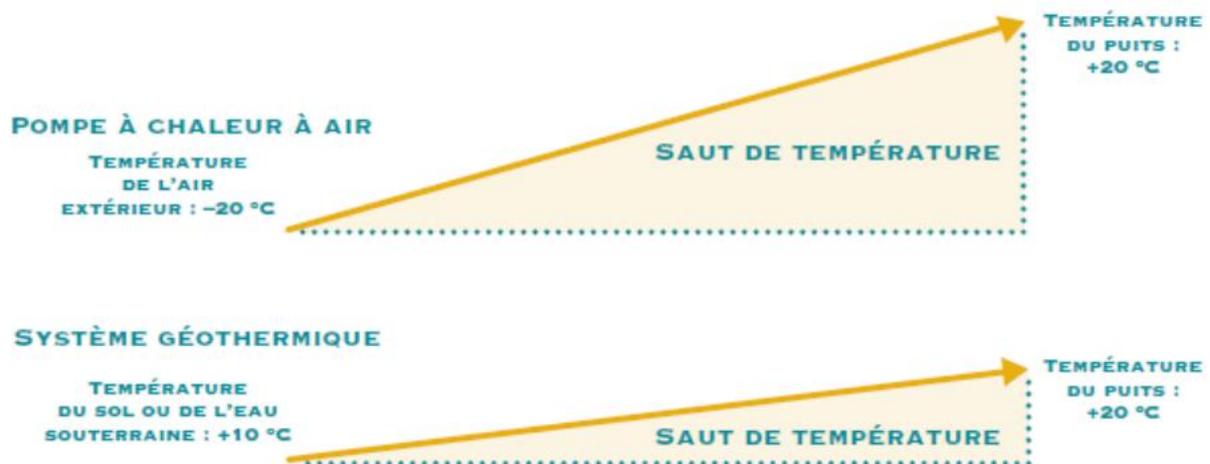
### **1-2 Pompe à chaleur et sol :**

L'accouplement de la pompe à chaleur avec le sol ne fait pas appel à l'énergie produite par la terre elle-même (énergie interne), mais la considère comme étant un réservoir d'énergie. Grâce à sa capacité d'absorber l'énergie et la transmettre avec un décalage, la terre assure ce rôle de réservoir. Elle stocke en continu l'énergie solaire qu'elle reçoit. Cette même énergie sert de source de chaleur pour la pompe à chaleur géothermique en hiver. En été, la terre peut assurer aussi le stockage de la chaleur extraite du bâtiment par la pompe à chaleur [26]. Le sol peut donc être considéré comme une source de chaleur stable pour le système géothermique en hiver, et comme son puits de fraîcheur en été [24]. Sur le tableau (2-1) ci-après on a un exemple de températures minimales types de sources de chaleur pour le chauffage.

Source de chaleur	Température minimale types (°C)
Air ambiant	De -30°C à -15°C
Eau de surface	De 0°C à 10°C
Eau souterrain	De 4°C à 10°C
Sol	De 4°C à 10°C

**Tableau 2-1** : Températures minimales types de sources de chaleur en mode chauffage [24]

D'après le tableau (2-1) on voit que la température de l'air extérieur peut varier d'une façon très importante et être loin de la température souhaitée. Alors que les températures obtenues en profondeur sont plus stables est plus proche de la température souhaitée que celle de l'air. La figure juste après reflète les écarts de température d'une pompe à chaleur (air-air) et une pompe à chaleur géothermique (air-sol).



**Figure 2-3** : Écarts de températures : pompe à chaleur à air et système géothermique [24]

Le saut de température traduit l'écart de température entre la source et le puits de chaleur. Le COP lié aux différences de températures entre la source et le puits de chaleur sera influencé positivement si l'écart est faible et négativement si l'écart est grand, ce qui donne l'avantage au système géothermique. Lorsqu'on parle de chauffage, il est favorable d'avoir une source de chaleur qui sait fournir à la pompe à chaleur une température élevée. Par contre, pour le refroidissement, on cherche

à avoir un puits de fraîcheur avec une température la plus basse possible [27]. Cela correspond dans les deux cas à avoir la température la plus proche à celle du sol à l'entrée de la pompe à chaleur. Ces deux conditions permettent d'avoir un COP de chauffage et de refroidissement élevé, ce qui se traduit par une diminution de la consommation électrique. Donc pour approcher le plus possible la température du sol, il faudra avoir une assez grande longueur du capteur ce qui n'est pas économiquement toujours accepté. Il existe des facteurs qui peuvent l'influencer, en plus de l'écart de température entre la source de chaleur et le puits, tels que : [24]

-La consommation électrique des pompes, des sources de chaleur d'appoint ... ,

-Le rendement nominal de la PAC,

-Le dimensionnement vis-à-vis de la demande et des conditions de fonctionnement (climat, température de chauffage, réseau de distribution ...).

Reste à savoir quand on peut opter pour un système géothermique. Les systèmes géothermiques peuvent être utilisés, par exemple, dans le cas des bâtiments suivants :

-Les bâtiments neufs,

-Les bâtiments avec demande de chaleur pour différentes fins (locaux et eau chaude sanitaire),

-Les bâtiments avec demande simultanée de chauffage et de refroidissement, Dans la partie qui suit nous allons présenter les composants principaux d'un système de pompe à chaleur géothermique.

## **2- Pompe à chaleur géothermique :**

### **2.1 Composants :**

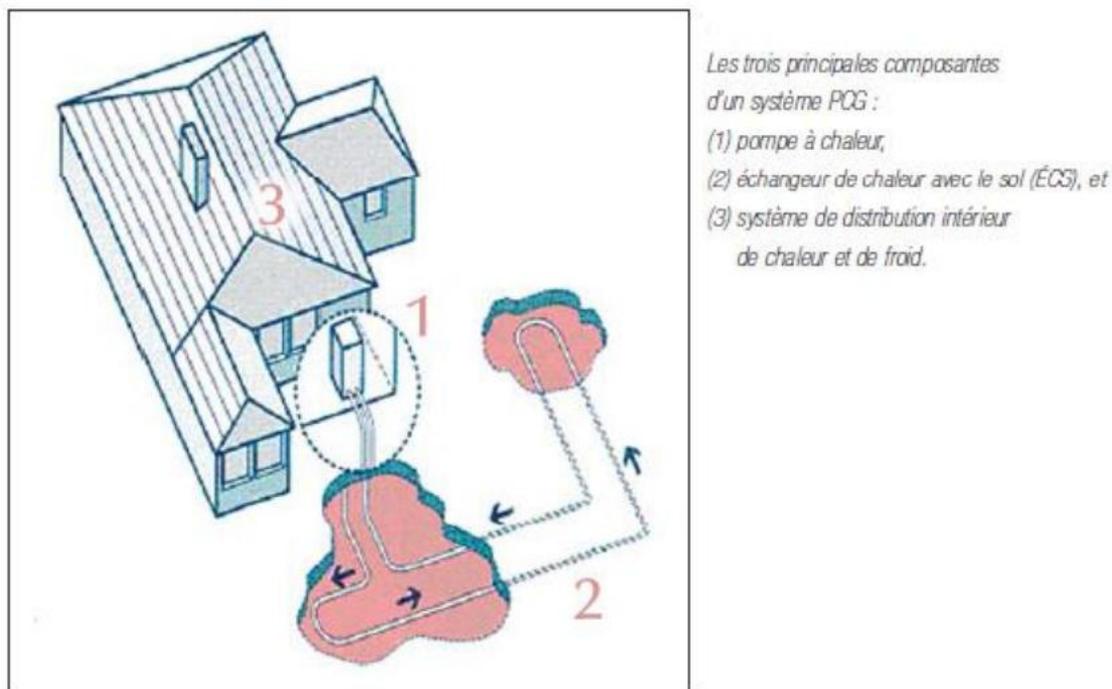
La pompe à chaleur géothermique est considérée comme le système le plus efficace pour la climatisation des bâtiments [28]. Ce système se compose de trois parties indispensables : le circuit souterrain (échangeur de chaleur), la pompe à chaleur, et le circuit de distribution : [26][29]

- L'échangeur de chaleur (réseau de tuyauterie) enterré dans le sol représente la source de chaleur (ou de froid) du système. Un fluide caloporteur (eau ou eau + antigel) circule à travers la tuyauterie dans le but de prendre (ou céder) de la chaleur au sol. (Échange thermique eau/sol)

- La pompe à chaleur joue son rôle habituel : le transfert de l'énergie d'une source à un récepteur. Selon l'utilisation, l'échangeur de chaleur souterrain et le bâtiment changent de rôle. S'il y a besoin de chaud dans le bâtiment, le transfert de chaleur se fera depuis le sol vers le bâtiment (cas d'hiver). Et si le bâtiment connaît un besoin de rafraîchissement, la pompe à chaleur assurera le transfert des calories depuis le bâtiment vers le sol (cas d'été). (Échange eau/réfrigérant)

- Le circuit de distribution est responsable de transporter la chaleur ou le froid produit au niveau de la pompe à chaleur vers les locaux concernés.

Un autre composant à ne pas oublier dans le cas d'un système à boucle fermée est la (ou les) pompe de circulation. Cette pompe est installée entre la pompe à chaleur et l'échangeur de chaleur souterrain [24]. La puissance maximale de celle-ci est estimée à 16W/ kW de charge globale de pointe [24]. Sans oublier qu'elles sont utilisées aussi dans le réseau de distribution, entre la pompe à chaleur et les émetteurs de chaleur. Sur la figure (2-4) suivante on a une illustration des trois principaux composants d'une pompe à chaleur géothermique.



**Figure 2-4** : les Principaux composants d'une pompe à chaleur géothermique [25].

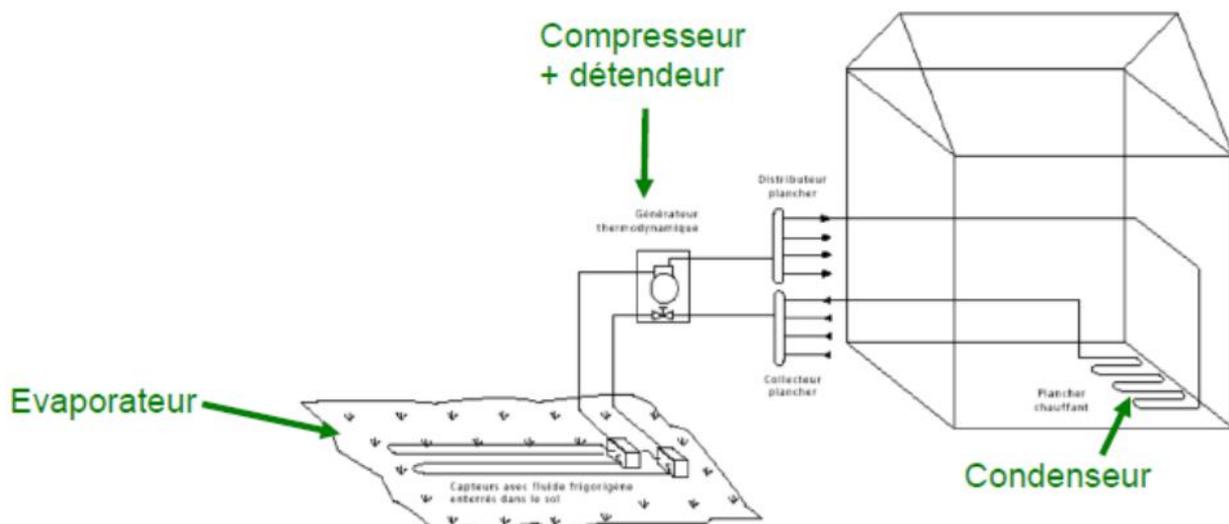
Dans la section suivante nous allons parler des différents types des pompes à chaleur géothermique existantes.

## 2.2 Types :

Les pompes à chaleur géothermique peuvent être classées selon la nature de la liaison entre la pompe à chaleur et le sol, il en résulte trois types :

- 1- Système sol/sol (à détente directe),
- 2- Système sol/eau,
- 3- Système eau glycolé/eau.

Le premier type a la particularité d'avoir un seul fluide caloporteur ; le fluide frigorigène qui circule dans la pompe à chaleur est le même qui circule dans l'échangeur souterrain et dans l'émetteur de chaleur [30]. La figure (2-5) ci-après représente un exemple d'utilisation de ce type de pompe à chaleur, utilisée ici pour le chauffage.



**Figure 2-5** : Exemple de pompe à chaleur sol/sol [30]

Dans cet exemple l'échangeur souterrain joue le rôle de l'évaporateur de la pompe à chaleur, alors que le plancher chauffant joue celui du condenseur ; les deux échangeurs font partie de la pompe à chaleur.

Dans le deuxième type, sol/eau, on ne fait circuler le fluide frigorigène que dans le circuit souterrain ; la distribution de la chaleur se fait par un autre fluide caloporteur [30]. Sur la figure (2-6), on a une illustration d'un exemple de ce type de pompe à chaleur géothermique.

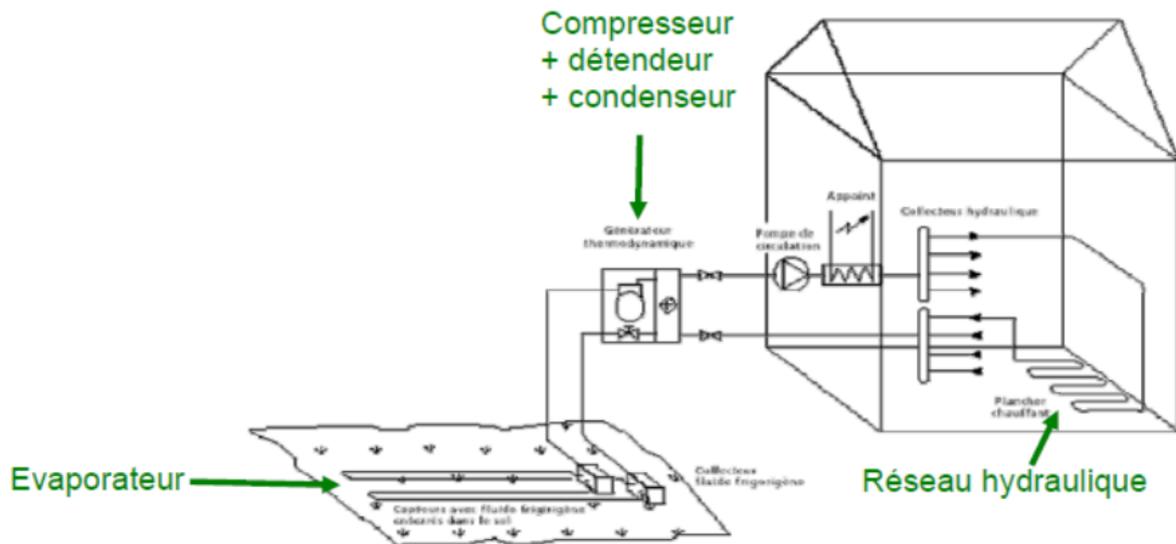


Figure 2-6 : Exemple de pompe à chaleur sol/eau [30]

Les pompe à chaleur géothermique de type eau glycolée/eau ne font pas circuler leur fluide frigorigène ni dans l'échangeur souterrain, ni dans le système de distribution de chaleur [30]. La figure (2-7) représente un exemple d'utilisation de ce type de pompe à chaleur géothermique.

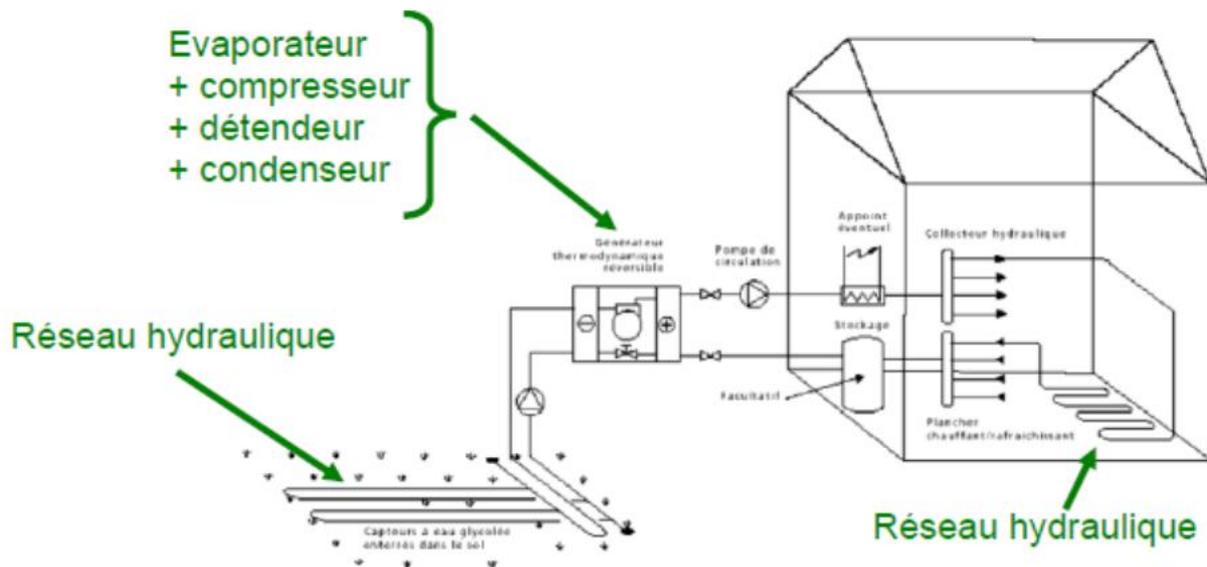


Figure 2-7 : Exemple de pompe à chaleur eau glycolée/ eau [30]

Dans ce dernier type on a, en plus de la pompe à chaleur et de ses deux échangeurs de chaleur, le sol qui joue le rôle d'un troisième échangeur. Généralement dans la boucle souterraine circule soit de l'eau soit de l'eau glycolée. La distribution de la chaleur quant à elle est assurée par un circuit à part qui peut être hydraulique comme dans notre exemple.

### 2.3 Fonctionnement :

La pompe à chaleur géothermique avec ses deux échangeurs (condenseur et évaporateur) de chaleur permet de répondre aux différents types de besoins d'un bâtiment (chauffage ou rafraîchissement) en inversant les rôles des changeurs.

En hiver, l'échangeur de chaleur souterrain garantit l'augmentation de la température du fluide caloporteur (eau ou eau glycolé) en bénéficiant de la différence entre la température d'entrée du fluide et celle du sol. La température du sol étant plus élevée que celle du fluide, on profite de l'énergie stocké dans le sol. Le lien entre l'échangeur de chaleur souterrain et la pompe à chaleur se fait via un troisième échangeur de chaleur (fluide caloporteur/fluide frigorigène) [25]. Le fluide caloporteur cède ses calories au fluide frigorigène qui change de phase au niveau de l'évaporateur de la pompe à chaleur. Cette vapeur créée est surchauffée par la suite à l'aide du compresseur ; et passe ensuite dans le troisième échangeur (condenseur) pour produire du chaud. En cédant ses calories, le fluide frigorigène se condense en sortant du condenseur pour passer dans la vanne de détente avant de rejoindre l'évaporateur pour recommencer son cycle.

En été, la demande étant du froid le rôle des échangeurs est inversé par rapport à la configuration de l'hiver. C'est-à-dire qu'au lieu de fournir de la chaleur au bâtiment on va en extraire. Et au lieu de prendre de la chaleur du sol on va en stocker.

Le changement de rôle des échangeurs a un impact sur la température du sol si les quantités d'énergie stockée et prélevée du sol ne sont pas équilibrées. C'est à dire que si on a une grande différence entre les charges de l'hiver et celles de l'été, il y a grand risque de ne plus avoir une température stable du sol à long terme [24]. Dans le cas où la charge de chauffage est beaucoup plus importante que celle du refroidissement il y a grande probabilité que le sol se refroidisse. Si la demande en froid est la plus importante une surchauffe du sol est très probable. Par contre, si l'utilisation du sol est équilibrée à long terme, on aura un effet de stockage qui peut contribuer à l'amélioration du comportement saisonnier du système et donc au maintien de sa performance sur le long terme. [31]

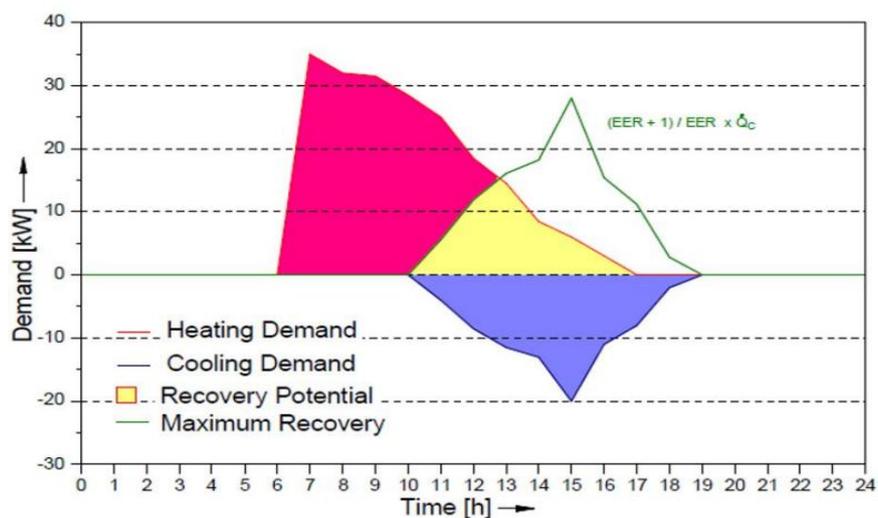
Ce type de système peut fonctionner en trois modes principaux : chauffage, refroidissement, ou en simultané (les deux besoins en même temps). Dans le premier cas le système répond uniquement à la demande en chaleur, comme n'importe quel autre système de production de chaleur. Dans le deuxième cas on a seulement une réponse au besoin de refroidissement. Une pompe à chaleur est

suffisante pour assurer les deux rôles, s'il n'y a pas de besoins simultanés. Dans le cas contraire, où la réponse aux demandes doit se faire en même temps, on parlera alors de pompe à chaleur avec récupération de chaleur.

Si le système fonctionne en mode production de froid, une récupération de la chaleur au niveau du condenseur est possible. Cette récupération de chaleur s'exprime par son potentiel (REC) que l'on peut calculer en utilisant cette formule : [31]

$$REC = \frac{\int \min\left(Q_{chauffage}; \left(\frac{EER+1}{EER}\right) * Q_{refroidissement}\right) dt}{\int Q_{chauffage} dt} \quad (2-2)$$

Pour une période précise, pour évaluer le potentiel de récupération de chaleur, on compare la quantité d'énergie qu'on peut récupérer au niveau du condenseur  $\left(\frac{EER+1}{EER}\right) * Q_{refroidissement}$  avec la demande de chauffage ( $Q_{chauffage}$ ) pour prendre la valeur la plus petite ; ensuite la valeur gardée est divisée par la demande en chaleur.



**Figure 2-8** : Potentiel de récupération de chaleur pour une journée [31].

Comme on peut voir sur la figure (2-8) la récupération n'est valorisable que lorsqu'on a les deux demandes de chaud et de froid en même temps (le cas entre 10h et 17h). Avant 10h aucune récupération de chaleur n'est possible vu qu'il n'y a aucune demande de froid qui va avec la demande en chauffage. Alors qu'après 17h on a une demande en refroidissement seule. La récupération est maximale à partir de 13h, quand ce qui est récupéré au niveau du condenseur est supérieur et couvre le besoin en chauffage. Elle est très importante dans les installations avec des demandes de froid sur toute l'année et indépendante du climat extérieur (peut atteindre les 100% de récupération). [31]

Lorsqu'on parle de répondre aux deux besoins de chauffage et de refroidissement par un seul appareil on peut faire appel à un autre indice de performance le ITEE (index of total energy efficiency). Cet indice est proposé par la société GEA HAPPEL, et s'exprime comme suit : [32]

$$ITEE = \frac{\text{Puissance utile (chaud+froid)}}{\text{Puissance électrique consommée}} \quad (2-3)$$

Les puissances utiles (chaud et froid) correspondent aux puissances que doit fournir l'évaporateur et le condenseur dans le même instant. On peut utiliser le ITEE pour calculer la puissance électrique consommée pour répondre à une simultanéité des deux besoins. On peut aussi calculer la quantité d'énergie, utilisée par la pompe à chaleur géothermique, qu'on peut considérer comme renouvelable (EReS) par l'équation suivante : [33]

$$E_{res} = E_u * \left( 1 - \frac{1}{SPF} \right) \quad (2-4)$$

Avec :

-EU : énergie total utile produite par la pompe à chaleur.

-SPF : facteur de performance saisonnier.

À condition que le SPF soit supérieur à  $(1.15/\eta)$ . Sachant que le  $\eta$  est le ratio entre le brut total de la production d'électricité et l'énergie primaire consommé pour la production de cette électricité, en Europe il vaut généralement 0.4 ; ce qui mène à dire que la valeur minimale acceptable d'un SPF est 2.875. [33]

### 3- Les échangeurs de chaleur :

#### 3-1 Définition :

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs utilisés pour transférer de l'énergie thermique d'un fluide à un autre sans mélanger les deux fluides. Les fluides sont généralement séparés par une paroi solide (avec une conductivité thermique élevée) afin d'empêcher tout mélange ou ils peuvent être en contact direct. L'exemple classique d'échangeur de chaleur se trouve dans un moteur à combustion interne dans lequel un liquide de refroidissement moteur traverse des serpentins de radiateur et de

l'air passe par les serpentins, ce qui refroidit le liquide de refroidissement et réchauffe l'air entrant. En génie électrique, les applications courantes des échangeurs de chaleur incluent les générateurs de vapeur, les ventilateurs, les échangeurs de chaleur à eau de refroidissement et les condenseurs. Par exemple, un générateur de vapeur est utilisé pour convertir l'eau d'alimentation en vapeur d'eau issue de la chaleur produite dans le cœur d'un réacteur nucléaire. La vapeur produite entraîne la turbine. Le transfert de chaleur dans un échangeur thermique implique généralement une convection dans chaque fluide et une conduction thermique à travers la paroi séparant les deux fluides. Dans l'analyse des échangeurs de chaleur, il est souvent commode de travailler avec un coefficient global de transfert de chaleur, connu comme un facteur  $U$ . Le facteur  $U$  est défini par une expression analogue à la loi de Newton sur le refroidissement. De plus, les ingénieurs utilisent également la différence de température moyenne logarithmique (LMTD) pour déterminer la force motrice de la température pour le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur. [34]

### **3-2 Principal but et fonctions d'un échangeur thermique :**

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

- Préchauffeur ou refroidisseur d'un liquide ou d'un gaz (air par exemple) pour lesquels de très nombreux exemples pourraient être rappelés et qui se caractérise par une fonction simple : le contrôle de la température du fluide en un point particulier du procédé.
- Récupérateur thermique qui permet d'introduire la récente notion de valorisation de l'énergie thermique d'un procédé. La fonction de cet échangeur est alors d'assurer le transfert d'une capacité thermique maximale afin de permettre une valorisation maximale du rejet thermique sur des critères énergétiques et économiques.
- Réfrigérants (et aérorefrigérant lorsque le vecteur de refroidissement est l'air, réfrigérant sur eau) qui assure la dissipation de l'énergie thermique non valorisable d'un procédé vers le milieu extérieur – fonction essentielle dans de nombreux process.
- Capteurs ou émetteurs thermiques dont les équipements ont pour fonction, respectivement, d'associer réception d'énergie thermique et transmission vers l'usage. Les exemples les plus courants sont les capteurs solaires thermiques ainsi que les radiateurs domestiques qui assurent le confort thermique dans un bâtiment.

- Des humidificateurs ou condenseurs partiels qui assurent la condensation d'une vapeur en mélange avec un gaz incondensable pour obtenir, en fin d'opération, un gaz appauvri en vapeur : l'exemple rencontré fréquemment est le déshumidificateur d'air humide qui permet d'assurer un contrôle de l'humidité de l'air en sortie de centrale de traitement d'air (CTA). D'autres exemples industriels peuvent être cités comme la captation de vapeurs organiques dans les Cryo-condenseurs ou les condenseurs de buées fréquemment rencontrés dans les installations de génie chimique.
- Évaporateurs qui assurent l'évaporation complète ou partielle d'un liquide dans différents procédés notamment de production d'énergie mécanique (cycle moteur de Rankine, de Hirn) et de production frigorifique : cycle à compression (PAC), réfrigérateur. Condenseurs qui assurent la condensation complète ou partielle d'un gaz (vapeur) là encore par exemple pour la production d'énergie mécanique et frigorifique.
- Équipements qui permettent la congélation et la fusion d'une phase liquide ou vapeur grâce à une paroi refroidie en dessous du point triple du fluide. Ces dispositifs sont utilisés pour assurer la séparation de plusieurs corps, assurer le stockage d'énergie thermique (stockage de glace ou stockage par MCP), produire une phase solide pour divers usages. [35, 36]

### 3-3 Les différents types d'échangeurs thermiques :

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

- Les plaques.
- Les tubes.

Il en existe d'autres types, tels que les échangeurs thermiques à ailettes, à bloc ou encore à spirales. Cependant, pour les systèmes de chauffage ou d'eau chaude des logements, ce sont surtout ceux à plaques et ceux munis de tubes qui sont principalement employés. De plus, les échangeurs thermiques ne fonctionnent pas tous avec la même nature de fluide.

Ils peuvent donc être de type :

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

- Eau/air
- Huile/air
- Air/air

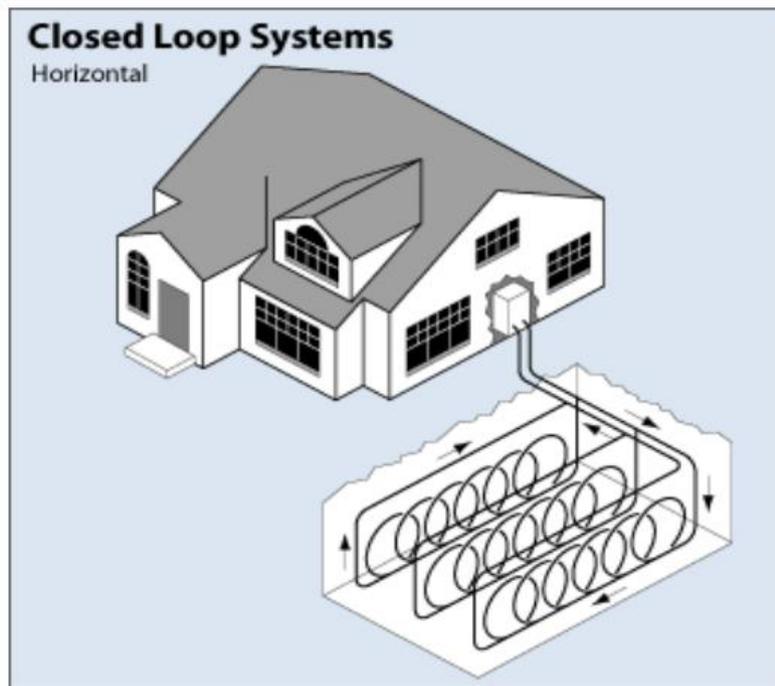
#### **4- Les échangeurs de chaleur géothermique :**

Les circuits souterrains peuvent être classés selon leurs configurations. Une première classification peut être faite en fonction de la nature du circuit ouvert ou fermé. Dans le cas où on utilise directement l'eau souterraine comme source (ou puits) de chaleur on parlera de circuit ouvert [29]. Dans le cas contraire si on utilise un fluide qui circule dans une boucle fermée (sans interaction avec eau souterraine) on parlera de circuit fermé.

Une autre classification existe aussi selon la manière dont on enfouit les tuyaux dans le sol. Il existe deux configurations : verticale ou horizontale. Ces deux types d'échangeurs sont aussi classés comme des systèmes à boucle fermée. [37]

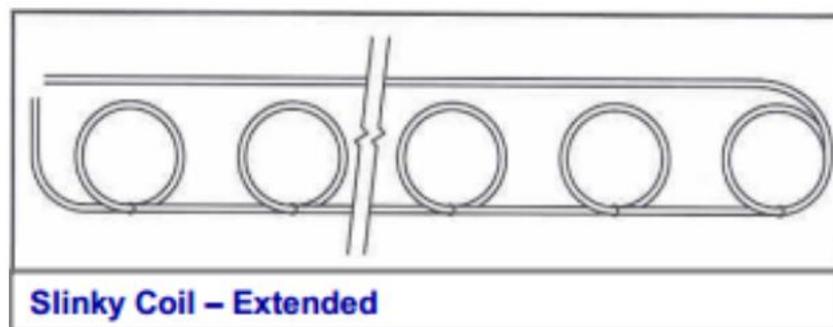
##### **4-1 Boucle fermée horizontale :**

Les boucles fermées horizontales (HCL) sont des tuyaux posés horizontalement pour absorber la chaleur du sol comme on le voit dans la figure (2-9). Ce système est généralement utilisé dans les zones résidentielles car il est plus rentable pour l'installation, en particulier pour les nouvelles constructions où suffisamment de terrain est disponible. Les tuyaux HCL sont enterrés droits ou enroulés dans des zones plus petites.

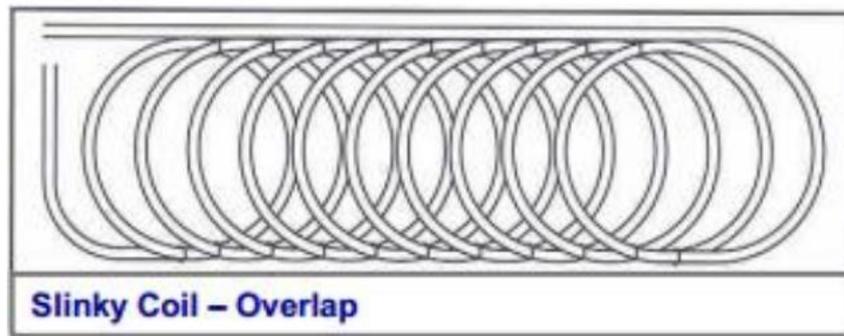


**Figure 2-9** : Système en boucle fermée horizontale [38]

Il existe trois types de boucles fermées horizontales. Ces types sont les slinky droits et superposés et le type de bobines slinky étendues. Ces systèmes ne diffèrent que par la façon dont les échangeurs de chaleur souterrains sont positionnés dans le sol. Le HCL avec un tuyau droit est lorsque le tuyau repose dans le sol jusqu'à l'extrémité de la tranchée et ramené pour former une seule boucle fermée. Le HCL avec une bobine slinky étendue est lorsqu'un tuyau forme des bobines slinky où les boucles ne se touchent pas. Ce type de bobine peut être vu dans la figure (2-10). Le HCL avec une bobine slinky qui se chevauche est le même que le HCL avec des bobines slinky étendues, mais a les boucles qui se chevauchent. Ce type de bobine est visible sur la figure (2-11).



**Figure 2-10** : Type étendu de bobine Slinky [39]



**Figure 2-11** : Type de chevauchement de bobine Slinky [39]

Les HCL ont généralement besoin d'une superficie de 762 m<sup>2</sup> pour chaque tonne de boucles fermées droites horizontales. Les tranchées pour les boucles droites horizontales mesurent généralement 91 m de longueur et 1.8 m de profondeur pour produire une tonne de capacité. La longueur totale du tuyau utilisé pour cette tranchée serait d'environ 600 pieds. Tranchées pour les boucles de bobines horizontales allongées et superposées mesurent généralement 38 m de long et 1.8 m de longueur profondeur pour produire une tonne de capacité. La longueur totale du tuyau utilisé pour cette tranchée serait d'environ 213 m. [40]

### 4-2 Boucle fermée vertical :

Les boucles fermées verticales (VCL) sont des tuyaux qui sont placés dans des trous verticaux généralement parce qu'il n'y a pas d'une superficie suffisamment grande pour faire des HCL. Les VCL sont deux tuyaux qui forment une connexion en boucle en U au fond de trous forés à plusieurs centaines de mètres sous la surface, comme illustré à la figure (2-12). C'est généralement utilisé par les grands bâtiments commerciaux car la superficie des boucles horizontales serait chère. [41]

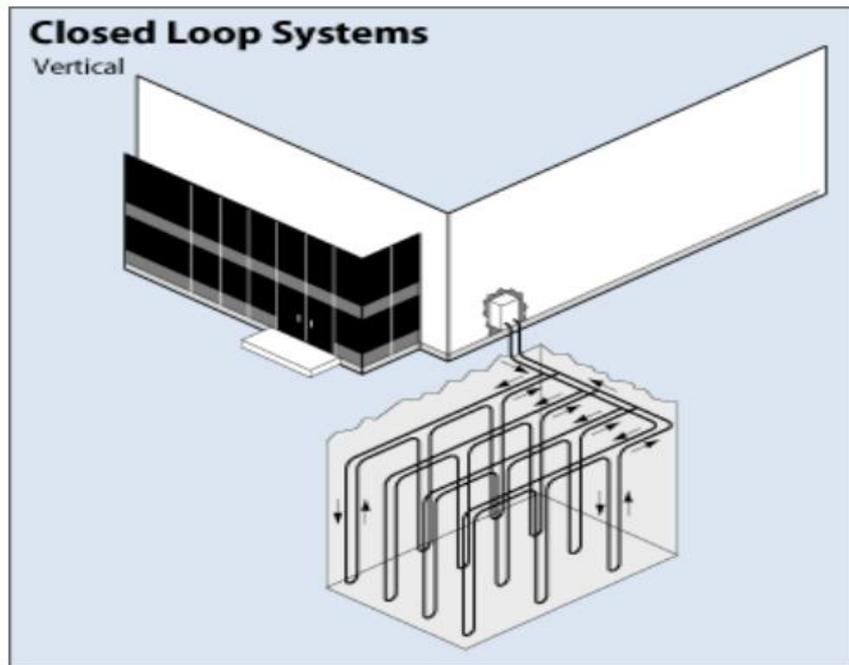


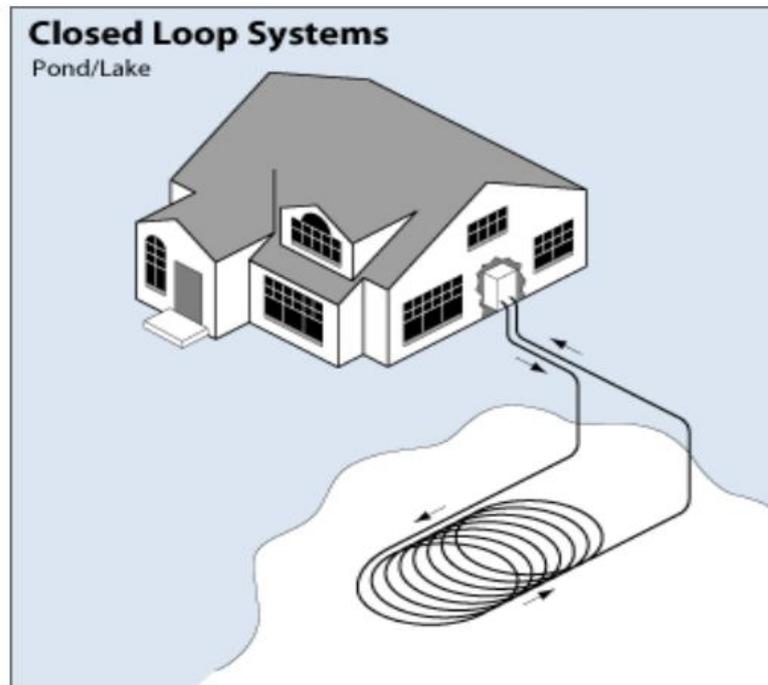
Figure 2-12 : Système vertical en boucle fermée [38]

Ce type est le plus utilisé et nécessite une main d'œuvre spécialisée ; en effet il existe des formations dédiées au forage géothermique [42]. C'est un ensemble de forages verticaux qui peuvent aller en profondeur jusqu'à 150m.

### 4-3 Boucle fermée de l'étang et du lac :

Les boucles fermées dans les étangs ou les lacs sont l'option la moins chère des trois systèmes en boucle fermée. S'il y a un étang ou un lac près de la maison d'habitation, les tuyaux peuvent être enroulés et mis au fond de l'étang ou lac comme on le voit sur la figure (2-13).

Ce système fonctionne comme les autres systèmes fermés avec seulement la différence étant que les boucles fermées transfèrent la chaleur de l'étang ainsi que de la Terre vers le bâtiment. Il y a des exigences auxquelles l'étang ou le lac doit répondre pour qu'ils soient pris en compte pour un système en boucle fermée.



**Figure 2-13** : Système de boucle fermée d'étang [38]

Les systèmes en boucle ouverte utilisent l'eau des puits comme fluide caloporteur qui circule dans le système et verse dans le puits. Ce système utilise l'eau de l'environnement et la ramène à l'environnement généralement plus chaud. [39]

## **5- Méthodes de récupération de l'énergie Géothermique :**

On a deux méthodes de récupération de l'énergie géothermique : par extraction ou par centrale géothermique. [43]

### **5-1 L'extraction :**

Les sources d'extraction pour mieux comprendre le fonctionnement de la géothermie :

#### **5-1-1- Réservoirs géothermiques :**

Les gradients thermiques profonds dans certaines zones de la planète sont plus prononcés que dans d'autres. Cela conduit à une plus grande efficacité énergétique et à la production d'électricité grâce à la chaleur interne de la terre. D'une manière générale, le potentiel de production de l'énergie géothermique est bien inférieur à celui de l'énergie solaire ( $60 \text{ mW} / \text{m}^2$  pour la géothermie et  $340 \text{ mW} / \text{m}^2$  pour l'énergie solaire). Cependant, lorsque le gradient de température mentionné est plus

élevé (appelé réservoir géothermique), le potentiel de production d'électricité est beaucoup plus élevé (jusqu'à 200 mW / m<sup>2</sup>). Cet énorme potentiel de production d'énergie génère une accumulation de chaleur dans l'aquifère, qui peut être utilisée dans l'industrie.

Pour extraire l'énergie des réservoirs géothermiques, une étude de marché réalisable doit d'abord être menée, car les coûts de forage augmentent énormément avec la profondeur. Autrement dit, à mesure que nous forons plus profondément, l'effort pour attirer la chaleur vers la surface augmente. Parmi les types de gisements géologiques, nous en avons trouvé trois types : l'eau chaude, les minéraux secs et les geysers.

### **5-1-2- Réservoirs d'eau chaude :**

Il existe deux types de réservoirs d'eau chaude : l'eau de source et l'eau souterraine. Le premier peut être utilisé comme bain chaud en les mélangeant un peu avec de l'eau froide pour pouvoir s'y baigner, mais le premier a le problème de son faible débit. D'un autre côté, nous avons les aquifères souterrains, qui sont des réservoirs avec des températures très élevées et peu de profondeur. Ce type d'eau peut être utilisé pour extraire votre chaleur interne. On peut faire circuler de l'eau chaude à travers une pompe pour profiter de sa chaleur.

Un dépôt sec est une zone où la roche est sèche et très chaude. Dans ce type de réservoir, il n'y a pas de fluide porteur d'énergie géothermique ou de tout type de matériau perméable. Ce sont les experts qui ont introduit ces types de facteurs pour transférer la chaleur. Ces champs ont une production plus faible et des coûts de production plus élevés. L'inconvénient de ce type de domaine est que la technologie et les matériaux pour cette pratique sont encore non viables économiquement, il faut donc les développer et les améliorer.

### **5-1-3- Dépôts de geyser :**

Un geyser est une source chaude qui émet naturellement une colonne de vapeur et d'eau chaude. Peu de gens sur cette planète. En raison de la sensibilité des geysers, les geysers doivent être utilisés dans un environnement hautement coté et prudent afin de ne pas réduire leurs performances opérationnelles. Pour extraire la chaleur du sédiment du geyser, la chaleur doit être utilisée directement par la turbine pour obtenir une vitalité mécanique.

Le problème avec cette extraction est que la réinjection d'eau à basse température va refroidir le magma et l'épuiser. On analyse également que l'injection d'eau froide et le refroidissement du magma provoquent de petits et fréquents tremblements de terre.

### 5-2 Centrale géothermique :

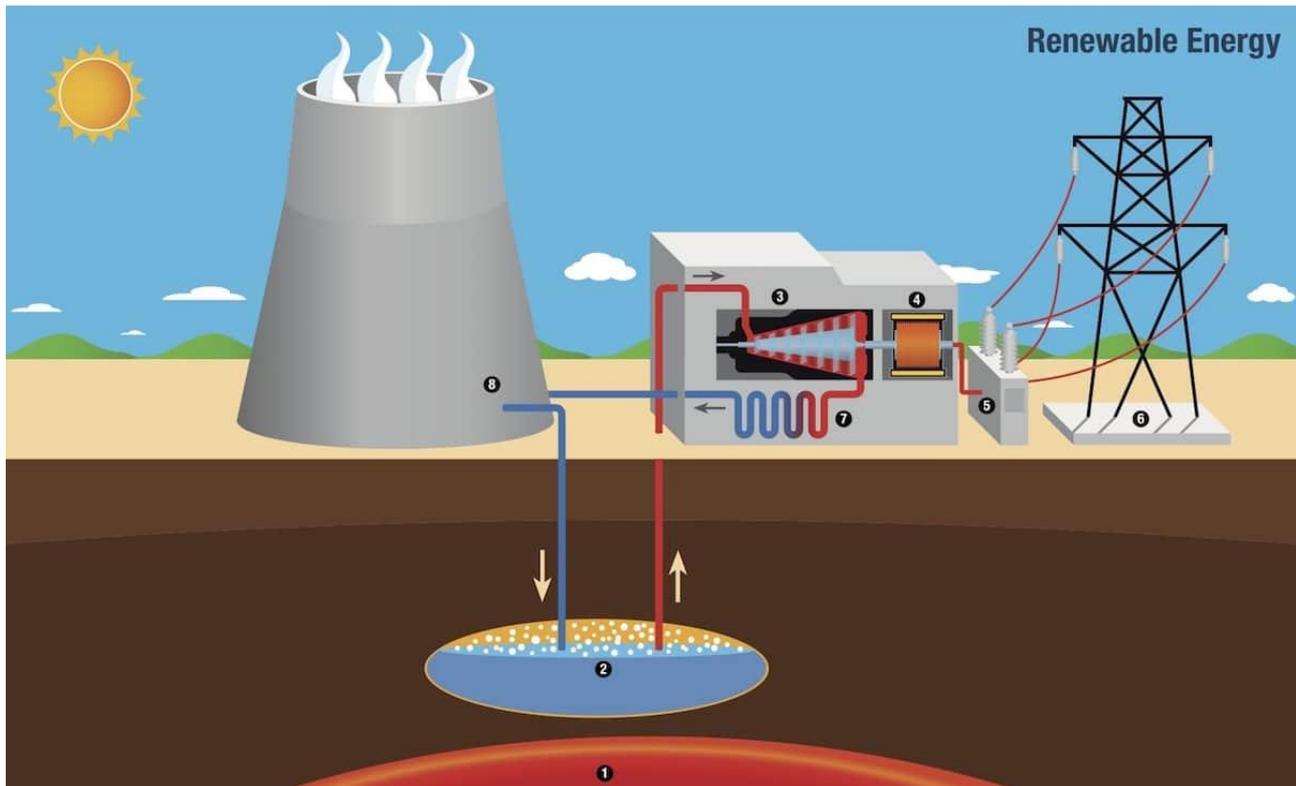


Figure 2-14 : Centrale géothermique [43]

Pour savoir comment fonctionne la géothermie, il faut se rendre dans les centrales géothermiques. Ce sont les lieux où ce type d'énergie est généré. L'exploitation d'une centrale géothermique repose sur une opération assez complexe qui fonctionne en un système de plantes sur le terrain. Autrement dit, l'énergie est extraite de l'intérieur de la Terre et transportée vers l'usine où l'électricité est produite.

Le gradient géothermique du champ géothermique dans lequel vous travaillez est supérieur à celui de la terre normale. Autrement dit, la température en profondeur augmente davantage. Cette zone à gradient géothermique plus élevé est généralement due à la présence d'un aquifère limité par l'eau chaude, et l'aquifère est conservé et restreint par une couche imperméable qui limite toute chaleur et pression. Il s'agit du soi-disant réservoir géothermique, où la chaleur est extraite pour produire de l'électricité.

Des puits d'extraction géothermique reliés aux centrales électriques sont situés dans ces zones géothermiques. La vapeur est extraite par un réseau de tuyaux et dirigée vers l'usine où l'énergie thermique de la vapeur est convertie en énergie mécanique puis en énergie électrique. Une fois que nous avons l'énergie électrique, nous n'avons plus qu'à la transporter jusqu'au lieu d'utilisation.

**CHAPITRE III**  
**MODELISATION ET SIMULATION**  
**NUMERIQUE**

## 1. Modélisation de la géométrie :

### 1.1 Géométrie et conditions aux limites :

Pour notre travail on a conçu un modèle 3D, avec deux géométries : la première à 8m et la deuxième à 15m au niveau de la conduite horizontale, pour un écoulement instationnaire.

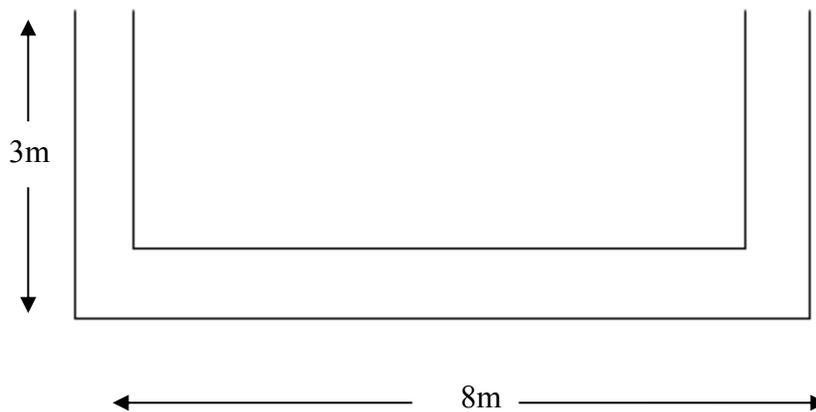
Les conditions aux limites sont :

L'entrée : vitesse (velocity-inlet) de 1m/s

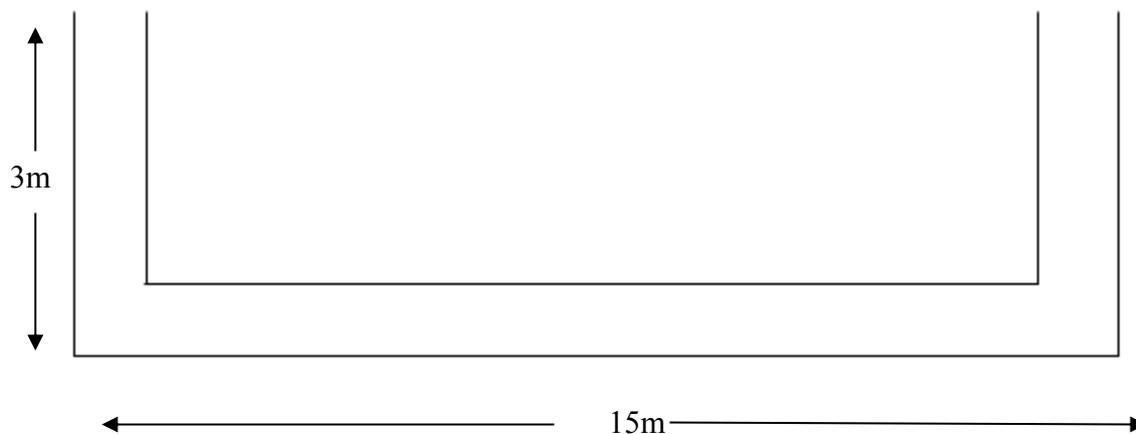
La sortie : pression (pressure-outlet)

La paroi : wall à 293K

- Première configuration : **(figure 3-a)**



- Deuxième configuration : **(figure 3-b)**



## 1.2 Maillage :

On a utilisé pour les deux géométries étudiées un maillage raffiné tétraédrique (TGrid).

Voir Figure 3.1 et Figure 3.2

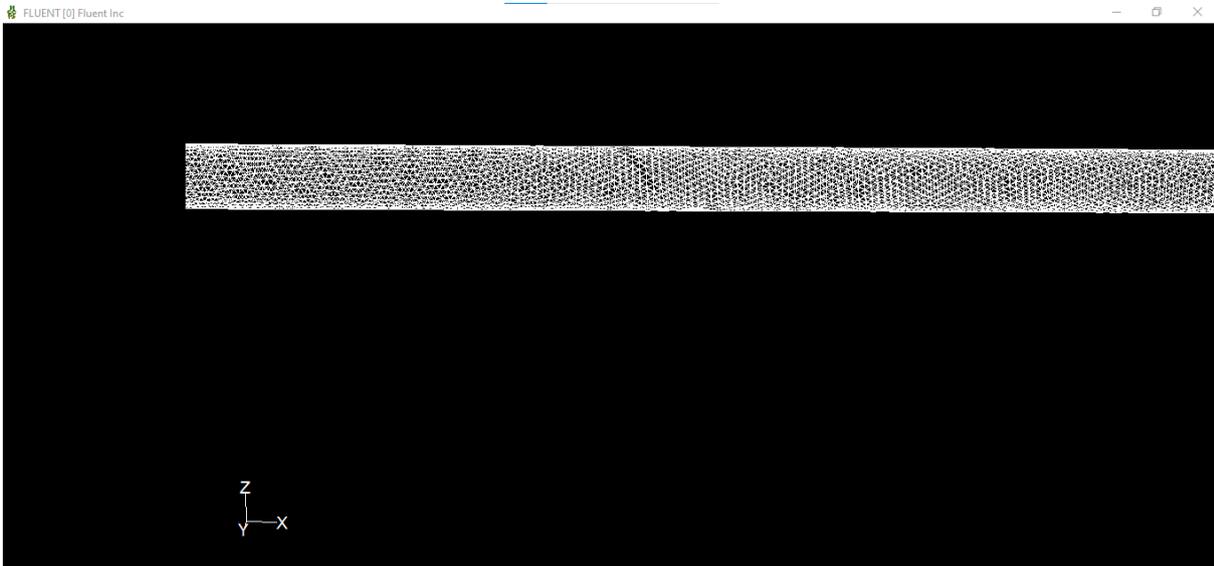


Figure 3.1 : Une partie de maillage



Figure 3.2 : Maillage raffiné

## 2. Equation :

### 2-1. Equation de Navier-Stokes incompressible :

- Equation de la conservation de la masse :

$$\nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (3-1)$$

- Equation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (3-2)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (3-3)$$

- Equation de l'énergie :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3-4)$$

## 2-2. Modélisation de la turbulence :

Le modèle classique de turbulence k-epsilon de Launder et Spalding (1974) est un modèle dans lequel on suppose que les contraintes de Reynolds sont proportionnelles aux gradients de vitesse moyens, avec la viscosité turbulente.

Le modèle k-epsilon utilise deux équations, l'équation pour l'énergie cinétique turbulente  $k$  et l'équation pour l'énergie dissipation epsilon :

- La formulation de Boussinesq pour un écoulement incompressible :

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_T \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3-5)$$

- La viscosité turbulente :

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-6)$$

- **K** :

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (3-7)$$

- **Epsilon** :

$$\rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_T \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-8)$$

Les constants empiriques pour le modèle k-Epsilon sont :

$$C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_T = 0.9$$

### **3.Simulation numérique :**

La simulation numérique en mécanique des fluides (CFD : Computational Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils inévitables de conception et elle est largement utilisée dans l'industrie. Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va compter essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre.

Dans ce chapitre, afin de résoudre ces équations avec leurs conditions aux limites associées, nous considérons une solution à l'aide d'un code de simulation numérique de deux logiciels commerciaux très appliqués dans l'industrie : un mailleur (GAMBIT) et un solveur (FLUENT) qui résolvent ces équations régissant les mouvements d'un fluide. Ces dernières traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de l'énergie.

#### **3-1. Gambit :**

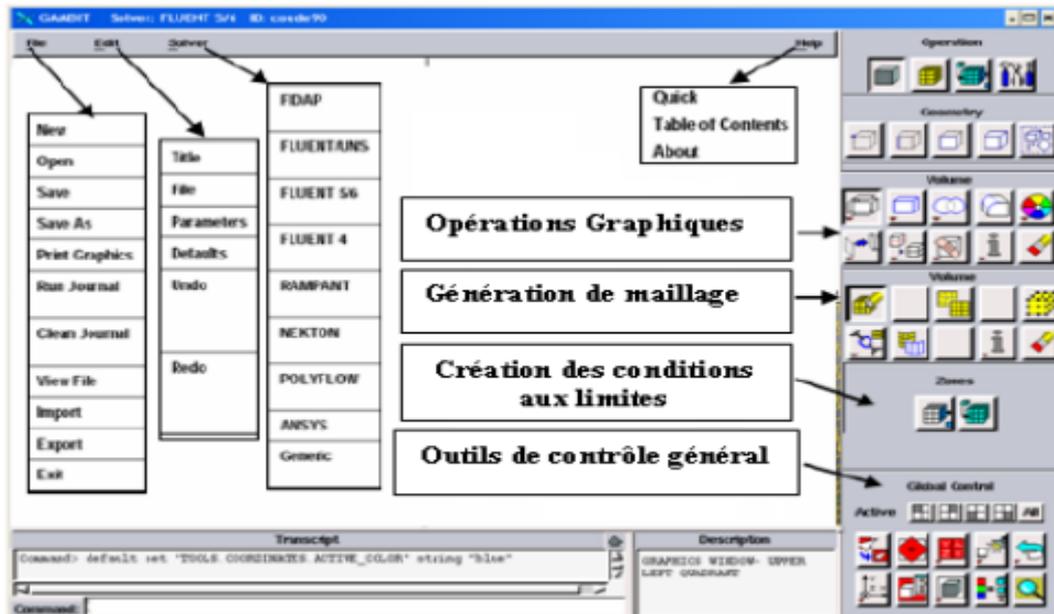
C'est un préprocesseur adopté pour l'analyse en CFD (Computation Fluide Dynamics). Il est utilisé pour créer une géométrie et générer son maillage.

Les options de génération de maillage de GAMBIT offrent une flexibilité de choix. La géométrie peut être divisé en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon GAMBIT génère automatique un maillage non structure adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont repérés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites.

Dans le présent travail, GAMBIT mise à disposition cette possibilité de définir d'un conduit cylindrique forme U, créer un volume représentant le domaine d'étude et résulter son maillage.

- **La création de la géométrie :**

Quand on clique sur la commande de la géométrie, le GAMBIT ouvre la fenêtre de la géométrie qui comporte des boutons qui permettent de créer, déplacez, copiez, modifiez, et effacez des points, lignes, surfaces, et volumes comme ci-dessous :



**Figure 3-3** : Vue globale de GAMBIT

Ce qui concerne notre simulation, on a fait deux géométries de même dimensionnement sauf au niveau de la conduite horizontale : le premier à 15 m de longueur, et le deuxième à 8m.

Donc les procédures sont les suivants :

A l'aide de la fonction géométrie on doit créer le conduit cylindrique forme U qui est constitué de trois cylindre, deux verticaux ils ont la même hauteur de 3m et le même diamètre de 0,11m et l'autre horizontal sa longueur de 15m et un diamètre de 0,11m.

On va commencer par le premier cylindre vertical comme suite :

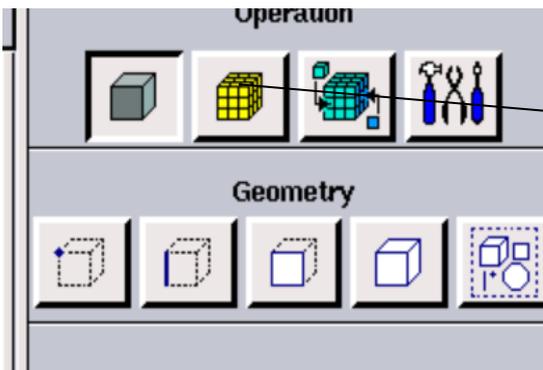


Figure 3-4 : Commande géométrie

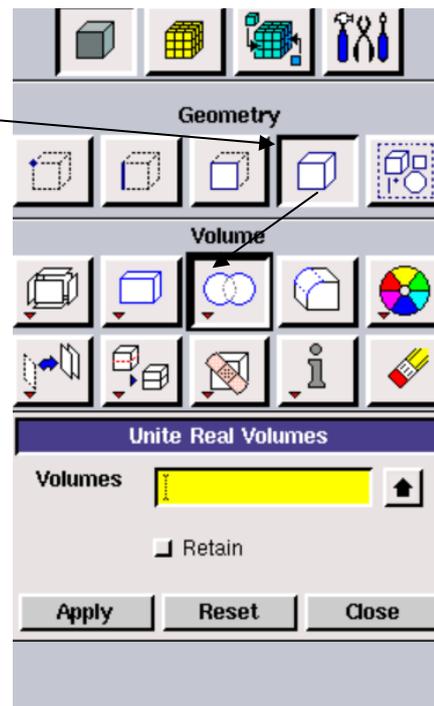


Figure 3-5 : Commande volume et création de cylindre

En indiquant la hauteur et le diamètre sur la fenêtre. Comme il est montré ci-dessous :

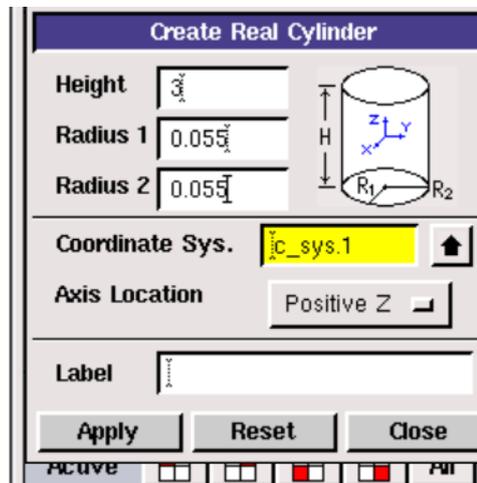


Figure 3-6 : Création du premier cylindre

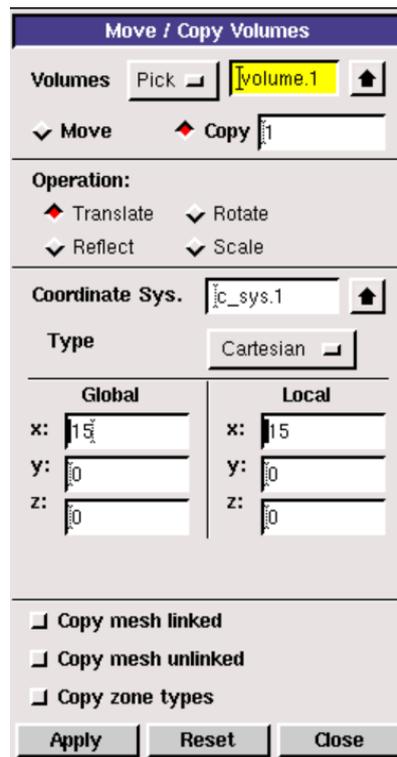
Concernant la création du cylindre on clique sur ‘APPLY’

Ensuite on va créer et ajuster la disposition des deux cylindres ; en utilisant les fonctions suivantes :

**\*La commande Move/Copy :**

Le GAMBIT offre la commande Move/Copy qui permet de repositionner, réorientez et/ou de créer des copies des points, lignes, surfaces, volumes, ou groupes.

En utilisant la commande ‘copy’ pour créer le deuxième cylindre :



**Figure 3-7 :** la Commande copy

On clique sur ‘APPLY’ pour effectuer la commande ‘copy’.

Pour le troisième cylindre horizontal, en utilise la même procédure pour la création du volume cylindre, comme suite :

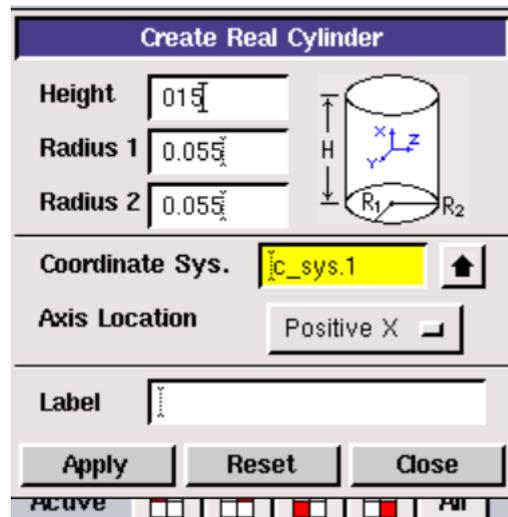


Figure 3-8 : Création du cylindre de la conduite horizontale

La géométrie obtenue :

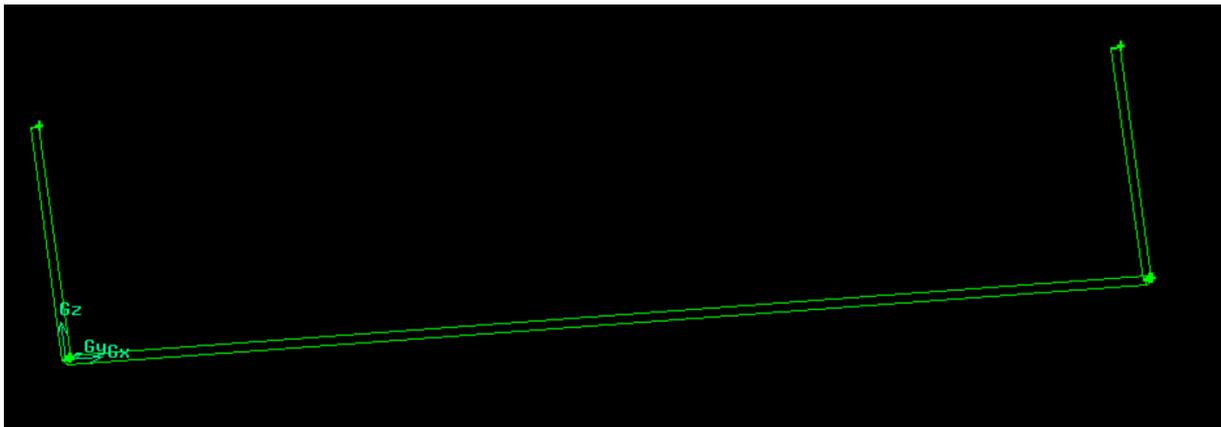
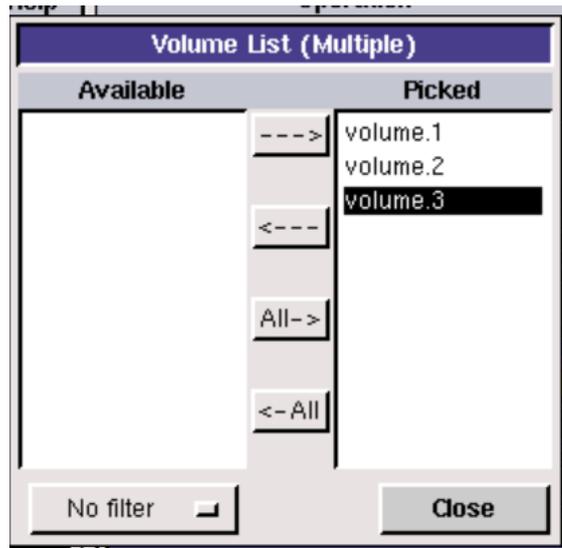


Figure 3-9 : la géométrie

En ce qui concerne notre géométrie on utilise l'opération Unite Real Volume qui permet



D'assembler les trois volumes des cylindres dans un volume indivisible comme il est présenté ci-dessous :

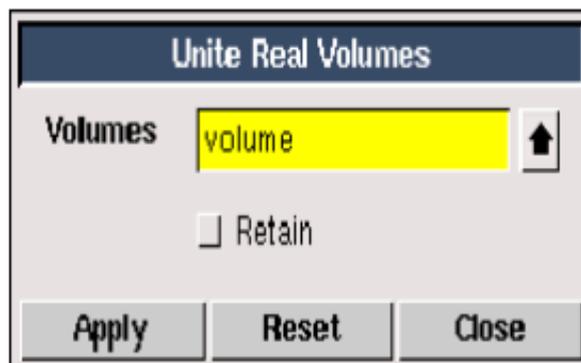


Figure 3-10 et 3-11 : la commande Unite Real Volume

Puis nous cliquons sur 'APPLY' pour la création du volume et nous aurons :

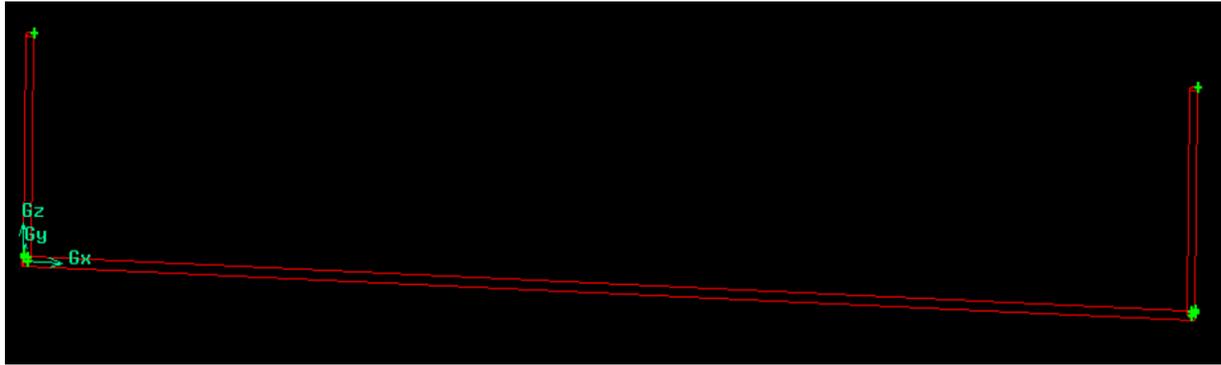


Figure 3-12 : La création de la géométrie

• **3-2. La création du maillage :**

Après la création de la géométrie nous faisons le maillage avec la commande **MESH** 

Cette commande possède des opérations applicables pour le maillage des couches limites, lignes, faces, volumes, et groupes comme il est montré ci-dessous :

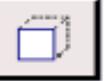
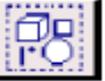
Symbole					
Commande set	<b>Boundary Layer</b>	<b>Edge</b>	<b>Face</b>	<b>Volume</b>	<b>Group</b>

Tableau 3-1 : la commande de création du maillage



En ce qui intéresse notre géométrie on utilise des opérations **Face et Volume** :

On utilise les mêmes opérations avec la commande de **MESH Face**, on trouve les configurations données par les figures (3-13) et (3-14) :

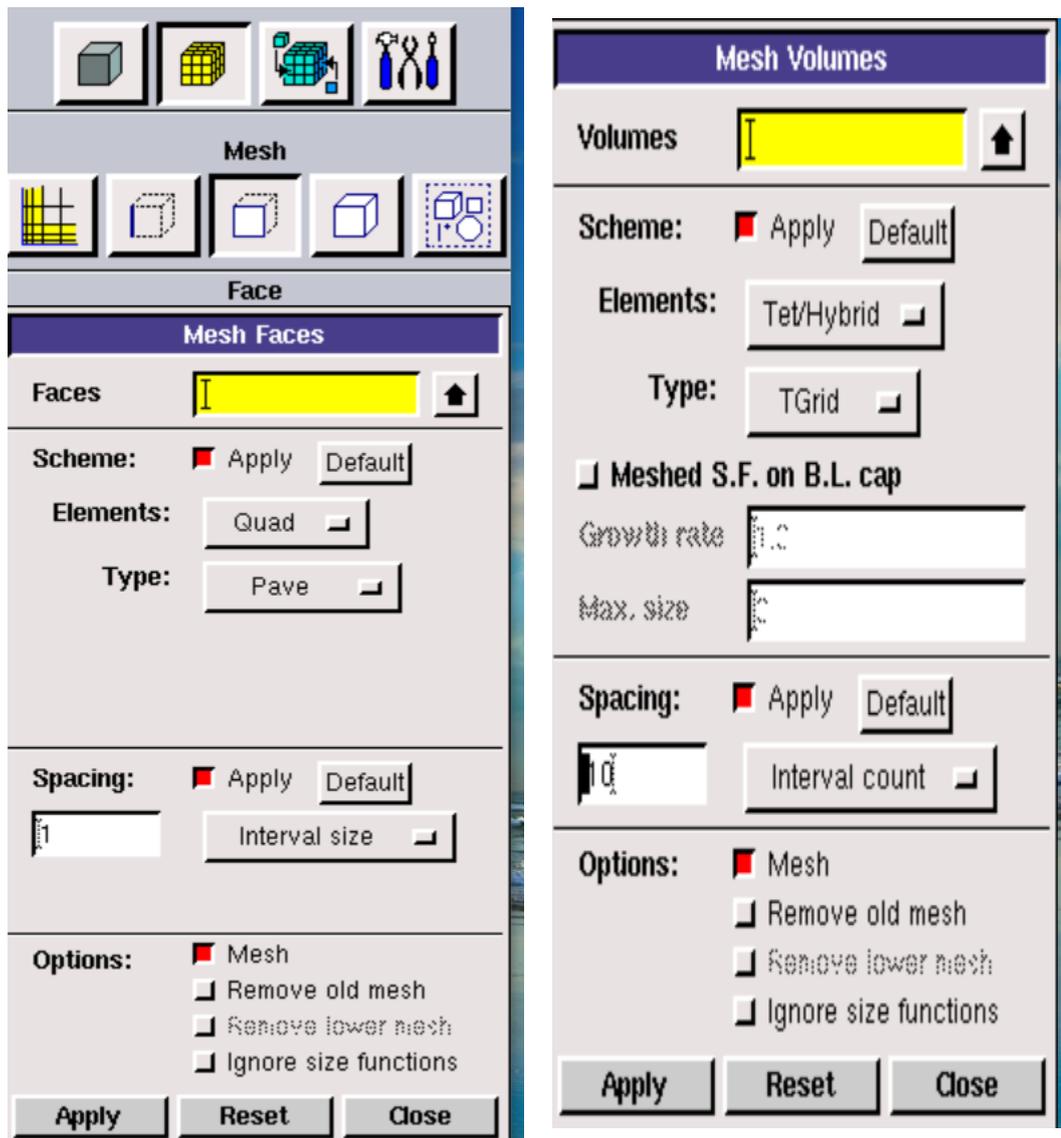


Figure 3-13 et 3-14 : Les commandes de maillage

Concernant la création de la géométrie maillée, on clique sur 'APPLY'.

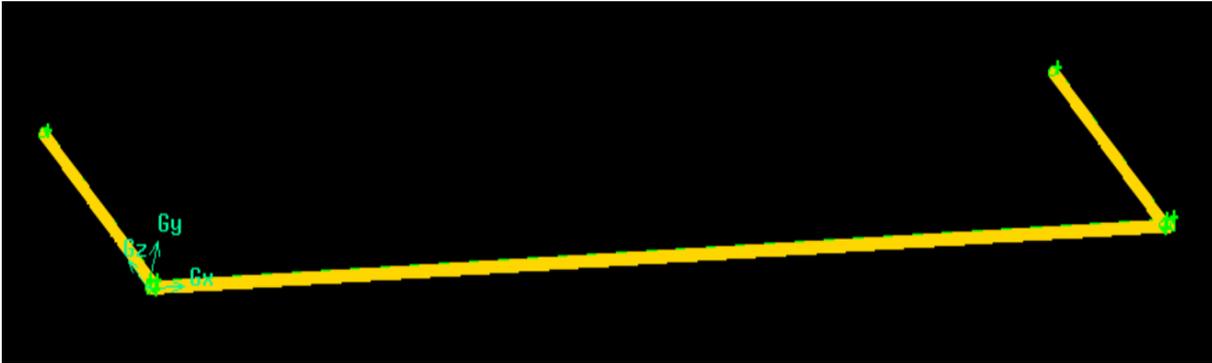


Figure 3-15 : Création de la géométrie maillée

- **Les conditions aux limites :**

Pour préciser les conditions aux limites on doit utiliser la commande **SPECIFYING ZONE TYPES**. Cette commande admet de décrire les caractéristiques physiques et opérationnelles du modèle à ses limites et dans des régions précises de son domaine : wall (paroi) ; velocity inlet (vitesse d'entrée) et pressure outlet (pression à la sortie).

Alors, appuyant sur **ZONES**  **SPECIFY BOUNDARY TYPES**  et on indique les conditions aux limites comme il est montré dans la figure suivante :

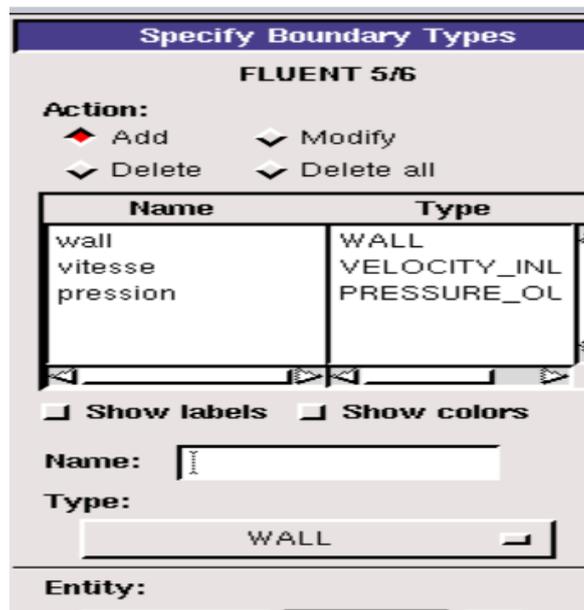
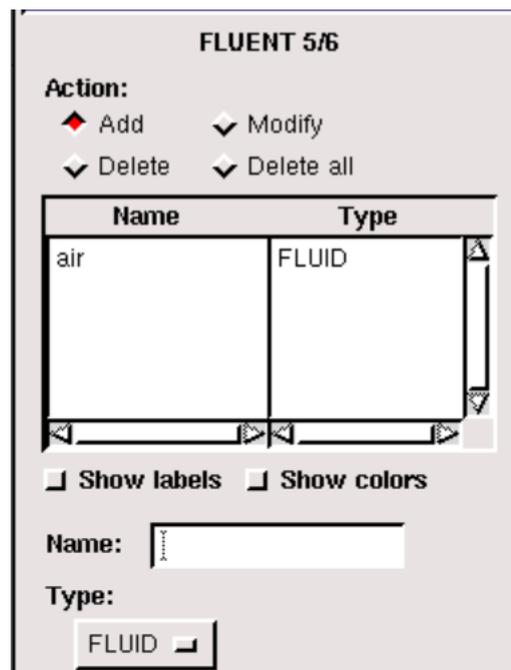


Figure 3-16 : La commande des conditions aux limites

Région	Géométrie
Wall	Wall (paroi)
Vitesse	Velocity inlet (vitesse d'entrée)
Pression	Pressure outlet (pression à la sortie)

**Tableau 3-2** : Les conditions aux limites dans **GAMBIT**

Ainsi, en appuyant sur **ZONES**  → **SPECIFY CONTINUUM TYPES**  et on indique le fluide comme il est montré dans la figure suivante :



**Figure 3-17** : La commande définition de fluide

### 3-2. Fluent :

Fluent est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides (compressible, incompressible, stationnaire et instationnaire) même sans l'équation de l'énergie. Il résout plusieurs phénomènes physiques tels que la turbulence, le transfert de chaleur, les écoulements dans les machines tournantes et les moteurs thermiques.

Le code « Fluent » est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage.

Pour démarrer la version 3D du fluent 6.3 en cliquant deux fois sur le raccourci suivant



La fenêtre de raccourci apparaît comme suite :

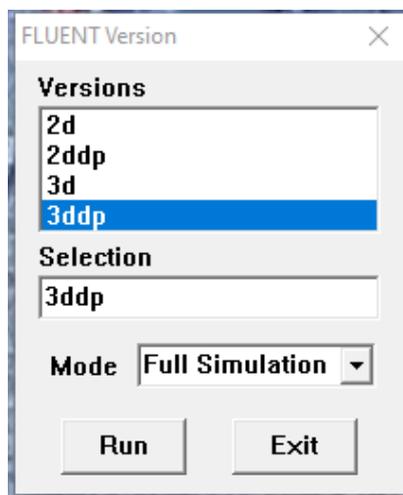


Figure 3-18 : Fenêtre de dialogue

Nous choisissons la version **3ddp** et nous cliquons sur **Run**. Apparaît alors l'écran de fluent (Figure 18).

- Premièrement :

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (‘. msh’) procréé sous Gambit.

**File** → **Read** → **Case**

```
FLUENT [3d, dp, pbns, ske, unsteady]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help

Welcome to Fluent 6.3.26

Copyright 2006 Fluent Inc.
All Rights Reserved

Loading "C:\Fluent.Inc\Fluent6.3.26\lib\fl_s1119.dmp"
Done.

> Reading "C:\Users\you\Desktop\simulation PFE\correction 5simulation.cas"...
310665 tetrahedral cells, zone 2, binary.
144 triangular wall faces, zone 3, binary.
72 triangular pressure-outlet faces, zone 4, binary.
69206 triangular wall faces, zone 5, binary.
72 triangular velocity-inlet faces, zone 6, binary.
586583 triangular interior faces, zone 8, binary.
70171 nodes, binary.
70171 node flags, binary.

Building...
grid,
materials,
interface,
domains,
mixture
zones,
default-interior
new_vitesse
wall
pression
new_wall
fluide
shell conduction zones,
Done.
```

Figure 3-19 : Importation de la géométrie

- Deuxièmement :

**A : Grid → Check**

Ceci permet de vérifier si le maillage inséré ne comporte pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

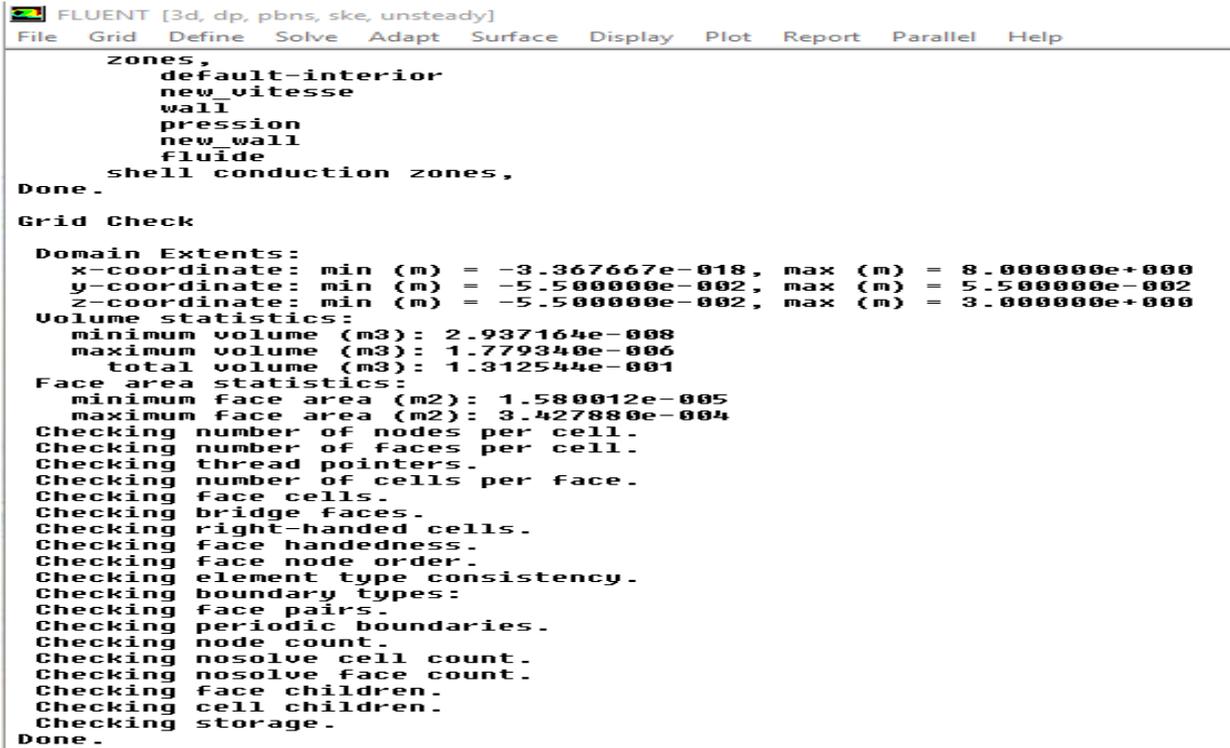


Figure 3-20 : Vérification du maillage sous Fluent

**B : Grid → Scale**

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

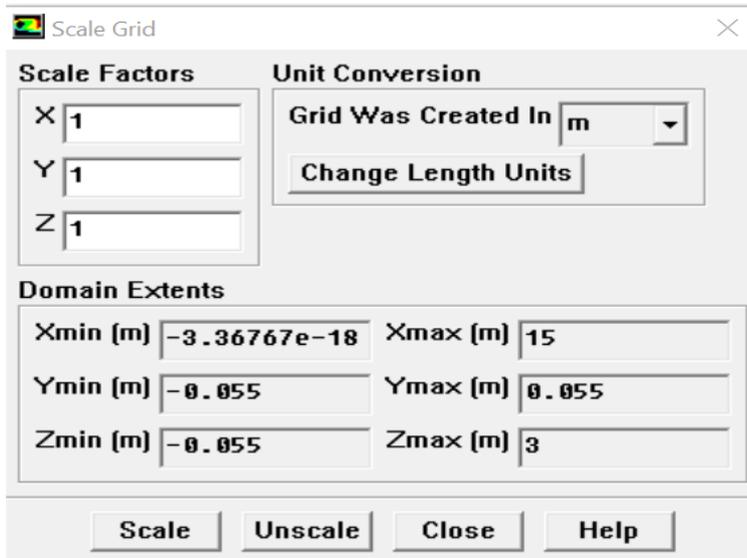


Figure 3-21 : Vérification des unités de simulation

- Troisièmement :

**A : Define** → **Models** → **Solver**

Définition de la dimension de la géométrie, la méthode utilisée pour le calcul, la formule de la vitesse (absolue ou relative ...), le régime instationnaire ou stationnaire.

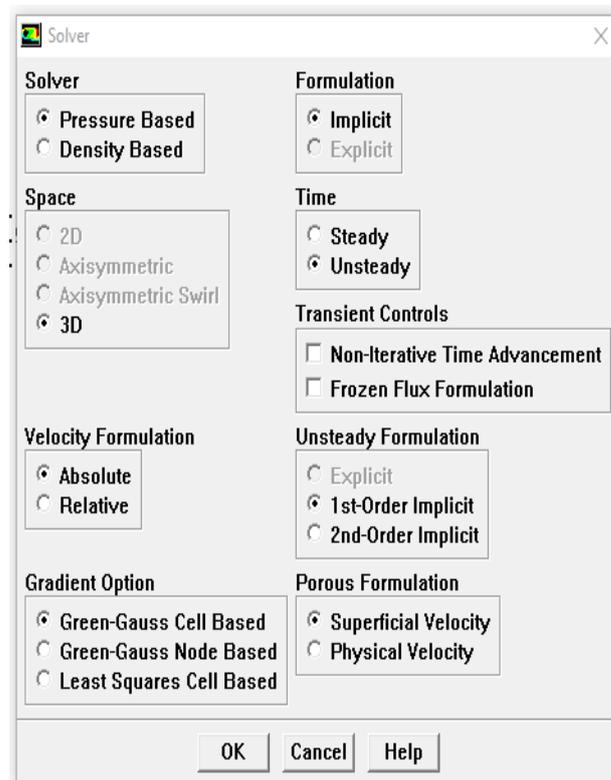


Figure 3-22 : Choix du solveur sous fluent

**B : Define** → **Models** → **energy**

Le transfert de la chaleur en pressant l'équation d'énergie.

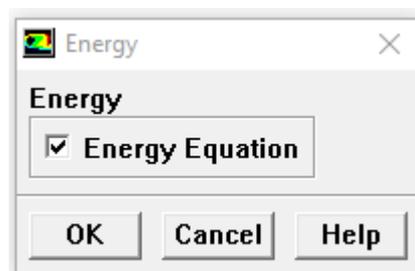
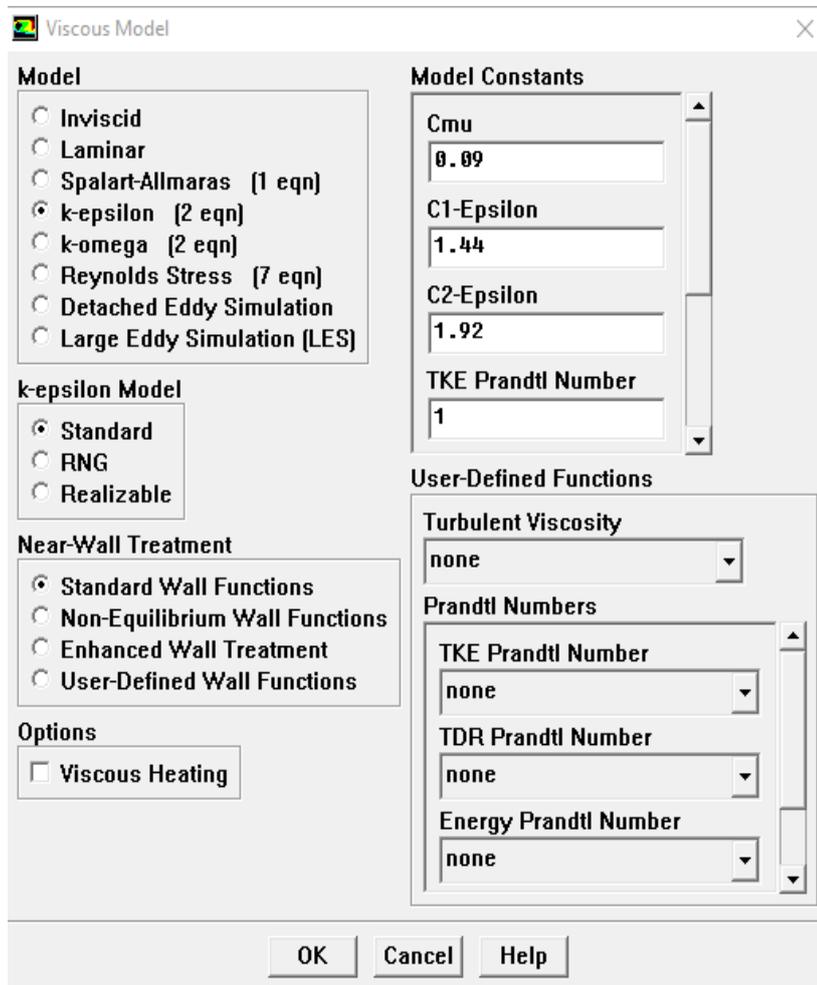


Figure 3-23 : Activation des équations de l'énergie

**C : Define** → **Models** → **viscous**

Selon le nombre de Reynolds, on choisit la nature de l'écoulement (laminaire ; turbulent...).



**Figure 3-24** : Choix de la nature de l'écoulement

Nous choisissons un modèle de l'écoulement **k-epsilon**, puis nous cliquons sur **OK**.

**D : Define** → **Materials**

On définit les propriétés de fluide, et pour notre cas le fluide est l'air (les propriétés constantes).

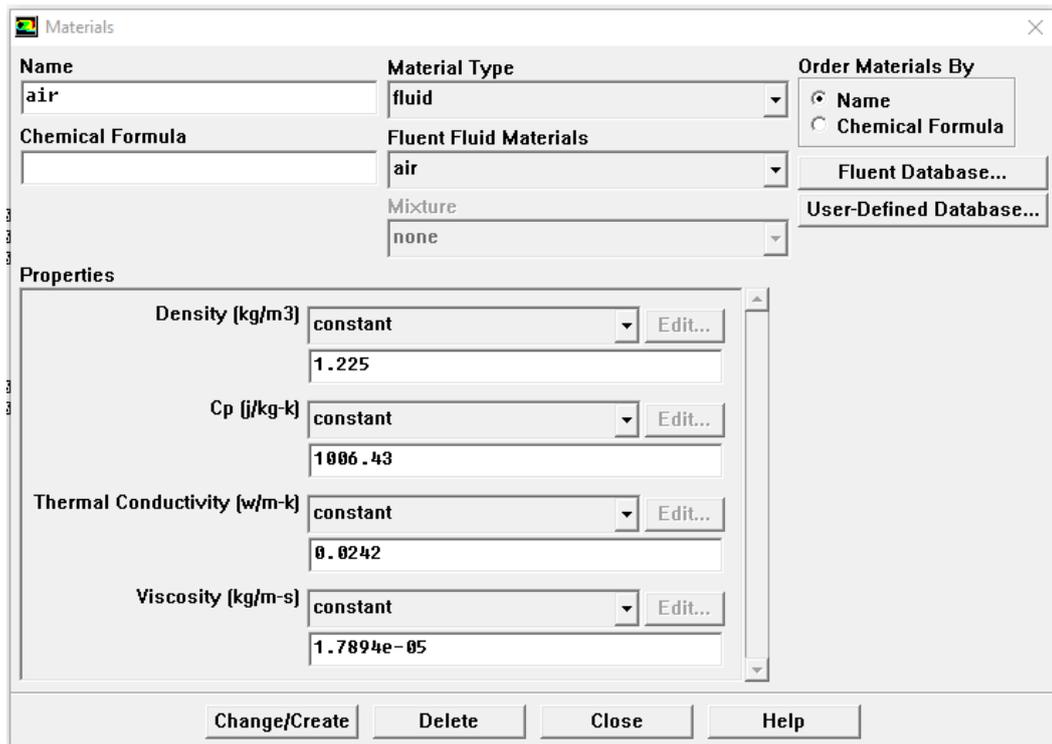


Figure 3-25 : Définition des propriétés de l'air

**E : Define** → **Operating conditions**

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut d'abord choisir la valeur de la pression de référence « **operating conditions** ». Puis nous cliquons sur **OK**.

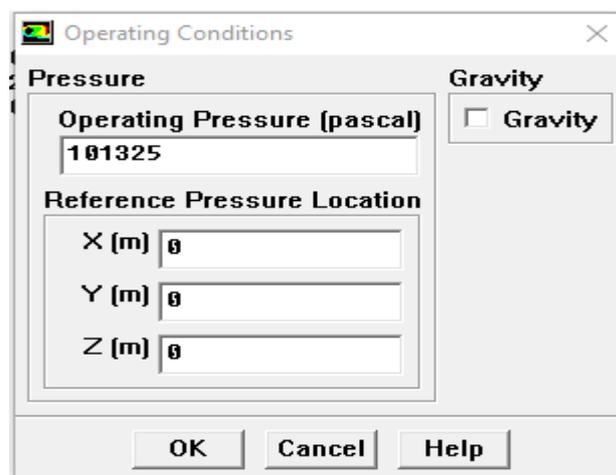
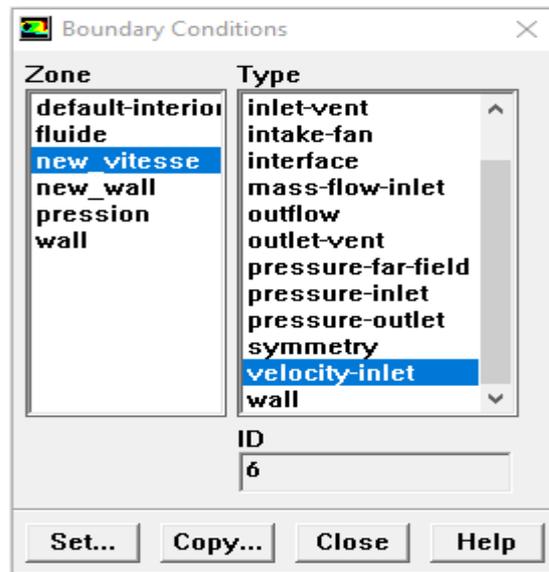


Figure 3-26 : Choix de la pression de référence

**F : Define** → **Boundary conditions**

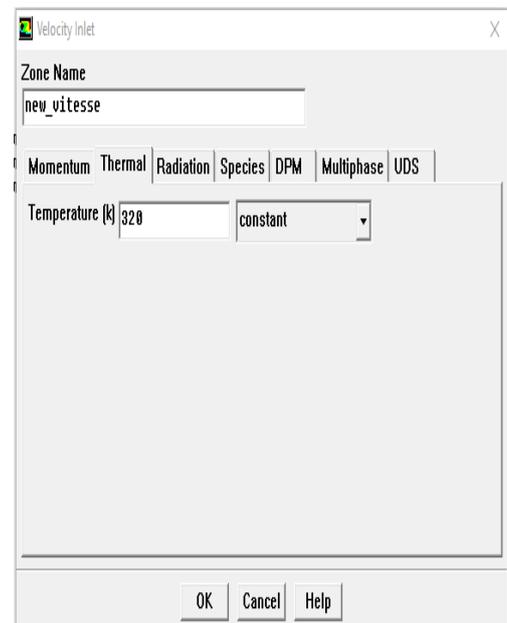
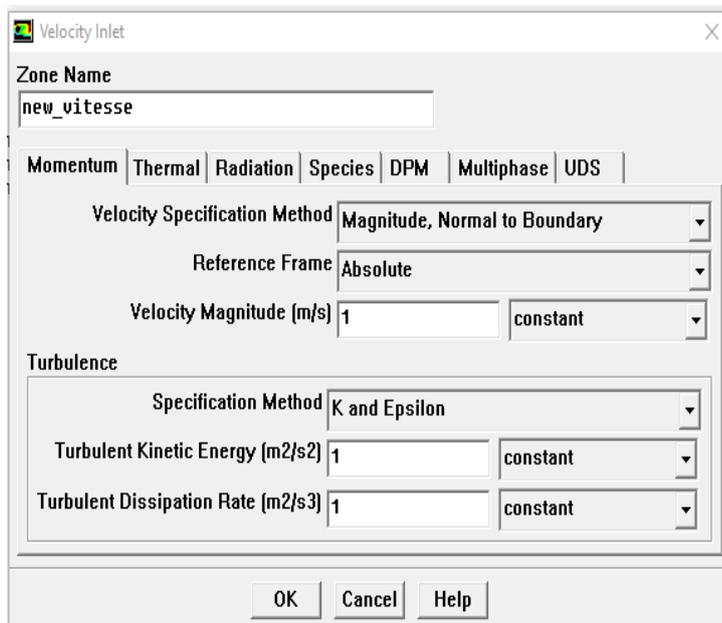
Ainsi, on fixe les valeurs des conditions aux limites.



**Figure 3-27** : Les valeurs des conditions aux limites

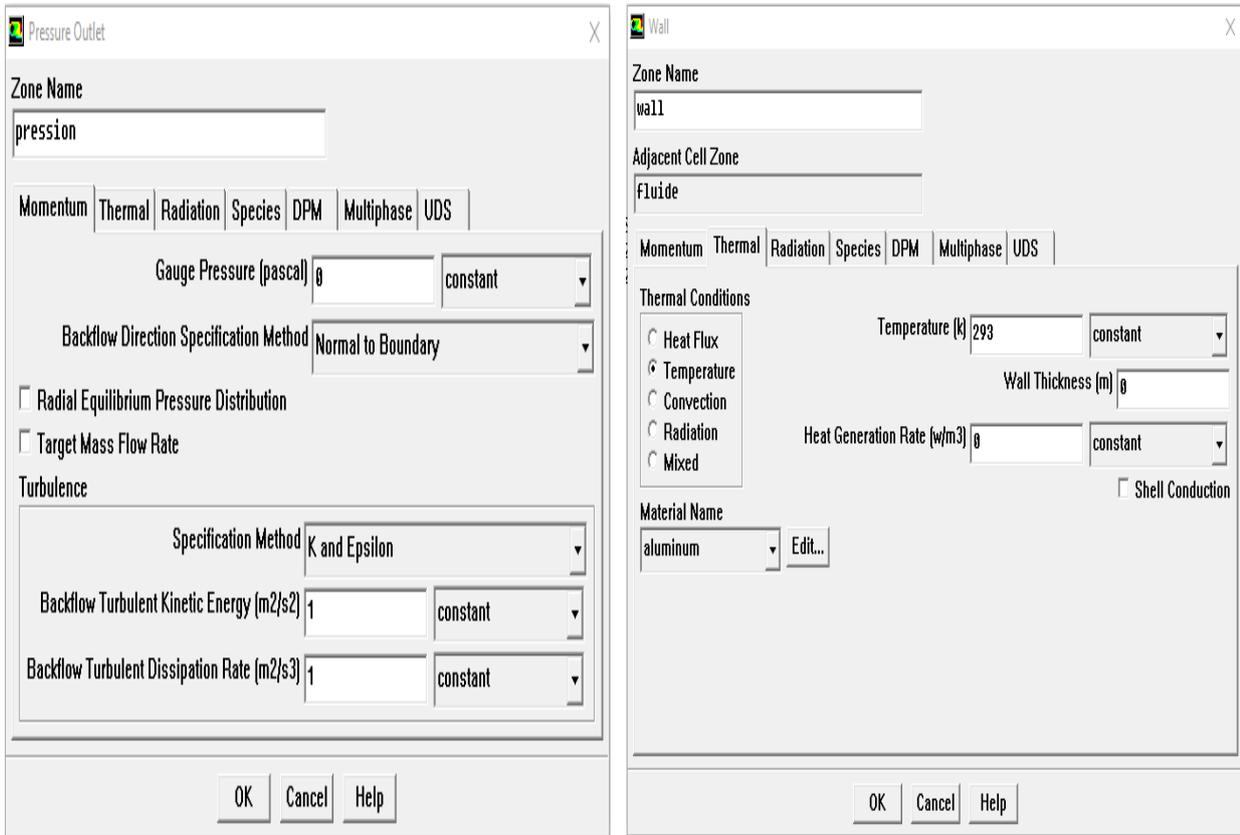
On clique sur 'set' pour définir les valeurs de la vitesse et la température d'entrée du fluide

(Avec :  $V=1$  m/s ;  $T_e=320$  K).



**Figure 3-28 et 3-29** : Définition des conditions à l'entrée

On utilise la même méthode pour la pression à la sortie (PRESSURE OUTLET) du fluide et au niveau de la paroi (WALL), comme suite :



**Figure 3-30 et 3-31** : Valeurs des conditions aux limites au niveau de la paroi et de la pression

Cliquons sur **OK**.

- **Quatrièmement** :

**A : Solve** → **Controls** → **Solution**

Pour le calcul on choisit le schéma de discrétisation utilisé par FLUENT.

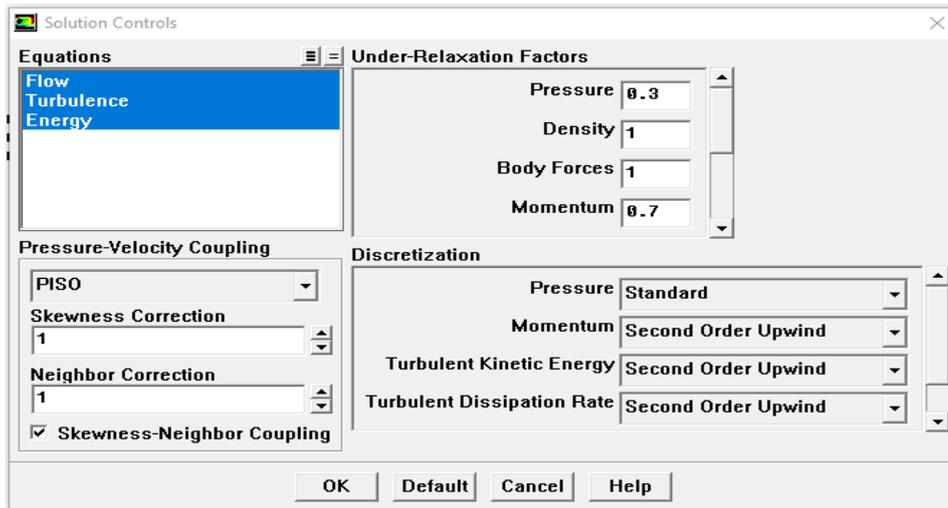


Figure 3-32 : Choix de la solution

**B : Solve** → **initialize** → **init**

Pour Initialiser la solution :

- 1- Sélectionner l'entrée dans **compute from** pour initialiser le calcul à partir de l'entrée.
- 2- Appuyer sur **Apply** puis sur **Init** pour le démarrage de l'initialisation.

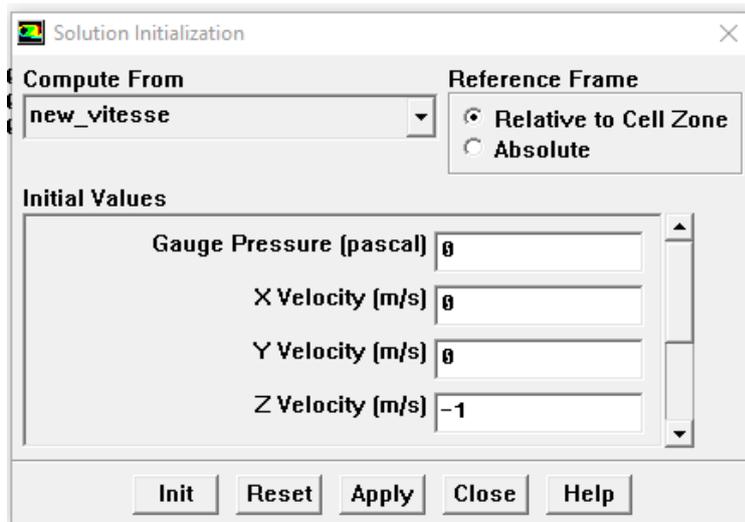


Figure 3-33 : Initialisation de solution

**C : Solve** → **Monitor** → **Residual**

On a fixé les résiduels avec une précision de 1/1000 pour obtenir des résultats précis.

(Pour l'équation de l'énergie  $10^{-6}$ ).

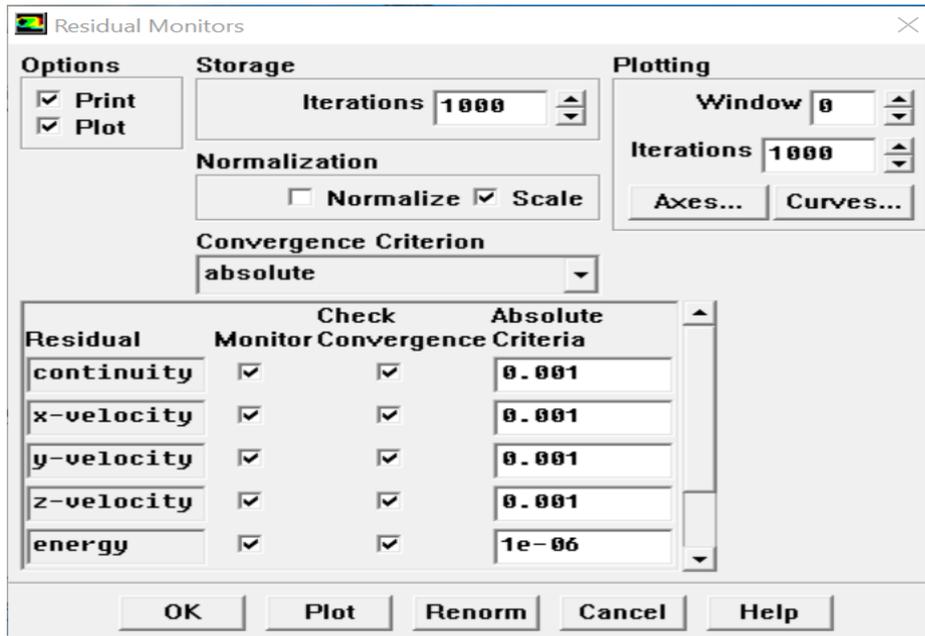


Figure 3-34 : Précision des résultats.

**F : Solve----- Iterate**

Pour démarrer le calcul instationnaire on doit fixer Time Step Size, et pour cela on applique l'équation suivante :

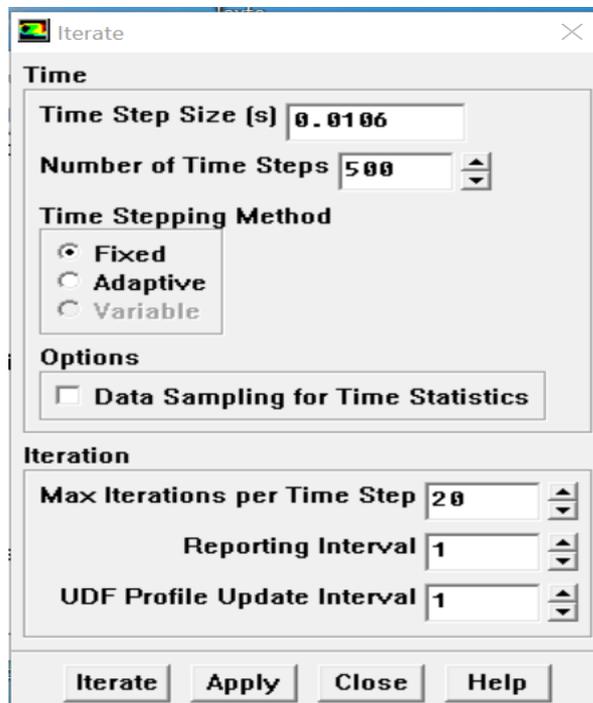


Figure 3-35 : Démarrage de calcul

Les résultats obtenus après la convergence :

- A 5 secondes :

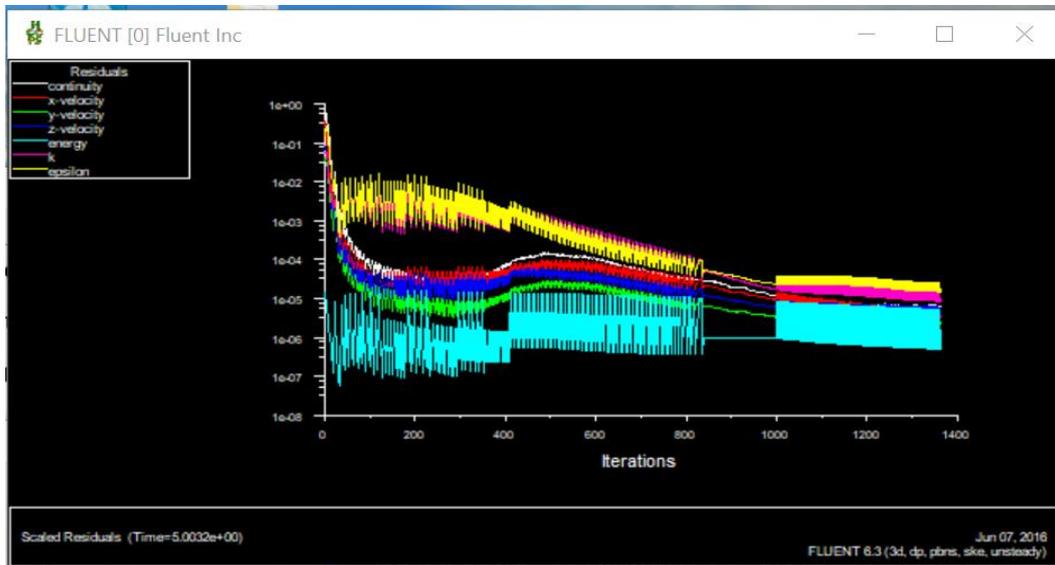


Figure 3-36 : L'itération à 5s

- A 15 secondes :

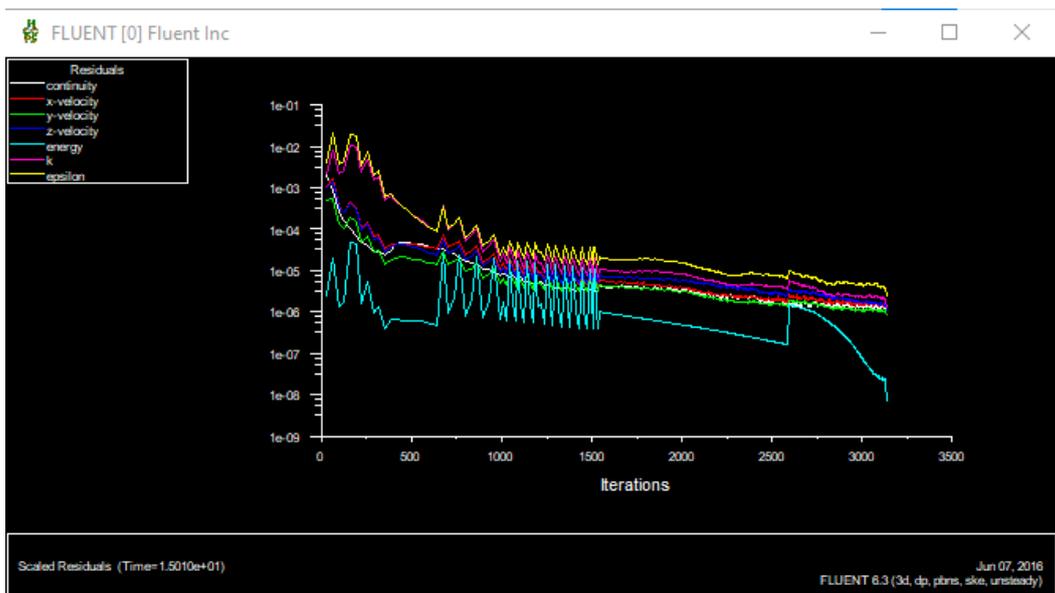


Figure 3-37 : L'itération à 15s

- **Cinquièmement :**

**A : Disply** → **Grid**

Affichage de la géométrie et le maillage

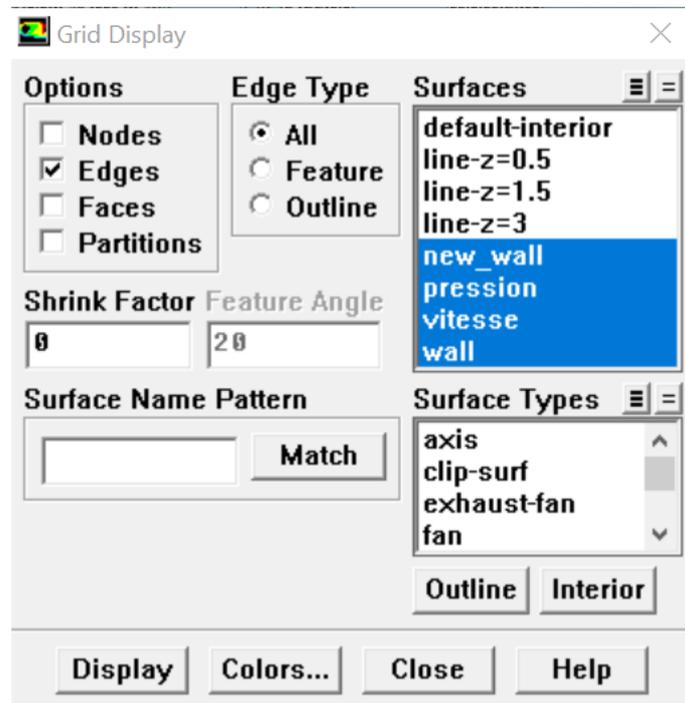


Figure 3-38 : Affichage du maillage

Cliquons sur 'Display' pour l'affichage de la géométrie maillée, et on obtient :



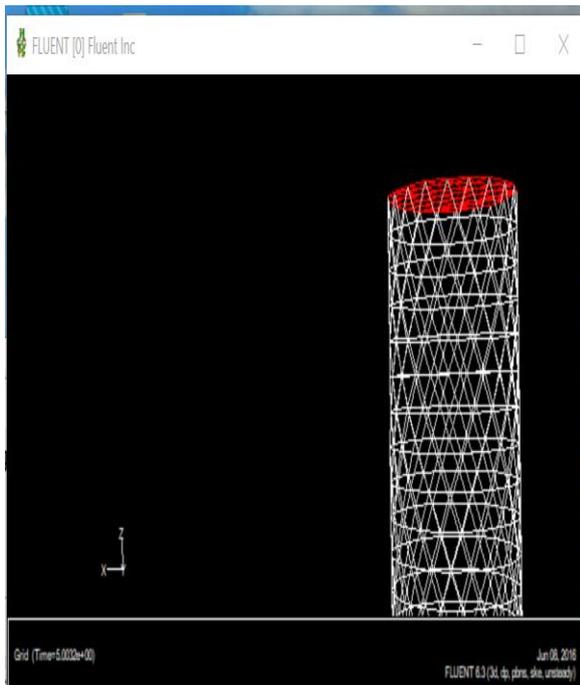
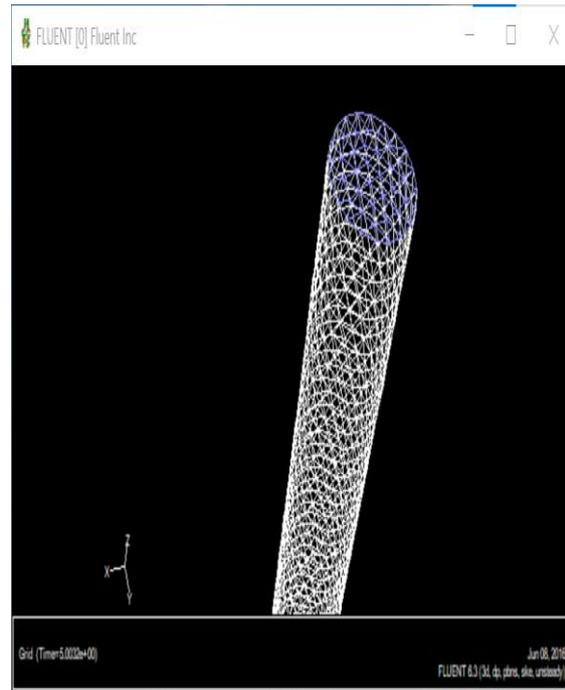
A l'entréeA la sortie

Figure 3-39 : Affichage de la géométrie et maillage sur FLUENT

**B : Display** → **Contour**

Pour l'affichage des différents contours (vitesse, température, pression), il faut d'abord créer des surfaces sur **Surface** → **Plane**.

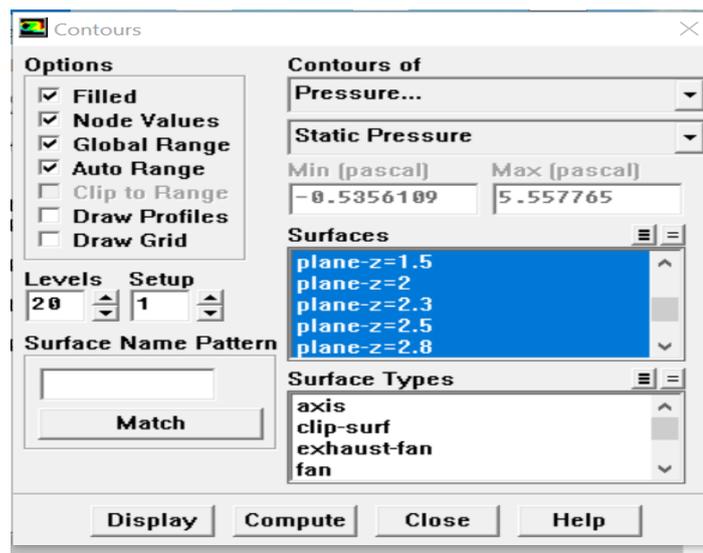


Figure 3-40 : Affichage des contours

**C : Plot** → **XY Plot**

Pour l'affichage des différents courbes (vitesse, température, pression), faut créer des lignes sur **Surface** → **Line/Rake**

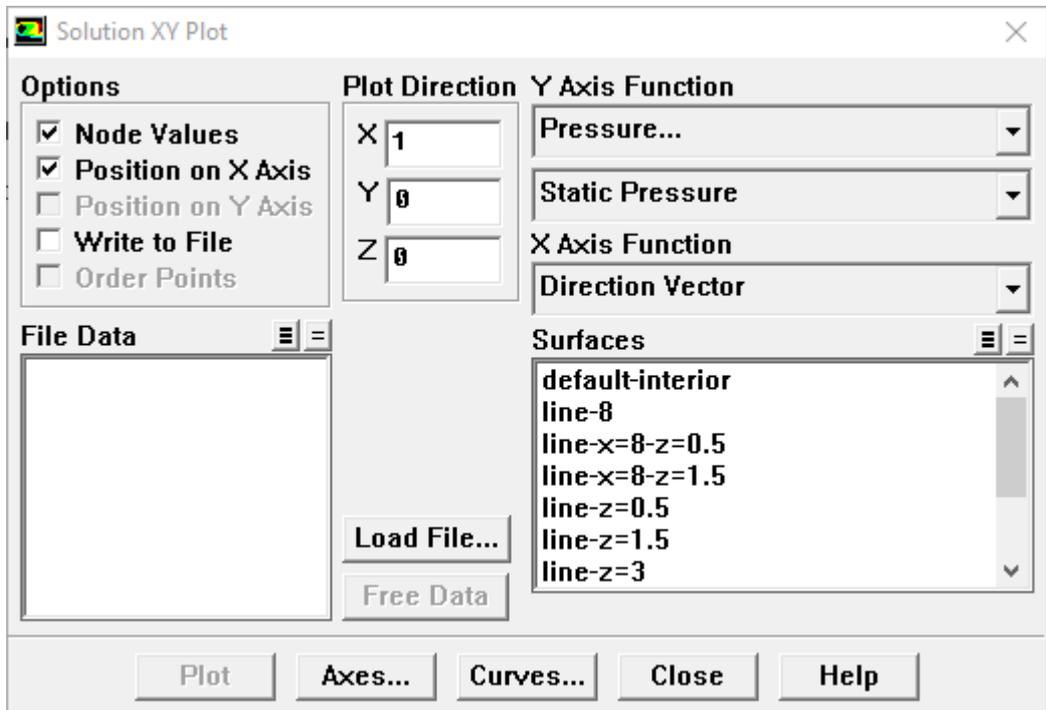


Figure 3-41 : La création des courbes

- **Finalement :**

**File** → **Write** → **Case & Data....**

A travers cette procédure on sauvegarde notre fichier des résultats

# **CHAPITRE IV**

## **RESULTATS ET DEPOUILLEMENTS**

## 1. Validation :

Les résultats de la simulation numérique de l'écoulement turbulent dans la conduite des deux modèles de notre étude ont été réalisés par le logiciel FLUENT 6.3.

Les résultats ont été validé par les travaux antérieurs. [44]

## 2. Contour (vitesse, température, pression) :

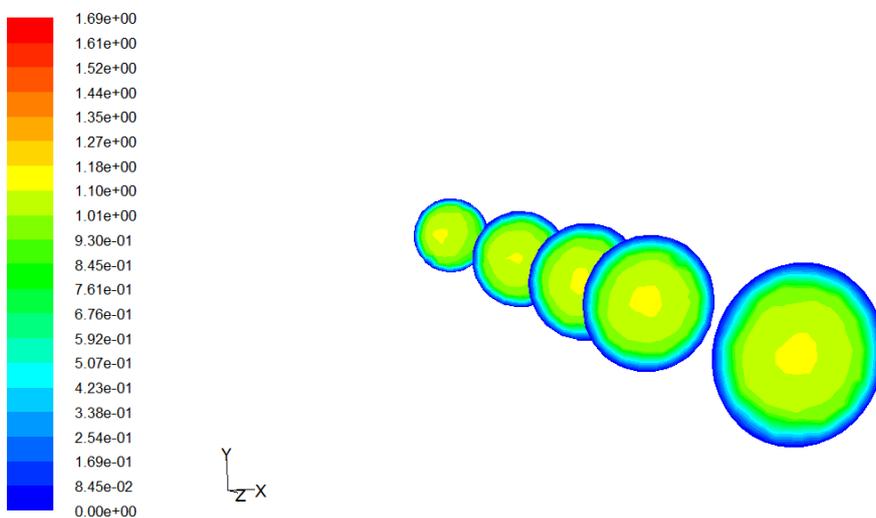
### 2.1. Contour de la vitesse :

Les figures suivantes illustrent le comportement de la vitesse pour les deux configurations étudiées. (Figure4-1) et (figure4-2).

Pour les deux configurations la valeur de la vitesse est maximale au centre, et la condition de non-glissement au niveau des parois.

On visualise que les valeurs de la vitesse sont importantes pour la première configuration (jusqu'à 1.18 m/s) on comparaison avec la deuxième configuration (jusqu'à 1.11 m/s).

- Première configuration :

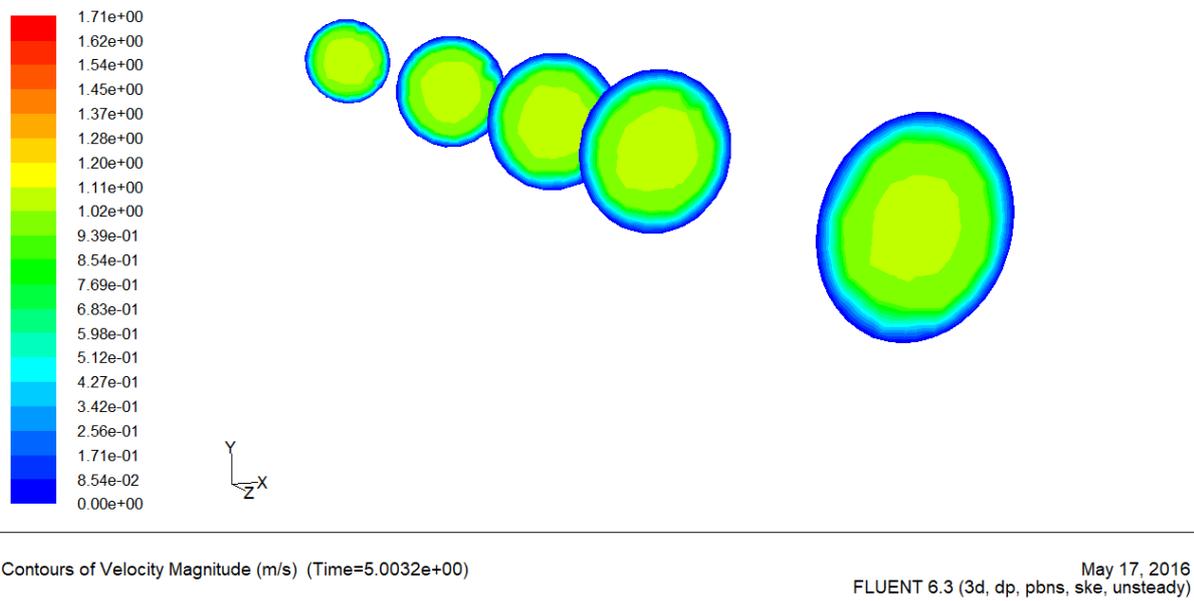


Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=5.0032e+00)

May 21, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-1** : Contour de vitesse configuration 1

- Deuxième configuration :



**Figure 4-2 :** Contour de vitesse configuration 2

## 2-2. Contour de la température :

Les figures suivantes montrent l'évolution du contour de la température à différentes sections à la position ( $z=1.5\text{m}$  ;  $z=2\text{m}$  ;  $z=2.3\text{m}$  ;  $z=2.5$  et  $z=2.8$ ).

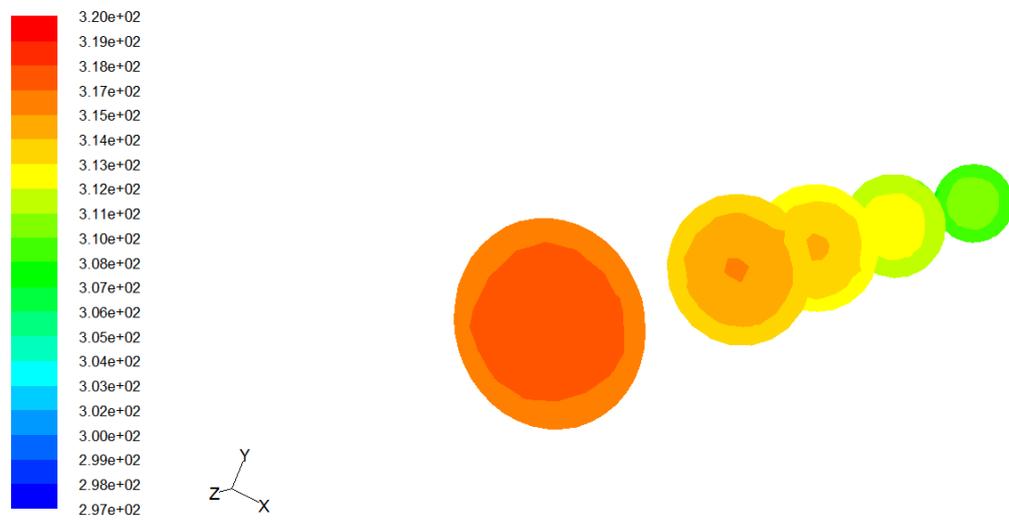
Pour  $t=5$  seconds :

- Première configuration :

Pour la section à la position  $z=2.8\text{m}$  (à l'entrée de l'air), la valeur de la température est de  $T=318\text{K}$ , cette température va diminuer jusqu'à  $T=308\text{K}$  pour la section à la position  $z=1.5\text{m}$ . (figure 4-3)

A la sortie de la conduite de notre modèle géothermique, la température de l'air arrive jusqu'à  $T=298\text{K}$ . (figure 4-4)

A l'entrée :

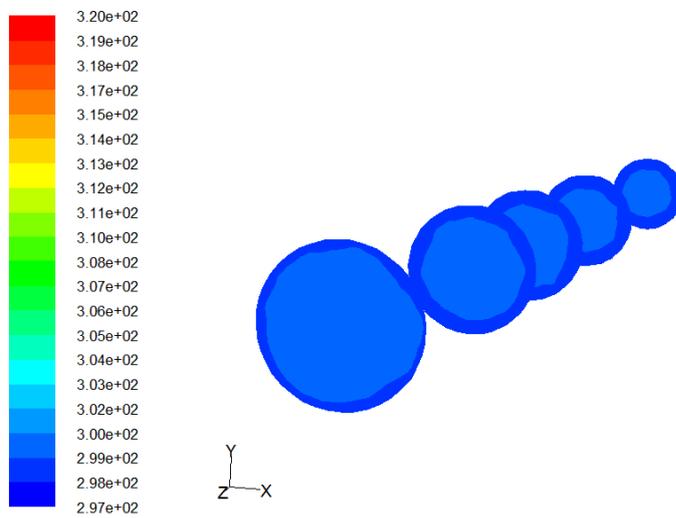


Contours of Total Temperature (k) (Time=5.0032e+00)

May 21, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-3** : Contour de température à 5seconds à l'entrée configuration 1

A la sortie :



Contours of Total Temperature (k) (Time=5.0032e+00)

May 21, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-4** : Contour de température à 5seconds à la sortie configuration 1

- Deuxième configuration :

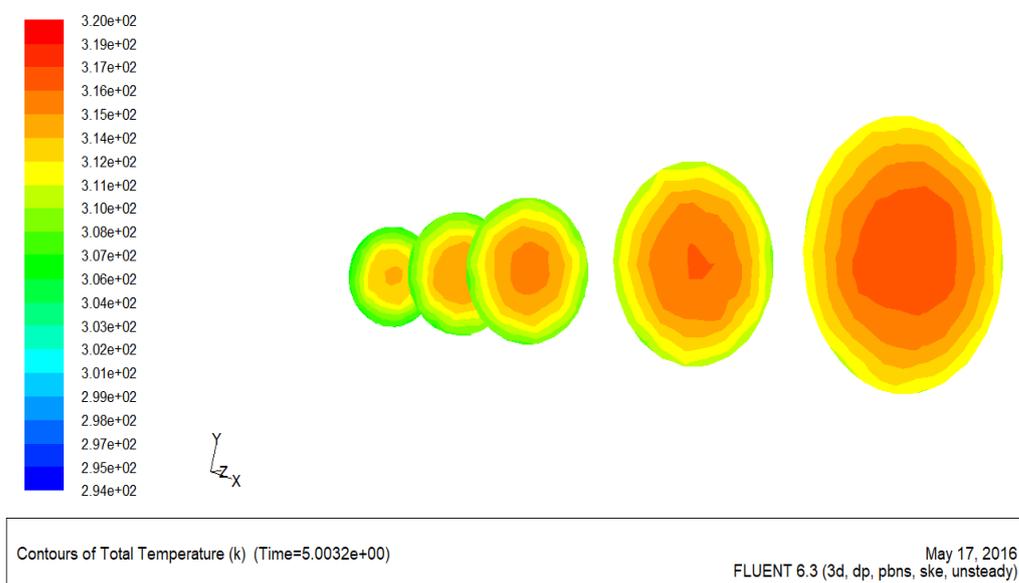
Les figures suivantes représentent le contour de la température à l'entrée et à la sortie de notre modèle géothermique pour la deuxième configuration.

Pour la section à la position  $z=2.8\text{m}$  (à l'entrée de l'air), la valeur de la température est de  $T=318\text{K}$ , cette température va diminuer jusqu'à  $T=308\text{K}$  pour la section à la position  $z=1.5\text{m}$ . (figure 4-5).

A la sortie de la conduite de notre modèle géothermique, la température de l'air arrive jusqu'à  $T=295\text{K}$ . (figure 4-6).

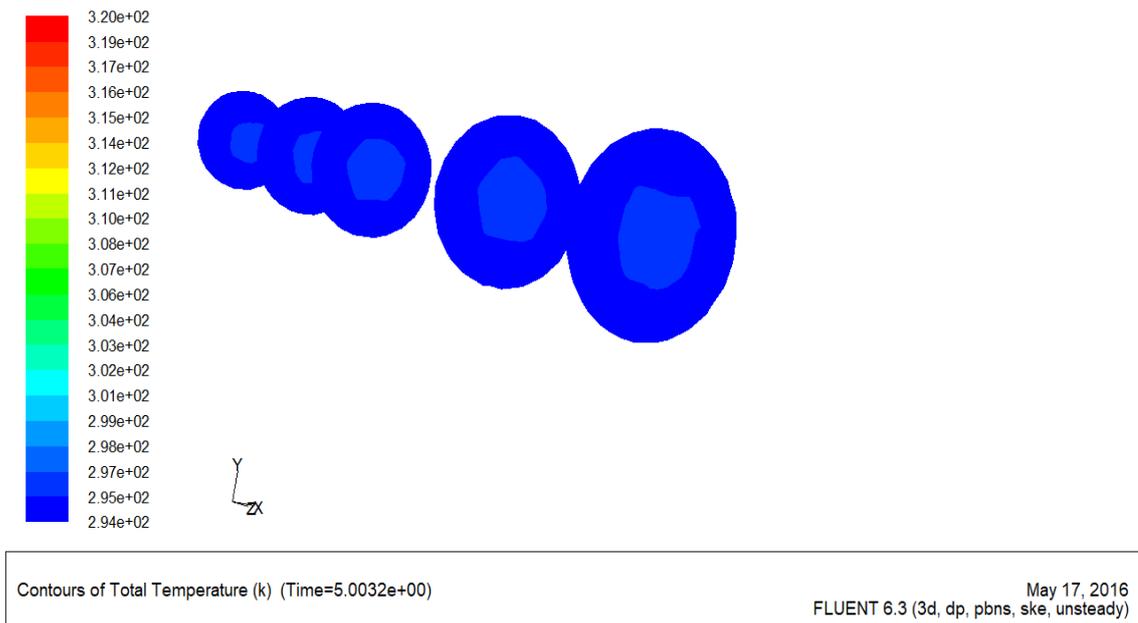
La variation de l'évolution de la chaleur de l'air est plus importante (à différentes sections), pour la deuxième configuration par rapport à la première configuration.

A l'entrée :



**Figure 4-5** : Contour de température à 5seconds à l'entrée géométrie 2

A la sortie :



**Figure 4-6** : Contour de température à 5seconds à la sortie configuration 2

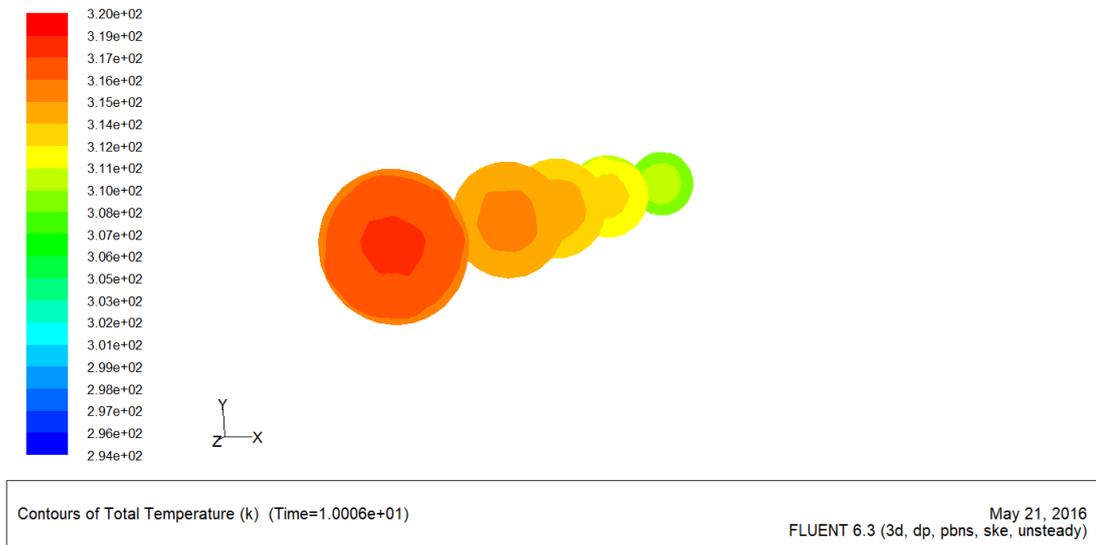
Pour **10 seconds** :

- Première configuration :

Pour l'évolution de la température à  $t=10s$  à partir de l'entrée de notre modèle géothermique jusqu'à la section à la position  $z=1.5m$ , on remarque l'influence du temps sur l'échange de chaleur de l'air.

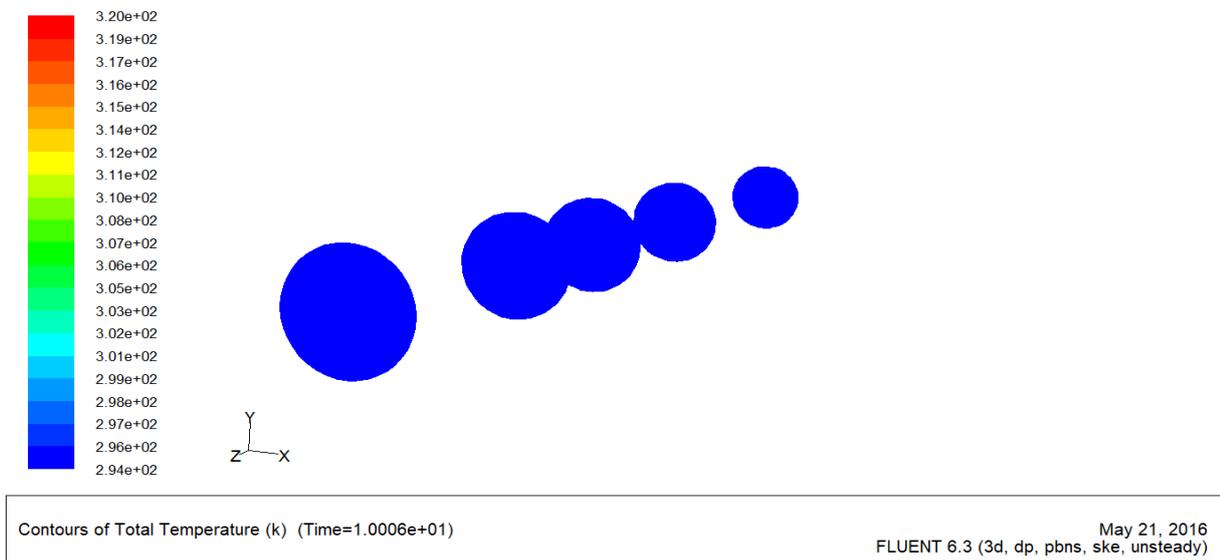
A la sortie, on remarque toujours l'influence du temps sur l'échange de chaleur de l'air.

A l'entrée :



**Figure 4-7** : Contour de température à 10seconds à l'entrée configuration 1

A la sortie :

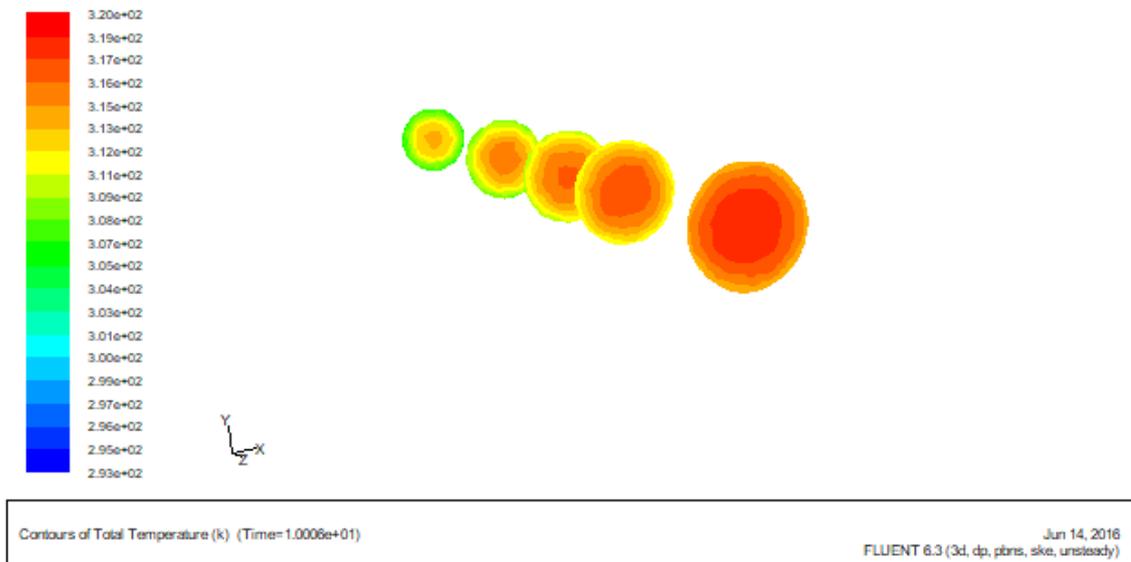


**Figure 4-8** : Contour de température à 10seconds à la sortie configuration 1

- Deuxième configuration :

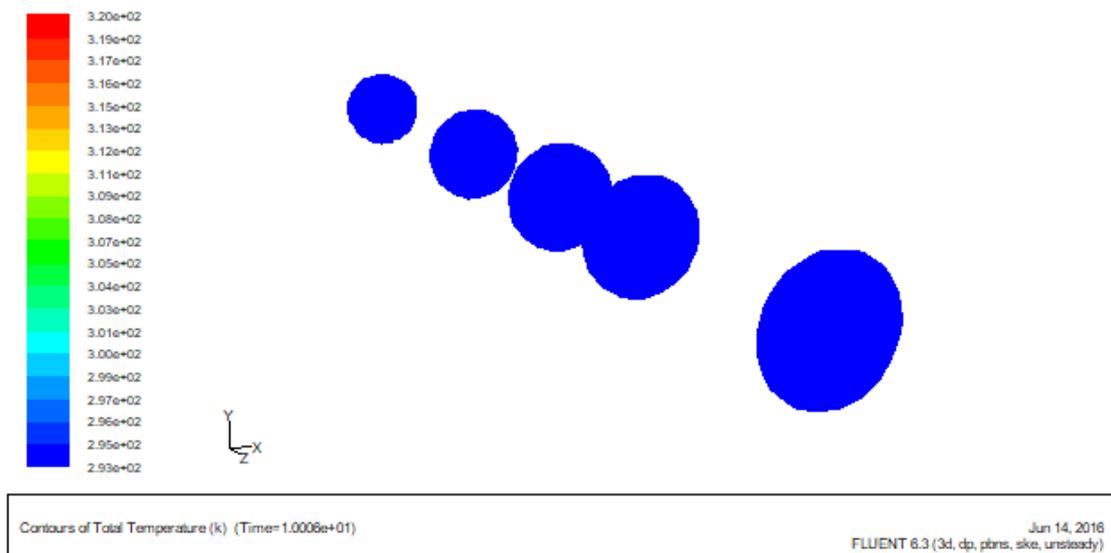
La différence de la température entre la paroi et l'air est moins importante lorsque on arrive à 10 seconds par rapport à celle de  $t=5s$ , ce qui a provoqué une diminution de la température à la sortie.

A l'entrée :



**Figure 4-9** : Contour de température à 10seconds à l'entrée configuration 2

A la sortie :



**Figure 4-10** : Contour de température à 10seconds à la sortie configuration 2

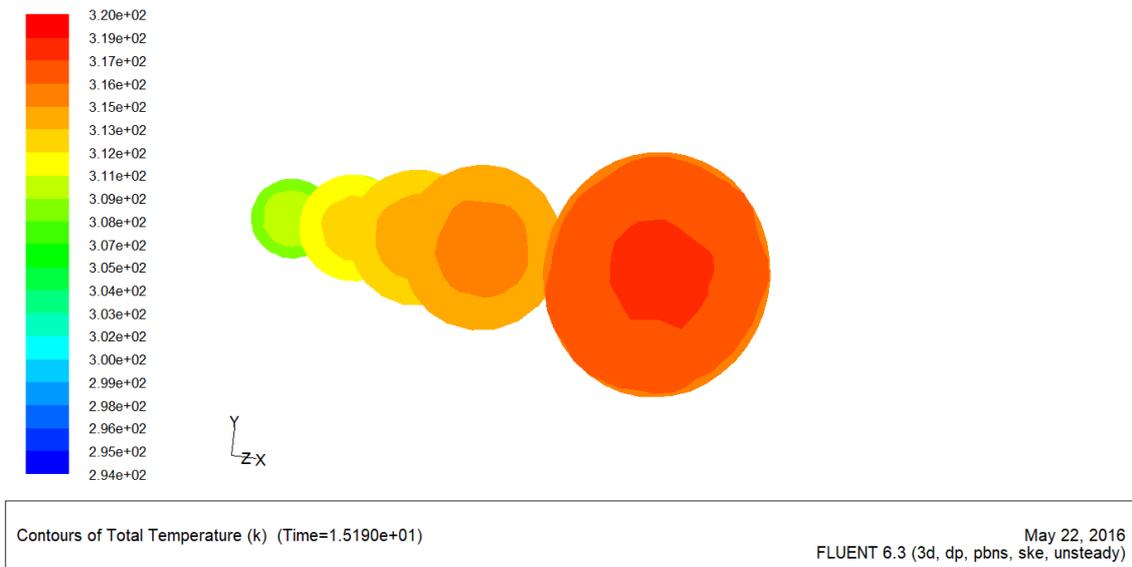
Pour 15 seconds :

- Première configuration :

A  $t=15s$ , la différence de température de fluide arrive à 305K-308K à la section de la position  $z=1.5$ .

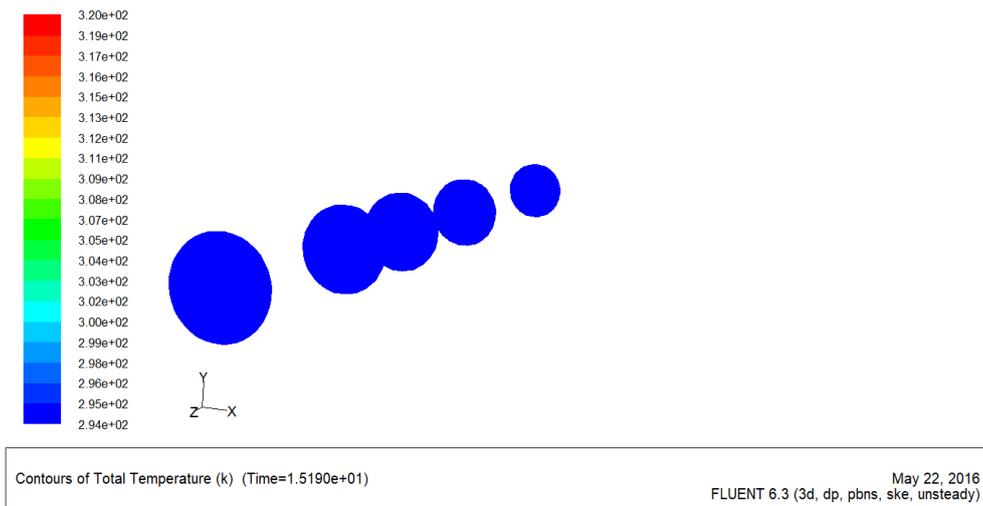
Pour la sortie l'échange de la chaleur est presque homogène, avec une différence de température entre 294K-296K tout le long des sections.

A l'entrée :



**Figure 4-11** : Contour de température à 15seconds à l'entrée configuration 1

A la sortie :

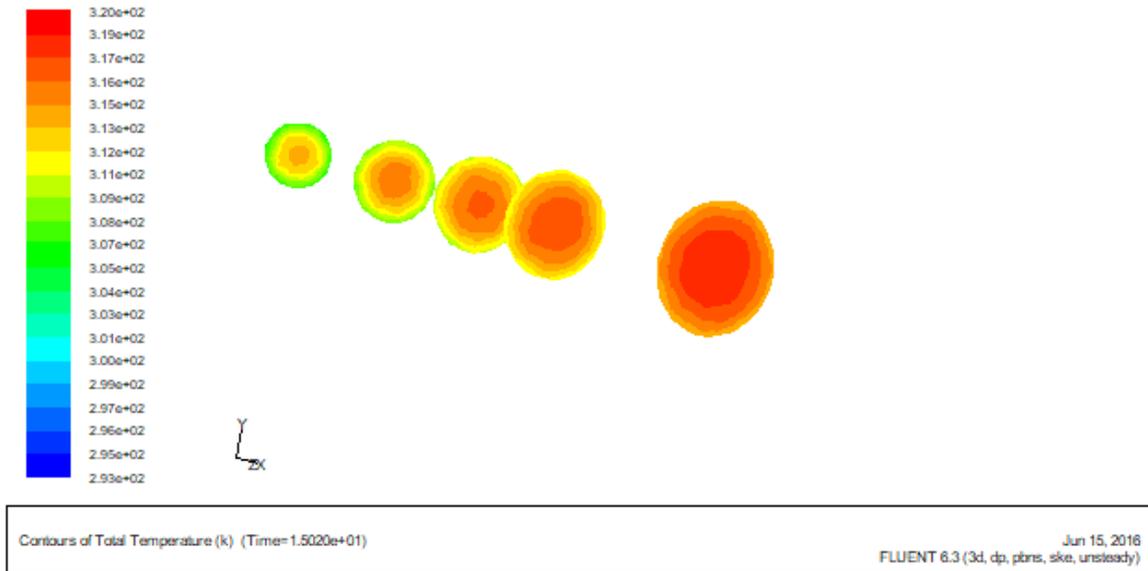


**Figure 4-12** : Contour de température à 15seconds à la sortie configuration 1

- Deuxième configuration :

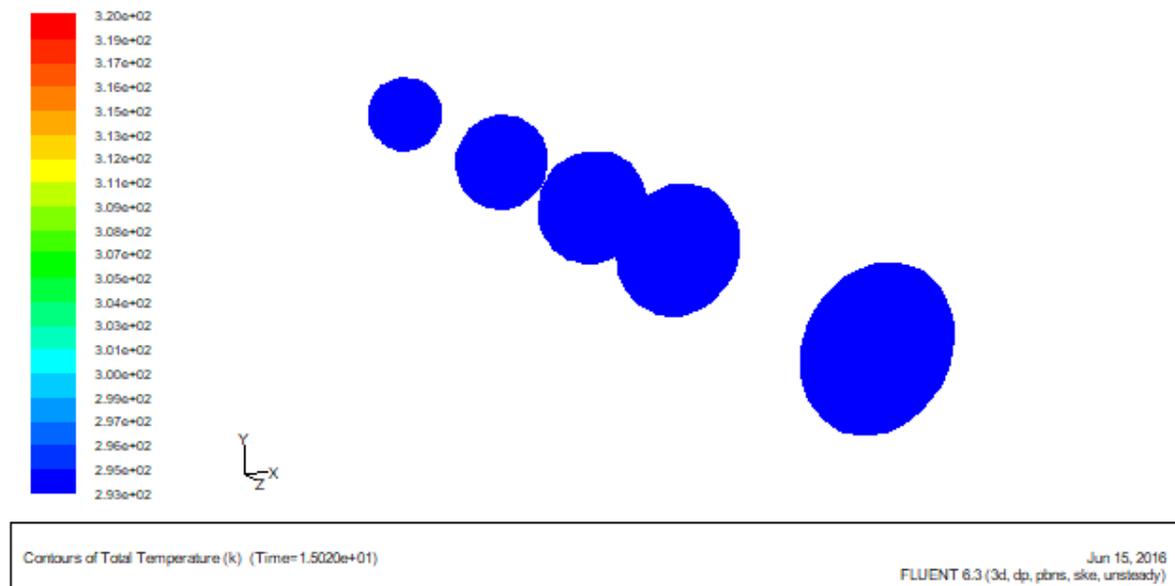
L'effet du temps, de la vitesse et de la longueur de la gaine génère un meilleur échange de chaleur.

A l'entrée :



**Figure 4-13** : Contour de température à 15seconds à l'entrée configuration 2

A la sortie :



**Figure 4-14** : Contour de température à 15seconds à la sortie configuration 2

### 2-3. Contours de pression :

Les figures suivantes montrent l'évolution du contour de la pression à l'entrée (figure 4-15, figure 4-17, figure 4-19, figure 4-21, figure 4-23, figure 4-25), et à la sortie du modèle géothermique (figure 4-16, figure 4-18, figure 4-20, figure 4-22, figure 4-24, figure 4-26).

On visualise une diminution de la pression à la sortie de la gaine, ce qui démontre la proportionnalité entre la pression et la température.

Pour **5 seconds** :

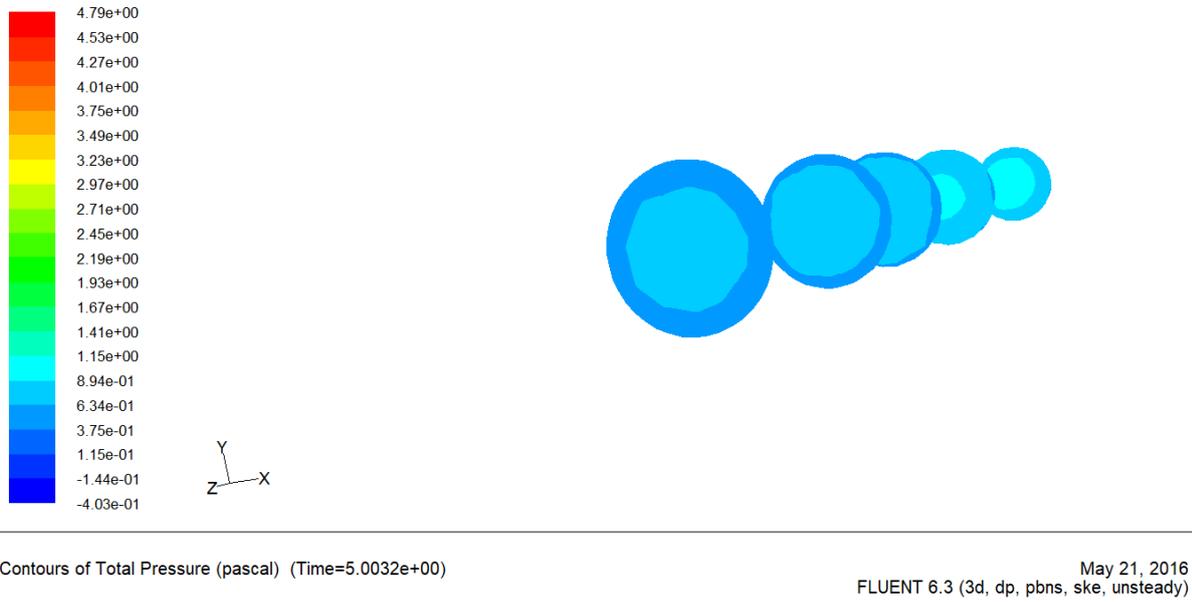
- Première configuration :

A l'entrée :



**Figure 4-15** : Contour de pression à 5seconds à l'entrée configuration 1

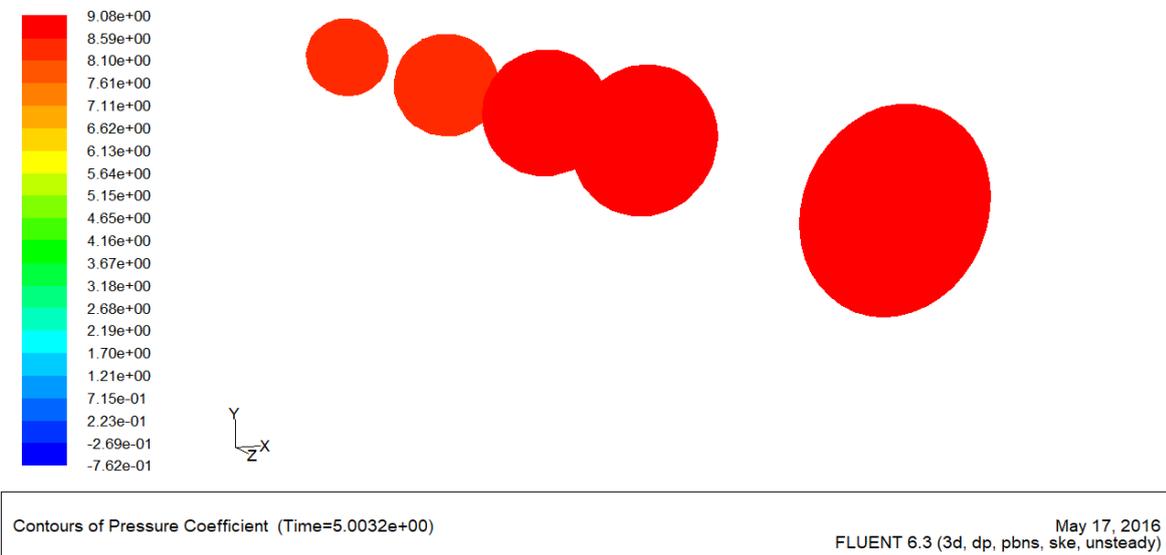
A la sortie :



**Figure 4-16** : Contour de pression à 5seconds à la sortie configuration 1

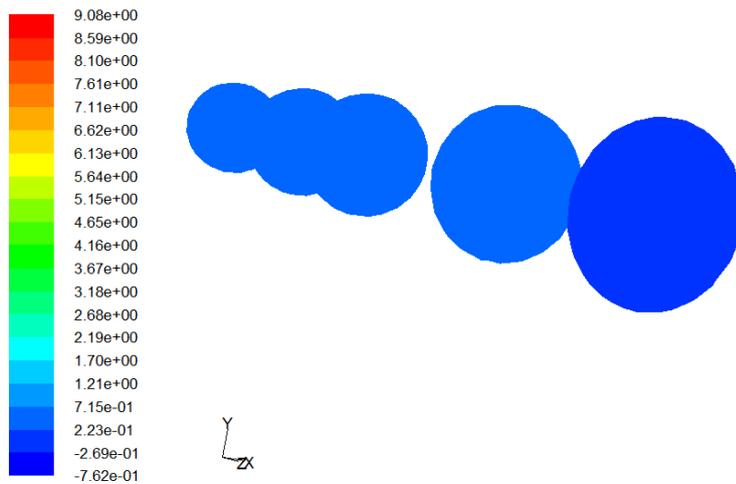
- Deuxième configuration :

A l'entrée :



**Figure 4-17** : Contour de pression à 5seconds à l'entrée configuration 2

A la sortie :



Contours of Pressure Coefficient (Time=5.0032e+00)

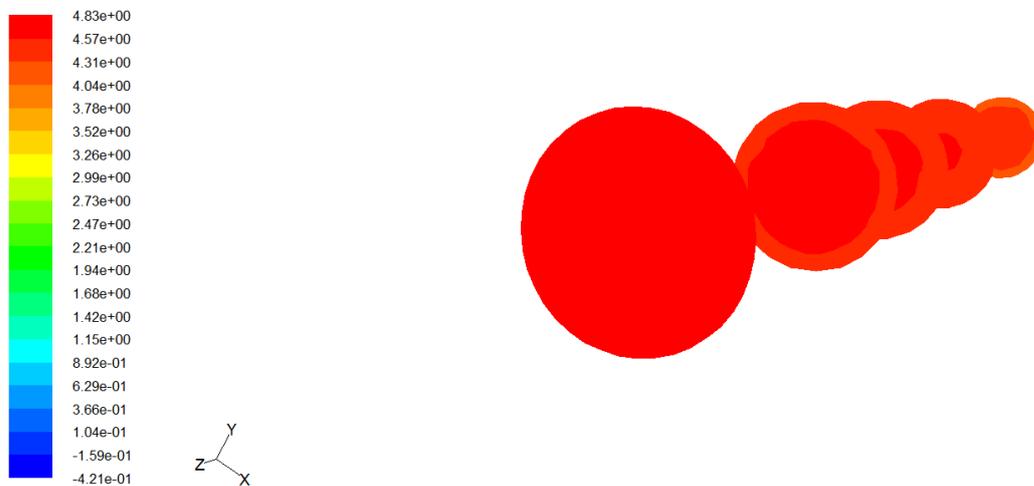
May 17, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-18** : Contour de pression à 5seconds à la sortie configuration 2

Pour 10 seconds :

- Première configuration :

A l'entrée :

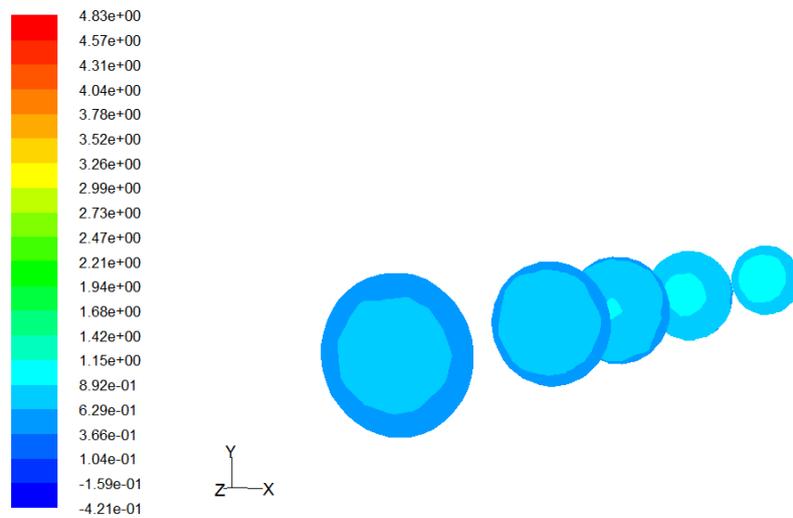


Contours of Total Pressure (pascal) (Time=1.0006e+01)

May 21, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-19** : Contour de pression à 10seconds à l'entrée configuration 1

A la sortie :



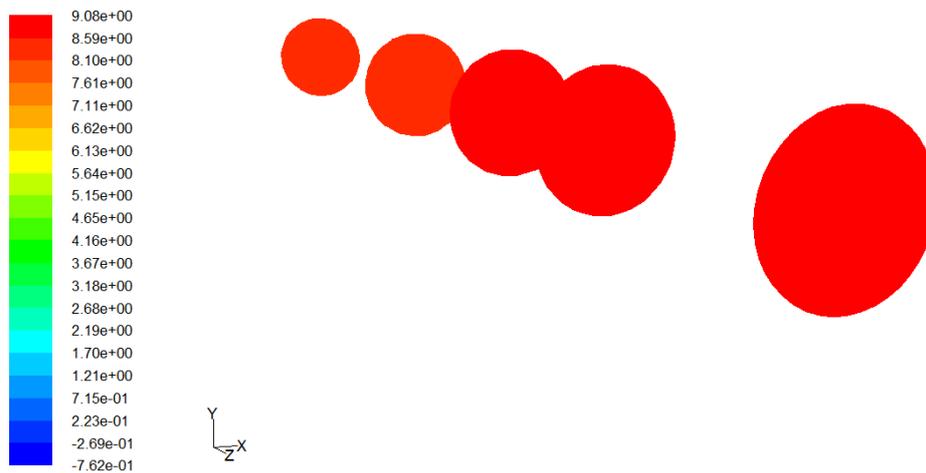
Contours of Total Pressure (pascal) (Time=1.0006e+01)

May 21, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-20** : Contour de pression à 10seconds à la sortie configuration 1

- Deuxième configuration :

A l'entrée :

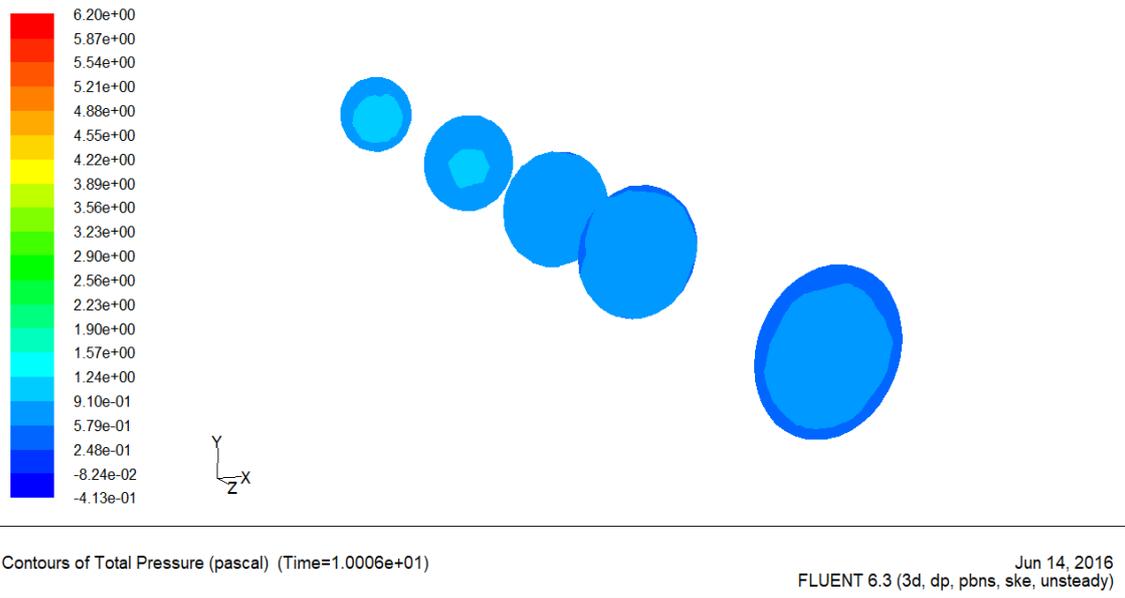


Contours of Pressure Coefficient (Time=5.0032e+00)

May 17, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-21** : Contour de pression à 10seconds à l'entrée configuration 2

A la sortie :

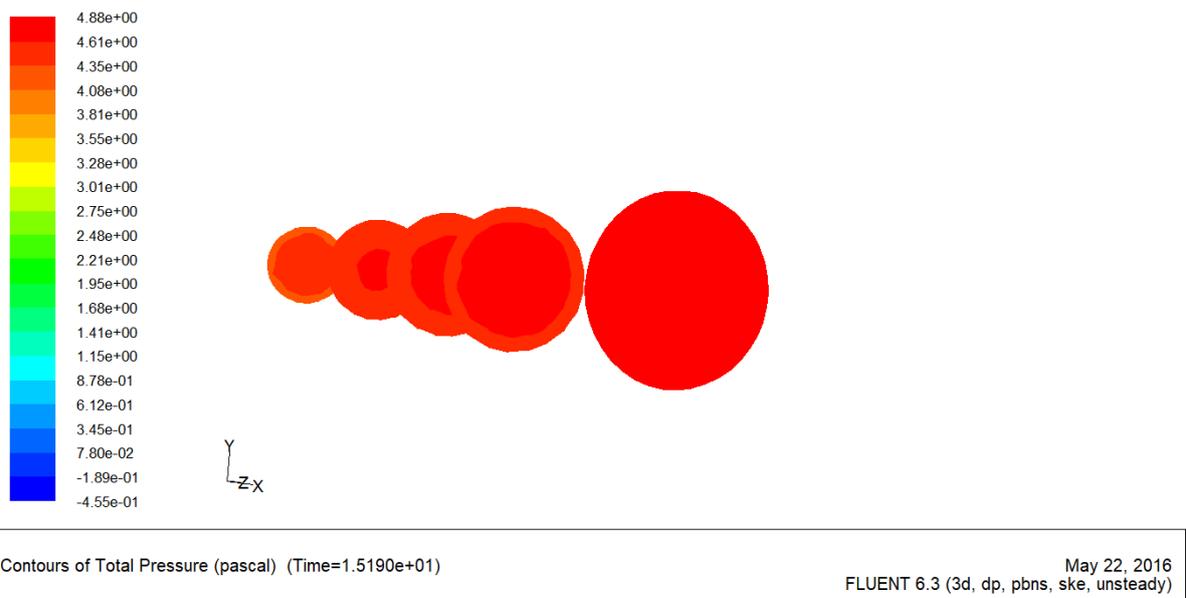


**Figure 4-22** : Profil de pression à 10seconds à la sortie configuration 2

Pour 15 seconds :

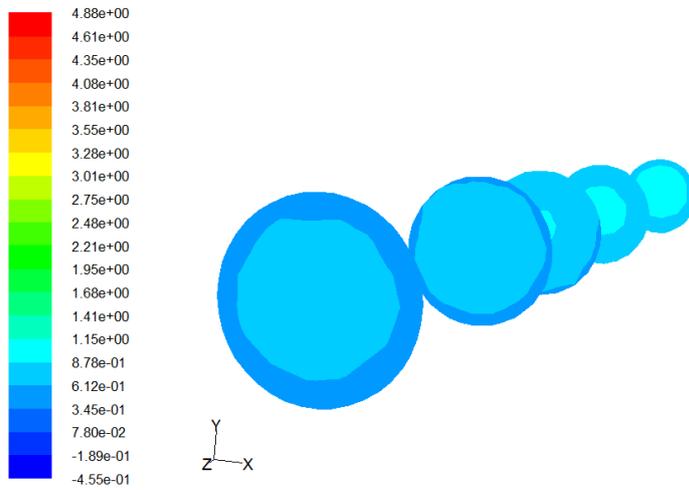
- Première configuration :

A l'entrée :



**Figure 4-23** : Contour de pression à 15seconds à l'entrée configuration 1

A la sortie :



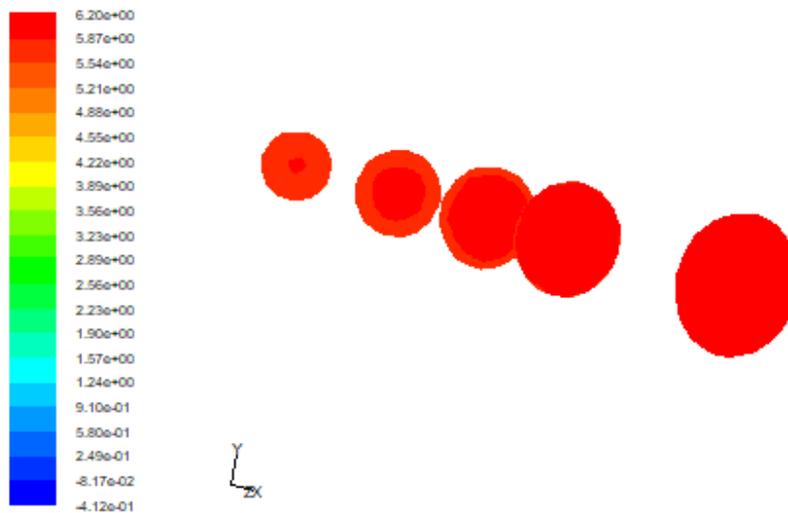
Contours of Total Pressure (pascal) (Time=1.5190e+01)

May 22, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-24** : Contour de pression à 15seconds à la sortie configuration 1

- Deuxième configuration :

A l'entrée :

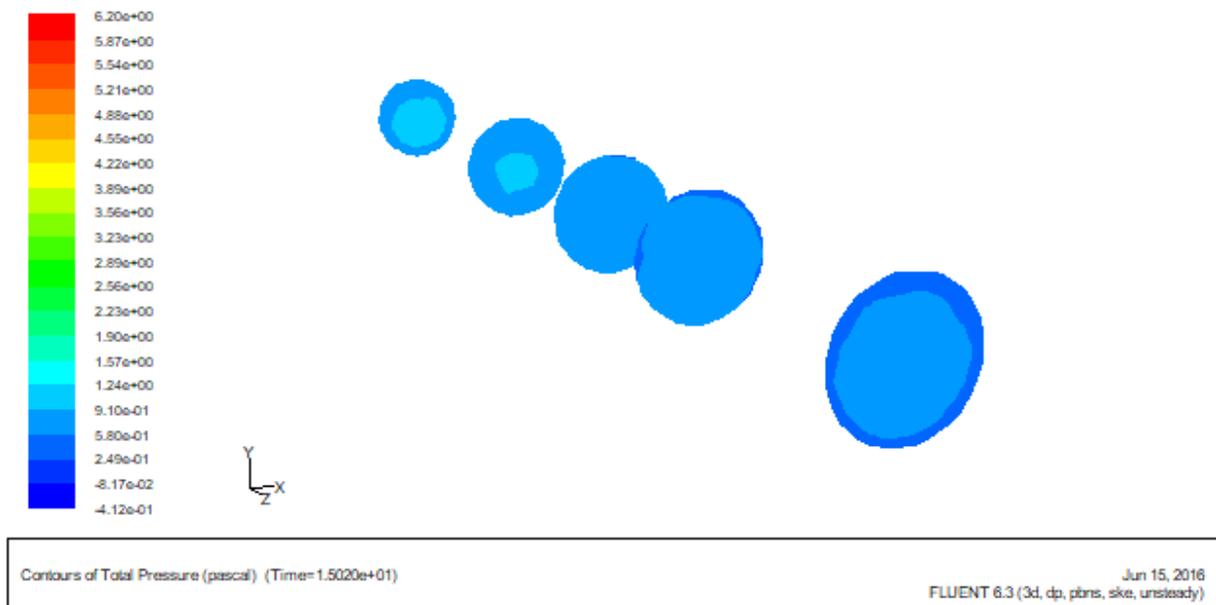


Contours of Total Pressure (pascal) (Time=1.5020e+01)

Jun 15, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

**Figure 4-25** : Contour de pression à 15seconds à l'entrée configuration 2

A la sortie :



**Figure 4-26** : Contour de pression à 15seconds à la sortie configuration 2

### 3. Les profils de températures :

\*A l'entrée :

Pour **5,10,15 seconds** :

Les profils de température suivantes figure (4-27) et figure (4-28) illustre l'évolution de la température à l'entrée pour les sections aux positions  $z=0.5\text{m}$  ( $T=310\text{K}$ ),  $z=1.5\text{m}$  ( $T=314\text{K}$ ) et  $z=3\text{m}$  ( $T=320\text{K}$ ).

- Première configuration :

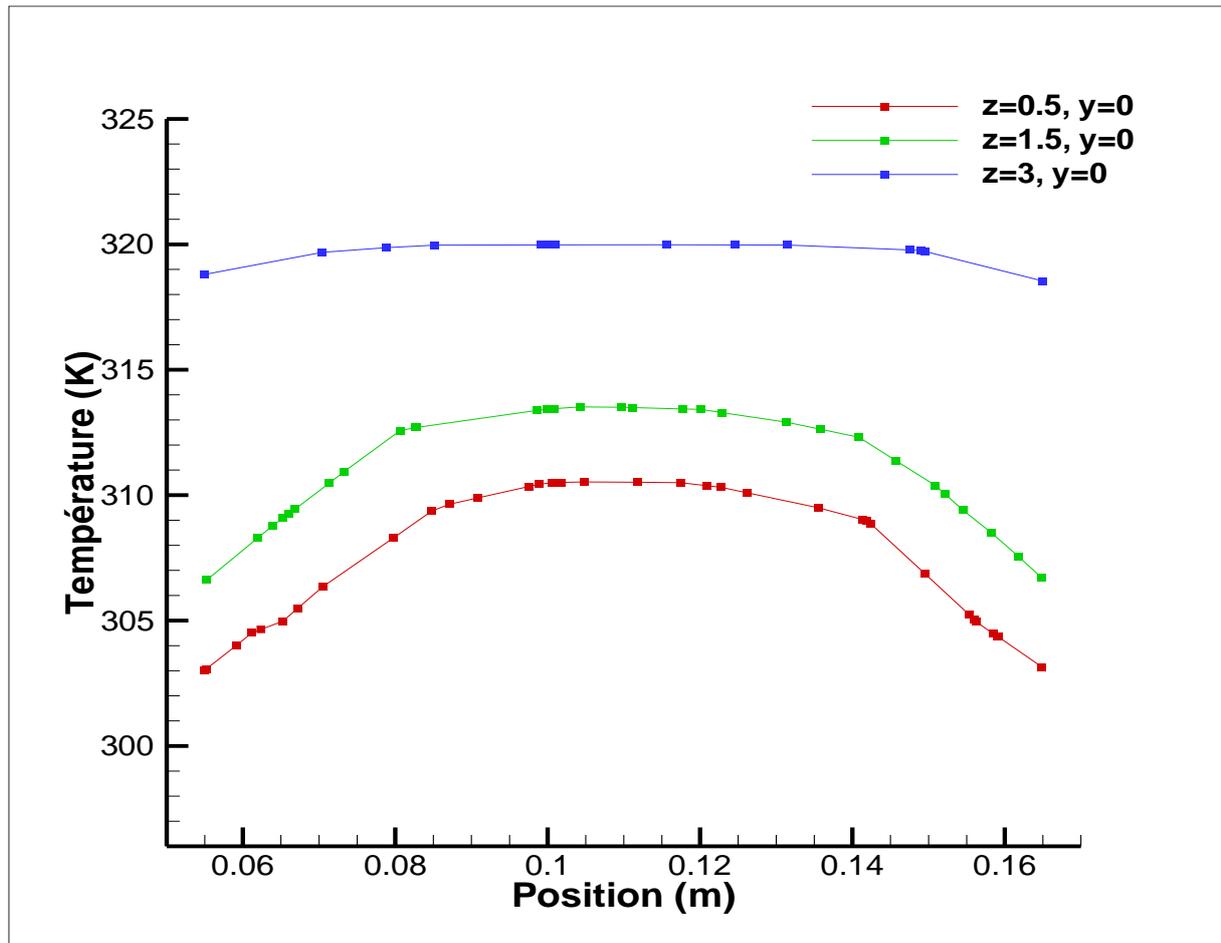


Figure 4-27 : Profil de température à l'entrée configuration 1

- Deuxième configuration :

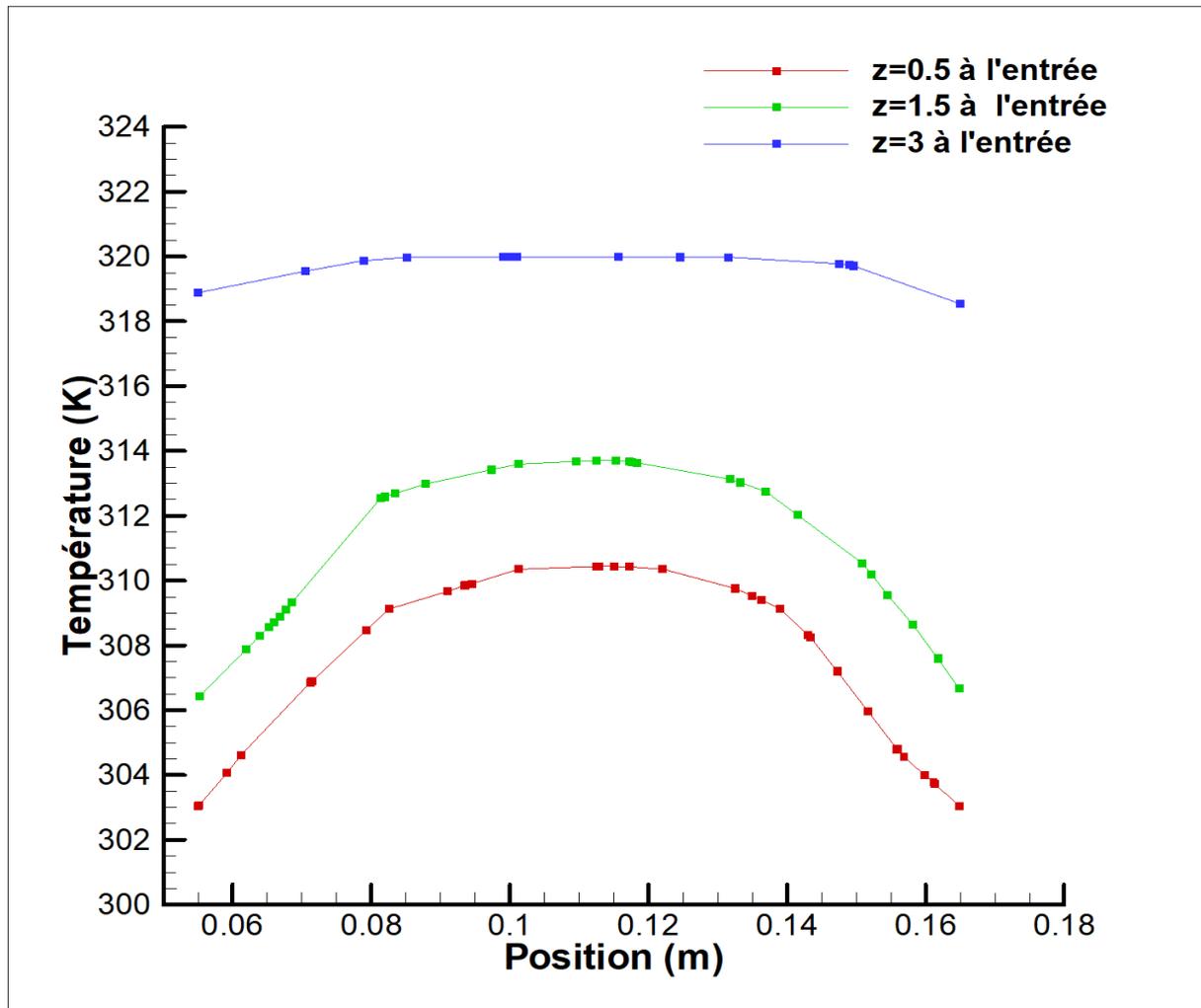


Figure 4-28 : Profil de température à l'entrée configuration 2

\*A la sortie :

Les figures suivantes (figure 4-29, figure 4-31 et figure 4-33) montrent les profils de température de la première configuration aux sections des positions  $z=0.5\text{m}$ ,  $z=1.5\text{m}$  et  $z=3\text{m}$ .

On remarque que à  $t=5\text{s}$  on a  $T=303\text{K}$ , à  $t=10\text{s}$  on a  $T=297\text{K}$  et à  $t=15\text{s}$  on a  $T=295\text{K}$  à la sortie de la conduite.

On conclut que le temps influe sur le refroidissement de l'air.

Les figures suivantes (figure 4-30, figure 4-32 et figure 4-34) montrent les profils de température de la deuxième configuration aux sections des positions  $z=0.5\text{m}$ ,  $z=1.5\text{m}$  et  $z=3\text{m}$ .

On remarque que à  $t=5\text{s}$  on a  $T=295.6\text{K}$ , à  $t=10\text{s}$  on a  $T=294.05\text{K}$  et à  $t=15\text{s}$  on a  $T=293.42\text{K}$  à la sortie de la conduite.

On conclut que la longueur de la gaine influe sur le refroidissement de l'air.

Pour 5 seconds :

- Première configuration :

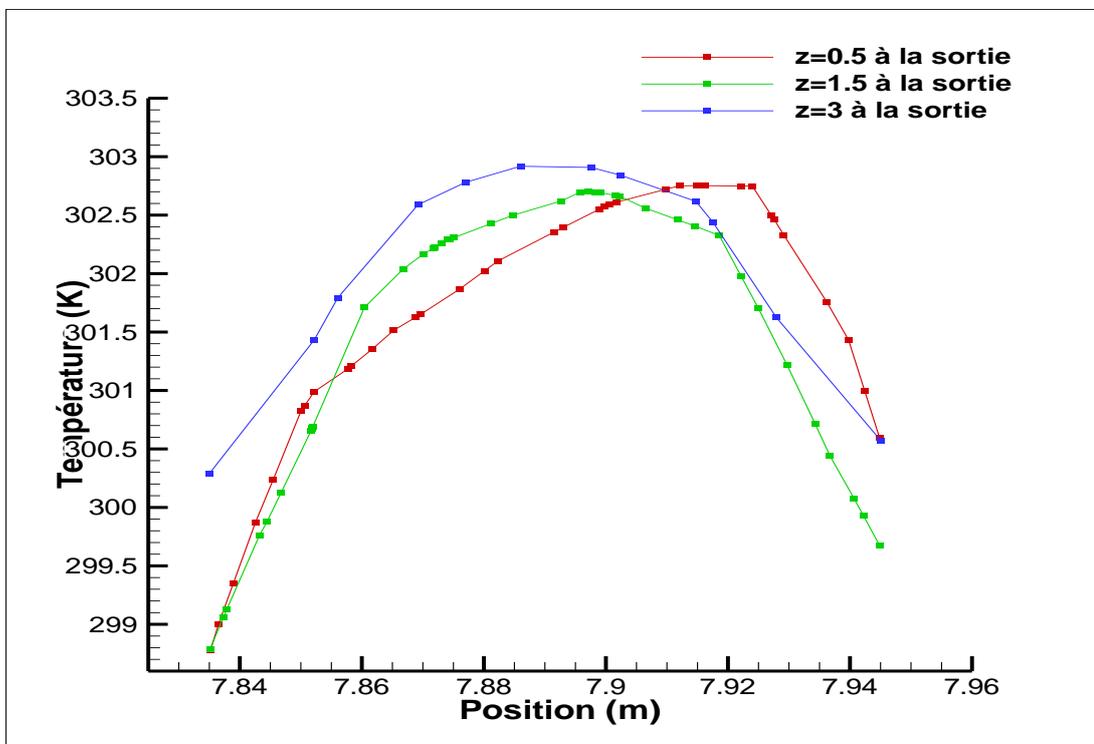


Figure 4-29 : Profil de température à 5seconds à la sortie configuration 1

- Deuxième configuration :

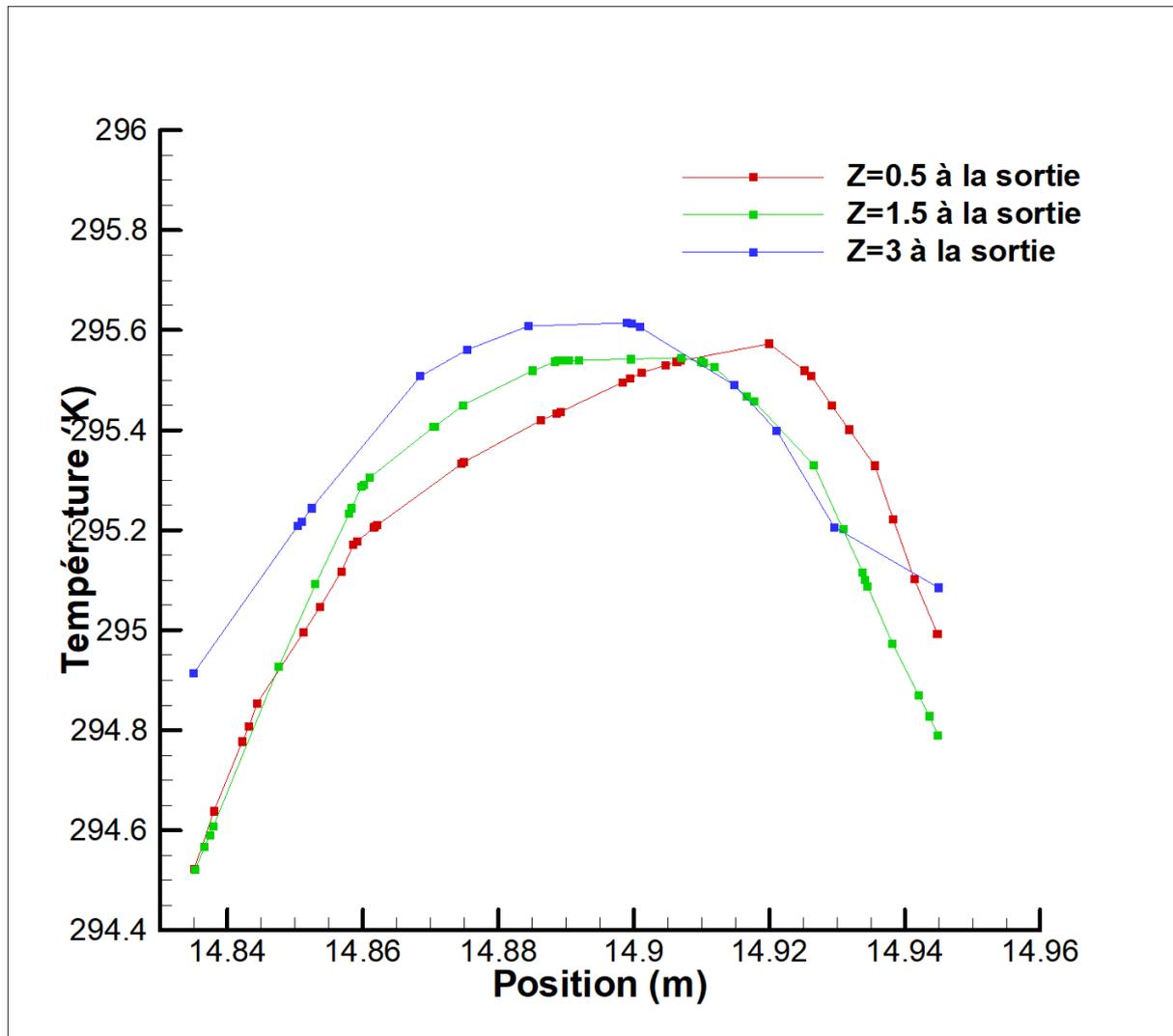


Figure 4-30 : Profil de température à 5seconds à la sortie configuration 2

Pour 10 seconds :

- Première configuration :

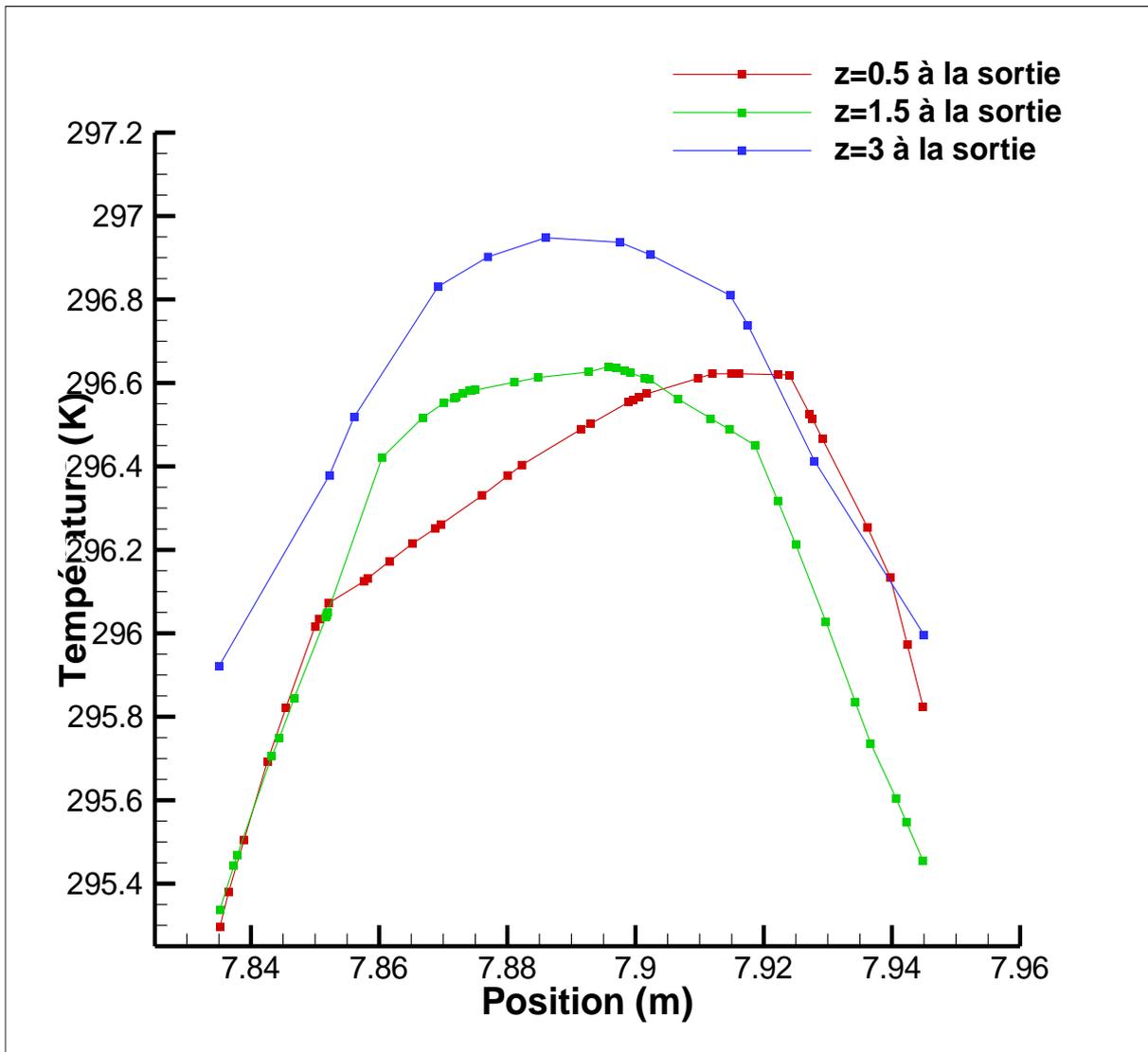


Figure 4-31 : Profil de température à 10seconds à la sortie configuration 1

- Deuxième configuration :

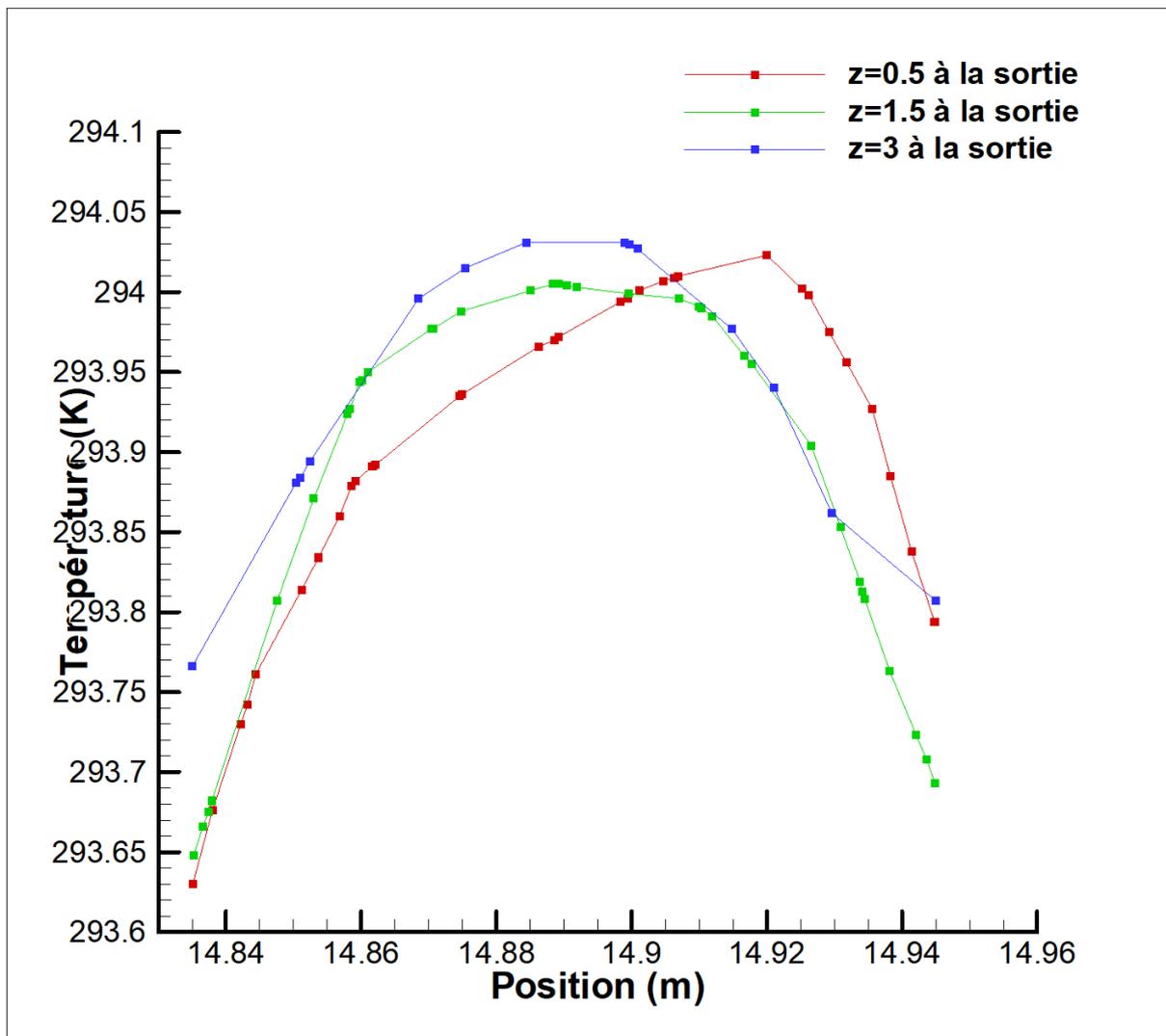


Figure 4-32 : Profil de température à 10seconds à la sortie configuration 2

Pour 15 seconds :

- Première configuration :

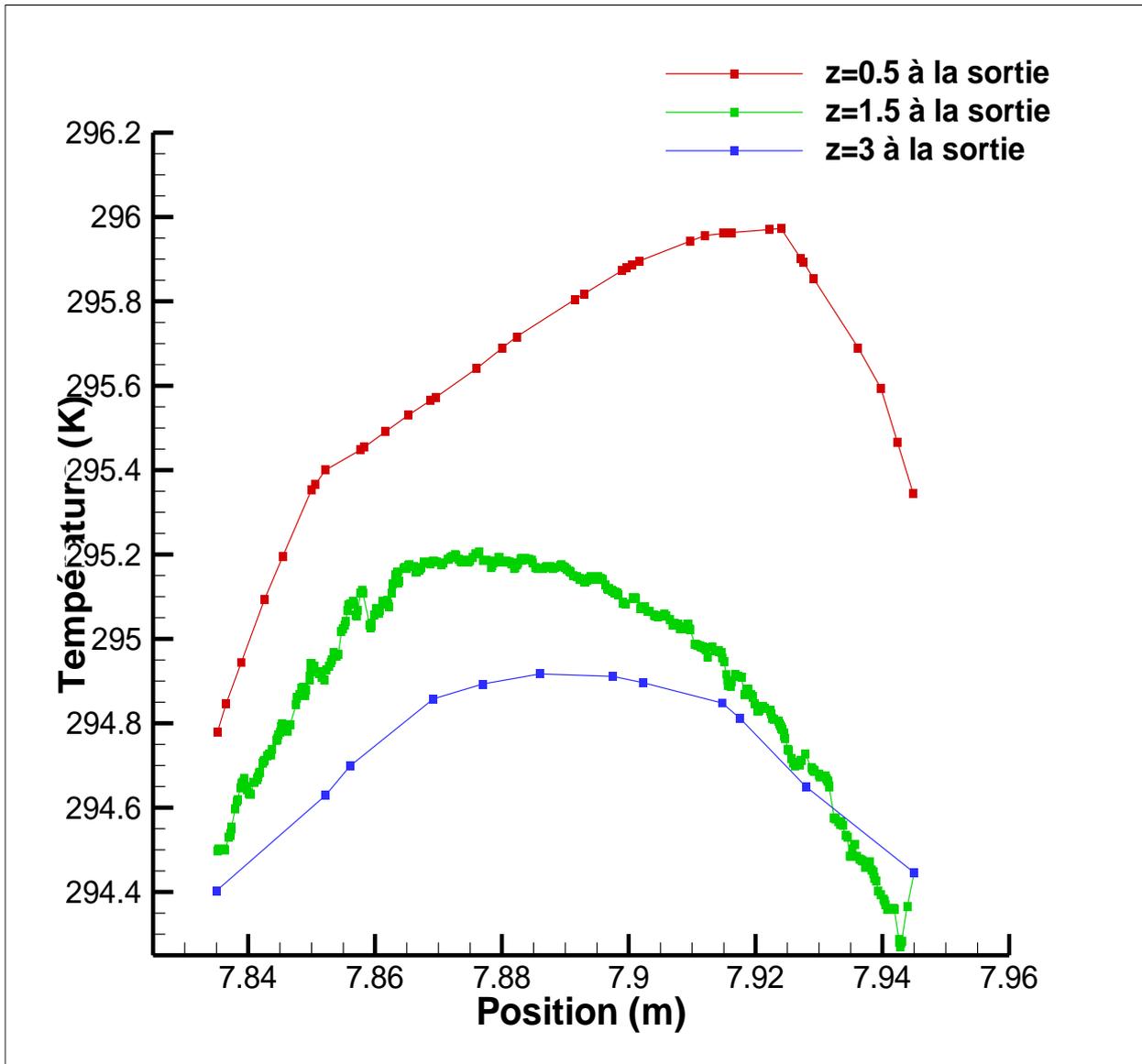


Figure 4-33 : Profil de température à 15seconds à la sortie configuration 1

- Deuxième configuration :

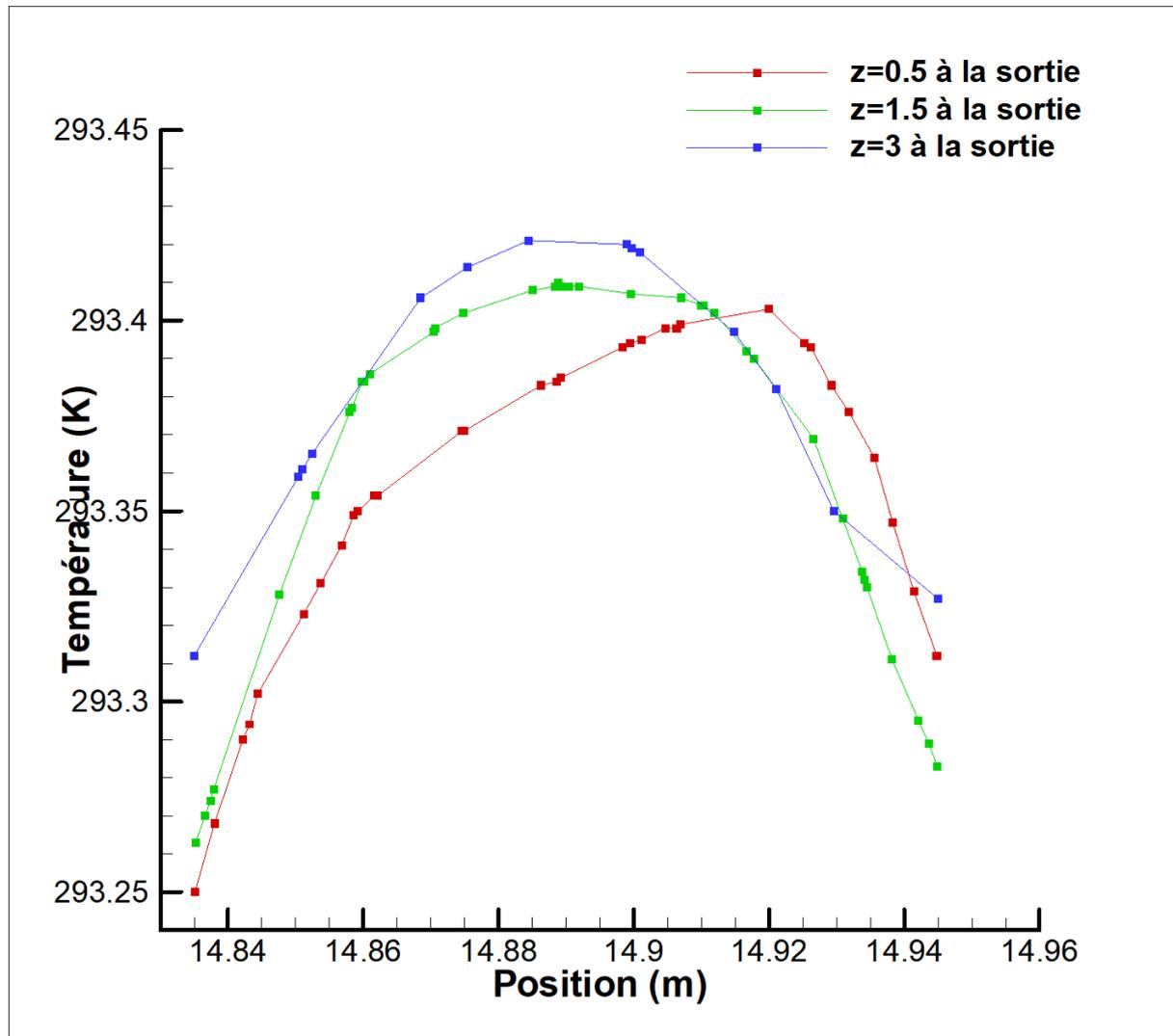


Figure 4-34 : Profil de température à 15seconds à la sortie configuration 2

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Le processus d'aération de refroidissement dans le bâtiment ou les locaux de stockage permet de maintenir une température pour un bon confort thermique la période de chaude.

Une alternative est l'utilisation de systèmes géothermiques également connu sous le nom de puits ou tubes canadiens, qui consistent à utiliser des tuyaux enfouis dans le sol, qui agissent comme un échangeur de chaleur air-sol, fournissant ainsi la température de l'air convenable. Ce projet consiste en une étude préliminaire de l'application de tuyaux dans le système d'aération. Dans cette étude, l'air refroidi sera inséré dans le processus de refroidissement et, par conséquent, il y aura moins de réquisition d'équipements de réfrigération, climatisation et une plus grande efficacité.

La simulation du système dimensionné a été réalisé à l'aide du logiciel Fluent 6.3, pour l'analyse de l'écoulement et de l'échange thermique.

L'échange de chaleur à l'intérieur des tubes des deux configurations étudiées où circule l'air se fait par convection forcée et en régime transitoire (l'échange thermique évolue en fonction du temps).

L'échange thermique important pour la deuxième configuration par rapport à la première configuration.

L'échangeur air/sol réside dans le fait que la différence de température entre l'air entrant et le sol est variable au cours de l'année et dépend de la profondeur d'enfouissement de la longueur de la gaine.

# **BIBLIOGRAPHIE**

**BIBLIOGRAPHIE:**

[1]: Rogner, H.-H., in: Goldemberg, J., Baker, J.W., Ba-N'Daw, S., Khatib, H., Popescu, A., Viray, F.L. (Eds), World Energy Asse

[2]: Anonymous: Thermal use of the underground; Part 1: Fundamentals, approvals, environmental aspects, VDI-Richtlinien VDI 4640/I, Verein deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf (2000)

[3]: Fridleifsson, I.B.: Renewable Sustainable Energy Rev.

[4]: Barbier, E.: Renewable and Sustainable Energy Rev.

[5] : Mohamed Aymen KETHIRI (2019). Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation dans la zone de Biskra. (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).

[6]: Ait Ouali A., Issaad A., Maizi D., Ayadi A., Bouhadjar A. (2019): Geothermal potential in the Ouarsenis-Biban-Kabylie (North Central Algeria): hot spring catalogue Arabian Journal of Geosciences.

[7] : M. Abouriche, A. Fekraoui, F.Z. Kedaid et M. Rezig, 'Atlas des Ressources Géothermiques du Nord de l'Algérie', Rapport Interne CDER, 1988.

[8] : M. Rezig, 'Etude Géothermique de l'Extrémité Est de l'Atlas Saharien', Rapport Interne, CDER, 1992

[9] : M. Rezig, 'Etude Géothermique du Nord-Est de l'Algérie', DEA, Université des Sciences et des Techniques du Languedoc, Montpellier, 1991.

[10] : S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en Géophysique, Université de Boumerdès, Mars 2006.

[11]: Tester J. (2013): The potential role of geothermal energy as a major supplier of primary energy in the U.S. Iceland Geothermal Conference, lecture notes.

[12]: T.L. Boyd, J.W. Lund & D.H. Freeston (2010)

**[13]** : M. SAADEDDINE, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, Mémoire de Magister, Université de Biskra 2013.

**[14]** : La chaleur de la terre : De l'origine de la chaleur à l'exploitation des gisements géothermiques, Raymond Ferrandes, Paris : ADEME Editions 1998 ; Contient des références bibliographiques et un index.

**[15]** : Hackel, S., Nellis, G., & Klein, S. (2008). Optimization of hybrid geothermal heat pump systems. 9th International IEA Heat Pump Conference

**[16]**: Popiel, C.O., Wojtkowiak, J. and Biernacka, B. (2001). Measurements of temperature distribution in ground. Experimental Thermal and Fluid Science

**[17]**: Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.-D., & Bayer, P. (2011). The geothermal potential of urban heat islands. Environmental Research Letters

**[18]** : La géothermie : une énergie d'avenir "réalité en Ile-de-France", Jean Lemale, Florence Jaudin, (avec la collaboration de Y. Benderitter, P. Laplaige, R. Ferrandes ; Coordination Francine Brenière), Paris : ARENE, 1998.

**[19]**: Bloomfield, K.K., J.N. Moore, et R.N. Neilson. 2003. "Geothermal Energy Reduces Greenhouse Gases." [L'énergie géothermique réduit les gaz à effet de serre] Geothermal Resources Council Bulletin 32 [Bulletin 32 du Conseil des ressources géothermiques]

**[20]**: BNEF (Bloomberg New Energy Finance). 2010. Geothermal—LCOE [Géothermique : CUNE],30 mars 2010.

**[21]**: Saemundsson, Axelsson et Steingrímsson, 2011

**[22]**: S. J. Rees, An introduction to ground-source heat pump technology. Elsevier Ltd, 2016.

**[23]**: "What is the difference between a heat sink and a heat spreader? - Quora.". [Accessed : 04-May-2017].

**[24]** : RessourceNatureCANADA, "Les systèmes géothermiques commerciaux," 2002. [Accessed : 19-Apr-2017].

- [25] : R. naturelles C.-C.-V.-Rets. International, “Chapitre Analyse de projets de pompes à chaleur géothermique.,” 2006. [Accessed : 27- Feb-2017].
- [26] : RETscreen, “Analyse de projets de chauffage solaire de l’air,” 2004. [Accessed : 27-Feb-2017].
- [27]: M. A. Bernier, “Closed-Loop Heat Pump Systems,” ASHRAE, no. September, pp. 13–19, 2006.
- [28]: S. Yoon, S.-R. Lee, and G.-H. Go, “Evaluation of the thermal efficiency and a cost analysis of different types of ground heat exchangers in energy piles,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 393–402, 2015.
- [29] : B. de l’efficacité et de l’innovation Énergétiques and © Gouvernement du Québec, “Géothermie : Fiche détaillée,” 2012. [Accessed : 27-Feb-2017].
- [30] : “Pompe à chaleur, que dois-je savoir ? COURS-RESSOURCES,” 2015. [Accessed: 09-May-2017].
- [31]: W. Stephan et al., “Design Handbook for Reversible Heat Pump Systems with and without Heat Recovery,” 2010.
- [32] : Catalogue GEA happel, “Présentation de la GEA HeaMo,” 2011.
- [33]: I. Sarbu and C. Sebarchievici, *Ground-Source Heat Pumps: Fundamentals, Experiments and Applications*, Elsevier. 2015.
- [34]: John R. Thome, *Engineering Data Book III*. Wolverine Tube Inc. 2004.
- [35] : BONTEMPS. A, GUARRIGUE.A, GOUBIER.C, HUETZ.J, MARVILLET.C, MERCIER.P, VIDIL.R. *Echangeurs de chaleur, Techniques de l’ingénieur*,
- [36] : MARVILLET.C, MANIFICAT.A, BERRADA.N et WEBER.C (2014). *E. Book TOME 1 : Echangeurs Thermiques - : Technologies, Conception et dimensionnement*, GRETh.
- [37] : Daniel Guilbault ing., “Géothermie Critères d’analyse et de sélection des systèmes,” 2008.
- [38]: *Geothermal Heat Pumps | Department of Energy*.

[39]: California Energy Commission, Efficiency Division, Building Standards Office. 2013.

[40]: Klaassen, Geothermal Heat Pump Systems. Iowa Energy Center, 2006.

[41]: Michigan DNRE. "Best Practices for Geothermal Vertical Closed-Loop Installations."

(N.d.) : n. pag. Michigan DNRE, Apr. 2010. Web. 1 Dec. 2014.

[42]: "Formation RGE." batiment/forage-geothermique/. [Accessed: 18-Aug-2017]

[43] : Germán Portillo / Article sur l'énergie géothermique.

[44] : Yacine AHMOUDA et Pr. Noureddine MOUMMI « Etude numérique des phénomènes d'écoulement et d'échanges thermiques dans un échangeur air/sol enterré de forme U », Université de Biskra 2014.