

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des Sciences Appliquées  
Département de génie mécanique

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Génie Energétique

Présenté par :

**BELACHI mouhi eddine**

**BOUGOFFA chaffai**

**Thème :**

**Etude paramétrique des performances de l'échangeur de chaleur  
air-sol pour les applications de refroidissement.**

Soutenu publiquement le : 12 /06/2022

**Devant le jury:**

Boubekri Abdelghani	(Professeur)	Président	UKM Ouargla
Derghout Zoheir	(M.A.A)	Examineur	UKM Ouargla
Drid Mohamed Mebrouk	(M.C.B)	Encadreur	UKM Ouargla

**Année Universitaire: 2020/ 2021**

## **REMERCIEMENT**

*Tout d'abord on remercie infiniment le bon dieu « ALLAH » puissant, de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il nous a donné tout le long de nos études.*

*On présente nos sincères remerciements avec nos profonds respects à notre promoteur, DRID MOHAMED MEBRUOK pour son suivi, pour sa collaboration et pour ses discussions aussi intéressantes que fructueuses. Ses précieux conseils ont grandement contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

*On tient à remercier Mr. Boubekri Abdelghani d'avoir accepté de présider le jury et Mr. Derghout Zoheir à sa contribution à l'examinations de ce travail.*

**BELACHI mouhi eddine, BOUGOFFA chaffai**



## DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes chers parents pour leurs  
Sacrifices.*

*À mes chers frères et sœurs  
et ma famille BELACHI Et  
BOUGOFFA sans exception.*

*À tous nos copains et ce qui nous  
aidé durant ce travail.*

*À tous mes enseignant du primaire,  
à l'université pour leurs formation  
et leur patience.*

BOUGOFFA chaffai, BELACHI mouhi eddine



# SOMMAIRE :

## Introduction Général:

<b>CHAPITRE 1: L'ENERGIE GEOTHERMIQUE ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>1</b>
1. L'ENERGIE GEOTHERMIQUE : .....	3
1.1 Introduction : .....	3
1.2. Histoire de la géothermie :.....	3
1.3. Exploitation de la géothermie : .....	5
1.3.1. Structure interne du globe : .....	6
1.3.2. Classification des ressources d'énergie géothermique :.....	7
1.3.2.1. Géothermie à haute énergie : .....	8
1.3.2.2. Géothermie moyenne énergie : .....	8
1.3.2.3. Géothermie de basse énergie : .....	9
1.3.2.4. Géothermie très basse énergie : .....	10
1.4. Les avantages de la géothermie:.....	11
1.5. Les inconvénients de la géothermie : .....	11
1.6. La géothermie en Algérie : .....	11
1.6.1. Les zones géothermiques en Algérie : .....	12
1.6.2. Gradient géothermique : .....	15
2. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : .....	16
<b>CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR ÉCHANGEUR DE CHALEUR AIR-SOL .....</b>	<b>17</b>
INTRODUCTION : .....	22
1. Les différentes méthodes de refroidissement : .....	22
1.1. Le système de refroidissement active : .....	22
1.1.1. La ventilation par des ventilateurs d'échappement : .....	22
1.1.2. Refroidissement par Climatiseur (Mega Hissotto HP8) : .....	23
1.2. Le système de refroidissement passif : .....	23
1.2.1. Ventilation : .....	23
1.2.2. Refroidissement par la géothermie : .....	24
1.2.3. Matériaux à changement de phase (MCPs) : .....	25
1.2.4. Un couvert de végétation : .....	25
1.2.5. La cheminée solaire : .....	26
1.2.6. Échangeur de chaleur : .....	26
1.2.6.1 Échangeur de chaleur air-sol : .....	26
A. Puits canadien : .....	27
A.1. Principe de fonctionnement du puits canadien : .....	27
A.2. Les principaux éléments d'un puits canadien : .....	29
1.2.6.1.1 Les type les échangeurs air/ sol : .....	30
1.2.6.1.2 La forme d'échangeur air/ sol : .....	32
1.2.6.2 Caractéristiques techniques de l'échangeur air-sol : .....	33
2. Caractéristiques climatiques la zone Ouargla : .....	36
<b>CHAPITRE 3 : MODELISATION MATHEMATIQUE .....</b>	<b>17</b>
.....	<b>17</b>
INTRODUCTION .....	38
1. MODELISATION THERMIQUE D'UN ECHANGEUR AIR-SOL POUR RAFRAICHISSEMENT : .....	38
2. DESCRIPTION DU PROBLEME : .....	39
3. BILAN THERMIQUE : .....	40
3.1 Par conduction : .....	41
3.2 Par convection thermique : .....	45
3.3 L'étude de processus thermique à l'intérieur de la conduite : .....	46
3.4 Hypothèses supplémentaires : .....	46

4. EQUATION DU MOUVEMENT :	47
5. LES CONDITIONS AUX LIMITES :	48
5.1 Cas le flux aux côtés des parois est constant :	48
5.2 Cas d'une variation de la température à la paroi :	49
<b>CHAPITRE 4 : RESOLUTION NUMERIQUE.....</b>	<b>50</b>
INTRODUCTION .....	50
1. DÉFINITION D'ANSYS INC: .....	50
2. DESCRIPTION ET MODELISATION DU PROBLEME: .....	51
3. CREATION D'UN SYSTEME D'ANALYSE FLUIDE FLOW 3D: .....	53
4.1. <i>Création de la géométrie en Ansys workbench:</i> .....	53
4.1.1. Etape 01 in workbenche:.....	53
4.1.2. Etape 02 in Design modeler:.....	53
4.2. <i>Maillage du domaine fluide:</i> .....	54
4.2.1. Optimisation de maillage : .....	55
a. Le premier type de maillage : .....	56
b. Le deuxième type : .....	56
c. Le troisième type : .....	57
d. Vérifiez la taille de maillage : .....	59
4.3. <i>Mettre en place le problème sous Fluent :</i> .....	59
4.3.1. Présentation de code fluent:.....	59
4.3.2. Les différentes étapes de simulations sous Fluent:.....	60
5. RESULTATS ET DISCUSSIONS: .....	61
5.1. <i>Effet du diamètre et du débit d'air :</i> .....	61
1 <sup>ere</sup> cas (D=150mm): .....	61
2 <sup>eme</sup> cas (D=200mm): .....	65
3 <sup>ème</sup> cas (250mm): .....	67
5.2. <i>Effet de matière (Conductivité thermique) :</i> .....	73
<b>CONCLUSION GENERALE : .....</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE : .....</b>	<b>75</b>

## **Liste Des Figures :**

Figure 1-1 : Production d'électricité avec la géothermie dans le monde (2005-2010)[2] .....	4
Figure 1-2 : Schéma de la structure interne du globe .....	6
Figure 1-3 : Ressources mondiales de la géothermie [7].....	7
Figure 1-4 : Géothermie haute énergie [9] .....	8
Figure 1-5 : Géothermie moyenne énergie [11] .....	9
Figure 1-6 : Géothermie de basse énergie [13] .....	9
Figure 1-7 : Géothermie très basse énergie (puits provençal) .....	10
Figure 1-8 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de température [14] .....	10
Figure 1-9 : Disposition de l'échangeur air/sol .....	18
Figure 1-10 : Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur .....	19
Figure 1-11 : Banc d'essai expérimental de Bansal et al.....	19
Figure 1-12 : Température de l'air et du sol à une section de 10 m de l'entrée du tube après 12 h de fonctionnement pour trois sols (a) 0,52, (b) 2,00et (c) 4,00 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> [25]. .....	20

## **Liste Des Tableaux:**

Tableau 1-1: Caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie [17] :....	13
Tableau 1-2: Données physicochimiques de quelques puits forés dans le sud algérien [18]..	14
Tableau 2-1: les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol.....	36
Tableau 4-1 : notations des différentes parties de la géométrie .....	63
Tableau 4-2: résultats de maillage générer.....	596
Tableau 4-3 : La température à la sortie pour tous les cas. ....	729

## Nomenclature :

- D : Diamètre de conduite (m)
- e : épaisseur du conduit (m)
- L : longueur du conduit (m)
- h : coefficient de convection thermique ( $W / m^2 K$ )
- $\lambda_s$  : conductivité thermique du solide ( $W / m K$ )
- $\lambda$  : conductivité thermique du fluide ( $W / m K$ )
- Q : flux de chaleur (W)
- $q_{cd}$  : densité de flux de chaleur par conduction ( $W / m^2$ )
- $q_{cv}$  : densité de flux de chaleur par convection ( $W / m^2$ )
- $h_{cv}$  : coefficient de transfert par convection ( $W.m^{-2}K^{-1}$ )
- $R_{cv}$  : Résistance thermique de la gaine du conduit à la convection, ( $m^2.K/W$ )
- $R_{cd}$  : Résistance thermique de la gaine du conduit à la conduction, ( $m^2.K/W$ )
- $T_s$  : température de la surface d'échange (K)
- $T_f$  : température du fluide loin de la surface d'échange (K)
- S : surface d'échange solide/fluide ( $m^2$ )
- r : rayon intérieur du conduit (m)
- T : température (K)
- $T_a$  : Température de l'air - conduit, (K)
- $T_{ae}$  : Température de l'air à l'entrée du conduit, (K)
- $T_{sol}$  : Température du sol, (K)
- $C_p$  : Chaleur massique de l'air, J/kg.K
- V : Vitesse de circulation de l'air à l'intérieur du conduit, (m/s)
- P : pression (Pa)
- t : temps (s)
- U : Composante de la vitesse selon Ox (m / s)
- V : Composante de la vitesse selon Oy (m / s)
- W : Composante de la vitesse selon Oz (m / s)
- $U_o$  : vitesse axiale moyenne à l'entrée du conduit (m / s)



### ***Symboles Grecs***

- $\alpha$  : diffusivité thermique ( $\text{m}^2 / \text{s}$ )  
 $\beta$  : coefficient d'expansion thermique ( $1 / \text{K}$ )  
 $\theta$  : coordonnée dans la direction azimutale (rad)  
 $\mu$  : viscosité dynamique ( $\text{kg m} / \text{s}$ )  
 $\nu$  : viscosité cinématique ( $\text{m}^2 / \text{s}$ )  
 $\rho$  : masse volumique ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )

### ***Indices***

- $i$  : relatif au nœud considéré  
 $i + 1$  : relatif au nœud en amont du nœud considéré  
 $i - 1$  : relatif au nœud en aval du nœud considéré

### ***Exposants***

- \* : variable adimensionnelle  
1 : désigne l'instant  $t$   
0 : désigne l'instant  $t - \Delta t$

### ***Nombres sans dimension***

- Re : Nombre de Reynolds  $R_e = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu}$   
Pr : Nombre de Prandtl  $P_r = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda_f}$

## Résumé:

Dans ce travail, nous étudions la possibilité d'exploiter l'énergie géothermique pour refroidir les bâtiments et les installations dans les zones chaudes et isolées grâce à un échangeur de chaleur sol-air, qui est considéré comme l'une des techniques de refroidissement passif afin de réduire la consommation d'énergie.

Nous avons mené une étude paramétrique pour connaître l'effet du débit, du diamètre du canal et du matériau du tube sur l'efficacité de l'échangeur, et après simulation à l'aide du programme Ansys Fluent, les différents résultats obtenus ont montré que l'efficacité de l'échangeur augmente avec la diminution du débit d'air et la diminution du diamètre du canal, à condition que le matériau de fabrication du tube ait un coefficient de conductivité thermique grand pour augmenter l'échange de chaleur. Où l'échangeur air-sol a donné les meilleures performances dans le cas de  $D = 150\text{mm}$  et  $Q_v=17.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  et le matériau du tube aluminium où la température était à la sortie ( $293 \text{ K}^\circ$ ) avec un écart de ( $25 \text{ K}^\circ$ ) entre l'entrée ( $318 \text{ K}^\circ$ ) et la sortie .

## **Les mots clés :**

Échangeur de chaleur air-sol, l'énergie géothermique, étude paramétrique, refroidissement passif.

## **ملخص :**

في هذا العمل ندرس إمكانية استغلال الطاقة الحرارية الجوفية لتبريد المباني والمنشآت في المناطق الحارة والمعزولة من خلال مبادل حراري أرضي-هواء والذي يعتبر من تقنيات التبريد السلبي لتقليل استهلاك الطاقة.

أجرينا دراسة بارامترية لمعرفة تأثير معدل التدفق وقطر القناة ومادة صنع الأنبوب على كفاءة المبادل ، وبعد المحاكاة باستخدام برنامج أنسيس فليوننت ، أظهرت النتائج المختلفة التي تم الحصول عليها أن كفاءة المبادل تزداد مع الانخفاض في تدفق الهواء وانخفاض قطر القناة بشرط أن يكون لمادة تصنيع الأنبوب معامل توصيل حراري كبير لزيادة التبادل الحراري. حيث أعطى المبادل الحراري الجوي-الأرضي أفضل أداء في حالة  $D = 150\text{mm}$  و  $Q_v=17.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

ومادة صنع الأنبوب هي الألمنيوم حيث كانت درجة الحرارة عند المخرج ( $293 \text{ K}$ ) بفارق ( $25 \text{ K}$ ) بين المدخل ( $318\text{k}$ ).

## **الكلمات المفتاحية :**

المبادل الحراري الجوي الأرضي ، الطاقة الحرارية الأرضية ، الدراسة البارامترية ، التبريد السلبي.

# Introduction Générale :

### Introduction Général:

La consommation d'énergie dans le monde augmente rapidement parallèlement au formidable développement qui s'opère dans tous les secteurs. Pour répondre à cette forte demande d'énergie, elle s'appuie principalement sur les combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), ce qui entraîne des répercussions négatives sur l'environnement, comme la pollution et le réchauffement climatique, ainsi que quelques autres effets indésirables sur l'équilibre économique, politique et social des pays, qu'ils soient consommateurs ou producteurs, et les combustibles fossiles sont considérés comme une grande source d'énergie, mais ils ne sont pas renouvelables et épuisables du fait de cette exploitation excessive.

D'autre part, il existe plusieurs sources d'énergie dont les caractéristiques sont renouvelables et respectueuses de l'environnement (non polluantes), telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et l'énergie géothermique, telles qu'elles sont utilisées depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours, mais avec seulement un faible pourcentage de la consommation mondiale. Par conséquent, l'accent devrait être mis sur la mise en place de l'infrastructure nécessaire et le développement de technologies pour exploiter ces énergies alternatives.

L'énergie géothermique est considérée comme l'une des plus grandes sources d'énergie renouvelables disponibles dans le monde (dans des proportions variables). Pour l'exploiter il est nécessaire de creuser profondément dans le sol, où la profondeur varie en fonction de la cible à atteindre, comme la production d'électricité, les applications de chauffage ou de refroidissement.

En été, la température atteint des extrêmes pouvant atteindre (45°C) à l'ombre, notamment dans les zones désertiques (sud algérien - Ouargla), et par conséquent la consommation d'énergie électrique augmente pour la climatisation des bâtiments et des installations industrielles, ce qui entraîne une augmentation des coûts, que ce soit pour les citoyens, les institutions étatiques ou les institutions privées. Pour résoudre ce problème et réduire l'utilisation de l'électricité dans la climatisation, il est devenu nécessaire de s'orienter vers des techniques de refroidissement passif, qui sont représentées dans la végétation, les matériaux à changement de phase, les isolants et un échangeur de chaleur air-sol.

## Introduction Général

---

Dans cette étude, nous aborderons en détail l'un des systèmes de refroidissement passif qui dépend principalement de l'énergie géothermique, qui est l'échangeur de chaleur air-sol. Afin d'assurer le succès de notre étude et de produire des résultats précis, nous nous concentrerons sur la simulation numérique à l'aide du programme (Ansys) pour le flux d'air à travers l'échangeur de chaleur surface-air, son matériau et le diamètre du canal.

Notre mémoire est composé de quatre chapitres et organisée comme suit :

Dans le premier chapitre : nous avons deux parties .Dans la première partie, nous avons abordé la géothermie, son histoire, comment l'exploiter, ses classifications, ses avantages et ses inconvénients, ainsi que sa situation en Algérie. Dans la deuxième partie, Étude bibliographique sur l'échangeur de chaleur air-sol.

Dans le deuxième chapitre : les différentes méthodes de refroidissement actif et passif ont été abordées, en mettant l'accent sur l'échangeur de chaleur air-sol, le principe de son fonctionnement, ses composants de base, ses types, ses formes et ses caractéristiques techniques, ainsi que les caractéristiques climatiques de la région d'Ouargla.

Dans troisième chapitre : nous mettons un rappels sur le transfert thermique et caractéristique d'écoulement des fluides Ensuite, nous présentons le problème de notre étude puis l'approche mathématique utilisée pour créer les différents modèles mathématiques qui décrivent le comportement en température à la sortie de l'échangeur selon les différentes normes d'ingénierie, physiques et thermiques. Ceci se fait en simplifiant les plus importantes équations de transfert de chaleur qui traitent de problèmes similaires.

Le dernier chapitre : sera consacré à la simulation numérique par le code ANSYS, présentant des résultats de simulation et des interprétations détaillées, telles que la plage de température, la vitesse de l'air pour différents diamètres, le débit et le matériau du tube.

Enfin, notre étude est clôturée par une conclusion.

# Chapitre 1 :

**L'énergie géothermique et recherche bibliographique**

## 1. L'énergie géothermique :

### 1.1 Introduction :

Pour réduire le réchauffement climatique et la pollution résultant de l'utilisation des énergies fossiles, certains pays se sont concentrés et ont développé des techniques d'exploitation des énergies renouvelables non polluantes qui existent en abondance dans la nature. Parmi ces énergies figure l'énergie géothermique, du grec Géo (La terre) et thermie (la chaleur), est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter.

### 1.2. Histoire de la géothermie :

Depuis l'Antiquité, nos ancêtres exploitent l'énergie géothermique sous toutes ses formes : sources chaudes pour le traitement et la cuisine, volcans pour extraire le soufre, grottes et entrepôts souterrains pour le refroidissement et le stockage des aliments.

Cependant, toutes ces applications restèrent à une échelle extrêmement modeste et il faut attendre le début du XXe siècle pour que la géothermie passe du stade artisanal au stade industriel.

Au début du XXe siècle en Italie, à Larderello, en Toscane, la première étape du développement de l'énergie géothermique comme source de production d'électricité a eu lieu. Là où tout a commencé en 1904 lorsqu'une tentative d'allumer cinq lampes de quelques dizaines de watts à l'aide d'une dynamo reliée à une machine à vapeur géothermique a réussi. L'année suivante, la première centrale électrique expérimentale d'une capacité de 20 kilowatts est construite pour alimenter en électricité les habitations du village via un simple réseau de distribution. En l'an 1913 débutent les travaux de la première centrale géothermique avec la première turbine à produire de l'électricité d'une capacité de 250 KW. En 1944, l'énergie électrique produite à la centrale atteint 127 mégawatts.

En 1960, la production d'énergie électrique géothermique a commencé à apparaître et à se répandre dans le monde, et elle est devenue une véritable industrie qui se développait rapidement.

Il existe des centaines d'installations dans le monde, avec des puissances installées allant de quelques mégawatts à plusieurs dizaines de mégawatts. Ces unités sont réparties dans un quart de douzaine de pays (États-Unis, Japon, Italie, Îles, Nouvelle-Zélande, Indonésie, Philippines et Mexique), dont un tiers d'économies émergentes où la géothermie pourrait représenter jusqu'à 30% de la production nationale d'électricité. En 2005, la puissance électrique installée dans le monde était de l'ordre de 8 900 MW, avec une production annuelle d'électricité géothermique d'environ 57 TWh, soit 0,4 % de la production mondiale totale. Après l'hydraulique (2 630 TWh), la biomasse (220 TWh), la géothermie se classe au quatrième rang des énergies renouvelables pour la production d'électricité (62 TWh). [1]



Figure 1-1 : Production d'électricité avec la géothermie dans le monde (2005-2010)[2]

Les applications les plus courantes des systèmes d'énergie géothermique (par exemple, les sources thermiques, les geysers et le sol chauffé par du magma chaud) sont la production d'électricité et la fourniture de chaleur. De tels systèmes sont utilisés dans des pays comme l'Islande, la Turquie et ailleurs. La capacité opérationnelle mondiale de production d'électricité



géothermique était d'environ 12,8 GWe en janvier 2015, répartie dans 24 pays, et devrait atteindre entre 14,5 et 17,6 GWe d'ici 2020, et environ 25 GWe d'ici 2030[3].

La géothermie, a d'abord été utilisée pour le chauffage d'habitations. Après le très ancien réseau de chaleur de Chaudes-Aigues(Auvergne), construit au XIV siècle, et alimenté par une source d'eau chaude à 82°C, des expériences ponctuelles eurent lieu aux États-Unis à Boise (Idaho) et Klamath Falls (Oregon) dès la fin du XIXe siècle.

En 1930, à Reykjavik, en Islande, la première application de chauffage géothermique a commencé pour 100 maisons, deux piscines, une école et un hôpital, et maintenant la majeure partie de la capitale islandaise est chauffée.

Des réseaux de chaleur urbains importants utilisant l'énergie géothermale se développeront plus tard en France, Italie, Roumanie, Russie, Turquie, Géorgie, Chine, États-Unis,...etc. Avec environ 27 800 MW installés et 72,6 TWh produits annuellement, la géothermie des usages thermiques est exploitée dans plus d'une soixantaine de pays (Japon, Chine, Russie, États-Unis, France, Islande...). Elle constitue, grâce à la variété de ses usages (chauffage d'habitations, production de froid, chauffage de serres, de bassins de pisciculture, bal néologie...) [1].

### **1.3. Exploitation de la géothermie :**

L'énergie géothermique est utilisée comme source d'énergie en exploitant la chaleur présente dans la couche superficielle ou profonde de la croûte terrestre résultant de la désintégration radioactive des minéraux et de la perte de chaleur continue de la formation d'origine de la terre.

Exploiter la chaleur des couches terrestres nécessite de forer des puits de différentes profondeurs allant de quelques mètres à environ 10 kilomètres, selon le but à atteindre. La chaleur est souvent extraite du sol en extrayant de la vapeur ou de l'eau chaude souterraine pour chauffer des bâtiments, des habitations, etc. directement via le réseau de distribution d'eau ou via des échangeurs Thermocouple qui transfère la chaleur à l'intérieur du bâtiment.[4]

Dans les centrales géothermiques, l'électricité peut être produite en exploitant la vapeur produite dans les profondeurs de la terre pour faire tourner des turbines reliées à des générateurs.[4]

### 1.3.1. Structure interne du globe :

En général et brièvement, la structure structurelle de la Terre se compose de trois couches principales, à commencer par le noyau, qui constitue environ 17% du volume de la Terre, qui à son tour est divisé en deux couches, un noyau interne solide à une profondeur de 6371 km, sa température peut atteindre 4200 degrés, et un noyau externe liquide avec une température de 3500 degrés entouré d'une couverture solide (formée de deux couches, la croûte supérieure et inférieure), son épaisseur peut atteindre 3000 km et il constitue 81% de le volume de la terre et sa température varie entre 1000 et 3000 degrés.

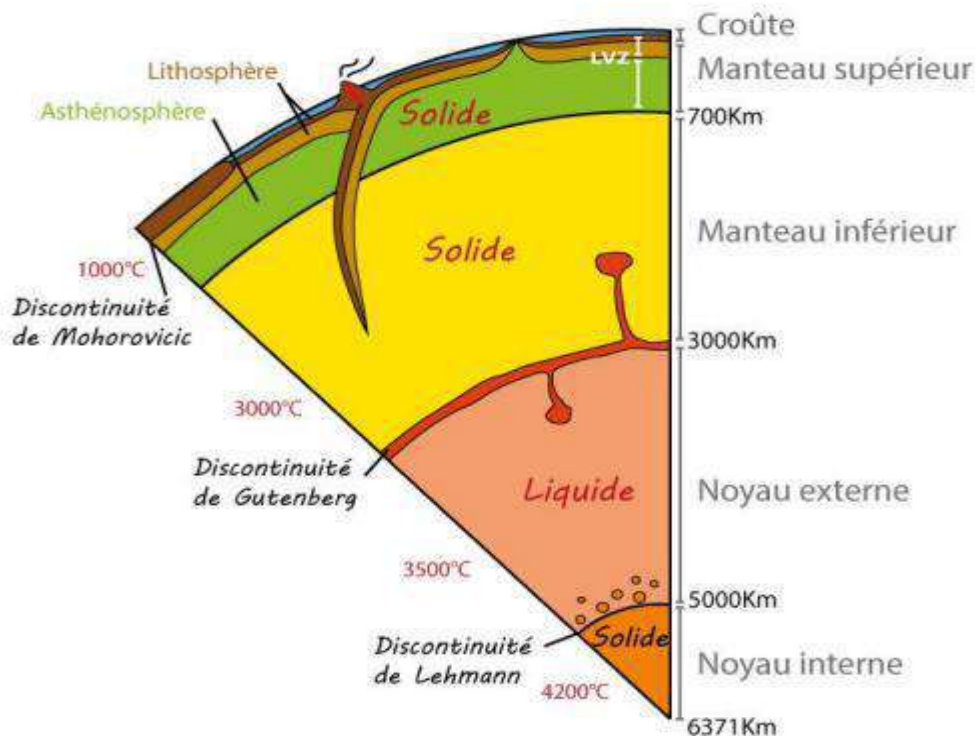


Figure 1-2 : Schéma de la structure interne du globe

La croûte de surface a deux types : une croûte continentale avec une densité de 2,7 et une épaisseur de 30 à 70 km et une croûte océanique avec une densité de 3,3 et une épaisseur de 5 à 20 km.

Seule une petite partie de la chaleur se propage dans la croûte en raison de la cristallisation du noyau interne. Cela est dû au fait que les roches de couverture ont une conductivité très faible.

Par conséquent, la majeure partie de la chaleur dans les couches terrestres est causée par la désintégration d'éléments radioactifs tels que l'uranium, le thorium et le potassium dans la calotte et la croûte. [5]

A une certaine profondeur, la température de la croûte terrestre est quasi constante tout au long de l'année, on peut exploiter cette caractéristique à deux fins différentes, selon la température du milieu extérieur.

En utilisant l'échangeur de chaleur approprié, la stabilité géothermique est utilisée dans la climatisation en été et le chauffage en hiver.

### 1.3.2. Classification des ressources d'énergie géothermique :

Les ressources géothermiques sont classées de plusieurs manières, en fonction de la source de chaleur, du type de transfert de chaleur, de la température de la source, de la profondeur du réservoir, de l'état et de l'utilisation physiques et des caractéristiques géologiques. En général, il existe quatre types d'énergie géothermique, qui sont les suivants [6] :



Figure 1-3 : Ressources mondiales de la géothermie [7]

**Le rouge** : Zones propices au développement de la géothermie haute énergie

**Le vert** : Zones favorables à la géothermie basse énergie (bassins sédimentaires)

**Le gris** : Zones de socle cristallin réservées pour la très basse énergie

### 1.3.2.1. Géothermie à haute énergie :

L'énergie géothermique à haute énergie génère de l'électricité directement à partir du fluide aquifère jusqu'à une profondeur de 1500 mètres et une température de plus de 150. C'est dans les zones à haute température géothermique telles que les zones volcaniques ou les lieux de collision ou de formation de plaques tectoniques. Les liquides extraits passent par un processus de séparation pour séparer les liquides gazeux. Les gaz sont ensuite utilisés pour alimenter des turbines qui produisent de l'électricité grâce à des générateurs [8].

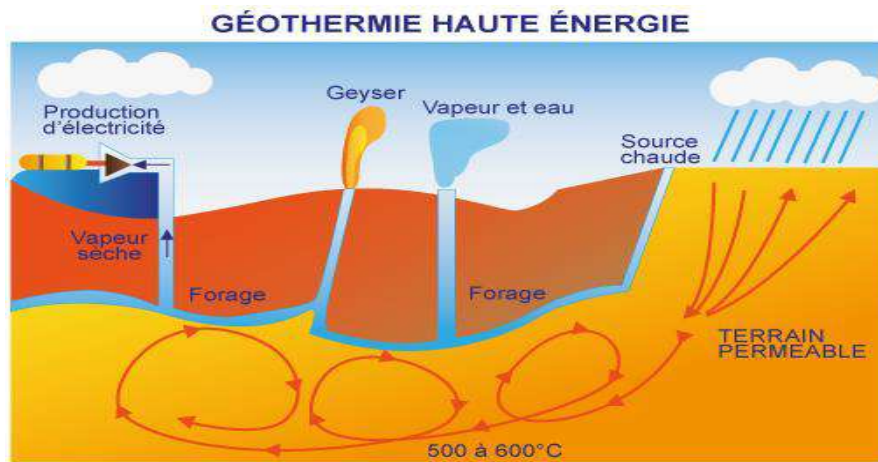


Figure 1-4 : Géothermie haute énergie [9]

### 1.3.2.2. Géothermie moyenne énergie :

La chaleur géothermique à moyenne température, également connue sous le nom d'enthalpie moyenne, existe sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à des températures allant de 90 à 150 degrés Celsius. On les trouve souvent à 1 000 m de profondeur dans les zones géothermiques à haute énergie, mais aussi dans les bassins sédimentaires entre 2 000 et 4 000 m de profondeur. Pour générer de l'électricité, l'eau extraite doit être utilisée pour chauffer un autre fluide dans un système fermé dont la température d'évaporation est inférieure à la température de l'eau. Ce système fonctionne par un échangeur de chaleur [10].

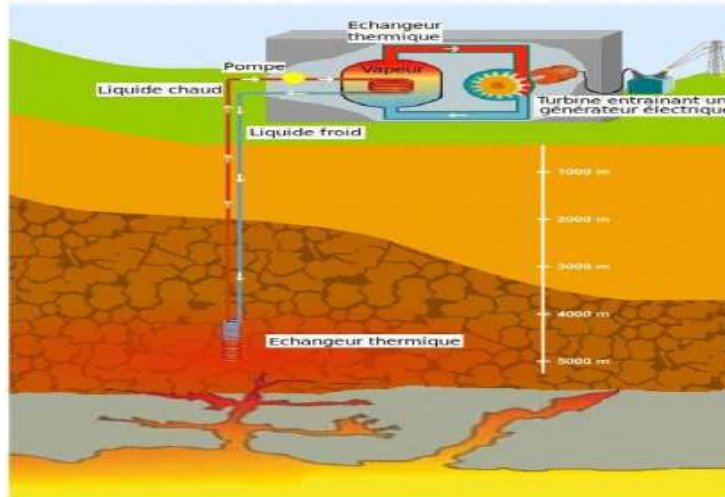


Figure 1-5 : Géothermie moyenne énergie [11]

### 1.3.2.3. Géothermie de basse énergie :

Ce système est conçu pour exploiter la température des eaux souterraines allant de 30°C à 90°C situées dans des bassins diamantifères à des profondeurs comprises entre 1500 et 2000 mètres. Ce système est souvent utilisé pour chauffer les maisons et les bâtiments via un réseau de distribution de chaleur, et est également utilisé dans une faible mesure dans certaines applications industrielles [12].

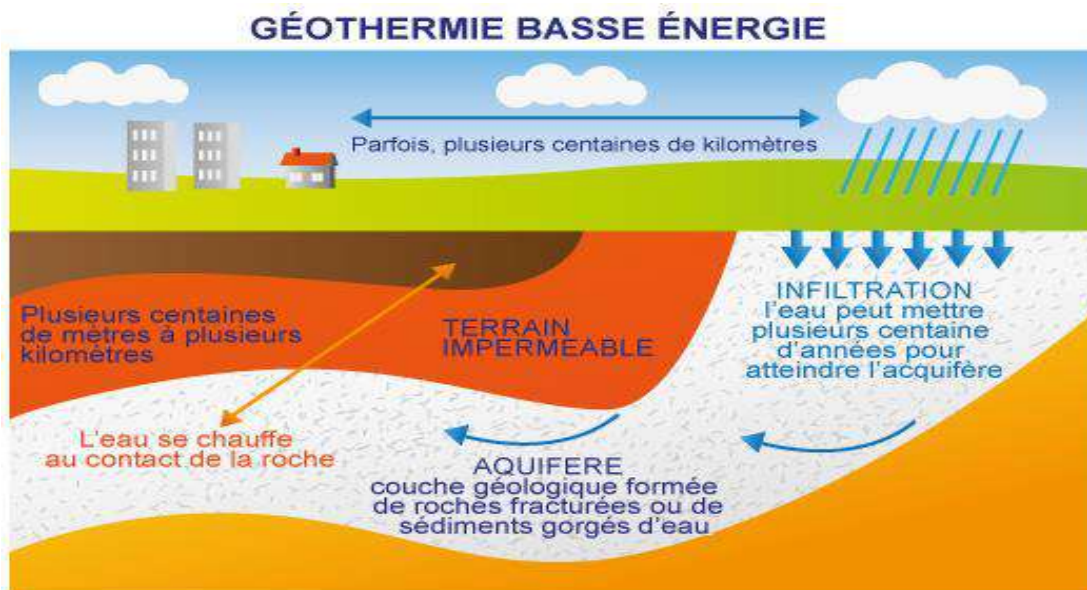


Figure 1-6 : Géothermie de basse énergie [13]

1.3.2.4. Géothermie très basse énergie :

La géothermie peut être exploitée à faible profondeur (quelques mètres) et à des températures inférieures à 30 degrés et elle est dite très basse géothermie. Il est utilisé dans la production de froid et de climatisation au moyen d'un échangeur de chaleur sol-air, ou puits dit canadien, et est pareillement utilisé dans le réchauffement. Une pompe à chaleur peut également être utilisée pour exploiter cette énergie.

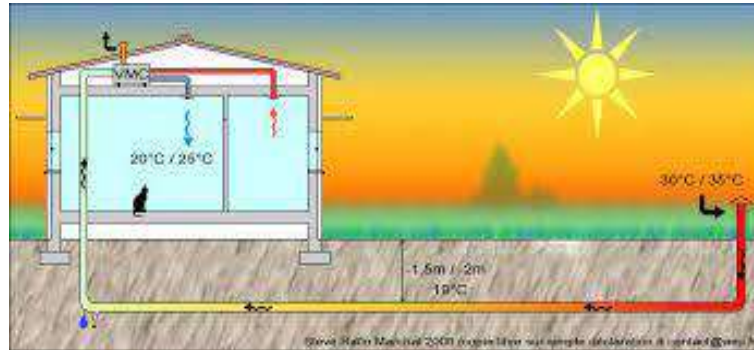


Figure 1-7 : Géothermie très basse énergie (puits provençal)

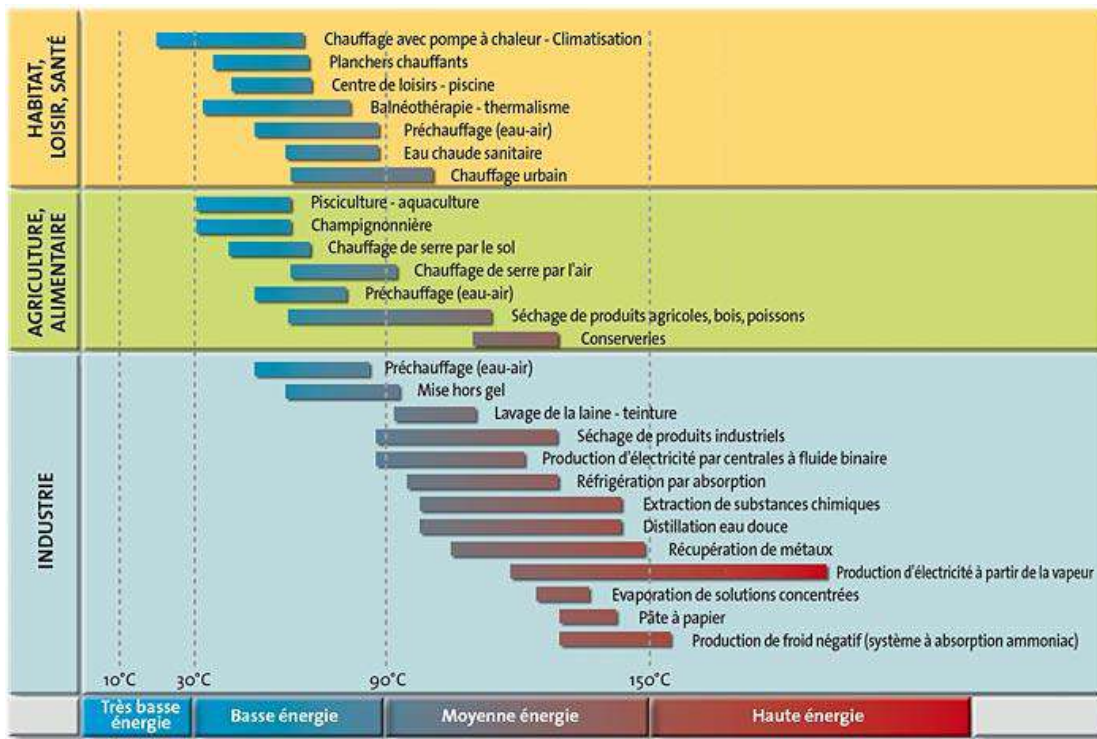


Figure 1-8 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de température [14]

#### 1.4. Les avantages de la géothermie:

- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
  - C'est une source d'énergie quasi-continue.
- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne) et disponible dans tous les sous-sols de la planète.
- La géothermie est une énergie renouvelable et propre (pas de déchets à stocker, très peu d'émissions de CO<sub>2</sub>).
  - Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport; Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement;
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables ;
- Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques [15].

#### 1.5. Les inconvénients de la géothermie :

- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés ;
- L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques
  - Risque de glissement de terrain.
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques [15].

#### 1.6. La géothermie en Algérie :

L'Algérie est un pays avec un grand et important potentiel de basse géothermie. Dans ce cadre, nous aborderons l'histoire de cette énergie en Algérie.

En 1967, SONATRACH a commencé à explorer la géothermie, et en 1982, la Société nationale d'électricité SONELGAZ, en coopération avec la société italienne ENEL, a réalisé des études

pour identifier et identifier les zones riches en faible géothermie, où toutes les études étaient concentrées dans le nord- est. En 1983, le Centre des énergies renouvelables d'Algérie (CDER) a commencé à mener des recherches et des travaux dans le domaine de la géothermie dans la majeure partie du nord du pays.

Pendant des années, le domaine de l'exploitation de l'énergie géothermique a stagné en Algérie pour plusieurs raisons, mais récemment, le pays a commencé à s'orienter progressivement vers les énergies renouvelables, et cela travaillera à développer des techniques pour son exploitation, y compris l'énergie géothermique.

### **1.6.1. Les zones géothermiques en Algérie :**

Jusqu'à présent, seules les ressources géothermiques à faible contenu thermique ont été identifiées en Algérie, mieux adaptées aux applications d'utilisation directe. L'Agence nationale des ressources en eau a recensé plus de 282 sources d'eau chaude du nord de l'Algérie (ANRH).

Il est réparti dans 24 régions, avec une concentration plus élevée dans le nord-est. Les températures de surface varient de 22 à 98 degrés Celsius. Les sources de chaleur les plus abondantes sont celles avec des températures allant de 22 à 45°C, suivies de celles avec des températures allant de 45 à 60°C, et enfin celles avec des températures supérieures à 60°C. [16]



Tableau 1-1: Caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie [17] :

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	H. Boutaleb	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

"L'aquifère albien" est un grand réservoir géothermique dans le Sahara algérien, couvrant une superficie massive de plus de 650 000 km<sup>2</sup>. Les réservoirs de cette zone sont principalement composés de grès où la température de l'eau de surface varie de 20 à 60 °C [16] [18].

Tableau 1-2: Données physicochimiques de quelques puits forés dans le sud algérien [18].

Nom du puits	Province	Temp (C) Type d'eau	TDS (mg/l)	Débit (l/s)
H011e516	El Oued	65 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1970	197
J0010e583	Ouargla	51 CaSO <sub>4</sub>	1620	120
J0011e94	Ouargla	60 CaSO <sub>4</sub>	1760	150
L011e11	Ouargla	48 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3333	22
H008e59	Laghouat	34 CaSO <sub>4</sub>	2300	12

I009e55	Ghardaia	41 NaCl	1569	160
G009e109	Biskra	53 CaCl	2822	100

### 1.6.2. Gradient géothermique :

La température des roches augmente avec la profondeur ; c'est ce qu'on appelle le gradient géothermique. Il varie selon les couches traversées. Les valeurs moyennes sont pour la croûte continentale  $3\text{ °C} / 100\text{ m}$  et pour le manteau  $1\text{ °C} / 100\text{ m}$ . Le gradient géothermique observé dans la croûte continentale varie considérablement d'un endroit à l'autre, bien que la valeur normale de l'ordre de  $3\text{ °C} / 100\text{ m}$ , néanmoins certaines régions enregistrent plus de  $100\text{ °C} / 100\text{ m}$  comme à Larderello en Italie, Tandis que d'autres ne dépassent pas  $1\text{ °C} / 100\text{ m}$  comme à Padoue. Le forage pétrolier le plus profond est la meilleure façon de tenir compte du gradient géothermique. Ce gradient est estimé pour chaque forage pétrolier à l'aide des températures de boue de forage.

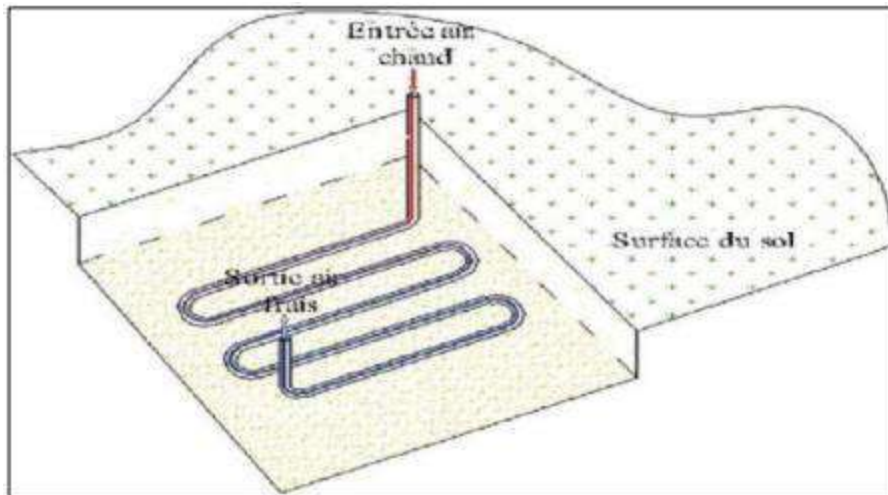
Le Sahara algérien présente dans son ensemble un gradient géothermique moyen de l'ordre de  $4\text{ °C} / 100\text{ m}$ . Dans la partie nord du Sahara, le gradient géothermique moyen est de  $3\text{ °C} / 100\text{ m}$ ; cela semble être dû à l'effet de la profondeur. Une forte anomalie géothermique est bien démontrée au Sahara occidental dans les régions de Béchar, Beni Abbas et Timimoune. Le gradient est supérieur à  $6\text{ °C} / 100\text{ m}$ , il est probablement dû à la tectonique intense vécue par la partie occidentale de la plate-forme saharienne pendant l'orogénie hercynienne comme indiqué dans la référence [19].

## 2. Étude bibliographique :

**Nesrine Hatraf [20]** .Dans ce travail, le chercheur a évalué la performance de l'échangeur de chaleur air-sol en étudiant l'effet du site, des propriétés du sol et de la nature du conduit sur l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur et à la sortie qui est utilisée dans l'air conditionnement et en fonction de la différence de température extérieure, les possibilités offertes par les techniques de refroidissement sont déterminées par l'exploitation de l'énergie géothermique pour une utilisation dans des endroits climatiquement différents en Algérie.

**Mushtaq Ismael Hasan [21]**.L'échangeur de chaleur terre-air (EAHE) est un système de refroidissement et de chauffage passif efficace pour les bâtiments. Cet article a étudié numériquement l'effet du matériau du tuyau et de l'épaisseur de la paroi sur la performance globale de l'EAHE. Deux matériaux (PVC et acier) et trois épaisseurs (2, 3 et 6) sont sélectionnés sous le climat de la ville de Nasiriyah dans le sud de l'Irak. Le modèle numérique construit a d'abord été validé par rapport à un modèle expérimental et les résultats de la comparaison ont montré un bon accord. Après la validation, les performances globales du système EAHE ont été analysées avec des plages de vitesse de l'air, de température d'entrée, de longueur de tuyau de 50 m et de diamètre de tuyau de 4 po (0,1016 m). Les résultats de la simulation ont montré qu'il existe un moins parfaits en performance thermique pour le matériau acier mais ce parfait peut être négligé par rapport aux prix des matériaux.

**Mushtaq Ismael Hasan [22]** : Pour réduire la consommation d'énergie, l'échangeur de chaleur terre-air (EAHE) est une technique appropriée pour le refroidissement et le chauffage des bâtiments. Cet article étudie numériquement l'effet de certains paramètres de conception (diamètre du tuyau, condition d'entrée, longueur du tuyau et condition de sortie) sur la performance globale du système EAHE. Quatre diamètres du tuyau EAHE (2, 3, 4 et 6 pouces) sont étudiés et cette étude numérique a été réalisée pour les saisons d'été et d'hiver pour la ville de Nasiriyah dans le sud de l'Irak. Premièrement, le modèle numérique construit a été validé par rapport au modèle expérimental, et les résultats de la comparaison ont montré un bon consensus. Après la validation et en utilisant la modélisation numérique de la dynamique des fluides, les performances globales du système EAHE avec tous les diamètres de conduite ont été analysées avec des plages de vitesse de l'air, de DBT ou de température d'entrée, et une longueur de conduite de 50 m. Les résultats simulés ont montré que le système EAHE avec un diamètre de tuyau de 6 pouces a les meilleures valeurs de performance globale, mais du point de vue des performances thermiques, le diamètre de tuyau de 2 pouces est plus approprié.



**Nasreddine Sakhri [23]**. Une étude expérimentale est réalisée concernant l'effet des matériaux de l'échangeur de chaleur terre-air (EAHE) sur les performances globales. Une comparaison est faite entre l'efficacité des tuyaux en acier et en PVC. De plus, la variation de la température verticale du sol de la surface du sol à 140 cm est déterminée. Il ressort de la comparaison entre les EAHE en PVC et en acier que le tuyau a un faible effet sur la température de l'air de sortie du système. Au contraire, la longueur du tuyau a un effet important sur les performances EAHE.

**N. Momi [24]**. L'écoulement d'air et le transfert de chaleur par convection à travers un échangeur air/sol réfrigéré ont été étudiés, ils ont analysé et piloté un système d'échangeur air/sol pour

déterminer les principales caractéristiques qui affectent les performances du système illustré à la figure .

Figure 1-9 : Disposition de l'échangeur air/sol

Dans cette étude, ils ont considéré que :

Le régime de l'échange thermique est stationnaire.

Le sol est considéré homogène.

Les caractéristiques de l'air et du sol sont considérées constantes.

Dans une section du conduit perpendiculaire à l'écoulement, l'air est considéré homogène, l'échange convectif est régi par un coefficient convectif moyen.

La température extérieure du tube est constante.

La vitesse de l'air est considérée constante le long du conduit.

Ils ont trouvé à partir des équations du bilan énergétique, l'expression analytique qui traduit l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur :

$$T_a = T_{ae} \exp\left(\frac{-2L}{p_{crv}R}\right) + T_{sol} \left(1 - \exp\left(\frac{-2L}{p_{crv}R}\right)\right)$$

Une comparaison a été faite entre les résultats théoriques et expérimentaux pour un débit de 121,52 m<sup>3</sup>/h (Fig.), et ils sont arrivés à la conclusion que la température du liquide continue de diminuer avec la longueur de l'échangeur et le régime thermique loin d'être établi et grande différence entre le modèle théorique et les résultats expérimentaux. Cela est dû aux hypothèses considérées des valeurs approximatives des propriétés du matériau du tuyau et du sol.

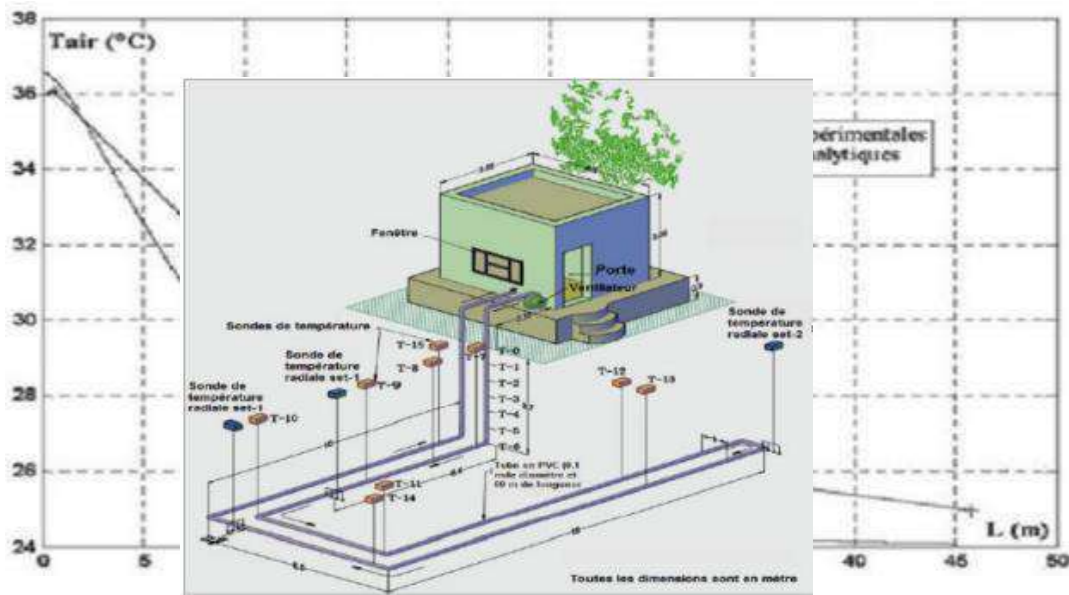


Figure 1-10 : Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur

**Bansal et al [25].** Dans ce travail, les chercheurs ont réalisé une étude expérimentale et numérique de l'effet de la conductivité thermique du sol, de la durée de fonctionnement continu de l'échangeur et des différentes longueurs de tuyaux. Là où ils ont constaté que la conductivité thermique du sol et la période de fonctionnement continu de l'échangeur de chaleur affectent principalement ses performances, les résultats montrent également que l'épaisseur du sol de la couche de sol est constante égale à deux fois le rayon du tuyau.

Figure 1-11 : Banc d'essai expérimental de Bansal et al.

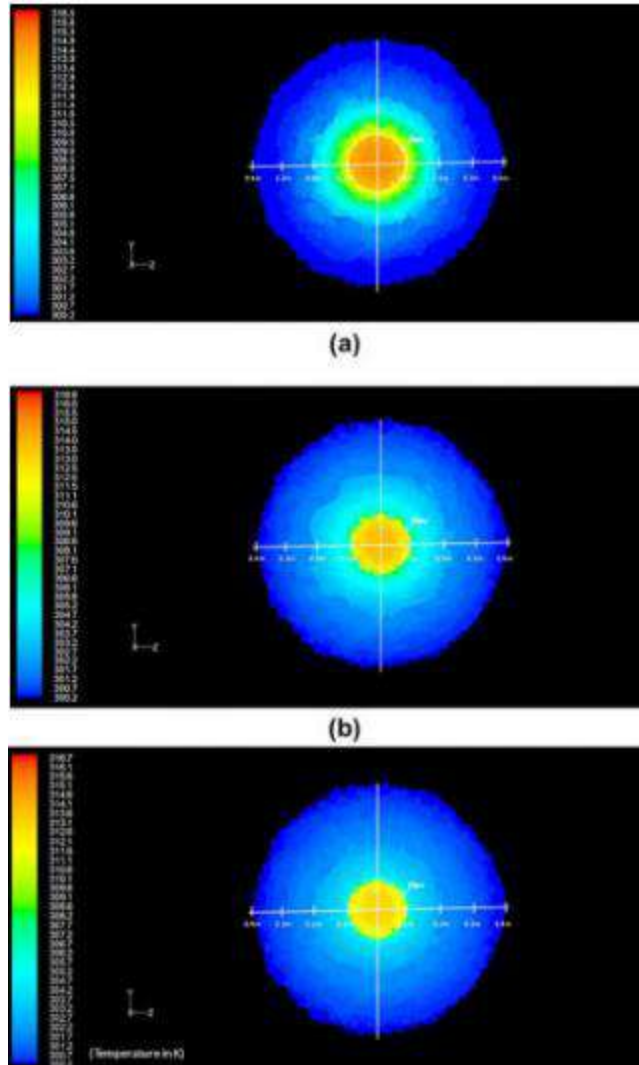


Figure 1-12 : Température de l'air et du sol à une section de 10 m de l'entrée du tube après 12 h de fonctionnement pour trois sols (a) 0,52, (b) 2,00et (c) 4,00 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>[25].

**M. E. Benhamza[26].** Dans cette étude, une simulation de mécanique des fluides computationnelle (CFD) a été réalisée, dans laquelle l'échangeur de chaleur a été conçu en tenant compte de la conception et des dimensions réelles du dispositif expérimental. À cette fin, les auteurs ont utilisé le programme « GAMBIT » pour la conception et le chevauchement en prêtant attention aux conditions aux limites appropriées. Plusieurs configurations de réseau ont été testées avec diverses optimisations pour en choisir une qui offre un compromis entre précision et ressources de calcul, et le réseau proche du mur est grandement amélioré. Pour la solution, le logiciel commercial FLUENT 6.3 a été utilisé. La comparaison entre les résultats de simulation



et les résultats du dispositif expérimental a montré un bon accord entre eux. Pour l'étude expérimentale, d'après les résultats obtenus en été, un écart de température très important a été observé entre l'entrée et la sortie de l'échangeur, pouvant atteindre 20°C. Ces résultats prouvent que l'échangeur de chaleur enterré peut contribuer à des économies d'énergie en été comme en hiver.

# Chapitre 2:

**Généralités sur Échangeur de chaleur air-sol**

## Introduction :

Aujourd'hui les bâtiments modernes sont très énergivores grand renfort de pétrole et de gaz en hiver et électricité en été. Dans ce chapitre, nous passerons en revue certaines des techniques passive qui utilise la chaleur de terre pour le refroidissement et le réchauffement des locaux qui réduisent la consommation d'énergies. Ces techniques passives sont prouvées très efficaces et peuvent contribuer à atteindre le confort thermique de l'habitat ainsi que une meilleure qualité de l'air à l'intérieur du local.

### 1. Les différentes méthodes de refroidissement :

#### 1.1. Le système de refroidissement active :

##### 1.1.1. La ventilation par des ventilateurs d'échappement :

Cette mode est une ancienne technique pour contrôler la température à l'intérieure de par la ventilation de l'air en utilisant les ventilateurs d'échappement tout simplement. Ces ventilateurs d'échappement fonctionnent dans la plus part des cas en DC (Direct curent) venant des batteries vont garder une température pertinente par la circulation de l'air de l'extérieur à l'intérieur.

La température élevée avec les particules (surtout le sable) venant de l'extérieure diminuent la vie de l'équipement, pour cette raison cette option n'est pas populaire [27].

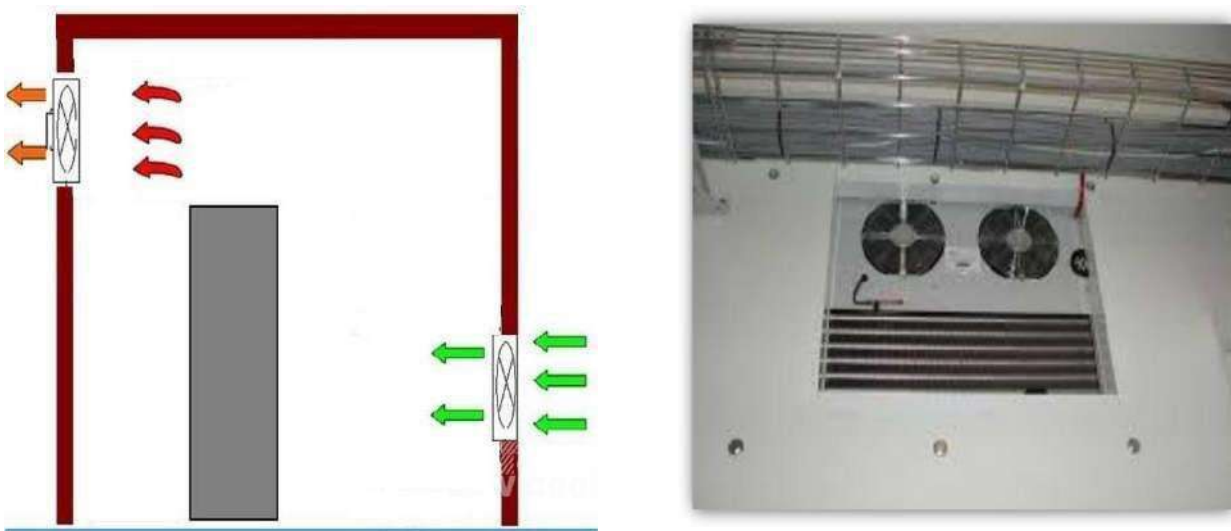


Figure 2-1: La ventilation par les ventilateurs d'échappement.

### 1.1.2. Refroidissement par Climatiseur (Mega Hissotto HP8) :

C'est un appareil split-système composé par deux parties une partie de traitement d'air et une deuxième de production de froid. Cette appareil peut être une armoire de climatisation ou un climatiseur individuelle (fenêtre ou murale). Dans certains cas la partie de traitement de l'air (L'évaporateur) elle est placée à l'intérieur du locale et le bloc frigorifique (condenseur + groupe frigorifique) à l'extérieur on appel ce système par le split-système.



Figure 2-2: Refroidissement par climatiseur

## 1.2. Le système de refroidissement passif :

### 1.2.1. Ventilation :

La ventilation c'est une stratégie passive, sans moyen mécanique, de maintenir un environnement intérieur confortable. Un des moyens déjà utilisés auparavant dans l'architecture traditionnelle exploitée sous plusieurs formes et sur plusieurs plans. Les systèmes de ventilation doivent satisfaire des exigences de confort, d'hygiène et respect de l'environnement et d'économie d'énergie. Elle est au service de ces trois fonctions principales. Face à la multitude de polluants de l'air intérieur, la ventilation a d'abord un rôle hygiénique qui consiste à maintenir une bonne qualité de l'air intérieur. Cela exige le remplacement de l'air vicié par de l'air dit « neuf », c'est-à-dire supposé exempt de polluant. Il s'agit essentiellement de prévenir l'accumulation de polluants gazeux et d'odeurs désagréables générés au sein même du bâtiment, car l'état actuel des connaissances montre que la santé et le confort des occupants sont avantagés ou défavorisés selon le type de gestion de l'environnement. La présence de moisissures, de

poussières, de dioxyde de carbone et de tout autre contaminant pouvant nuire à la santé des occupants [28].

### 1.2.2. Refroidissement par la géothermie :

Le concept de refroidissement par le sol est basé sur la dissipation de chaleur à partir d'un bâtiment sur le sol, qui pendant la saison le refroidissement a une température inférieure à l'air extérieure. Cette dissipation peut être réalisée soit par le contact direct d'une partie importante de l'enveloppe du bâtiment avec le sol (Fig.3), ou en injectant de l'air qui a déjà été distribué sous terre dans le bâtiment au moyen d'échangeur de chaleur terre – air.

Un échange de renforcement de chaleur avec l'environnement par conduction, convection et rayonnement. Pour un bâtiment ordinaire, le mécanisme principal est la convection, puis que le plupart de l'enveloppe du bâtiment est en contact avec l'air ambiant. Vient ensuite le rayonnement et, enfin, la conduction étant donné que la surface de l'enveloppe du bâtiment en contact avec le sol est la plus petite. Le principe de la terre de refroidissement par contact direct est d'augmenter l'échange de chaleur par conduction. La température de bâtiment diminue, parce que le sol est à une température inférieure à l'air pendant la période de refroidissement [29].



Figure2-3 : Pièces creusées dans la montagne en forme d'un puits. Maison troglodyte .Matmata ; Tunisie

### 1.2.3. Matériaux à changement de phase (MCPs) :

On appelle matériau à changement de phase, ou MCP, tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 °C et 80 °C. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans la vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire, etc.).[30]

### 1.2.4. Un couvert de végétation :

Jadis, l'homme a semé des vignes dans les murs et les toits de ses maisons. Tout le monde a entendu des jardins suspendus de Babylon. Aujourd'hui l'intégration de végétation dans la conception contemporaine en architecture est une opportunité pour les architectes.

Toutes les plantes sont capable de grandir verticalement ou autour d'un attachement, ils peuvent grandir au long des parois, clôtures ou d'autre structures (Voir Figure 2-16).



Figure 2- 4: couvrir par vignes

Quand la végétation autour d'est abondante elle peut réduire chaleur et réduire aussi l'effet des vagues de chaleur. Les vignes installées autour la façade réduisent la consommation de l'énergie de -50 à 70% en air conditionné. [31]

### 1.2.5. La cheminée solaire :

Une cheminée solaire appelée également cheminée provençale ou cheminée thermique est un dispositif permettant d'améliorer la ventilation naturelle d'un bâtiment en utilisant le mouvement convectif de l'air chauffé passivement dans un conduit exposé au rayonnement solaire [32]

Le but de la cheminée solaire est de générer un flux d'air à travers un local, elle convertit l'énergie thermique de l'air en énergie cinétique. La force motrice qui contrôle le débit d'air à travers la cheminée solaire est la différence de densité de l'air à l'entrée et à la sortie de la cheminée. Elle fournit une ventilation non seulement pour le refroidissement, mais aussi pour le chauffage si le ventilateur est utilisé pour diriger l'air chauffé dans le local. Quand la cheminée solaire est attachée au mur, Le principe de fonctionnement est similaire au mur Trombe. Elle fonctionne comme un chauffage passif en fournissant l'air chaud qui est chauffé par le collecteur solaire dans le local [33].

### 1.2.6. Échangeur de chaleur :

Un échangeur de chaleur est un dispositif utilisé pour modifier la température des fluides en les faisant passer à travers des tubes qui imprègnent un autre milieu. L'autre milieu est à haute température si l'on veut élever la température du liquide ou du gaz dont on veut élever la température. Le liquide ou le gaz à refroidir peut également être refroidi en le faisant passer dans des tubes qui passent au milieu d'une autre basse température. Le processus de transfert de chaleur d'un milieu à un autre est appelé échange de chaleur. L'appareil dans lequel se déroule le processus s'appelle un échangeur de chaleur.

#### 1.2.6.1 Échangeur de chaleur air-sol :

Un système de chauffage et de refroidissement passif pour les bâtiments qui dépend de la température de la terre et est relativement stable à une certaine profondeur de la surface de la terre.

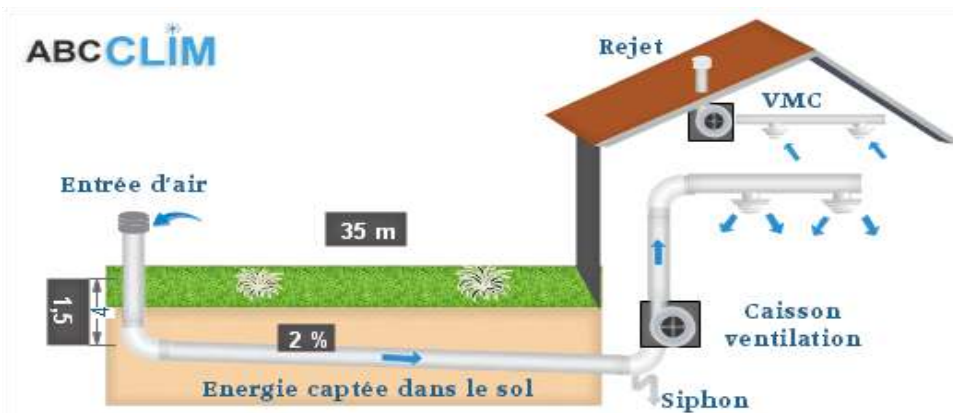


Figure 2- 5: Schéma d'un échangeur air/sol

### A. Puits canadien :

C'est ce qu'on appelle le puits provençal, et c'est le système géothermique le plus simple par lequel l'air est fourni au bâtiment en le pré-circulant à travers un tuyau enterré.

#### A.1. Principe de fonctionnement du puits canadien :

Elle dépend de la circulation de l'air par des conduites enterrées avant d'entrer dans le bâtiment, car la longueur de ces conduites varie de 25 à 30 mètres à une profondeur de un à trois mètres, selon la zone étudiée, où la température est relativement constante (de 10 à 18 degrés Celsius) selon la saison, tandis que l'air extérieur varie (de -5 à 45 degrés Celsius) dans la plupart des climats, le processus est le suivant [34]

En hiver, la température du sol est comprise entre 4 et 7°C à une profondeur d'environ deux mètres, et dans le cas d'une température extérieure de -10°C, de l'air frais sera introduit dans le bâtiment à + 2°C, ce qui permet d'économiser jusqu'à 15% de chauffage selon la logique. Le puits canadien permet également de maintenir le bâtiment à l'abri du gel. [35]



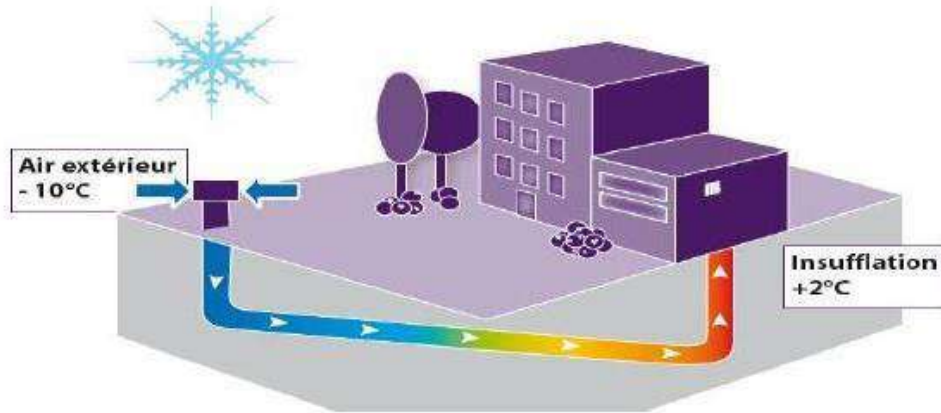


Figure 2- 6 : Description d'un puits canadien en Hiver

En été, la température du sol est d'environ  $15^{\circ}\text{C}$  à une profondeur de deux mètres, dans le cas de la température extérieure  $+30^{\circ}\text{C}$ , de l'air frais sera introduit dans le bâtiment à  $+20^{\circ}\text{C}$  qui permet de refroidir le milieu environnant sans avoir recours à la climatisation [35]

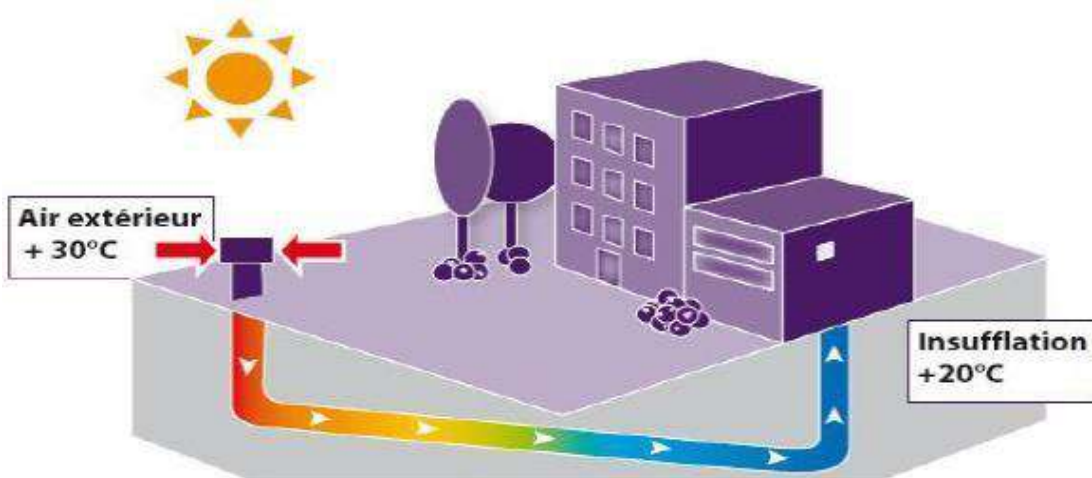


Figure 2- 7 : Description d'un puits canadien en été

Dans les périodes intermédiaires, l'air neuf passe soit par l'accumulateur enterré, soit par l'entrée d'air directe en fonction de la température extérieure, et est régulé automatiquement par un thermostat ou manuellement par un contrôle de débit.

## A.2. Les principaux éléments d'un puits canadien :

### A.2.1. Prise d'air neuf :

Tous les échangeurs air-sol possèdent une prise d'air neuf. Elle peut être en colonne extérieure circulaire ou cubique et placée en façade de bâtiment ou à distance lorsque le terrain le permet. Ses dimensions sont généralement les mêmes que celles des conduits auxquels elle est reliée de manière à ne pas occasionner de variations de vitesse et de pertes de charge. Elle peut être omnidirectionnelle ou unidirectionnelle en fonction des éventuelles sources de pollution environnantes. Elle est souvent pourvue d'un chapeau et d'ailettes empêchant l'eau de pluie de pénétrer dans l'échangeur air -sol. La prise d'air est généralement placée légèrement en hauteur de manière à ne pas capter trop de poussières. Elle est fixée dans le sol par socle béton [36].



Figure 2- 8 : Différentes modèles des Prises d'air

La matière de la prise d'air peut être : l'acier inoxydable, l'acier galvanisé, le béton, le polyéthylène

### A.2.2. Échangeur géothermique :

Il est constitué d'un ou plusieurs tubes assurant un triple rôle : canaliser le flux d'air, permettre les échanges thermiques entre l'air et le sol et assurer la tenue mécanique de l'ouvrage. Leurs principales caractéristiques sont leurs dimensions (diamètre, longueur) et leur matériau.



Figure 2- 9: Echangeur géothermique

### A.2.3. Système d'évacuation des condensats :

Le fait que de l'air chaud et humide provenant de l'extérieur se refroidisse au contact des parois froides du puits canadien peut engendrer un phénomène de condensation dans les conduits. Dans ce cas, un système doit permettre d'extraire ces condensats. Pour ce faire, il existe trois possibilités :

- Dans le cas où le bâtiment possède un sous-sol, alors le point bas de l'échangeur thermique peut être situé à ce niveau. Les condensats sont alors récupérés grâce à la pente des conduits de 2 à 3% et à un siphon. Le siphon est dans raccordée au réseau d'écoulement des eaux usées ou des eaux pluviales lorsque celui dernier existe.
- Si le sol est perméable et que la topographie le permet, un puits d'infiltration peut être placé au niveau du point bas de l'installation (vers le bâtiment ou vers la prise d'air). Il faut au préalable s'assurer de l'absence de nappe, source ou écoulements souterrains
- Si la nature du sol ne permet pas l'infiltration ou si il y a un risque de remontée d'eau (nappe libre superficielle par exemple) dans le puits, alors l'installation d'une fosse en point bas de l'installation équipée d'une pompe ne peut être envisagé. La pompe est dans ce cas raccordée au réseau d'écoulement des eaux usées ou des eaux pluviales lorsqu'ils existent.

Dans le cas contraire, il faut prévoir une zone d'épandage [37]

### A.2.4. Ventilateur :

Pour garantir l'apport en air neuf du bâtiment, le système du puits canadien nécessite un couplage avec une ventilation mécanique capable de vaincre les pertes de charge engendrées par le passage dans l'échangeur. Le ventilateur doit être dimensionné de manière à assurer les débits réglementaires [37].

#### 1.2.6.1.1 Les type les échangeurs air/ sol :

La connaissance des propriétés thermiques et physiques du sol (conductivité thermique, densité, diffusivité etc.), profondeur du substratum rocheux, profondeur de l'eau et la nature du sol. Ces informations guident le concepteur dans la sélection du type de système échangeurs air/ sol à utiliser et dans la conception du système. Il existe deux types principaux :

- boucle ouverte : aspirer l'air extérieur à travers les tuyaux pour ventiler le maison [38].

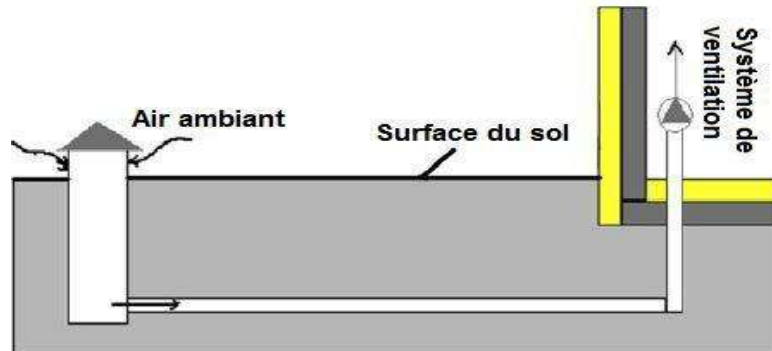


Figure 2- 10: Echangeur air sol (système à boucle ouverte)

- boucle fermée : recirculation de l'air du bâtiment à travers les tubes de terre [38].

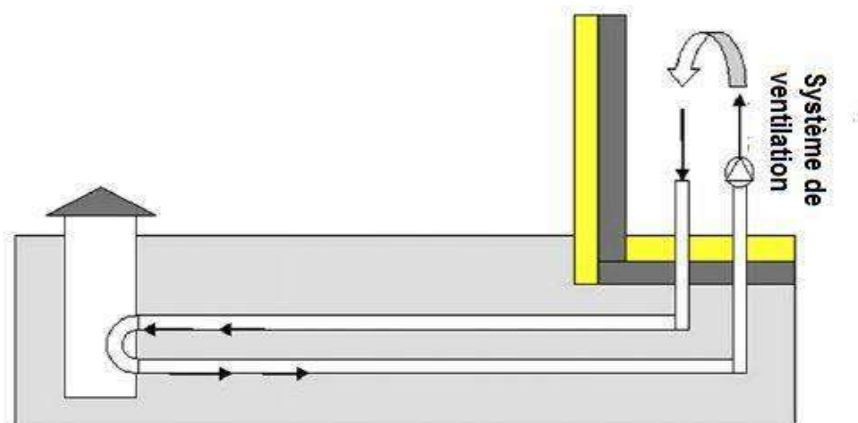


Figure 2- 11: Echangeur air sol (système à boucle fermée)

### 1.2.6.1.2 La forme d'échangeur air/ sol :

#### a) Echangeur Vertical :

Les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment. La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau glycosée. L'emprise au sol est minime par rapport aux capteurs horizontaux [39]

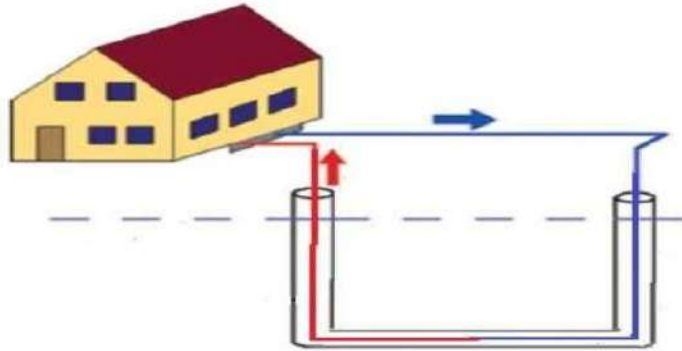


Figure 2-12: Echangeur vertical

#### b) Echangeur Horizontal :

Il n'existe actuellement pas de réglementation ou de normes concernant la mise en œuvre des capteurs horizontaux utilisés dans des installations géothermiques. Seules des recommandations et des conseils pratiques sont accessibles [39].

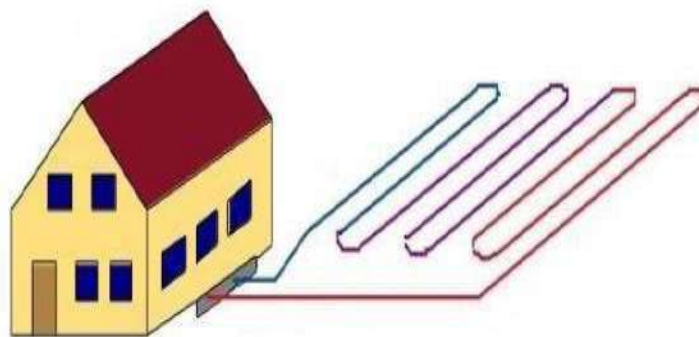


Figure 2- 13: Echangeur air sol horizontal (style européen).

**c) Echangeur Spiral :**

L'échangeur de chaleur à spirale est constitué de 2 canaux concentriques formés par deux plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale. La distance entre les deux canaux est obtenue à l'aide de taquets soudés sur les plaques et tient compte des débits, de la taille des particules pour les fluides chargés et des pertes de charge. Ces taquets ont également pour effet de favoriser un écoulement turbulent dans chaque canal et d'améliorer ainsi le coefficient d'échange [39].

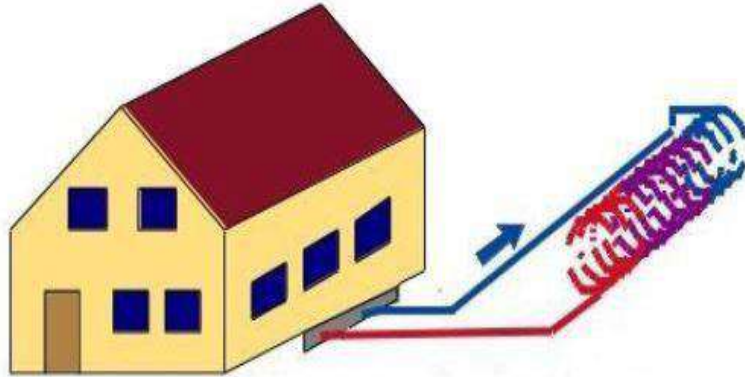


Figure 2- 14: Echangeur air sol spirale (Amérique du Nord)

**1.2.6.2 Caractéristiques techniques de l'échangeur air-sol :****A. Le débit d'air total :**

Le débit d'air dans le conduit agit simultanément sur l'échange thermique entre l'air et le conduit et sur l'énergie calorifique fournie par le bâtiment, le meilleur débit doit être sélectionné. Le débit total doit correspondre avant tout aux besoins de renouvellement d'air dans le local ou zone ventilée.

**B. Longueur des tubes :**

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes.

Il existe donc une longueur idéale de l'échangeur, liée à la longueur caractéristique d'échange thermique  $L$ , qui peut être obtenue en comparant le surcoût économique de l'échangeur (constant avec la longueur) avec l'application de l'économie d'énergie par allongement du tube [40].

**C. Profondeur d'enfouissement des tubes :**

La terre agit comme un réservoir de chaleur entre l'extérieur et le tuyau enterré. C'est lui qui isole ce dernier de l'influence des conditions météorologiques. Ainsi la profondeur d'enfouissement est un paramètre important qui va influencer sur la qualité de cette isolation, une plus grande profondeur améliore l'isolation des canalisations et le déphasage.

Nisreen Hetraff explique dans son étude qu'après une profondeur de 3 mètres, la température est devenue constante [41]

**D. Diamètre des tubes :**

L'augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais n'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au-delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement de l'air, le coefficient d'échange convectif chute. Ceci est dû au fait que l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite, où va être échangée la chaleur. L'air circulant au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol.

**E. Matériaux pour les tubes :**

Le matériau du tuyau est plus important car il a un effet direct sur l'échange de chaleur sol/puits. Le choix des matériaux varie en fonction des contraintes mécaniques, des dimensions et des performances thermiques souhaitées.

L'utilisation de parois combinées à haute conductivité thermique est à privilégier car elles permettent d'augmenter les échanges et donc de réduire la longueur du puits. La faible épaisseur des tubes fait que leurs propriétés thermiques ont peu d'effet sur le comportement global du puits. Cependant, ces propriétés peuvent avoir un impact sur le comportement dynamique de l'échangeur, et il est nécessaire d'en tenir compte.

**F. Les propriétés thermiques du sol :**

La nature de sol est un des principaux éléments à prendre en compte lors de la conception d'un échangeur air-sol. La capacité calorifique et la conductivité du sol ont une influence importante sur l'efficacité du système. Elles dépendent de la composition du sol mais aussi de son taux d'humidité et des migrations d'eau en son sein.

Ces deux propriétés thermiques du sol sont expliquées ci-dessous :

➤ **Conductivité thermique du sol :**

La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives et sa teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide. La conductivité thermique d'un sol peut donc varier dans le temps, notamment en fonction des évolutions de sa teneur en eau dues aux variations climatiques et au changement de saison.

La figure (2-27) montre la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau :

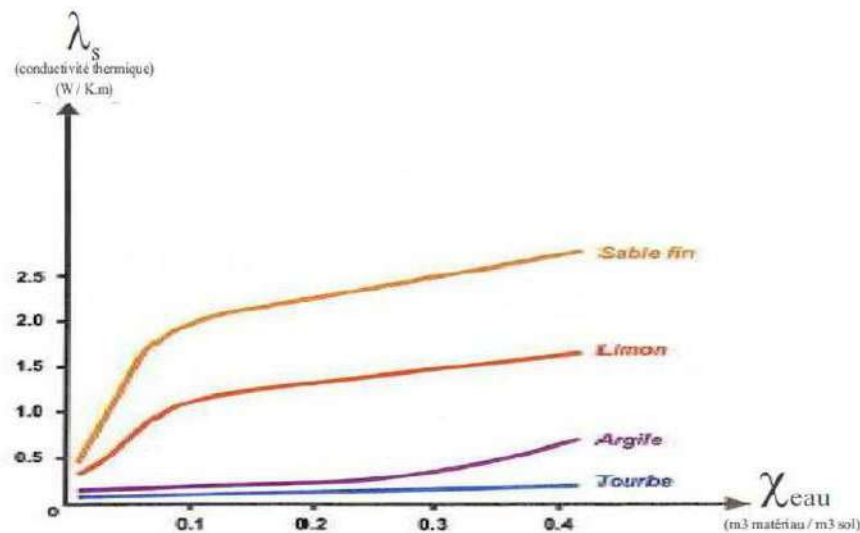


Figure 2- 15: Conductivité thermique des sols.

➤ **Capacité calorifique du sol**

La capacité calorifique  $C_s$  d'un sol s'exprime par la moyenne pondérée des capacités calorifiques de ses constituants : minéraux, matière organique, eau, air :

$$C_s = \sum X_i \rho_i C_i$$

Où  $X_i$ ,  $\rho_i$ ,  $C_i$  représentent respectivement la teneur du matériau (m<sup>3</sup> de matériau/m<sup>3</sup> de sol), sa masse volumique et sa capacité calorifique. Comme l'eau et la matière organique ont une capacité calorifique supérieure à celle des éléments minéraux, un sol humide et riche en matière organique stockera mieux la chaleur qu'un sol sec, riche en minéraux.



Le tableau suivant montre les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol :

Tableau 2- 1: les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol.

	Masse volumique	Capacité calorifique	Conductivité thermique
Matière	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	C [KJ/Kg k]	$\lambda$ [W/m k]
Minéraux (moyenne)	2650	0.80	2.90
Sable et Gravier	1700 à 2200	0.91 à 1.18	2.00
Argile et limon	1200 à 1800	1.67 à 2.50	1.50
Matière organique	1300	1.90	1.25
<b>Eau</b>	<b>1000</b>	<b>4.20</b>	<b>0.585</b>
Glacé	920	2.10	2.20
Air	1.250	1.00	0.023

Le résultat qu'on peut extraire du Tableau (2-1) : il est préférable de choisir un sol argilo sableux humide pour l'installation d'un système puits canadien, celle-ci donne une quantité d'énergie récupérable optimale.

## 2. Caractéristiques climatiques la zone Ouargla :

La wilaya d'Ouargla, est située au Sud-Est du pays couvrant une superficie de 163.233 km<sup>2</sup>, plongée au fond d'une large cuvette de la vallée de l'Oued Mya. Latitude : 31°56' Nord. Longitude : 5°24' Est. Altitude : 142 m. La wilaya d'Ouargla est caractérisée par climat saharien. Avec une pluviométrie très réduit, vent forte, des températures élevées, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l'écosystème. Sont des facteurs qui influent sur le bilan thermique des logements, des immeubles administratifs et collectifs, etc. [42]

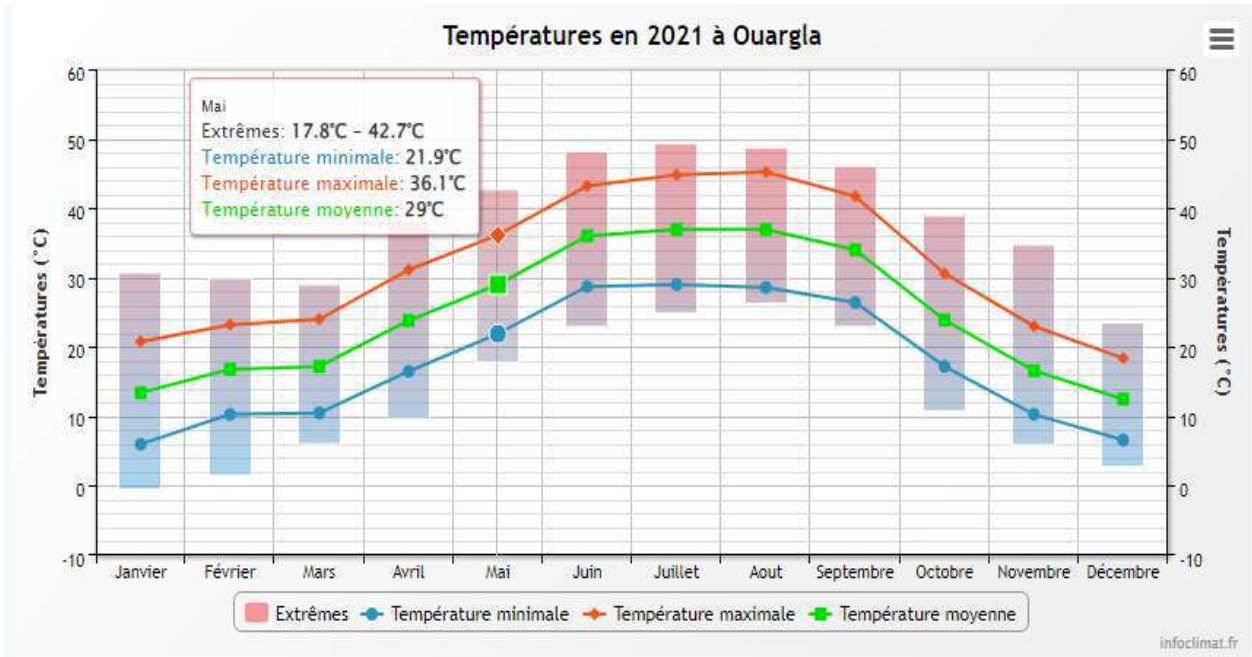


Figure 2- 16 : Températures en 2021 à Ouargla [43]

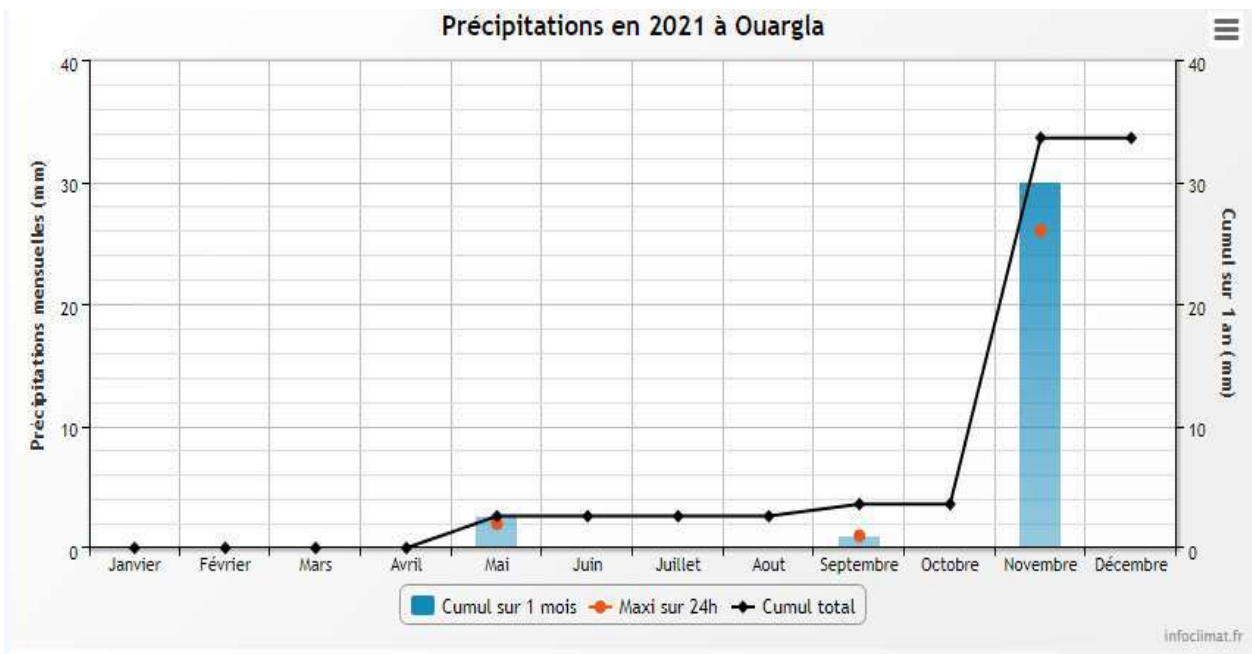


Figure 2- 17 : Précipitations en 2021 à Ouargla [43]

# Chapitre 3:

**Modélisation Mathématique**

## Introduction

La chaleur passe automatiquement d'un objet à haute température à un objet à basse température la même chose se situe entre le corps humain et son environnement. Et quand on veut régler la température ambiante pour le confort humain, il doit y avoir un certain type d'échange de chaleur, comme le chauffage lorsqu'il est, Il fait froid en hiver ou se rafraîchit lorsqu'il fait chaud en été On sait que si deux objets sont en contact, la chaleur sera transférée de l'objet à haute température

Au corps avec la température la plus basse, et le transfert de chaleur entre les deux corps s'arrête lorsqu'ils sont égaux Leur température est atteinte et l'équilibre thermique est atteint

### 1. Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour rafraîchissement :

L'échange thermique entre le sol et l'air circulant dans les tubes dépend de la structure de l'échangeur, de la température d'entrée de l'air et de la température du sol à proximité des tubes. Si la première température constitue une sollicitation qui peut être fournie par un fichier de données météorologiques, la seconde doit nécessairement être calculée, C'est pourquoi le modèle réalisé est structuré en deux parties. Une première partie calcule la température en tout point du sol, hors influence de l'échangeur (température du sol « non perturbé »). Cette température est utilisée comme condition aux limites du système étudié. Une deuxième partie, constituant le modèle d'échangeur proprement dit, calcule la température de l'air en sortie d'échangeur.

Seul l'échange thermique au niveau des tubes est considéré. Les tubes sont supposés identiques et le sol est supposé présenter des propriétés homogènes autour des tubes. Afin de tenir compte des aspects dynamiques et spatiaux de l'échange thermique, les tubes et le sol à son voisinage sont représentés par un maillage, ce maillage comprend plusieurs mailles cylindriques concentriques.

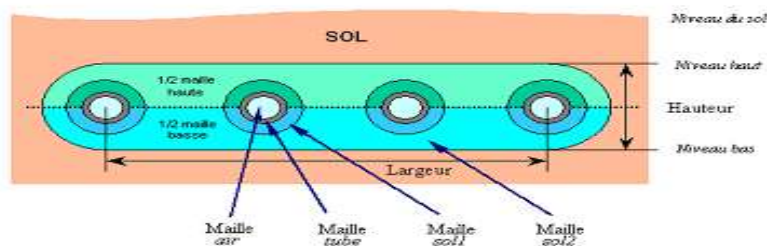


Figure 3-1 : Aspect du maillage (coupe transversale)





- $V_e$  : vitesse d'entrée.
- $T_a$  : température de l'air.
- $V_s$  : vitesse de sortie.
- $T_s$  : température de sortie.

Figure 3-3 : Géométrie du système.

**3. Bilan Thermique :**

Le flux thermique par unité de surface ' $\varphi$ ' à travers la paroi du tube est proportionnel à la différence de température entre la surface interne,  $T_{sol}$ , et externe du tube,  $T_{air}$ , et à l'inverse de la résistance thermique de la paroi R.

$$\varphi = \frac{T_{sol} - T_{air}}{R} \dots \dots \dots (3.1)$$

La résistance de la paroi (gaine) est composée d'une part, de la résistance à la conduction et d'autre part de la résistance à la convection :

$$R = R_{cd} + R_{cv} \dots \dots \dots (3.2)$$

La quantité de chaleur échangée par unité de temps correspond au flux thermique multiplié par la surface d'échange :

$$dQ = \varphi \cdot S \cdot dt = \frac{T_{sol} - T_{air}}{R} S \cdot dt \dots \dots \dots (3.3)$$

Telle que  $S = S_{laterale}$

$$dQ = \varphi \cdot S \cdot dt = \frac{T_{sol} - T_{air}}{R} S \cdot dt = \frac{T_{sol} - T_{air}}{R} 2 \cdot r \cdot \pi \cdot L \cdot dt \dots \dots (3.4)$$

$$q_v = S.V = \frac{\pi.d^2}{4}.V$$

$q_v$  Est constant donc V est constant

$$V = \frac{dL}{dt} \implies dt = \frac{dL}{V}$$

Cet échange de chaleur entraîne la variation de la température de l'air.

$$dQ = c. \rho. V. dT_{air} = c. \rho. r^2. \pi. LdT_{air} \dots \dots \dots (3.5)$$

Egalisons les expressions (2.13) et (2.14) on aura :

$$\frac{dT_{air}}{-T_{air} + T_{sol}} = \frac{2. dL}{c. \rho. r. V. R} \dots \dots \dots (3.6)$$

**3.1 Par conduction :**

Conduction est une transmission de la chaleur dans la matière par vibration moléculaire. Les vibrations thermiques des cristaux sont des phonons excités.

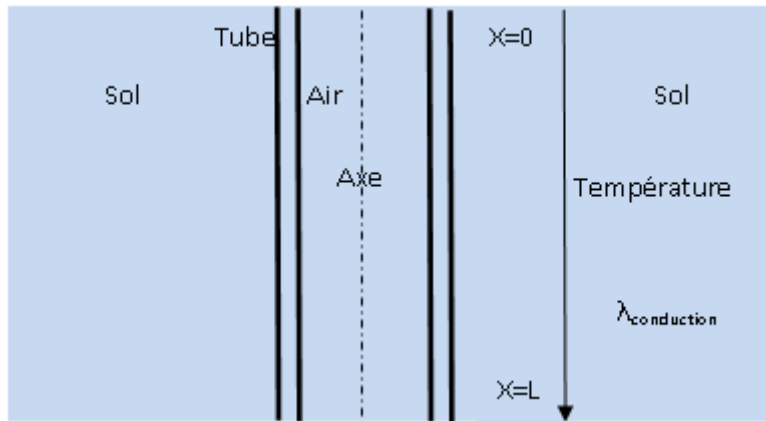


Figure 3-4 : Schématisation du Problème Physique

L'équation générale de la conduction s'écrit comme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q'}{\rho c} \dots \dots \dots (3.7)$$

Pour un transfert unidimensionnel suivant l'axe des x

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0$$

Et sans source interne  $Q'=0$  l'équation se simplifie pour s'écrire :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Avec :

$$\alpha = \frac{K}{\rho c}$$

Nous sommes donc confrontés à une équation différentielle aux dérivées partielles de la forme:

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \dots \dots \dots (3.8)$$

On pose

$$T(x, t) = \theta(x, t) + T_i$$

Alors eq (1) s'écrit par

$$\frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} \dots \dots \dots (3.9)$$

La solution générale de  $\theta(x, t)$  est :

$$\theta(x, t) = f(t)R(x)$$

Remplaçons dans l'équation (2.19), on trouve :

$$\frac{\partial^2 f(t)R(x)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial f(t)R(x)}{\partial t}$$

Puis diviser par  $\theta(x, t)$  , on trouve :

$$\frac{d^2 R(x)}{R(x)dx^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{df(t)}{f(t)dt}$$

Cela signifie que

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 R(x)}{R(x)dx^2} = \text{cte} \dots \dots \dots (3.10) \\ \frac{1}{\alpha f(t)} \frac{df(t)}{dt} = \text{cte} \dots \dots \dots (3.11) \end{array} \right.$$



Cette constant, par exemple pendue  $\text{cte} = a$

Le choix de la constant (a) est déterminé des conditions initiales du système

L'équation (2.21) est :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha f(t)} \frac{df(t)}{dt} &= a \Rightarrow \frac{df}{f} = \alpha a dt \\ \Rightarrow \ln f(t) - \ln f(i) &= \alpha a t \\ \Rightarrow \ln \frac{f(t)}{f(i)} &= \alpha a t \\ \Rightarrow \frac{f(t)}{f(i)} &= e^{\alpha a t} \\ \Rightarrow f(t) &= f(i)e^{\alpha a t} \dots \dots \dots (3.12) \end{aligned}$$

( $\alpha a = i\omega$ ) Fréquence que l'excitation pour cela en posant  $\alpha a = i\omega$ , alors :

$$f(t) = f(i)e^{i\omega t} \dots \dots \dots (3.13)$$

La deuxième équation (2.20) :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 R(x)}{R(x) dx^2} &= a \\ \frac{d^2 R(x)}{dx^2} - aR(x) &= 0 \dots \dots \dots (3.14) \end{aligned}$$

Sa solution s'écrit comme :

$$R(x) = Ae^{\sqrt{a}x} + Be^{-\sqrt{a}x}$$

Le premier terme ( $Ae^{\sqrt{a}x}$ ), est physiquement inacceptable puisque

$$R(x) \underset{x \rightarrow \infty}{=} \infty \Rightarrow \text{Pour cela nous prenons } A=0$$

On aura

$$\begin{aligned} R(x) &= Be^{-\sqrt{a}x} \\ R(x) &= B e^{-\sqrt{\frac{i\omega}{\alpha}} x} \dots \dots \dots (3.15) \\ \Rightarrow R(x) &= Be^{\sqrt{-i\omega}x} = B \exp \left[ -\sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} e^{i\frac{\pi}{2}} x \right] \\ &= B \exp \left[ -\sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} e^{i\frac{\pi}{4}} x \right] \end{aligned}$$

$$= \text{Bexp} \left[ -\sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) x \right]$$

$$= \text{Bexp} \left[ -\sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} + i \frac{1}{\sqrt{2}} \right) x \right]$$

Donc

$$R(x) = \text{Bexp} \left[ -\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} (1 + i) x \right] \dots \dots \dots (3.16)$$

$$\Rightarrow \theta(x, t) = R(x)f(x)$$

$$\theta(x, t) = f(i) e^{i\omega t} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}(1+i)x}} \dots \dots \dots (3.17)$$

Si x=0, on a

$$\theta(0, t) = T_0 \cos \omega t$$

$$\Rightarrow f_i B = T_0 \dots \dots \dots (3.18)$$

Développons l'expression  $\theta(0, t)$  :

$$\theta(x, t) = T_0 e^{i\omega t} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}(1+i)x}}$$

$$= T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left( e^{i\omega t} e^{-i\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \right)$$

$$= T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} e^{i(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x)}$$

$$= T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left( \cos(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x) + i \sin(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x) \right)$$

$$\Rightarrow \theta(x, t) = T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left( \cos \omega t \cos \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x + \sin \omega t \sin \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x + i \sin \omega t \cos \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x - i \cos \omega t \sin \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x \right)$$

Ou

$$e^{i\omega t} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} = (\cos \omega t + i \sin \omega t) (\cos \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x - i \sin \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x)$$

$$= \cos \omega t \cos \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x + \sin \omega t \sin \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x + i \sin \omega t \cos \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x - i \cos \omega t \sin \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x$$

$$\Rightarrow \theta(x, t) = T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x\right) \dots \dots \dots (3.19)$$

Alors finalement l'équation aura la forme :

$$T = T_i + T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x\right) \dots \dots \dots (3.20)$$

**3.2 Par convection thermique :**

Le mode transfert de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont appelés transferts thermique par convection.

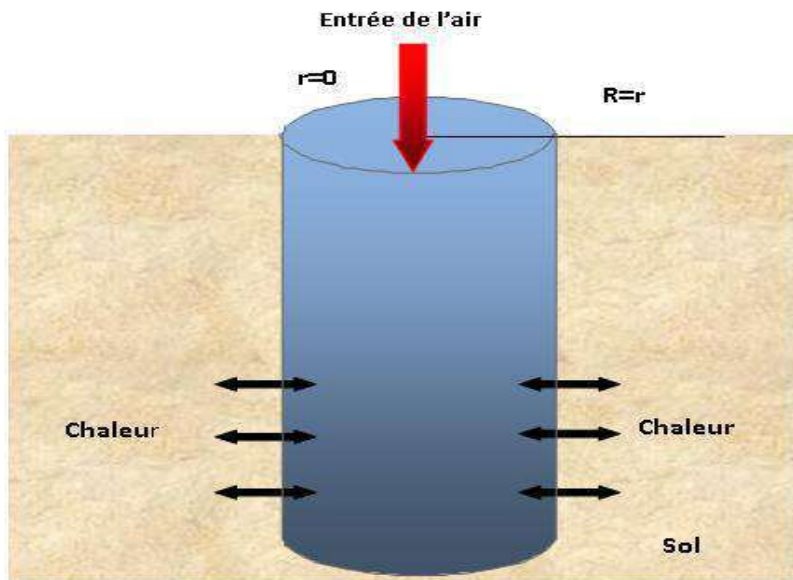


Figure 3-5 : Echangeur de chaleur entre air et sol

**3.3 L'étude de processus thermique à l'intérieur de la conduite :**

On considère, que la conductivité thermique de sol est égale la conductivité thermique de matière de conduit

$$\lambda_{cond} = \lambda_{sol}$$

Le bilan thermique est devient :

$$\rho \frac{DE}{Dt} = div(\overrightarrow{\lambda grad T}) - P div \vec{q} + \phi \dots \dots \dots (3.30)$$

Comme nous avons indiqué antérieurement que l'air est considéré comme un fluide incompressible donc :

$$div \vec{q} = 0$$

-Mouvement unidirectionnel sur l'axe  $\rightarrow x$

$$(v = w = 0), \text{ Établi } \frac{d}{dx} \rightarrow 0$$

**3.4 Hypothèses supplémentaires :**

✚ Les propriétés physiques de fluide est constantes  $\lambda, C_v, \mu$

✚ On donne l'énergie interne par  $E = C_v T + E_0$

✚ Phénomène thermique est permanent

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Donc l'équation de bilan thermique s'écrit comme :

$$\rho C_v u \frac{dT}{dx} = \lambda_f \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] + \mu \left( \frac{du}{dr} \right)^2 \dots \dots \dots (3.21)$$

En générale, les deux termes de dissipation visqueuse  $\mu \left( \frac{du}{dr} \right)^2$  et de conduction  $\lambda_f \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right]$  sont égaux à zéro

Dans ces conditions, l'équation (2 .32) s'écrit :

$$\rho C_v u \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda_f}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (3.22)$$

On tire l'attention que nous avons considéré le fluide est incompressible à une viscosité constante, sans oublier que l'écoulement d'air faite dans un tube de section circulaire. Ce conduit que le régime dynamique est permanent.

**4. Equation du mouvement :**

L'équation de mouvement est très connue dans le domaine d'écoulement des fluides que s'appelé l'équation de Navier-stockes, on l'utilisé comme suit pour un écoulement tridimensionnel :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = v. \nabla^2 U \dots \dots \dots (3.23)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = v. \nabla^2 V \dots \dots \dots (3.24)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = v. \nabla^2 w \dots \dots \dots (3.25)$$

En respectant les hypothèses précédentes on obtient :

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0, \frac{\partial P}{\partial z} = 0, P(x) = P$$

L'équation de conservation de masse s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (3.26)$$

Donc l'équation de Navier-Stockes sur l'axe d'abscisse cartésienne devient :

$$- \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v. \nabla^2 U = 0 \dots \dots \dots (3.27)$$

L'équation s'écrit aux coordonnées cylindriques comme suit :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{\rho} \nabla \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial r} \right] = \frac{\mu}{\rho} \nabla + \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial r} + \left[ r \frac{\partial u}{\partial r} \right] \dots \dots \dots (3.28)$$

Avec :

$$\mu. \nabla^2 u = \frac{\partial P}{\partial x}$$

On simplifiant l'équation et on l'égalisant par la constante  $-\alpha$  :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial u}{\partial r} \right] = -\alpha \dots \dots \dots (3.29)$$

**5. Les conditions aux limites :**

Selon les démarches de simplifications les équations susvisés, on doit les faites cas par cas en respectant les conditions aux limités prescrites par la situation physique de domaine d'études :

**5.1 Cas le flux aux côtés des parois est constant :**

Pour trouver les solutions de l'équation différentielle, on doit poser les conditions aux limites adéquates :

Dans l'instant  $t \geq 0$ , Le fluide rentra à la conduite à l'instant  $t \geq 0$  avec une température  $T_1$

$$T_1(x = 0, t = t_1)$$

La condition de symétrie se traduit par

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \text{ pour } r = 0$$

A la surface de contact air sol, la densité de flux s'écrit :

$$q_0 = \lambda_{fluide} \frac{\partial T}{\partial r} \text{ Pour } r = R$$

Par changement de variables suivant :

$$T^* = \frac{T - T_i}{q_0 \left(\frac{R}{\lambda}\right)}, \quad r^* = \frac{r}{R}, \quad x^* = \frac{x}{R} \frac{\gamma}{Re \cdot Pr}$$

Avec:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda_f}, \quad Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Avec:

- ❖ Le nombre de Prandtl (Pr) : Caractérise le comportement thermique du fluide. Il est défini comme le rapport de la viscosité cinématique du fluide sur sa diffusivité thermique
- ❖ Le nombre de Reynolds (Re) : Caractérise le régime de l'écoulement (laminaire, turbulent ou mixte). Il est défini comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

Après simplification mathématique on aura :

$$(1-r^{*2}) \cdot \frac{dT^*}{dx^*} = \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \cdot \frac{dT^*}{dr^*} \right) \dots \dots \dots (3.30)$$

Les conditions aux limites liées au problème (2.41) sont :

$$\begin{cases} \frac{dT^*}{dr^*} = -1, & r^* = 1 \\ T^* = 0, & x^* = 0 \\ \frac{dT^*}{dr^*} = 0, & r^* = 0 \end{cases}$$

**5.2 Cas d’une variation de la température à la paroi :**

Après le développement de l’équation de bilan thermique (2.33) on aura :

$$\rho C_v U \frac{dT}{dx} = \lambda_f \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (3.31)$$

Implique que

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\lambda_f}{\rho_f C_f u} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (3.32)$$

En tenant compte :

$$u = Cste; \quad a = \frac{\lambda_f}{\rho_f C_f}$$

L’équation sera :

$$\frac{dT}{dx} = \frac{a}{u} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (3.33)$$

Dans les coordonnées cartésiennes l’équation devienne :

$$\frac{dT}{dx} = \frac{a}{u} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \dots \dots \dots (3.34)$$





# Chapitre 4 :

**Résolution Numérique**

## Introduction

La simulation numériques en mécanique des fluides (CFD ; Computational Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournables de conception et est largement utilisée dans l'industrie. Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre : la nature du fluide, le comportement thermodynamique, la modélisation du milieu et le problème stationnaire ,

Intuitif, mais extrêmement puissant, notre logiciel de calcul de dynamique des fluides accélère le développement de produits. Les produits Ansys CFD vous donnent la possibilité de faire des progrès incroyables grâce à l'innovation, car les pressions pour optimiser les produits augmentent et les marges d'erreur se réduisent rapidement. Composé des solveurs les plus précis et les plus fiables du secteur, vous aurez confiance en vos résultats

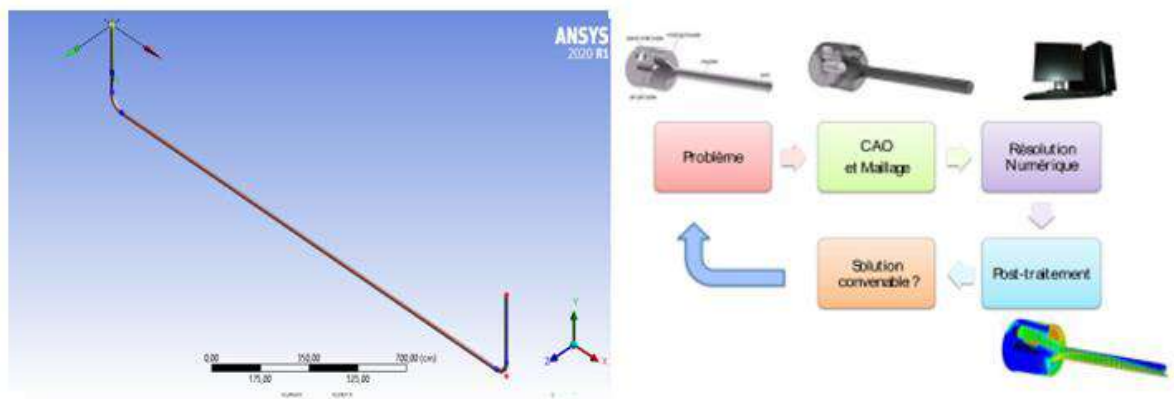


Figure 4-1 : les différentes étapes d'une simulation

### 1. Définition d'ANSYS Inc:

ANSYS, Inc est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en As



Figure 4-2 : logo de l'entreprise

**2. Description et modélisation du problème:**

On étudie dans ce travail le transfert de chaleur stationnaire 3d dans un tube U a trois différents diamètres pour 3 différent débit d'air:

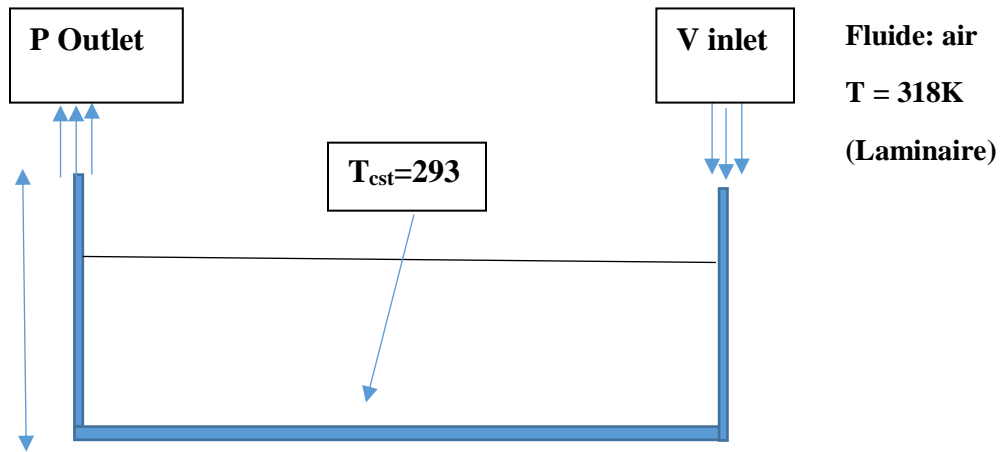


Figure 4-3 : Position du problème

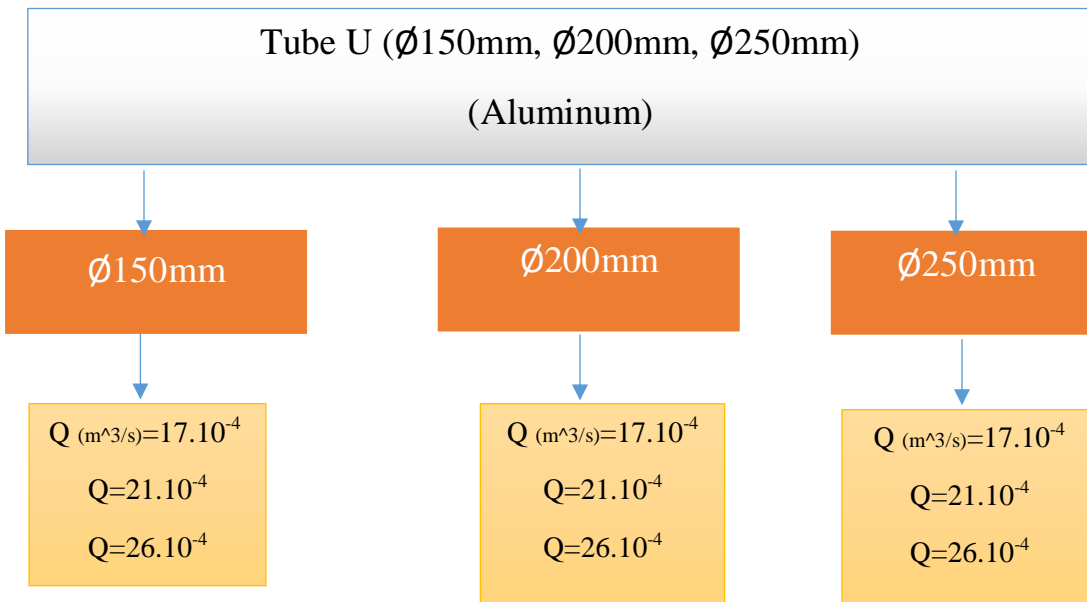


Figure 4-4 :L'organigramme suivant représente l'aspect de travail

Les trois valeurs de diamètre ont été sélectionnées sur la base d'études antérieures sur le même sujet. Les valeurs de débit ont été sélectionnées mathématiquement selon les conditions

mentionnées dans le chapitre précédent. La valeur de débit a été contrôlée et modifiée en modifiant la vitesse.

Caractéristiques de l'ordinateur utilisé pour effectuer la simulation :

Dell latitude E.6410, RAM 4Go , Système 64 bits

3.1. Pour effectuer une simulation par ANSYS Workbench à un écoulement dans un tube U il faut suivre une logique de calcul. Cette simulation faite à partir des processus "avec une approche interactive, étape par étape. Cette logique de calcul résumées dans le chemin suivant :

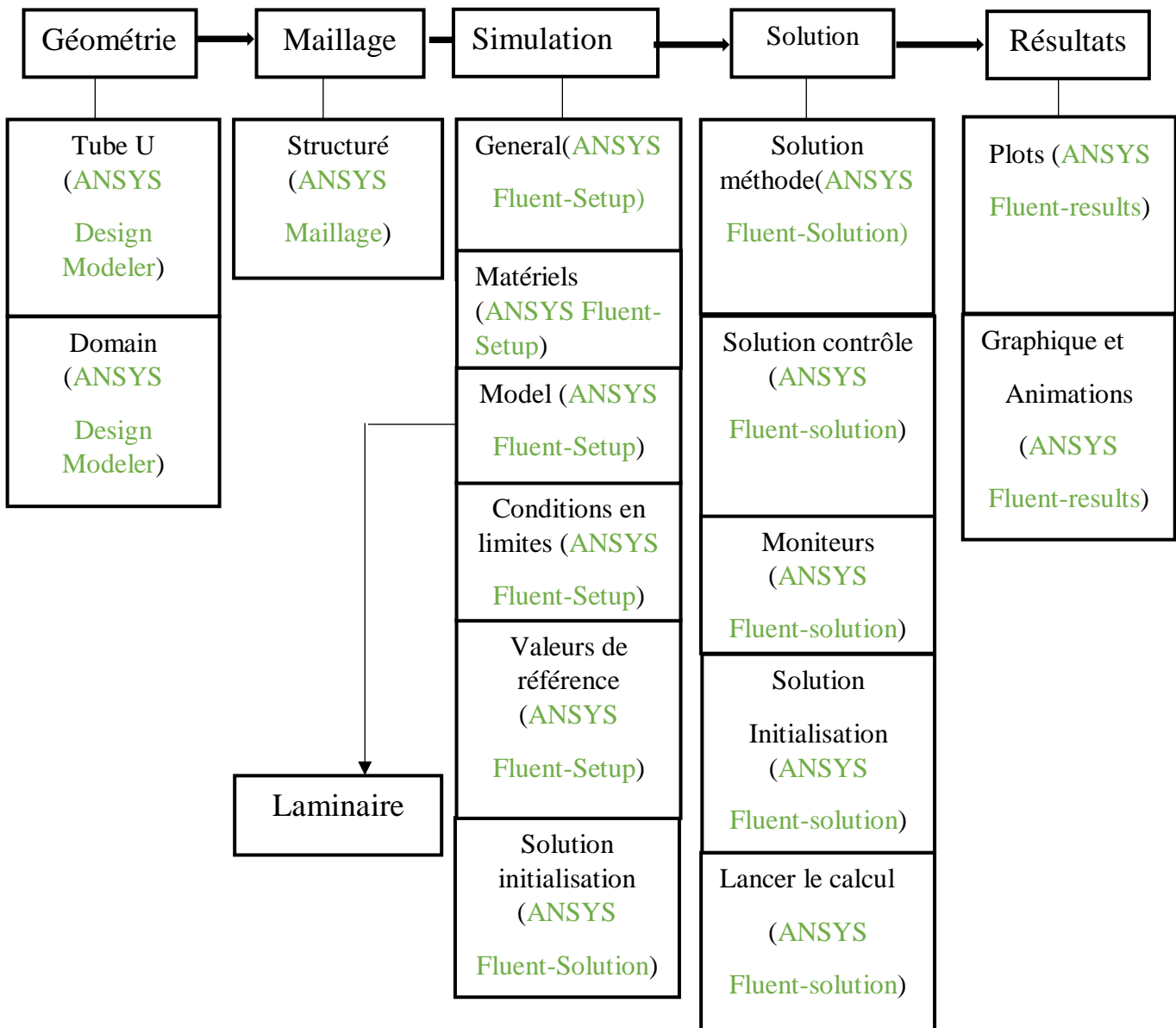


Figure 4-5: Chemin de "Processus CFD" pour la simulation numérique

### 3. Création d'un système d'analyse Fluide Flow 3d:

Pour créer un « Analysis System », c'est-à-dire une chaîne de calcul pour une simulation Fluent.

#### 4.1. Création de la géométrie en Ansys workbench:

##### 4.1.1. Etape 01 in workbench:

✓ Ouvreur Ansys workbench choisie mécanique de fluide (fluent) :

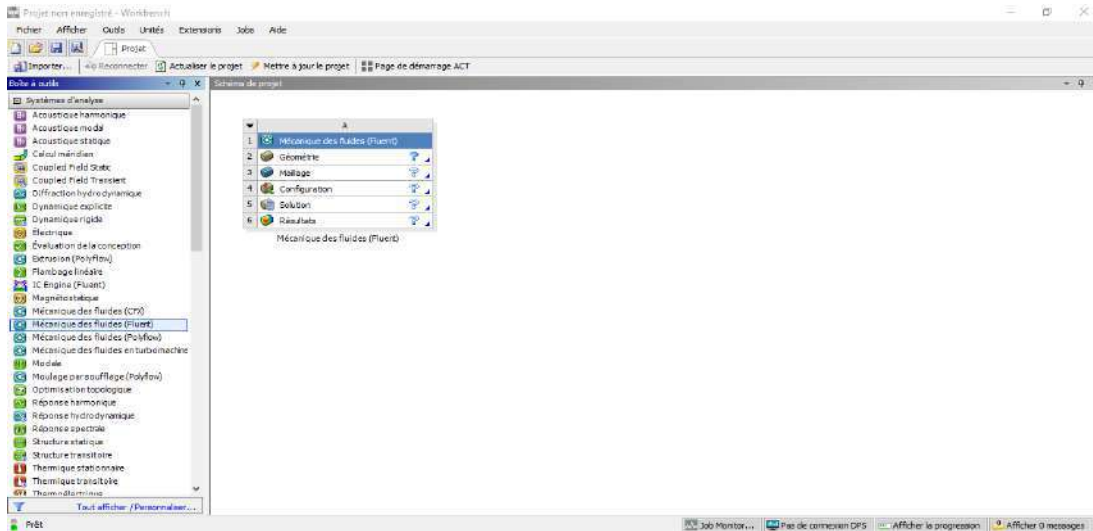


Figure 4-6: page de projet in workbench

##### 4.1.2. Etape 02 in Design modeler:

✓ Désigne la forme de la géométrie in deux plans et in 1D :

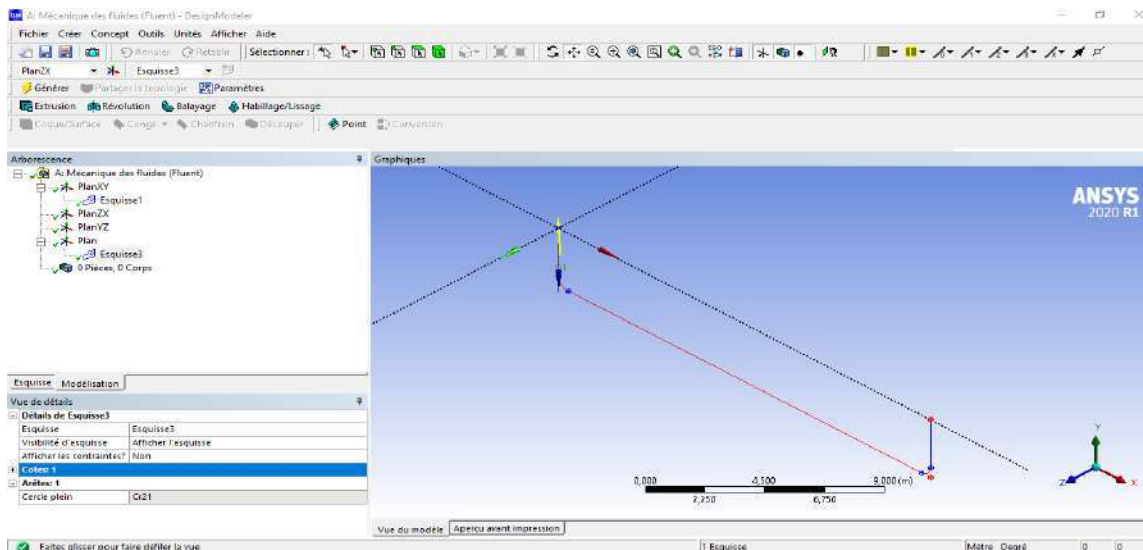
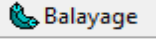


Figure 4-7: la forme de la géométrie in deux plans et in 1D

✓ Cliquez sur  Balayage et choisissez Esquisse 1, Esquisse3 :

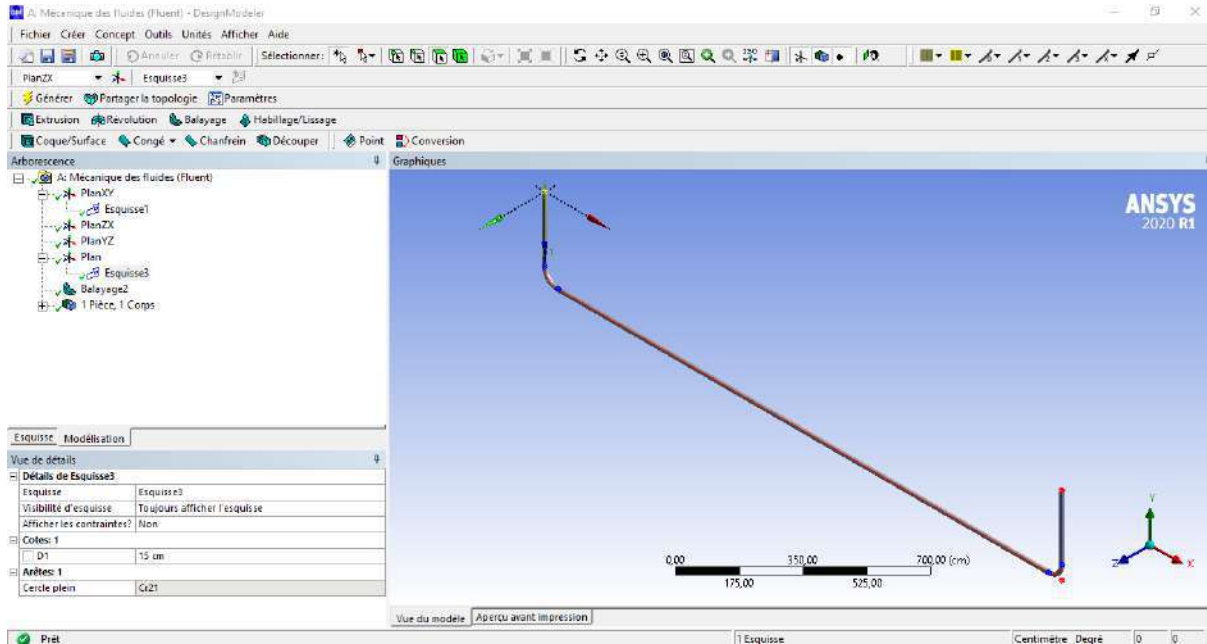


Figure 4-8: la forme finale de la géométrie in 3D

## 4.2. Maillage du domaine fluide:

Le deuxième pas de la chaîne de la simulation numérique du problème est le développement et l'adaptation du maillage autour du profil. Un maillage de bonne qualité est indispensable pour la procédure du calcul afin que les résultats soient acceptables et utilisables et ainsi recueillir des conclusions.

1. Cliquez sur Maillage et sélectionnez le paramètre de Maillage.
2. Repérez les conditions aux limites:

La première étape consiste à identifier et à nommer les différentes parties de la géométrie afin de:

- définir les conditions aux limites du problème (entrées, sortie etc ...),
- définir les conditions sur le maillage au niveau des différentes sélections.

Pour repérer les entrées, sorties etc... en 3d, il faut sélectionner les différentes faces de la géométrie.

Les notations des différentes parties de la géométrie sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4-1 : notations des différentes parties de la géométrie

surface	Fonction
Entrée	Velocity inlet
Sortie	pressure Outlet
Surface extérieur de tube	wall

#### 4.2.1. Optimisation de maillage :

Nous voulons mener des expériences afin de déterminer la précision des résultats finaux et la vitesse de calcul parmi les trois types de maillages.

**a. Le premier type de maillage :**

- Divise les éléments sous une forme large et aléatoire :

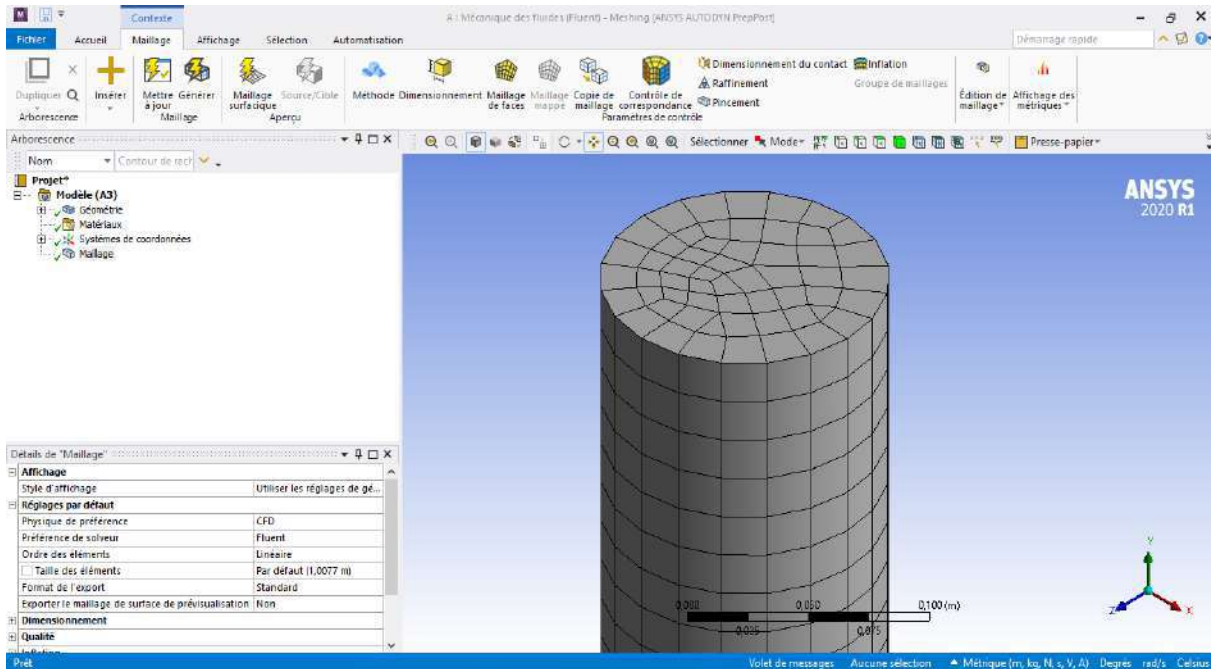


Figure 4-9 : Le premier type de maillage

**b. Le deuxième type :**

Nous choisissons une division régulière des éléments dans une forme plus petite avec une augmentation de la division à l'intérieur et à l'extérieur au niveau de la géométrie de la forme, cette maillage est courant dans le domaine de l'étude du transfert de chaleur maillage est courant dans le domaine de l'étude du transfert de chaleur.

Maillage structuré (quadra/hexa) : Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc.



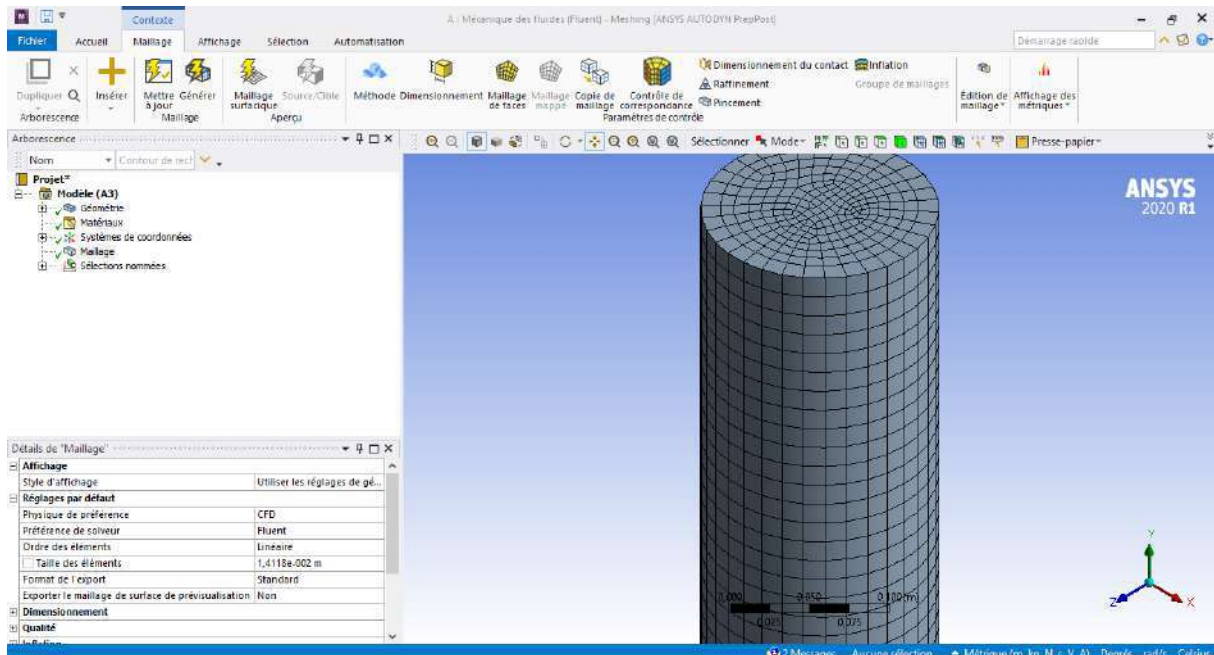


Figure 4-10 : Le deuxième type de maillage

**c. Le troisième type :**

On prend les éléments sous forme de triangles inégaux, tandis que les parties intérieures sont de formes irrégulières.

Maillage non structuré (tri/tétra.) : Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

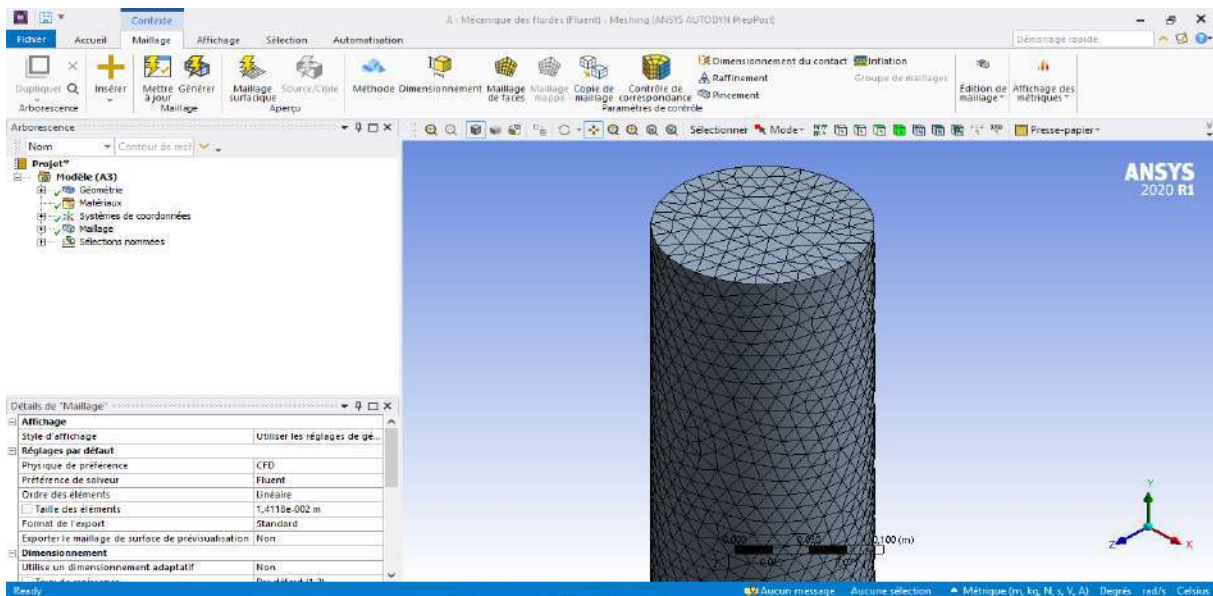


Figure 4-11 : Le troisième type de maillage

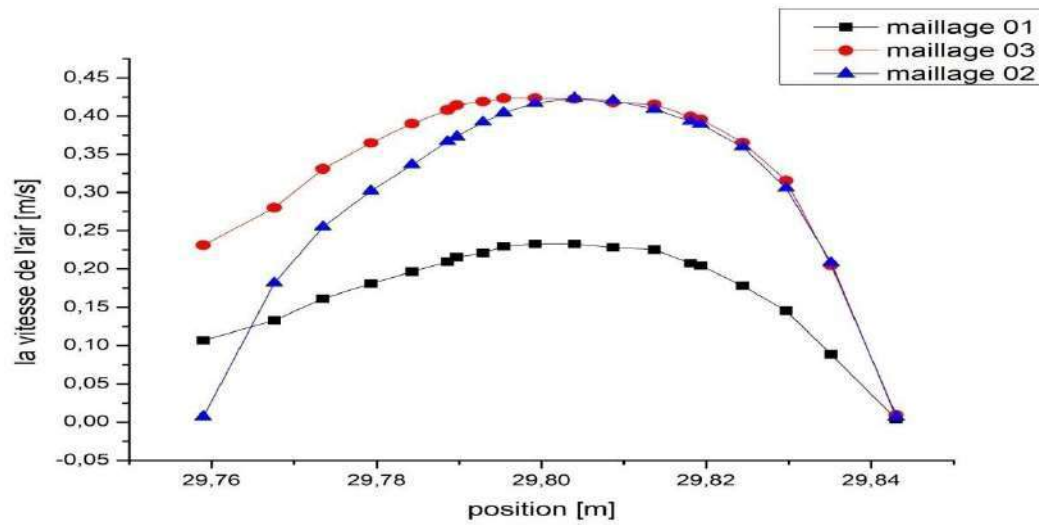


Figure 4.12 : test de maillage

Après avoir terminé les tests de précision, il devient clair que le deuxième type de maillage Est presque le plus précis dans les résultats et le plus rapide dans l'exécution des opérations mathématiques .

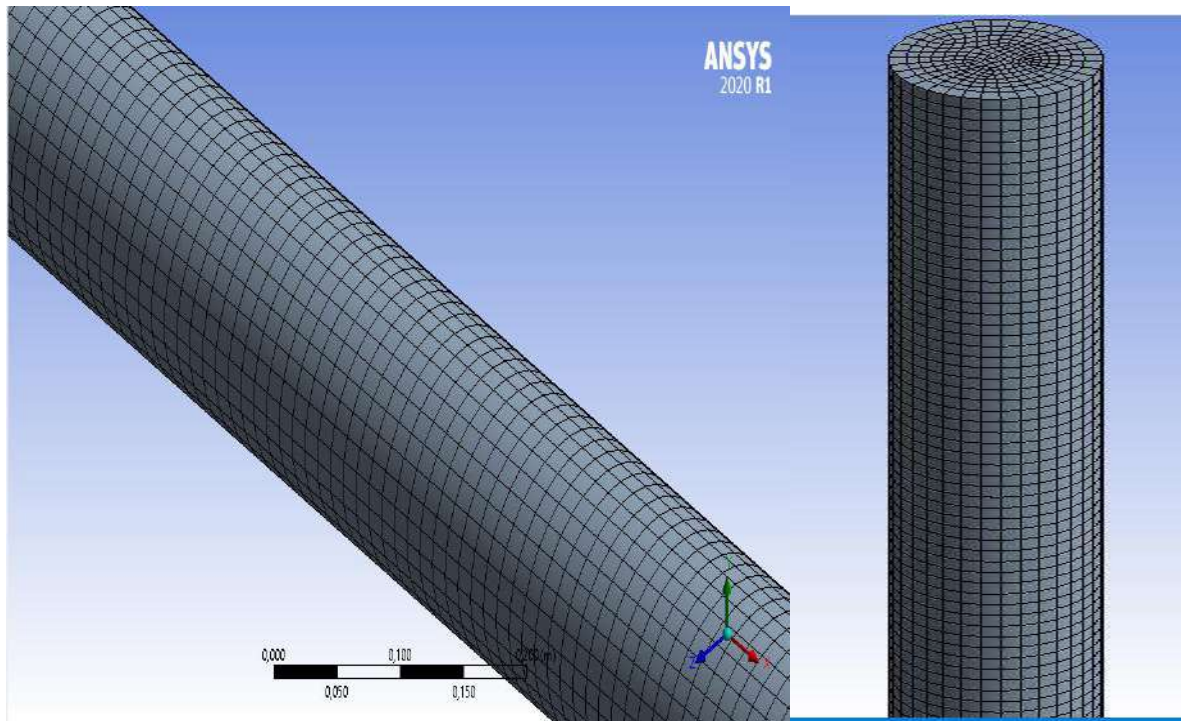


Figure 4- 13: Le maillage de la géométrie

#### d. Vérifiez la taille de maillage :

Le tableau suivant résume les différents résultats de maillages générés:

Tableau 4-2: résultats de maillage générer

	Eléments	Nœuds
Tube U Ø150mm	436158	463014
Tube U Ø200mm	755326	795520
Tube U Ø250mm	1176208	1223508

### 4.3. Mettre en place le problème sous Fluent :

#### 4.3.1. Présentation de code fluent:

Le code Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie à travers le monde. Fluent est un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis et qui permet de simuler les écoulements de fluides compressible, incompressible, stationnaire ou in stationnaire impliquant divers phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, la turbulence, les écoulements dans les machines tournantes, moteurs thermiques dans des géométries complexes.

### 4.3.2. Les différentes étapes de simulations sous Fluent:

❖ Les différentes étapes de simulation :

❖ **Setup** 

1. **General** : 

Dans cette étapes on choisit les paramètres de solver tels que:

Type: pressure-Based

Velocity formulation: Absolute

Time: steady

3D space: planar

2. **Models** : 

Dans cette étape on précise le type de l'écoulement:

- Multiphase-off
- Energy-on
- Viscous laminair
- Radiation-off
- Heat exchanger-off
- Spicies-off
- Discrete phase-off
- Solidification & Melting-off
- Acoustics-off

3. **Materials** : 

Dans cette étape en choisir le type de fluide et ces propres propriétaires dans notre cas c'est l'air, un cas effectué par une valeur non nulle de viscosité et un autre a viscosité nulle

- Air

#### 4. Conditions aux limites : Boundary Conditions

Dans cette étape on précise les conditions aux limites de l'écoulement tel que la vitesse et la température.

À travers ce qui précède, on perçoit mieux ce que l'on peut rencontrer lors de la modélisation numérique d'un problème en mécanique des fluides même très simple. En effet, les étapes de la modélisation numérique : la création de la géométrie, la génération du maillage, l'implémentation du problème sous "fluent". Le contrôle de la Convergence et même le traitement des données de la simulation sont fortement interdépendants. Par ailleurs, l'analyse des différents paramètres à régler qu'offre le logiciel "FLUENT" nous a permis d'adopter une méthode de résolution optimum (précision/cout de calcul) en passant par des choix judicieux qui ont été systématiquement justifiés.

### 5. Résultats et discussions:

#### 5.1. Effet du diamètre et du débit d'air :

Pour connaître l'effet du diamètre du conduit et du débit d'air sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur sol-air, nous allons simuler trois cas pour des valeurs de diamètre (150mm ,200mm ,250mm) et pour chaque valeur de diamètre seront trois valeurs de débit d'air ( $Q=17.10^{-4}$  ,  $Q=21.10^{-4}$  ,  $Q=26.10^{-4}$ )  $Q$  (  $m^3/s$ ).

##### 1<sup>ere</sup> cas (D=150mm):

##### ➤ Champs de température :

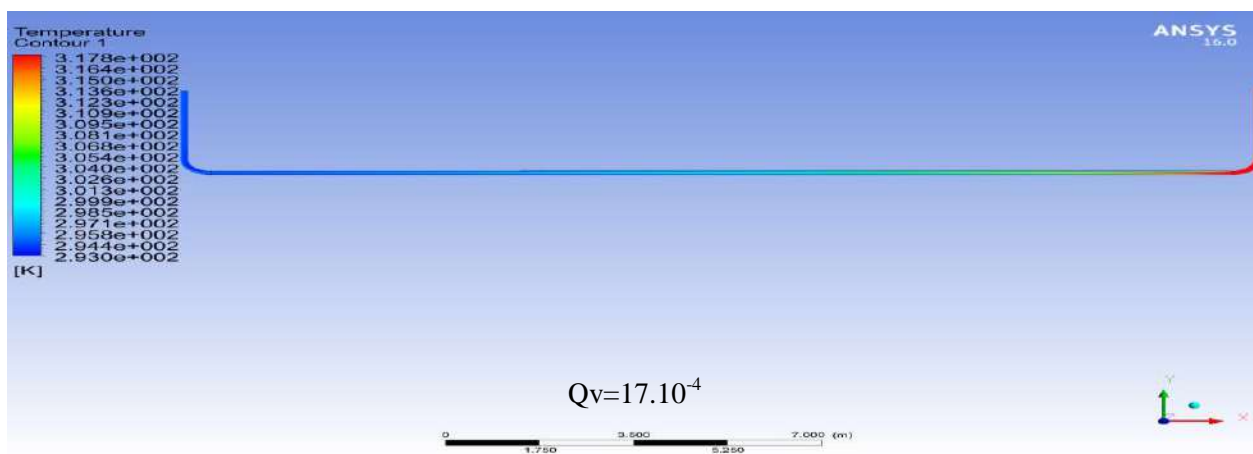


Figure 4-14 : Champ de température (D=150mm,  $Q_v=17.10^{-4} m^3/s$ )

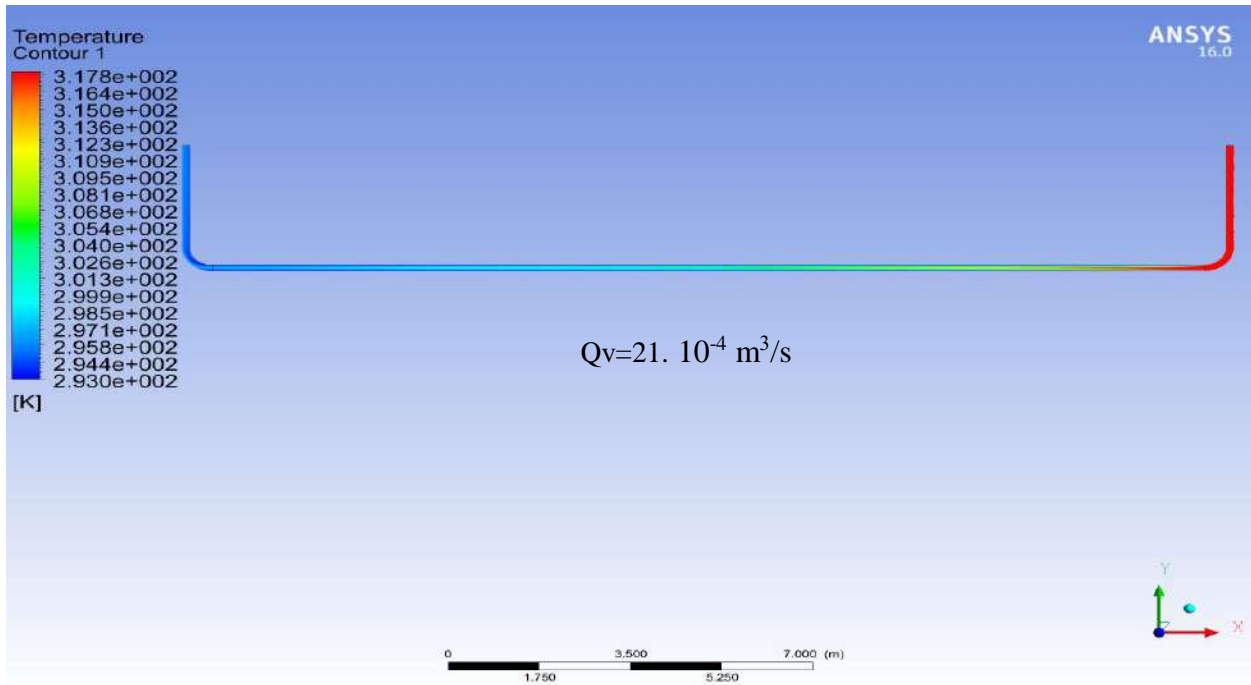


Figure 4-15 : Champ de température (D=150mm,  $Q_v = 21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

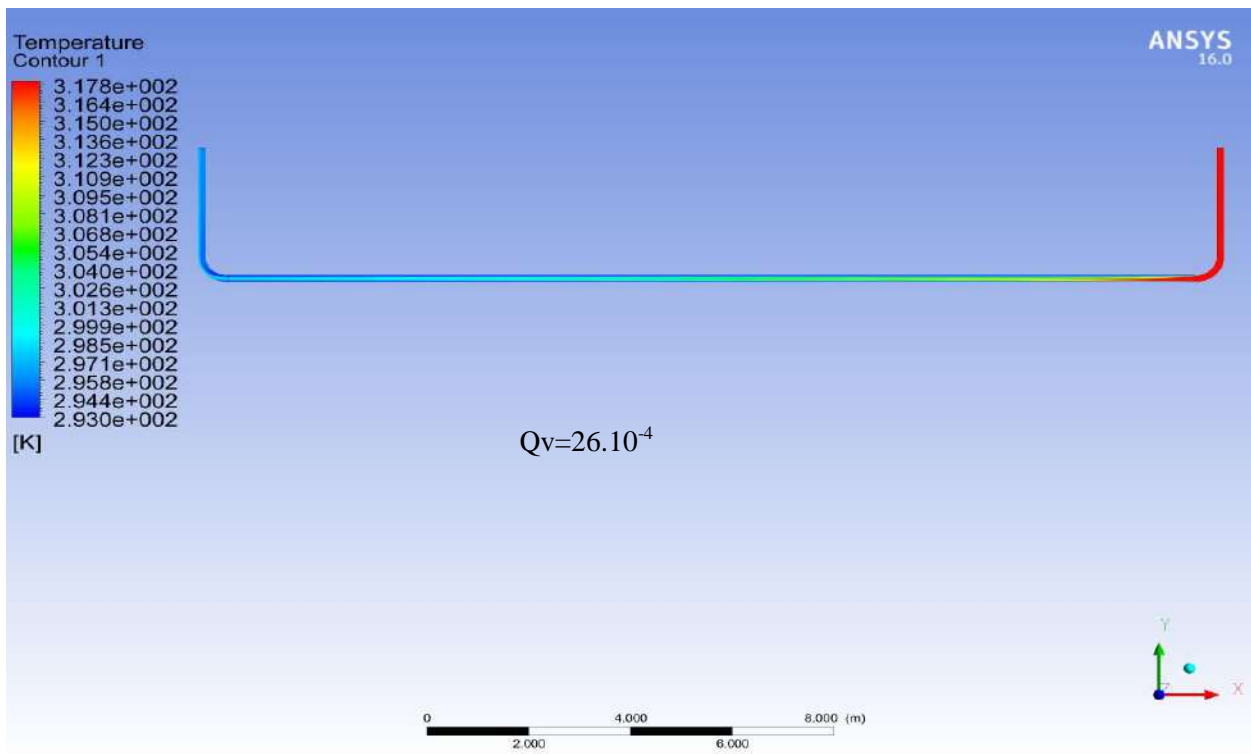


Figure 4-16 : Champ de température (D=150mm,  $Q_v = 26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

➤ Champs de vitesse :

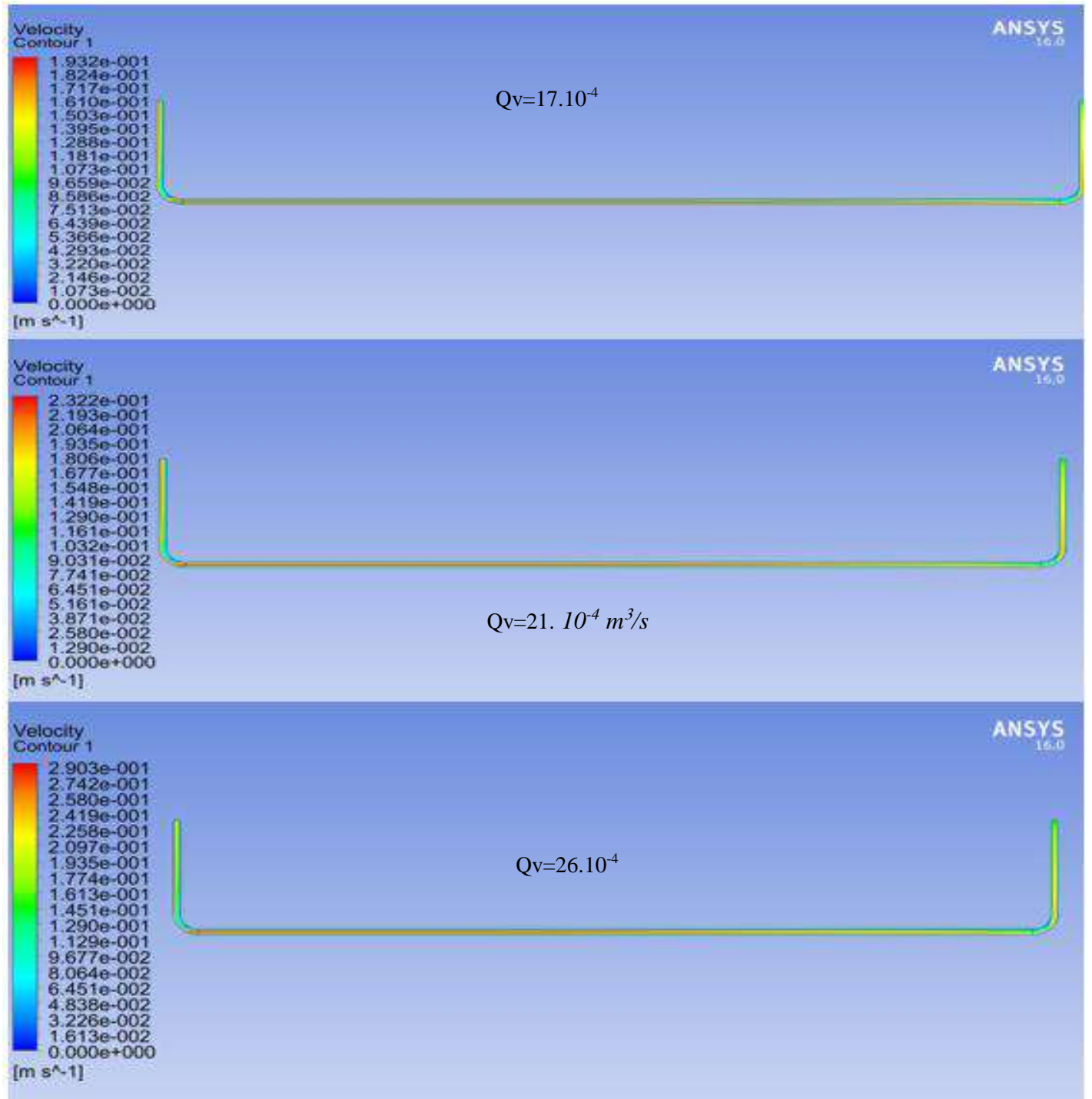


Figure 4-17 : Champ de vitesse ( $D=150\text{mm}$ ,  $Q_v=26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_v=21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

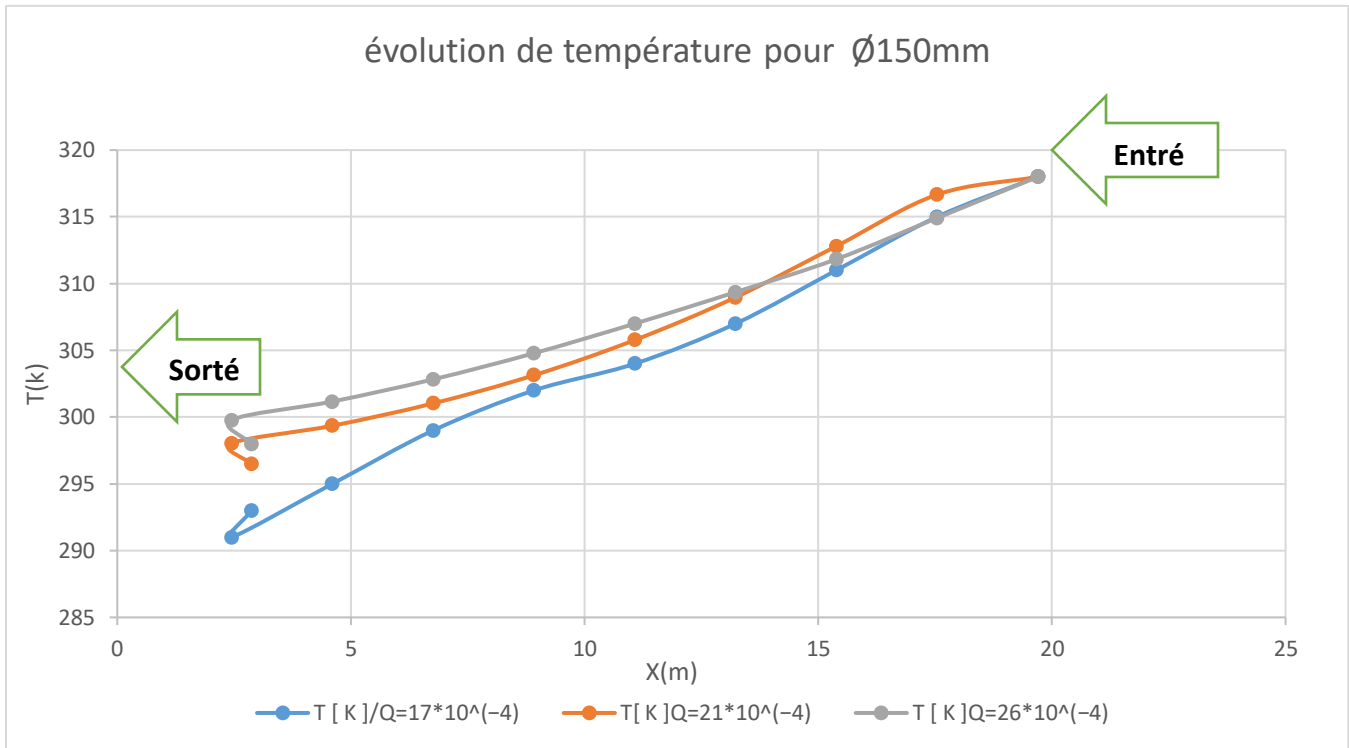


Figure 4-18 : évolution de température pour (Ø150mm) et différent débit d'air

La figure (4-18), représente l'évolution entre la température de l'air à l'entrée (318 k) et à la sortie de l'échangeur en fonction du diamètre du canal (150 mm) et du débit d'air.

1. Dans le cas du diamètre (150 mm) et du débit ( $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (293 k) a été obtenue avec une diminution de (25 k).
2. Dans le cas du diamètre (150 mm) et du débit ( $Q_v=21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (296.33 k) a été obtenue avec une diminution de (21.67 k).
3. Dans le cas du diamètre (150 mm) et du débit ( $Q_v=26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (297.97 k) a été obtenue avec une diminution de (20.03 k).

Le meilleur cas qui a donné de bons résultats est le cas n°1 ( $D=150 \text{ mm}$ ,  $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ).

On remarque qu'il existe une relation directe entre le débit d'air et la température à la sortie, donc toute augmentation du débit d'air s'accompagne d'une augmentation de la température à la sortie et inversement.



2<sup>eme</sup> cas (D=200mm):

➤ Champs de température :

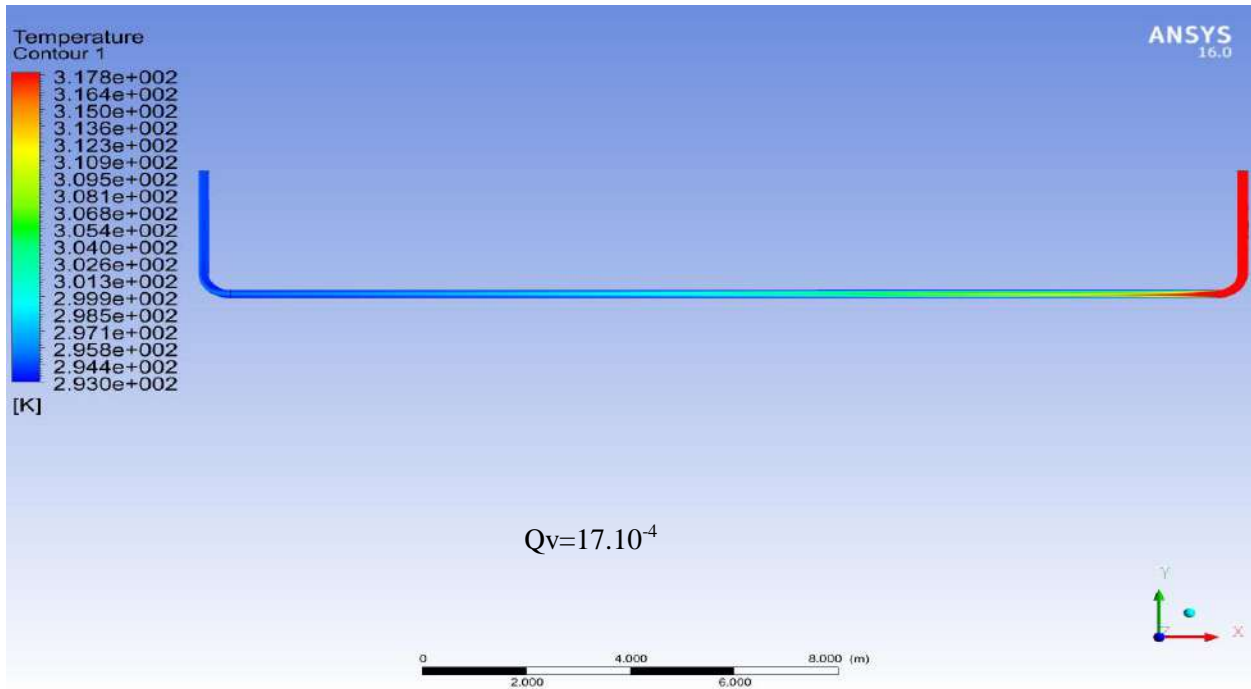


Figure 4-19 : Champ de température (D=200mm,  $Q_v = 17.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

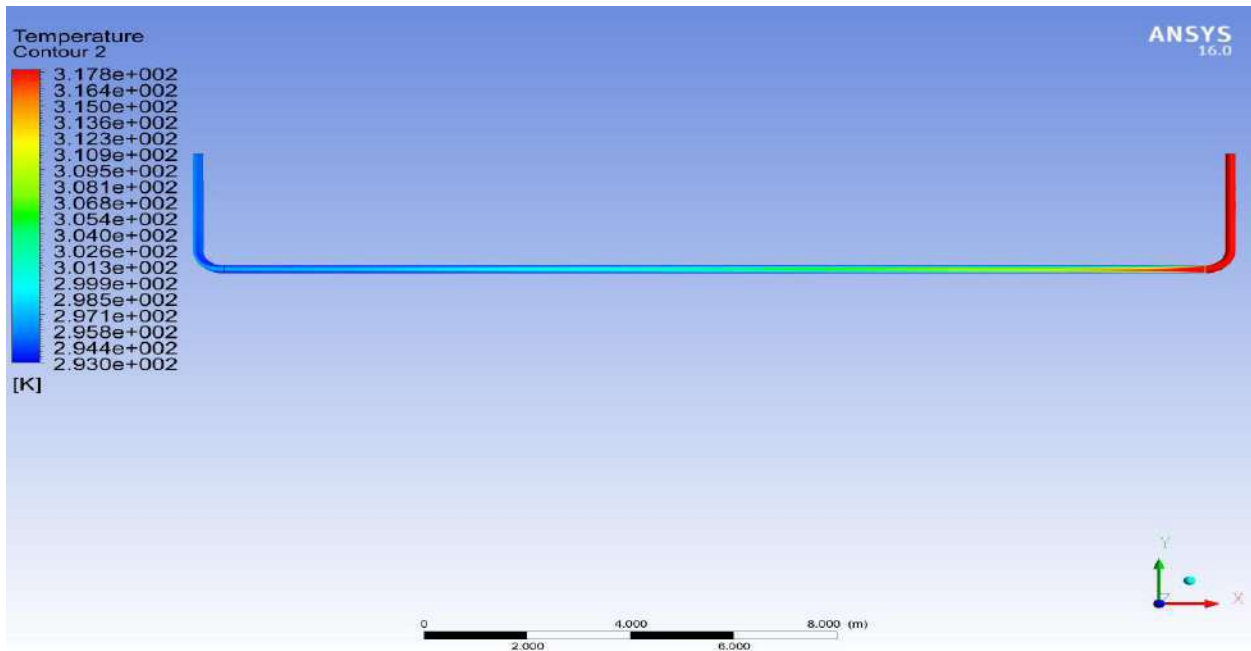


Figure 4-20 : Champ de température (D=200mm,  $Q_v = 21.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

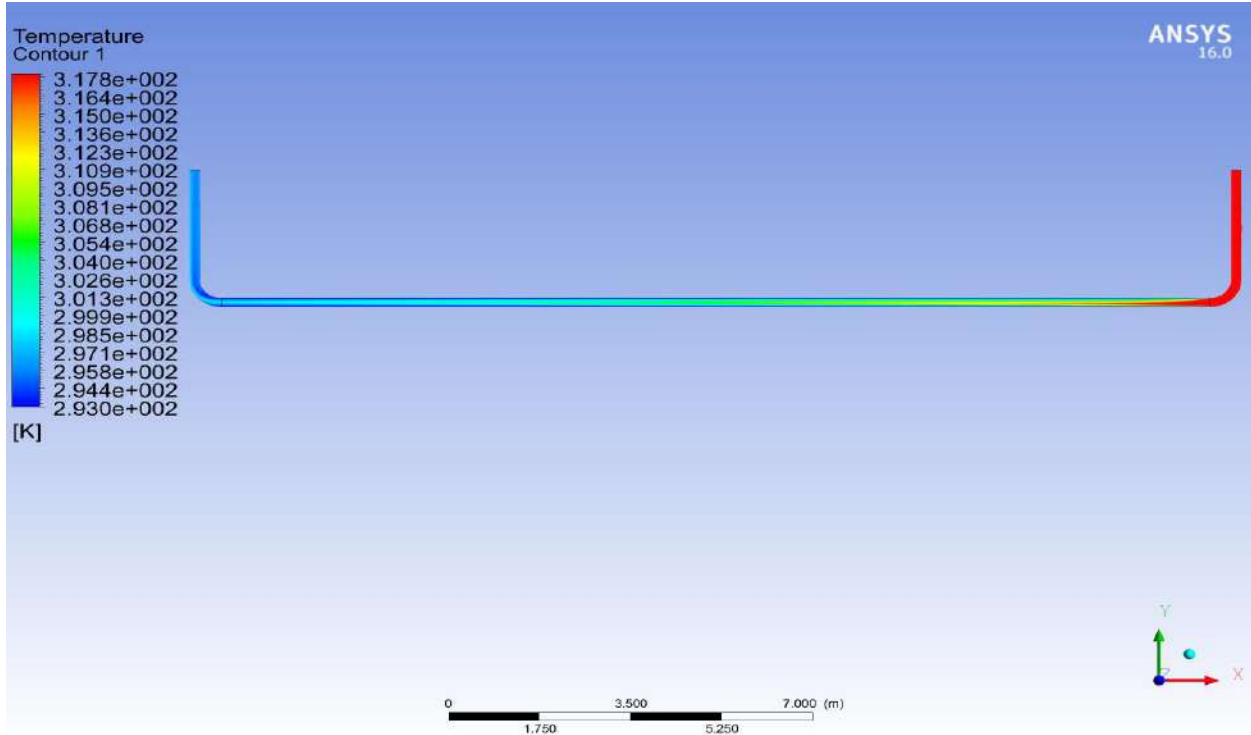


Figure 4- 21 : Champ de température (D=200mm,  $Q_v=26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

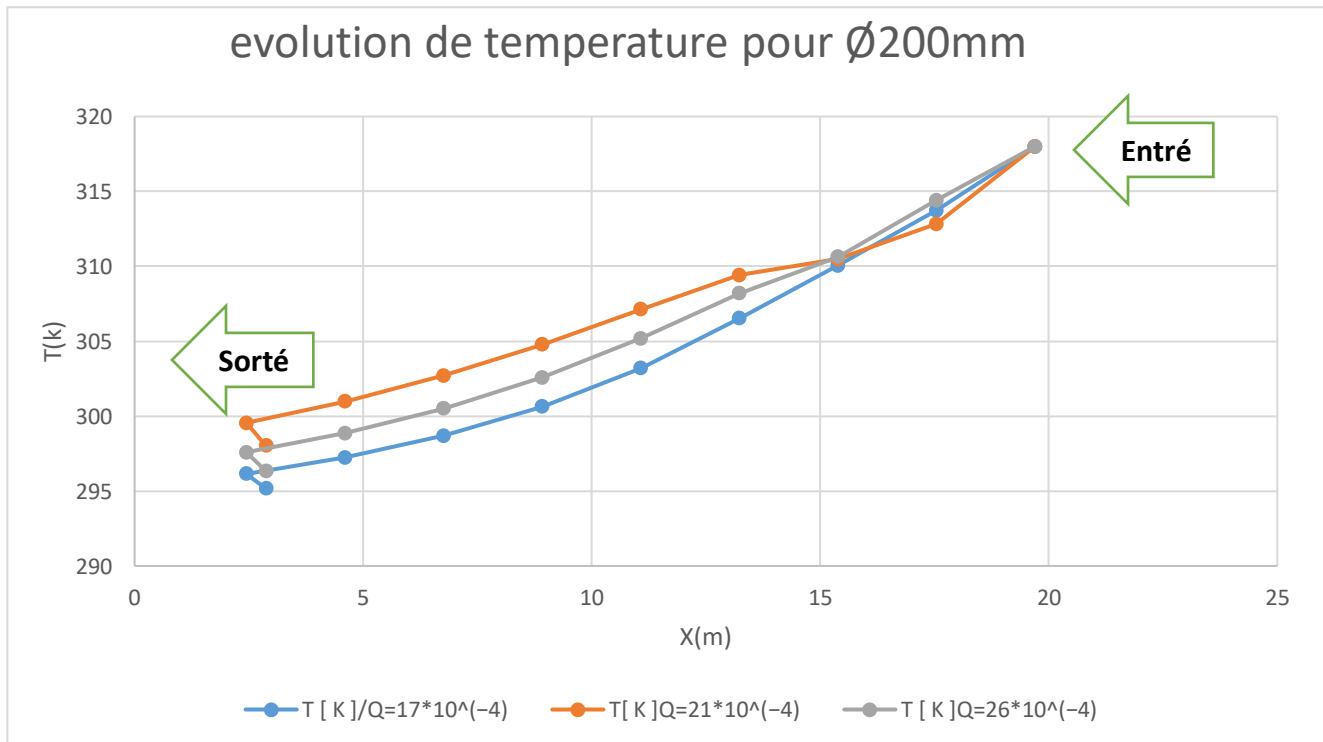


Figure 4- 22 : évolution de température pour Ø200mm et différent débit d'air

La figure (4-22), représente l'évolution entre la température de l'air à l'entrée (318 k) et à la sortie de l'échangeur en fonction du diamètre du canal (200 mm) et du débit d'air.

1. Dans le cas du diamètre (200 mm) et du débit ( $Q_v=17. 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (295.17 k) a été obtenue avec une diminution de (22.33 k).
2. Dans le cas du diamètre (200 mm) et du débit ( $Q_v=21. 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (296.47 k) a été obtenue avec une diminution de (21.53 k).
3. Dans le cas du diamètre (200 mm) et du débit ( $Q_v=26. 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (298 k) a été obtenue avec une diminution de (20 k).

Le meilleur cas qui a donné de bons résultats est le cas n°1 ( $D=200 \text{ mm}$ ,  $Q_v=17. 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ).

On remarque qu'il existe une relation directe entre le débit d'air et la température à la sortie, donc toute augmentation du débit d'air s'accompagne d'une augmentation de la température à la sortie et inversement.

En comparant entre le premier (150 mm) et le deuxième (200 mm) cas, on remarque que l'augmentation du diamètre du canal s'accompagne d'une augmentation de la température en sortie avec toutes les valeurs de débit.

### 3<sup>ème</sup> cas (250mm):

#### ➤ Champs de température :

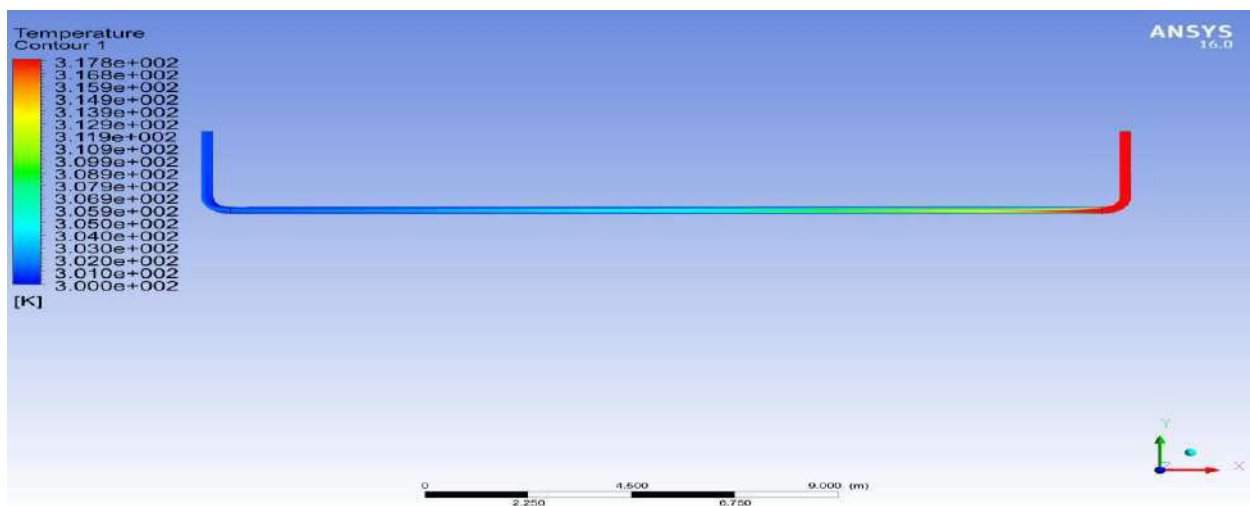


Figure 4- 23 : Champ de température ( $D=250\text{mm}$ ,  $Q_v=17. 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

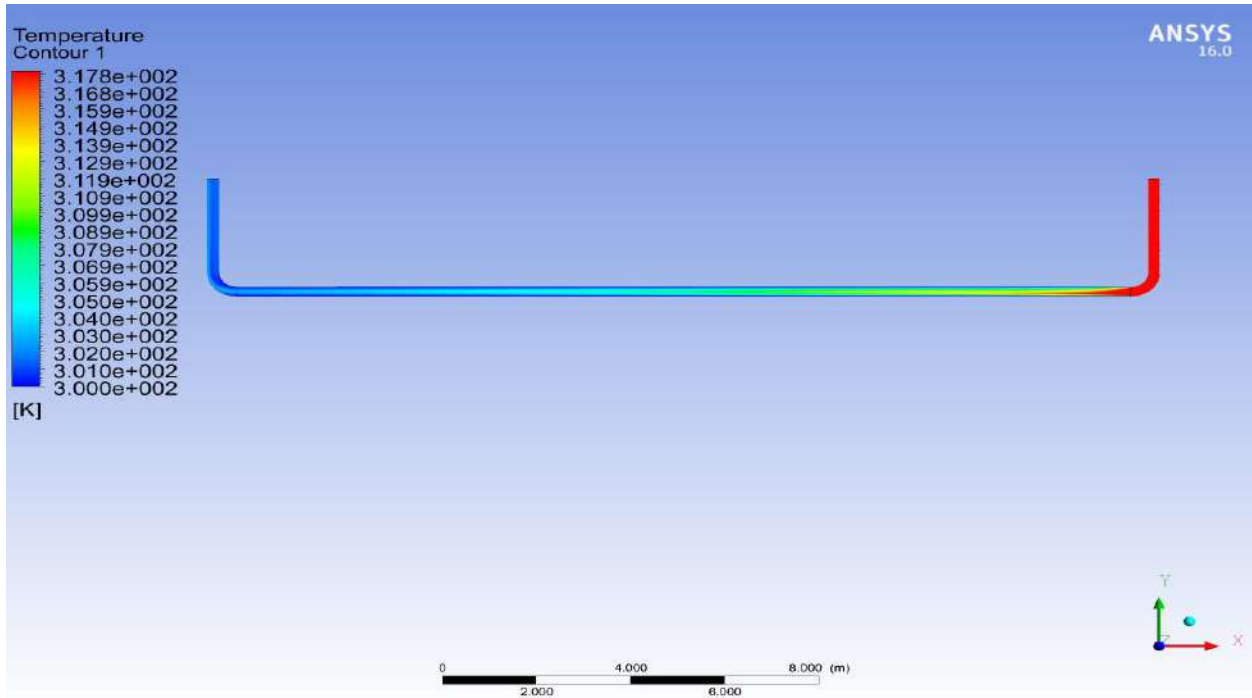


Figure 4- 24 : Champ de température (D=250mm,  $Q_v=21. 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

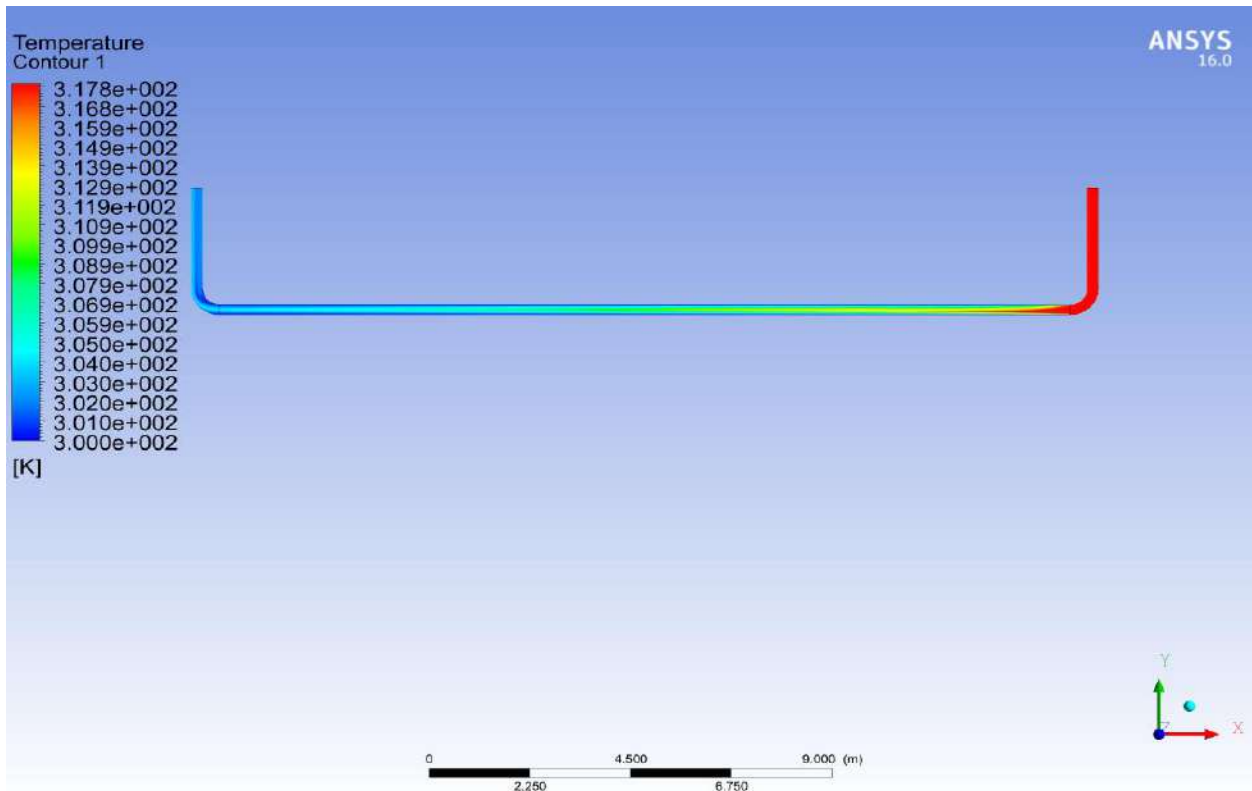


Figure 4-25 : Champ de température (D=250mm,  $Q_v=26. 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

➤ Champs de vitesse :

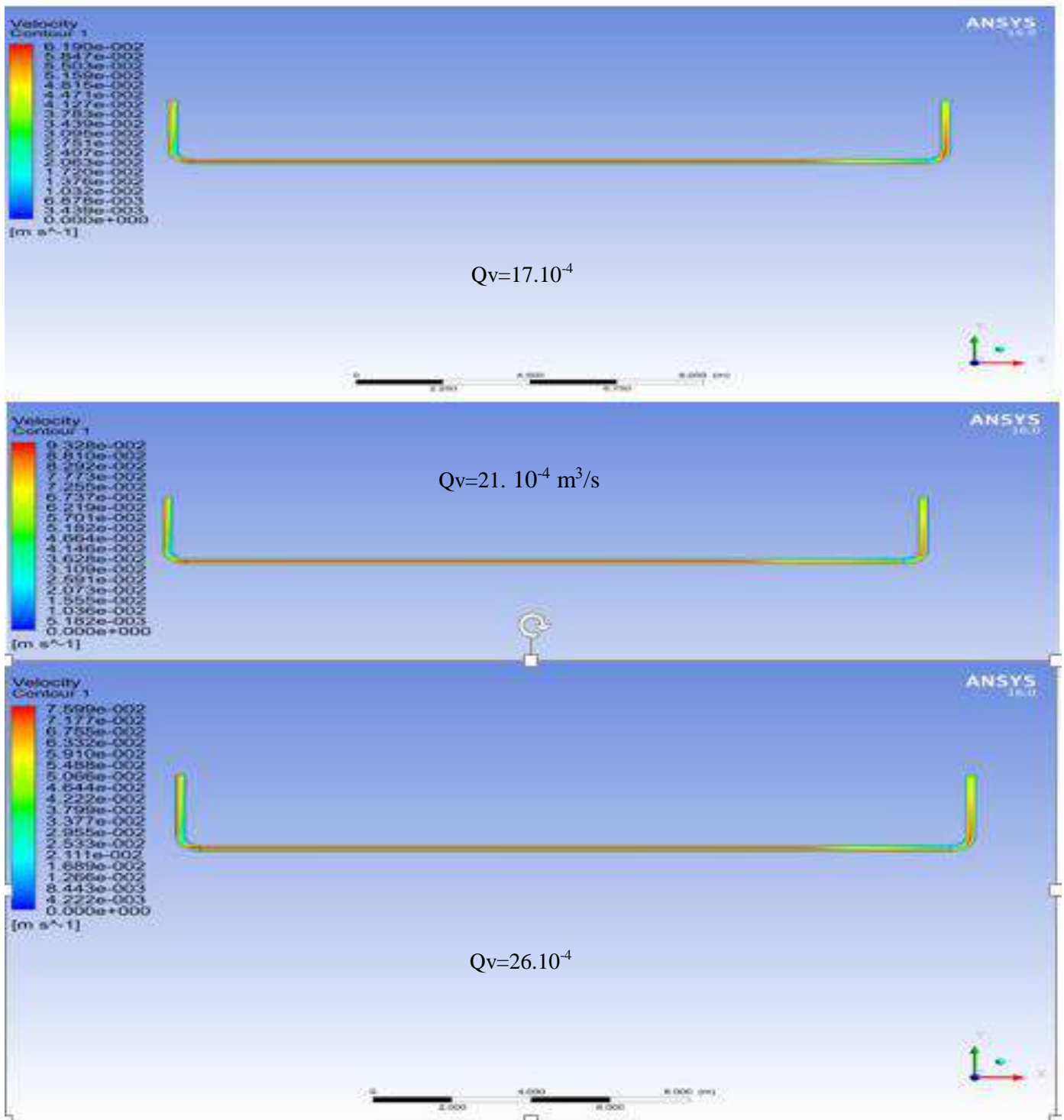


Figure 4-26 : Champ de vitesse ( $D=250\text{mm}$ ,  $Q_v=26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_v=21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

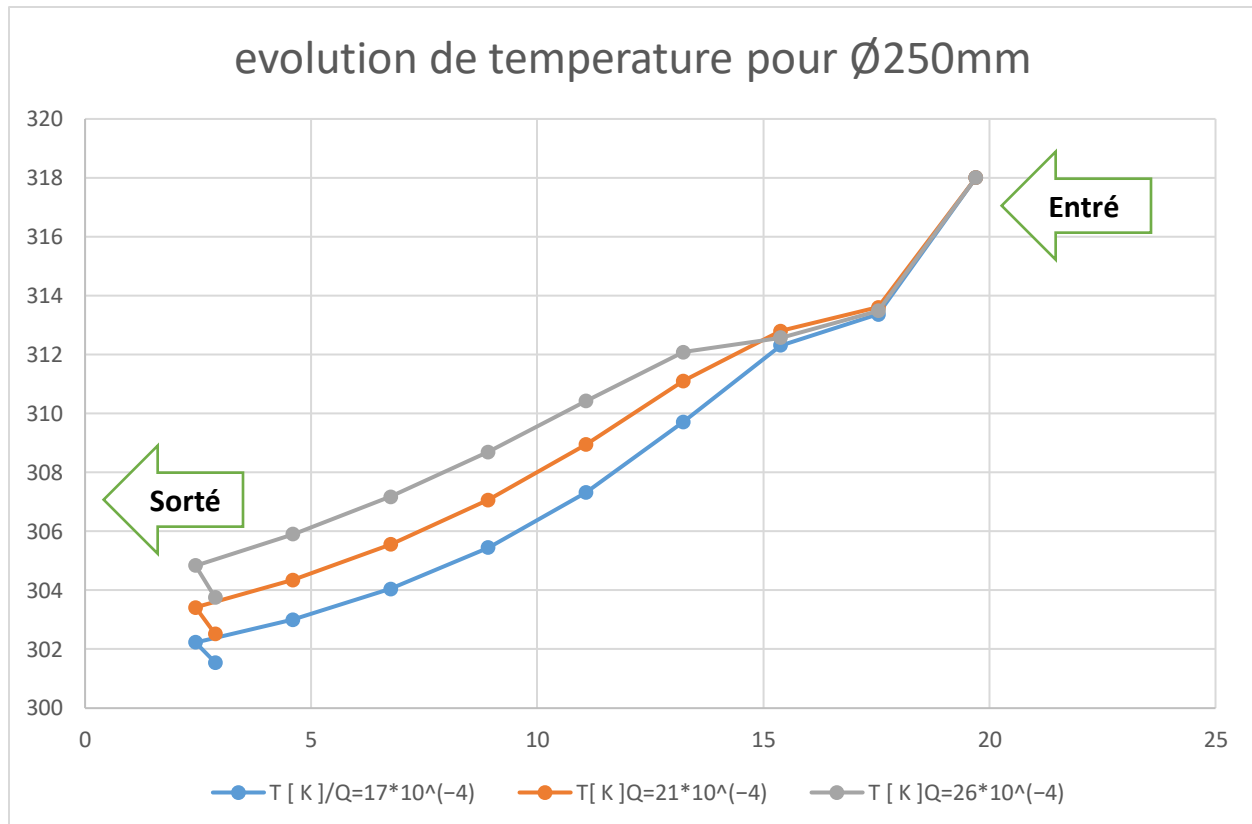


Figure 4-27 : évolution de température pour Ø250mm et différent débit d'air

La figure (4-27), représente l'évolution entre la température de l'air à l'entrée (318 k) et à la sortie de l'échangeur en fonction du diamètre du canal (250 mm) et du débit d'air.

1. Dans le cas du diamètre (250 mm) et du débit ( $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (301.55 k) a été obtenue avec une diminution de (16.45 k).
2. Dans le cas du diamètre (250 mm) et du débit ( $Q_v=21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (302.51 k) a été obtenue avec une diminution de (15.49 k).
3. Dans le cas du diamètre (250 mm) et du débit ( $Q_v=26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (303.75 k) a été obtenue avec une diminution de (14.25 k).

Le meilleur cas qui a donné de bons résultats est le cas n°1 ( $D=250 \text{ mm}$ ,  $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ).

On remarque qu'il existe une relation directe entre le débit d'air et la température à la sortie, donc toute augmentation du débit d'air s'accompagne d'une augmentation de la température à la sortie et inversement.

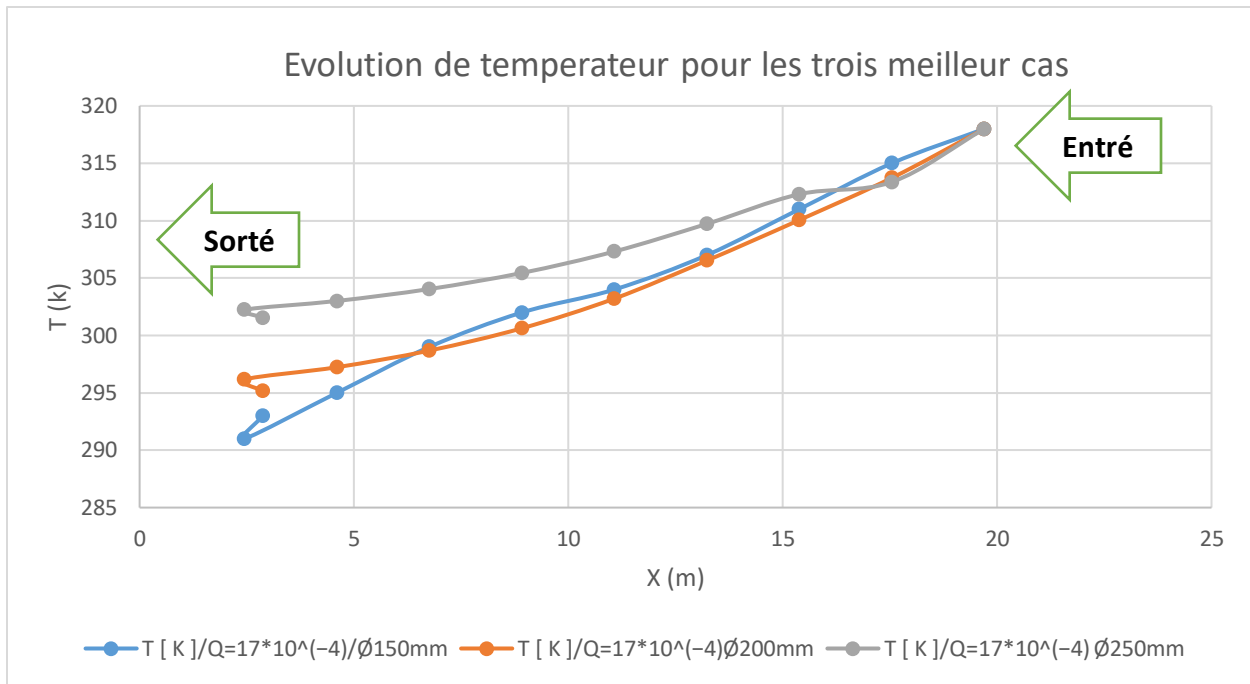


Figure 4-28 : Evolution de température pour les trois meilleur cas

La figure (4-28) représente l'évolution entre la température de l'air à l'entrée (318 k) et à la sortie de l'échangeur en fonction du diamètre du canal et du débit d'air.

1. Dans le cas du diamètre (**150 mm**) et du débit ( $Q_v = 17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (293 k) a été obtenue avec une diminution de (25 k).
2. Dans le cas du diamètre (**200 mm**) et du débit ( $Q_v = 17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (295.17 k) a été obtenue avec une diminution de (22.33 k).
3. Dans le cas du diamètre (**250 mm**) et du débit ( $Q_v = 17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (301.55 k) a été obtenue avec une diminution de (16.45 k).

Le meilleur cas qui a donné de bons résultats est le cas n°1: diamètre (150 mm) et du débit ( $Q_v = 17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ).

En comparant entre le **1 (150 mm)** et le **2 (200 mm)** et le **3 (250 mm)** cas, on remarque que l'augmentation du diamètre du canal s'accompagne d'une augmentation de la température en sortie avec toutes les valeurs de débit.

L'élévation du diamètre du canal augmente la surface d'échange et donc une augmentation du débit et de la vitesse, ce qui ne laisse pas assez de temps pour l'échange thermique et par conséquent, l'efficacité de l'échangeur diminue.

Tableau 4-3 : La température à la sortie pour tous les cas.

Débit volumique [m <sup>3</sup> /s]	Diamètre [mm]	Vitesse [m/s]	Température de sortie [k°]
<b>17.10<sup>-4</sup></b>	<b>150</b>	<b>0.1</b>	<b>293</b>
	<b>200</b>	<b>0.055</b>	<b>295.17</b>
	<b>250</b>	<b>0.035</b>	<b>301.55</b>
<b>21.10<sup>-4</sup></b>	<b>150</b>	<b>0.12</b>	<b>296.33</b>
	<b>200</b>	<b>0.066</b>	<b>296.47</b>
	<b>250</b>	<b>0.043</b>	<b>302.51</b>
<b>26.10<sup>-4</sup></b>	<b>150</b>	<b>0.15</b>	<b>297.97</b>
	<b>200</b>	<b>0.082</b>	<b>298</b>
	<b>250</b>	<b>0.053</b>	<b>303.75</b>

De ce qui précède, nous trouvons :

L'efficacité de l'échangeur de chaleur air-sol augmente à mesure que le débit d'air est plus faible et que le diamètre du canal est plus petit. L'élévation du diamètre du canal augmente la surface d'échange et donc une augmentation du débit et de la vitesse, ce qui ne laisse pas assez de temps pour l'échange thermique et par conséquent, l'efficacité de l'échangeur diminue



### 5.2. Effet de matière (Conductivité thermique) :

Pour connaître l'effet du matériau (conductivité thermique) sur l'efficacité de l'échangeur air-sol, nous allons reprendre les conditions du cas précédent qui ont donné le meilleur résultat ( $D=150$  mm, et  $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ) et changer le matériau du tuyau (aluminium et acier).

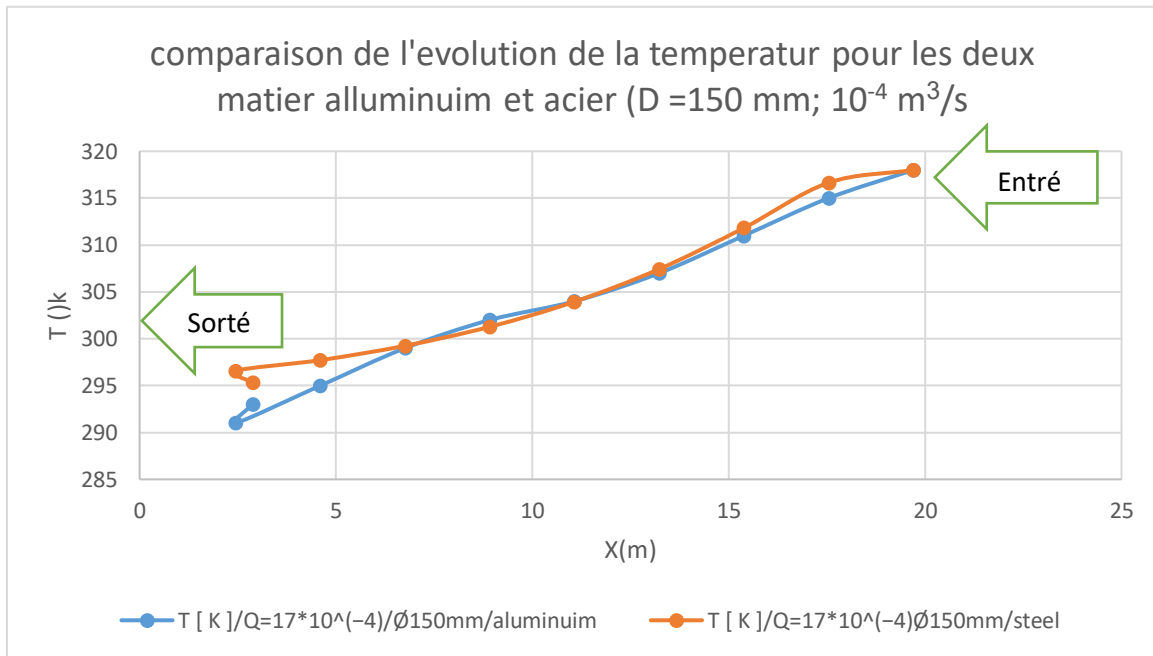


Figure 4-29 : comparaison de l'évolution de la température pour les deux matières aluminium et acier.

La figure (4-29), représente comparaison l'évolution entre la température de l'air à l'entrée (318 k) et à la sortie de l'échangeur en fonction du diamètre du canal et du débit d'air pour les deux matières aluminium et acier.

a. Dans le cas du aluminium (Conductivité thermique  $202 \text{ w/m-k}$ ) : diamètre (150 mm) et du débit ( $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (293 k) a été obtenue avec une diminution de (25 k).

b. Dans le cas du acier (Conductivité thermique  $=16.27 \text{ w/m-k}$ ) : diamètre (150 mm) et du débit ( $Q_v=17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), la température à la sortie (295.34 k) a été obtenue avec une diminution de (22.66 k).

Nous constatons que dans le cas de l'utilisation de l'aluminium, l'efficacité de l'échangeur était meilleure que l'utilisation de acier. La raison est due à la différence de valeur du conductivité thermique des deux matériaux. Plus la valeur de la conductivité thermique est élevée plus l'échange de chaleur est important et augmente ainsi l'efficacité de l'échangeur de chaleur.

# Conclusion générale

### Conclusion générale :

Aujourd'hui, notre monde souffre de toutes sortes de pollutions et de vagues de réchauffement climatique qui menacent la vie sur la planète et causent de nombreux problèmes pour le climat et l'écosystème. Cette pollution est causée par l'exploitation excessive des combustibles fossiles, gaz, pétrole et charbon. Ces énergies sont considérées comme épuisables et ne peuvent être maintenues à long terme. Tout cela a poussé l'homme à réfléchir à trouver des énergies alternatives, propres et constamment renouvelables et à essayer de les développer.

L'énergie géothermique est l'une des plus grandes sources d'énergie renouvelables disponibles dans le monde (dans des proportions variables). Ils sont exploités dans plusieurs domaines tels que la production d'électricité, les applications de chauffage ou de refroidissement. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur son exploitation dans des applications de refroidissement passif au moyen d'un échangeur de chaleur air-sol.

Dans notre étude, une des méthodes de refroidissement passif a été abordée car le refroidissement actif est coûteux pour réduire la chaleur à l'intérieur des habitations et des installations industrielles dans les zones chaudes et isolées en installant un échangeur de chaleur air/sol.

Nous avons mené une étude paramétrique pour connaître l'effet du débit, du diamètre du canal et du matériau du tube sur l'efficacité de l'échangeur, et après simulation à l'aide du programme Ansys Fluent, les différents résultats obtenus ont montré que l'efficacité de l'échangeur augmente avec la diminution du débit d'air et la diminution du diamètre du canal, à condition que le matériau de fabrication du tube ait une conductivité thermique grande pour augmenter l'échange de chaleur.

Où l'échangeur air-sol a donné les meilleures performances dans le cas de  $D = 150\text{mm}$  et  $Q_v = 17.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  et le matériau du tube aluminium où la température était à la sortie ( $293 \text{ K}^\circ$ ) avec un écart de ( $25 \text{ K}^\circ$ ) entre l'entrée ( $318 \text{ K}^\circ$ ) et la sortie .

### Bibliographie :

1. Ph. Laplaige, J. L. Géothermie. Cet article est issu de : Énergies | Ressources énergétiques et stockage. (2008).
2. <http://pfeeree.eb2a.com/www.PFE.com/template/PFE/pic/geothermie/carte-electriciteBD.jpg>
3. B. Matek, Annual US & Global Geothermal Power Production Report, Geothermal Energy Association, Washington, USA, 36pp, 2016.
4. [https://studentenergy.org/source/geothermal/?gclid=EAIaIQobChMINDGuKXB9gIVAe\\_tCh38\\_wPIEAAYASAAEgJWUvD\\_BwE](https://studentenergy.org/source/geothermal/?gclid=EAIaIQobChMINDGuKXB9gIVAe_tCh38_wPIEAAYASAAEgJWUvD_BwE)
5. Cf. vidéo de l'interview de Gabriel Gohau, Recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et les institutions scientifiques (Université Paris 7 – CNRS), consultée sur <http://www.insu.cnrs.fr/terresolide/experimenter-modeliser/les-theories-de-la-terre-le-07/08/2018>
6. Charaf-eddine MEHDID, "Comportement thermo-physique d'un puits canadien : application aux sites de l'oasis algérien. Université Mohamed Khider – Biskra ,Faculté des Sciences et de la technologie ,Département :Génie Mécanique", Doctorat LMD en Génie Mécanique,2021,
7. <http://pfeeree.eb2a.com/www.PFE.com/template/PFE/pic/geothermie/ressources-mondiales-geothermie.gif>
8. . B. Dounane , B. Hathat " Conception et analyse de fonctionnements d'un échangeur airsol", 2011.
9. <https://1.bp.blogspot.com/fwFboa8Wu3I/WeXhAHFsFqI/AAAAAAAAAZA/2RjIEd5gQNIjRIk8ssrxB-GlPxxWH2McgCLcBGAs/s400/geothermie.jpg>
10. <https://www.infoclimat.fr/climatologie/normales-records/1991-2020/ouargla/valeurs/60580.html>
11. [https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTg8YI6bbCtN\\_ytBOEM\\_WbQtQXZKHcbo969gw&usqp=CAU](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTg8YI6bbCtN_ytBOEM_WbQtQXZKHcbo969gw&usqp=CAU)

## Bibliographie

---

12. M. Ghyselinck- Bardeau, and A. Wuilleumier, Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse à basse énergie (nappe salluviales et thermalisme) dans la région Midi-Pyrénées. BRGMR eport BRGM/RP-55888-FR, 2007
13. <https://e.educlever.com/img/4/2/8/0/428073.jpg>
14. <http://sacha.delanoue.free.fr/tpe/utilisations.jpg>
15. I. Benchemsa, L'utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique , Mémoire de master. Université BADJI MOKHTAR ,ANNABA.2016/2017.
16. Saibi, HGeothermal resources in Algeria. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (9), 2544--2552. . 2009.
17. M. Abouriche, A. Fekraoui, F.Z. Kedaid et M. Rezig, 'Atlas des Ressources Géothermiques du Nord de l'Algérie', Rapport Interne CDER, 1988
18. Ouali, S., Hadjiat, M., Ait-Ouali, A., Salhi, K., Malek, A., Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie. *Revue des Energies Renouvelables* 21 (1), 54e61. 2018.
19. Ouali, S., Étude géothermique du sud de l'Algérie. 2005.
20. Nesrine Hatraf , N.Moummi , A.Brima , A.Moummi , "Etude Paramétrique d'un échangeur air/sol enterré", Département de génie mécanique-Université de Biskra- Algérie , Laboratoire de génie mécanique-LGM- Université de Biskra-Algérie,2011
21. Hasan, Mushtaq Ismael, and Sajad Waleed Noori. "Numerical investigation of earth to air heat exchanger for cooling and heating applications." *Proc. Of the 3rd Int. Sci. Conf.* Vol. 14. 2018.
22. Hasan, Mushtaq I., Sajad W. Noori, and Ahmed J. Shkarah. "Parametric study on the performance of the earth-to-air heat exchanger for cooling and heating applications." *Heat Transfer—Asian Research* 48.5 (2019): 1805-1829.
23. Nasreddine Sakhri, Y. Menni, H. Ameer, " Effect of the pipe material and burying depth on the thermal efficiency of earth-to-air heat exchangers ", *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2 (2020) :100013

## Bibliographie

---

24. N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi et S. Youcef Ali, " Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra", *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°3, pp. 399 - 406, 2010
25. V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal and J. Mathur, "Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger", *Applied energy*, vol. 103 pp. 1-11, 2013. DOI
26. Benhamza, M. E., et al. "Étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur air/sol horizontal." *Article, Le 3ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa, Algérie* (2014).
27. Fakhil Mostapha ; Contribution à l'introduction de refroidissement passif dans une station de téléphone mobile, Mémoire de master en mécanique énergétique, Université Kasdi Merbah Ouargla (2013).
28. Saheb, B., Etude et simulation de ventilation d'un local, université de bouira, 2018.
29. DAOUADJI, Y., évaluation d'un système de rafraîchissement passif dans les zones chaudes et arides par l'application d'un couplage puits canadien et cheminée solaire, , Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
30. Gouareh Abderrahmane, Rachedi khouiled, Incorporation des matériaux à changement de phase pour l'habitat dans les zones arides. Mémoire de master en mécanique énergétique, Université Kasdi Merbah Ouargla (2012).
31. Med Bouattour et Fuchs Alain, LA VEGETALISATION DES BATIMENTS direction régionale de l'équipement ile de France (2009).
32. BOUANANI, M. and A. DJELAILI, Performance en été de la cheminée solaire sur toit incliné par la ventilation naturelle.
33. Hollmuller, P., Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique, University of Geneva , 2002.
34. Y. Belloufi, Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux (mémoire de Master), University de Biskra, 67, 2012.
35. Le puits canadien: solution environnementale, Site Web : consulté le 13/02/2014 [http://conseils.xpair.com/consulter\\_parole\\_expert/puits\\_canadien\\_solution\\_environnementale.htm](http://conseils.xpair.com/consulter_parole_expert/puits_canadien_solution_environnementale.htm).

## Bibliographie

---

36. SAIFI, N. and N. SETTOU, Contribution à la conception des bâtiments a faible consommation d'énergie dans les zones arides, 2016.
37. Lucie, T., Puits canadiens/provençaux et qualité de l'air intérieur: Analyse des dégradations potentielles. 2009.
38. Bisioniya, T.S., A. Kumar, and P. Baredar, Experimental and analytical studies of earth-air heat exchanger (EAHE) systems in India: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 19: p. 238-246.
39. BELLOUFI, Y., Etude théorique et expérimentale de l'exploitation de la géothermie dans le réchauffement ou le refroidissement d'un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l'habitat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
40. E. SATARA and A. MABROUKI, Etude d'un échangeur de chaleur air/sol, Mémoire de Master, Mémoire de Master Université de Ouargla, 38, 2016.
41. Hatraf, N., Moumni N., Brima A., A. Moumi, S. Youcef.Ali, Etude théorique et expérimentale d'un échangeur air/sol enterre destine au rafraichissement des locaux, Séminaire Internationale des énergies nouvelles et renouvelables, SIENR, Ghardaïa Octobre 2010.
42. Drid Mohamed Mebrouk, « Développement d'un système d'alimentation autonome d'une station téléphonique isolée », Doctorat en génie mécanique, Université Kasdi Merbah Ouargla (2020).
43. Infoclima.fr « <https://www.infoclimat.fr/> »
44. SOUCI Ali et BOUKHETTA M. Lamine, « Modélisation d'un échangeur de chaleur air/sol pour le rafraîchissement d'une station téléphonique isolée », Mémoire master en Génie Mécanique, Université Kasdi Merbah Ouargla (2019).