

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA BEJAÏA

Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie
Mécanique

Spécialité : Installation énergétique et turbomachine

Thème

**Etude de l'écoulement d'air dans un puits
canadien**

Sous l'encadrement de Mme : Adjouadi.N

Devant le jury :

Mr ALI AGHA

president

Mr SAHALI

Examineur

Réalisé par:

**Boussada Farid
Bekkouche Messaoud**

Année universitaire : 2018/2019

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: exemple de partage des composants principaux dans un sol cultivé (en volume)	(3)
Figure I.2: Méthode de détermination de la texture du sol	(5)
Figure I.3 : Conductivité thermique de quelques sols	(7)
Figure I.4 : Rayonnement solaire annuel dans le monde	(8)
Figure I.5 : Géothermie à haute énergie	(9)
Figure I.6 : Géothermie à basse énergie	(9)
Figure I.7 : Isotherme et gradient thermique	(12)
Figure I.8: Système et bilan énergétique	(13)
Figure I.9: Schéma représentatif du rayonnement	(14)
Figure I.10: Schéma représentatif de la convection naturelle	(15)
Figure I.11 : Schéma représentatif de la convection forcée	(16)
Figure I.12: Schéma représentatif de la conduction thermique	(17)
Figure I.13 : Illustration du phénomène de transfert de chaleur se produisant dans une chambre	(17)
Figure I.14: Classification du climat en Algérie	(21)
Figure I.15 : Écoulement laminaire et écoulement turbulent	(21)

Chapitre II

Figure II.1: Schéma de puits canadien	(25)
Figure II.2 : Description d'un puits canadien en Hiver	(26)
Figure II.3 : Description d'un puits canadien en été	(27)
Figure II.4 : différents éléments d'un puits canadien	(28)
Figure II.5 : La Prise D'air Extérieure	(29)
Figure II.6 : échangeurs air sol horizontal	(31)
Figure II.7 : échangeurs air sol forme spirale	(31)
Figure II.8 : échangeurs air sol verticale	(32)
Figure II.10 : Schéma de fonctionnement d'une VMC simple flux	(33)
Figure II.11 : Schéma de fonctionnement d'une VMC double flux	(34)
Figure II.12 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques	(35)
Figure II.13 : Comparaison échangeur à courant croisé (à gauche) et à contre-courant (à droite)	(35)

Figure II.14 : Principe de fonctionnement d'un échangeur rotatif.....	(36)
Figure II.14 : Quelques possibilités des évacuations des condensats.....	(37)
Figure II.15 : Schéma descriptif de l'échangeur air/sol.....	(44)
Figure II.16 Schéma descriptif de l'échangeur vertical d'entrée 1.....	(45)
Figure II.17 : Schéma représentatif d'un échangeur air/sol en coupe transversale.	(46)
Figure II.18 : Schéma descriptif de l'échangeur horizontal 2.	(48)
Figure II.19 : Schéma descriptif de l'échangeur vertical de sortie 3.....	(48)
Chapitre III	
Figure III.1 : Vue de ciel de l'ensemble du local.....	(50)
Figure III.2 : Plan de RDC de local.....	(51)
Figure III.3 : vue de terrain en face de l'atelier.....	(51)
Figure III.4 : Vue de la surface d'enfouissement.....	(52)
Figure III.5 entrée d'air.	(54)
Figure III.6 Sortie d'air	(54)
Figure III.7 : Profondeur d'enfouissement de tube	(55)
Figure III.8 Schéma descriptif de l'échangeur air/sol.....	(56)
Figure III.9 : la création de maillage du tub	(58)
Figure III.10 : Climatisation.....	(60)
Figure III.11 : Répartition de champs de température sur l'échangeur air-sol. (Climatisation).....	(60)
Figure III. 12 : Répartition de champs de vitesse de l'air sur l'échangeur air-sol.....	(61)
Figure III.13 profil de la variation de température de l'air a l'entrée jusqu'à la sortie. Représente pour le nombre de Reynolds $Re = 500$	(62)
Figure III.14 : profil de la variation de champs de vitesse de l'air sur l'échangeur air-sol (climatisation).....	(62)
Figure III.15 : profil de la variation de température de l'air a l'entrée jusqu'à la sortie. Représente pour le nombre de Reynolds $Re = 1000$ (Climatisation)	(63)
Figure III .16 : profil de la variation de champs de vitesse de l'air sur l'échangeur air- sol(Chauffage),pour $R=1000$	(63)
Figure 17 : profil de la variation de champs de vitesse de l'air sur l'échangeur air- sol(climatisation).....	(64)
Figure III.18 : Profil de la variation de température de l'air a l'entrée jusqu'à la sortie. Représente pour le nombre de Reynolds $Re = 1500$, (Climatisation).....	(64)

Figure III.19 : profil de la variation de champs de vitesse de l'air sur l'échangeur air-sol(Chauffage).....(65)

Figure III.20 : Profil de la variation de température de l'air a l'entrée jusqu'à la sortie. Représente pour le nombre de Reynolds $Re = 2000$ (Climatisation).....(65)

Figure (III.21)(..)

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol	(5)
Tableau I.2 : Représente les viscosités dynamiques de quelques milieux.....	(22)
Tableau II.1 . Avantages et inconvénients du puits canadien.....	(37)
Tableau III.1 : Taux de brassage dans tout type de ventilation.....	(53)
Tableau III.2 : Débit en fonction du diamètre des conduites pour obtenir un échange thermique de 80%.....	(55)
Tableau III.3 : dimensions de l'atelier 5.....	(57)
Tableau III.4 : conditions aux limites dans GAMBIT.....	(59)
Tableau III.5 : paramètres de la simulation pour chaque cas.....	(61)

Nomenclature

ρ : Masse Volumique (kg/m^3)

C: Capacité calorifique ($kJ/k\ kg$)

λ : Conductivité thermique (W/Km)

X_i : La teneur du matériau (m^3 de matériau/ m^3 de sol)

S : Surface (m^2)

Q : Quantité de chaleur (W)

\emptyset : Flux de chaleur (W /m^2)

Q_{st} : flux de chaleur stocké (W /m^2)

Q_g : flux de chaleur généré (W /m^2)

Q_e : flux de chaleur entrant (W /m^2)

Q_{st} : flux de chaleur sortant (W /m^2)

T : Température (K)

σ : est la constante de "Stefan-Boltzmann" $\sigma = 5.6697. 10^{-8} W/m^2$

Q_{cv} : flux thermique de convection (W)

h_{cv} : coefficient de convection (W/m^2K)

Q_{cd} : flux thermique par conduction (W)

R_e : nombre de Reynolds

ρ : masse volumique du fluide ($kg. m^{-3}$)

d: dimension caractéristique de l'écoulement (m)

η : viscosité dynamique du fluide (Pa. s).

\vec{V}_i : Vecteur vitesse de la particule i (m/s)

v : vitesse moyenne d'écoulement (m. s⁻¹)

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)

V_0 : Vitesse à l'entrée du conduit (m / s)

r : Rayon du conduit (m)

R : Resistance thermique surfacique (m² K/W)

h : Coefficient de convection thermique (W / m² K)

λ_f : Conductivité thermique du fluide (W / m K)

λ_s : Conductivité thermique du solide (W / m K)

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Généralité sur le sol.....	3
I.2.1. La structure du sol	4
I.2.2.Observations et déterminations la textures du sol	4
I.2.3.La qualité du sol et le taux d'humidité	5
I.2.4.Capacité calorifique du sol.....	6
I.2.5.Conductivité thermique du sol	7
I.2.6. La surface du sol et le rayonnement solaire.....	7
I.3.La géothermie	8
I.3.1.Classification des ressources géothermiques.....	8
I.3.1.1.La Géothermie à haute énergie	8
I.3.1.2 La Géothermie à basse énergie	9
I.3.1.3 La Géothermie à très basse énergie	10
I.4 flux géothermique	10
I.4.1. Avantages de l'énergie géothermique	10
I.4.2. Inconvénients de l'énergie géothermique	11
I.5. Rappels sur le transfert thermique	11
I.5.1.Champ de température	11
I.5.2 Gradient de température	11
I.6 Flux de chaleur.....	12
I.7 Formulation d'un problème de transfert de chaleur	12
I.7.1 Bilan d'énergie	12
I.8. Les différents modes de transfert de chaleur	13
I.8.1 Rayonnement.....	13
I.8.2.Effet dû à la radiation:	14
I.8.3.Convection	15
I.8.3.1.La convection libre ou naturelle	15
I.8.3.2.La convection forcée	16
I.8.3.3.La convection mixte	16
I.8.4.Conduction	16
I.9.Le confort thermique.....	18

I.9.1 Les paramètre effectuant du confort thermique	18
I.9.1.1. Les températures.....	18
I.9.1.2. Humidité relative	19
I.9.1.3. La vitesse de l'air.....	19
I.9.1.4. Le métabolisme	19
I.9.1.5. L'habillement	19
I.10.Données climatiques et le confort.....	20
I.11.Classification du climat en Algérie.....	20
I.12.Ecoulement d'un fluide dans le cas laminaire et turbulent	21
1.12.1 Définition des notions d'écoulement laminaire et turbulent	21
1.12.2. Nombre de Reynolds	22
I.13.Classification des écoulements	23
I.14.Conclusion.....	24
 Chapitre II : Puits canadien et modélisation mathématique	
II.1.Introduction	25
II.2.Le puits canadien	25
II.2.1.Principe de fonctionnement	26
II.2.1.1.En saison froide.....	26
II.2.1.2.En saison chaude	27
II.2.1.3.En périodes intermédiaires	27
II.2.2.Principe d'installation d'un puits canadien	27
II.2.3 Les différents éléments d'un puits canadien.....	28
II.2.3.1.La prise d'air extérieure	28
II.2.3.2.Les Tuyaux.....	29
II.2.3.3.La ventilation	32
II.2.3.4.Evacuation des condensats	36
II.3.Avantages et inconvénients du puits canadien	37
II.4.Modélisation mathématique du puits canadien	38
II.4.2. Formulations Mathématiques.....	44
II.4.2.1 Modélisation de la température de l'air	44
II.4.2.2. Quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur.....	49
II.5 Conclusion.....	49

Chapitre III : Dimensionnement et simulation.

III.1. Introduction	50
III.2.3. Localisation géographique.....	50
III.2.4. Place disponible pour l'enfouissement du conduit.....	51
III.2.5. Mise en œuvre de l'installation	52
III.2.6 : Conduit et caractéristiques	54
III.3.2.Les paramètres géométriques du local étudié.....	57
III.3.4 La création du maillage :	57
Après la création de la géométrie nous faisons le maillage avec la commande MESH	57
III.3.5. Les conditions aux limites	58
III.3.6. Simulation sous solveur fluent	59
III.4. Résultats et discussion.....	60
III.4.3.1. Refroidissement.....	61
III.4.3.2.Chauffage	66
III.5. Conclusion.....	69
Conclusion générale	71

Introduction générale

En Algérie comme ailleurs dans le monde, la demande d'énergie électrique nécessaire pour la climatisation et le chauffage est en forte augmentation. Pour baisser cette consommation, on peut mettre en œuvre des mesures architecturales et constructives favorables (réduction des gains solaires), ainsi comme on peut exploiter les techniques de réchauffement ou refroidissement.

Les énergies propres pour les besoins énergétiques et le développement économique et social deviennent incontournables (inchangeables). Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables telles que (l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et énergie géothermique qui représente une grande quantité d'énergie. L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et les moins chères du monde entier.

L'utilisation de cette énergie est multiple. Elle est utilisable pour le chauffage des serres, la production de l'électricité et le rafraîchissement et réchauffement de l'air. Et pour aboutir à cet usage on exprime la modalité de l'installation.

Pour le chauffage et la climatisation des locaux, on utilise un échangeur air/sol, ce système est appelé communément « puits canadien » et parfois « puits provençal » lorsqu'il sert à rafraîchir et chauffée l'habitation qui connaît un développement important depuis quelques années, L'air qui a préalablement circulé dans un tube enterré à une certaine profondeur, il consiste être utiliser comme entrée pour la ventilation de la maison.

La température du sous-sol étant moins variable que celle de l'air extérieur, cela permet d'avoir une entrée d'air plus tempérée.

En hiver, l'air est réchauffé avant de pénétrer dans la maison, en été, il est rafraîchit. Il s'agit ainsi du système de géothermie le plus simple qui soit, avec une consommation électrique réduite à la celle du ventilateur utilisée pour la circulation de l'air.

Le dimensionnement d'un puits canadien s'appui sur un grand nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de tubes, profondeur d'enfouissement, distance entre les tubes, débit de ventilation. Le présent travail est basé sur dimensionnement et des simulations numériques d'échanges thermiques par convection dans un tube enterré.

Ceci permet de mettre en évidence l'effet du débit volumétrique et la différence de température entre le sol et l'air entrant sur le flux thermique fournis par le puits canadien.

Nous avons décomposé le présent travail en trois chapitres :

Le premier : traite des généralités sur le domaine, puis définition des concepts clés (transfert de chaleur, sol, géothermie, etc).

Le deuxième chapitre évoque le puits canadien (définitions, dimensions, éléments, méthodes ; ... etc), la manière et étapes d'installation.

Le troisième chapitre traite une exploitation complète du terrain et une étude approfondi sur la possibilité ou l'impossibilité de dimensionner et d'installer le puits canadien dans l'atelier(05) dans hall technologie

Enfin on termine notre travail par une conclusion générale.

I.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la géothermie et Les différents modes de transfert de chaleur sur lequel nous avons évoqué pleins d'aspects sur cela tel que le sol qui est considéré essentiel pour obtenir des résultats sur cette présente recherche, en finissons avec le sol on parviendra a la géothermie avec tout ses aspects, qu'on ira découvrir tout au long de se présent chapitre.

I.2.Généralité sur le sol

Le sol est un élément crucial pour la plante et la vie en général. Il constitue un support pour les racines des plantes et fournit des éléments nutritifs qui sont essentiels pour la croissance des plantes. Les caractéristiques des sols déterminent souvent la nature de la végétation et les cultures les plus adaptées, pouvant donner un bon rendement. Le sol détermine en grande partie ce qui se passe avec l'eau dans un bassin versant ; les pertes en eau, la disponibilité en eau, la qualité de l'eau sont toutes déterminées par les caractéristiques du sol. Le sol est aussi un moteur de recyclage : des micro-organismes dans le sol décomposent les résidus de récolte pour en faire de la matière organique. En Afrique, le sol sert aussi souvent de matériau de construction, de matériau pour la fabrication de récipients et d'objets d'art. Le sol contient quatre éléments principaux : [1]

- l'air (20–30 % du volume) ;
- la solution du sol (20–30 % du volume) ;
- la matière minérale (45 % du volume) ;
- la matière organique (5 % du volume).

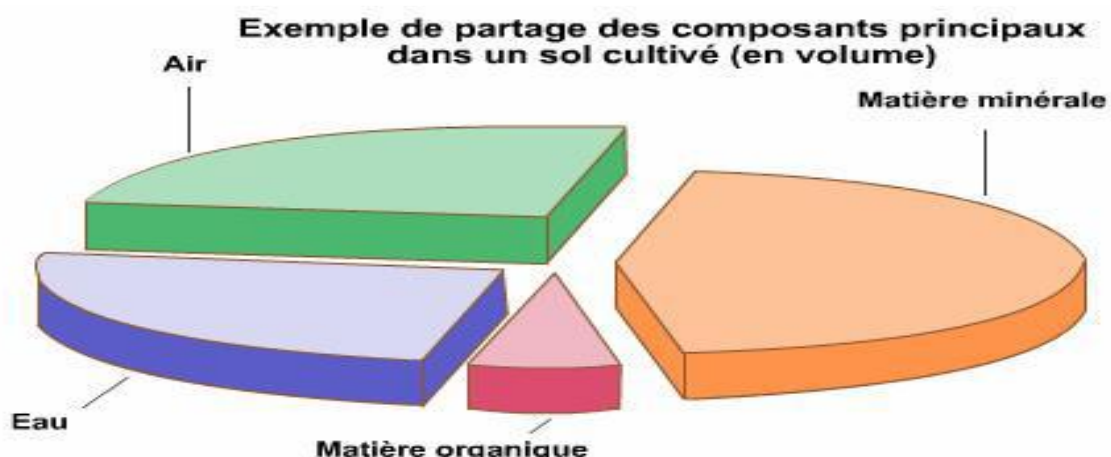


Figure I.1: exemple de partage des composants principaux dans un sol cultivé (en volume)[1]

I.2.1. structure du sol

Le sol est un lieu d'échanges et de transferts, Le sol est un milieu triphasé, poreux, perméable, apte à transporter des liquides, des gaz et de la chaleur. La variété des phénomènes de transport y est très importante, ne serait-ce que celle liée au transport de chaleur du simple fait des écarts de température entre le jour et la nuit ou entre les saisons. Par ailleurs l'évapotranspiration des couverts végétaux (évaporation directe plus eau transpirée par les plantes) conditionne en partie la circulation de l'eau à l'échelle de la micro ou de la méso porosité du sol.

Les éléments constitutifs de la fraction « terré fine » soudés par l'humus, forment des agrégats, qui ménagent entre eux des espaces lacunaires remplis d'air et d'eau. C'est le complexe argilo humique, qui en présence de calcium confère au sol une structure stable.

Les agrégats se rassemblent pour former des mottes.

La forme, la taille et la disposition des agrégats caractérisent la structure du sol, qui doit être à la fois stable et poreuse :

- stable : pour que les racines puissent explorer en permanence un grand volume de terre.
- poreuse : de façon à permettre la circulation de l'air et de l'eau.

Le sol est de ce fait propice à la vie biologique, à un bon enracinement et à la disponibilité des éléments minéraux. [1]

I.2.2.Observations et déterminations la textures du sol

Pour l'observation et déterminations la textures du sol Il faut :

- prélever un échantillon du sol suffisamment grand pour remplir environ un quart de la paume de la main ;
- enlever les corps étrangers (racines, semences, insectes) et les matériaux supérieurs à 2 mm (du gravier) ;
- ajouter un peu d'eau sur l'échantillon et malaxer le sol pour ainsi obtenir une pâte. Le sol doit être uniformément mouillé, sans présence d'agréations ;
- rouler d'abord la pâte entre le pouce et l'index pour former « une boule » ou un « cylindre » en faisant aller et venir la pâte de la paume de la main vers l'extrémité des doigt set vice-versa; ceci permettra de distinguer s'il s'agit principalement de :
 - sable: on sent les grains de sable entre les doigts et le sol ne colle pas aux doigts ; il n'a pas de cohésion et la boule casse facilement quand on exerce une pression avec les doigts ; le cylindre ne se forme pas facilement.

- **limon**: on sent que la pâte colle partiellement aux doigts ; on peut bien faire une boule qui ne casse pas facilement quand on la presse entre les doigts ; on peut former un cylindre qui, courbé en forme de U, laisse apparaître des fissures ;

- **argile** : la pâte est très souple et colle aux doigts, on peut facilement faire une boule et faire un creux dedans ou donner une forme à la pâte, il est facile de former un cylindre qui ne présente pas de fissure quand il est courbé en forme de U.

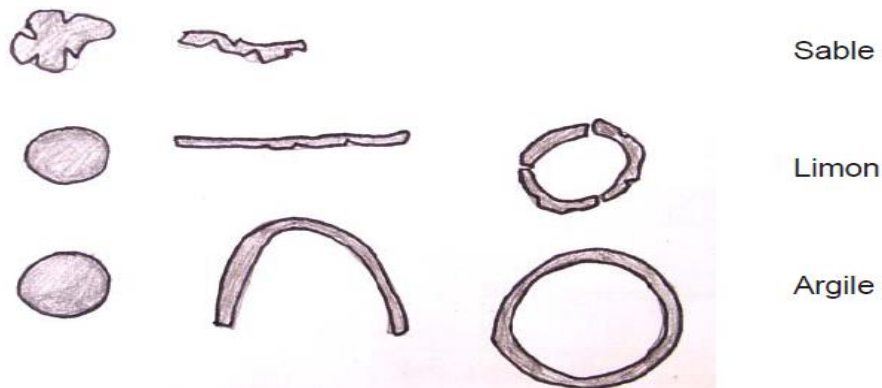


Figure I.2: Méthode de détermination de la texture du sol [1]

I.2.3. La qualité du sol et le taux d'humidité

Les capacités calorifiques et conductivité du sol ont un impact important sur l'efficacité du système. Ces caractéristiques dépendent de la composition du sol mais aussi de son taux d'humidité et des migrations d'eau en son sein.

La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau.

L'eau possédant une capacité et une conductivité thermique supérieures à celles des autres constituants du sol. Un sol humide est plus inertielle qu'un sol sec et transmettra plus facilement sa chaleur ou sa fraîcheur à l'air dans les canalisations du puits. Cet effet peut être mis à profit pour augmenter la performance des échangeurs thermiques air/sol. Il suffit alors d'humidifier le sol par arrosage pour accroître ses capacités de stockage thermique et les échanges avec l'air dans le puits. [6]

I.2.4. 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 :

$$C_s = \sum x_i \rho_i C_i \dots \dots \dots (I.1)$$

Où :

x_i, ρ_i, C_i représentent respectivement la teneur du matériau (m³ de matériau/m³ 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. [3]

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

	Masse Volumique	Capacité calorifique	Conductivité thermique
Minéraux (moy)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$C(\text{kJ/K kg})$	$\lambda(\text{W/Km})$
Sable et Gravier	2650	0.80	2.90
Argile et limon	1700 à 2200	0.91 à 1.18	2.00
Matière organique	1200 à 1800	1.67 à 2.50	1.50
Matière organique	1300	1.90	0.25
Eau	1000	4.20	0.585
Glacé	920	2.10	2.20
Air	1250	1.00	0.023

Tableau I.1 : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol [3]

I.2.5. 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, des liaisons entre ces particules ainsi que de sa teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide. 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. [3]

La figure suivante montre la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau : [3]

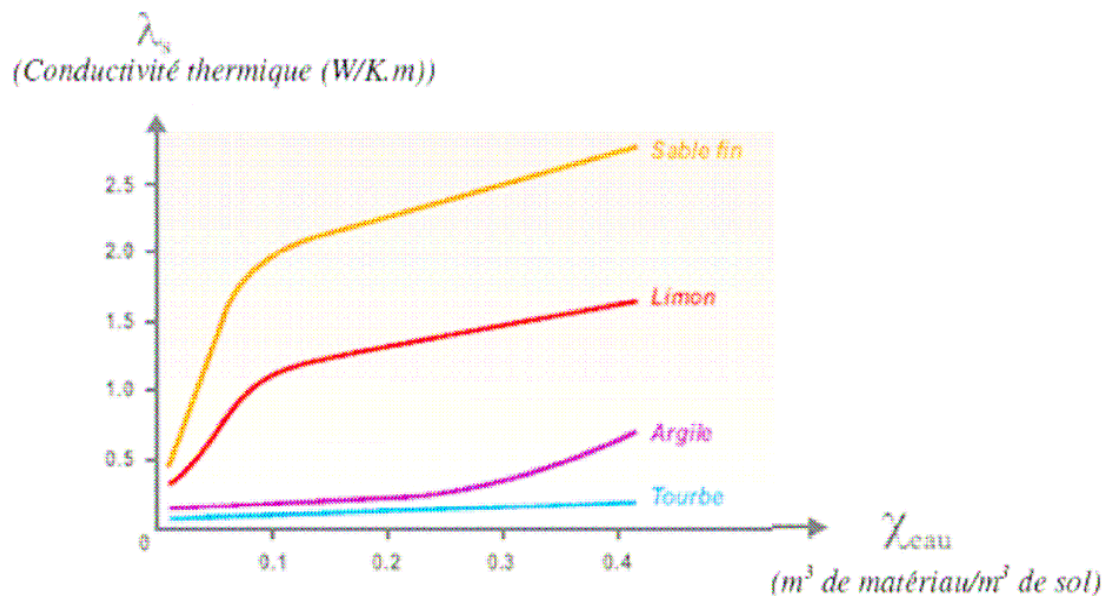


Figure I.3 : Conductivité thermique de quelques sols [3]

I.2.6. La surface du sol et le rayonnement solaire

La surface du sol absorbe le rayonnement solaire selon son coefficient d'albédo : il s'agit d'un apport énergétique majeur dont l'effet sur la température du sol est important. [6]

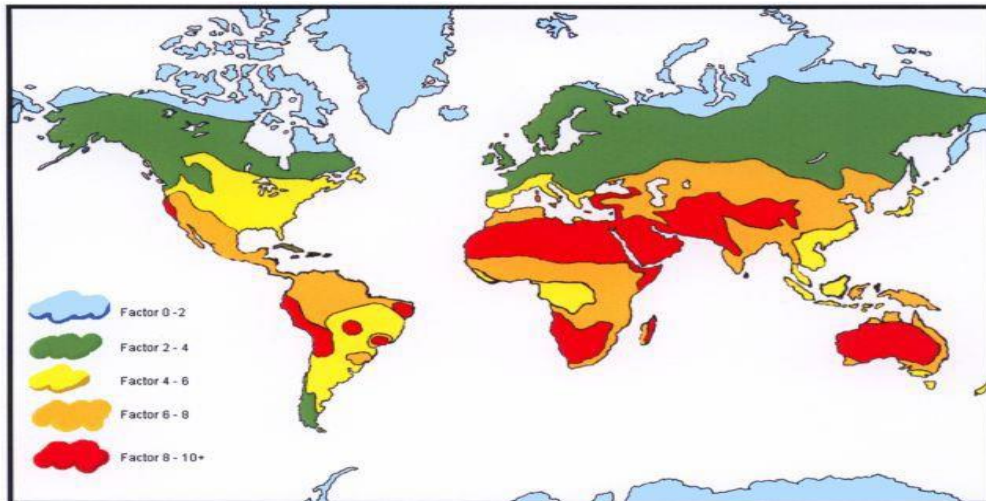


Figure I.4 : Rayonnement solaire annuel dans le monde [6]

I.3. géothermie

L'énergie géothermique désigne l'énergie provenant de la chaleur contenue dans la croûte terrestre et dans les couches superficielles de la terre.

On distingue habituellement deux formes d'énergie géothermique avec la géothermie de surface et la géothermie profonde.

La géothermie de surface consiste en la récupération de la chaleur pendant la période de l'hiver et de la fraîcheur pendant l'été à partir de la couche superficielle du sol.

La géothermie profonde consiste quant à elle à capter la chaleur contenue par la croûte terrestre en vue de produire du chauffage lorsque la température est inférieure à 90°, ou même de l'électricité dès lors que la température est comprise entre 90 et 150°. [4]

On distingue plusieurs types de géothermie en fonction de la température de la ressource et du mode d'utilisation de l'énergie.

I.3.1. Classification des ressources géothermiques

On distingue plusieurs types de géothermie en fonction de la température de la ressource et du mode d'utilisation de l'énergie, tel que la géothermie à haute énergie, la géothermie à basse énergie, et la Géothermie à très basse énergie.

I.3.1.1. Géothermie à haute énergie

(Haute enthalpie, haute température, profonde)

-La profondeur: plus de 1500 mètres.

- La température : entre 80 °C et 300 °C
- L'objectif : Production d'électricité et de chaleur à la fois.
- Le moyen: une turbine à vapeur pour l'électricité et de récupération des condensats de vapeur pour la chaleur.[2]

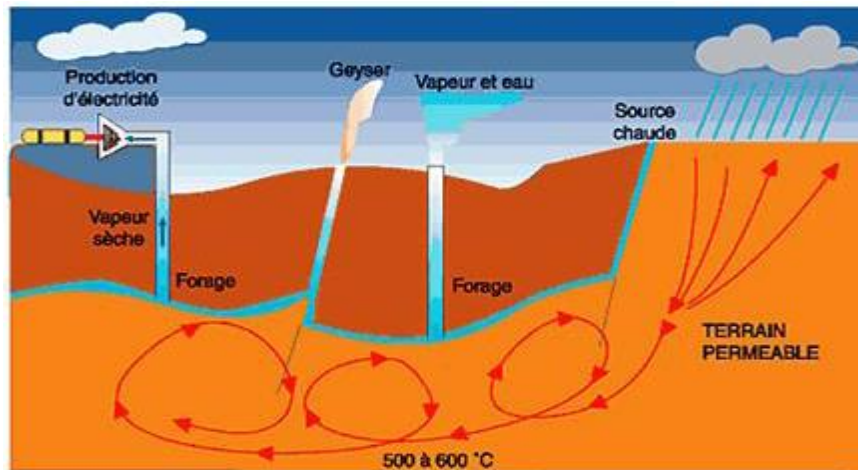


Figure I.5 : La Géothermie à haute énergie [2]

I.3.1.2 La Géothermie à basse énergie

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

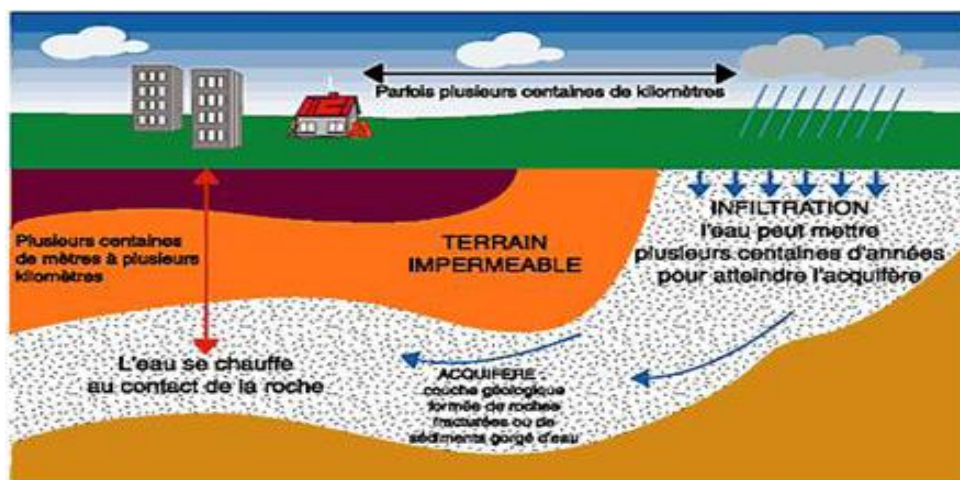


Figure I.6 : La Géothermie à basse énergie [2]

I.3.1.3 Géothermie à très basse énergie

-La profondeur: centaines mètres.

-La température: entre 10 et 30°C.

-L'objectif : la climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal et le chauffage et la climatisation.

-Le moyen : pompe à chaleur géothermique prélevant la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique.

I.4 Flux géothermique

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

-Le flux diminue avec la profondeur à cause de la désintégration matérielle radioactive impliquée.

-Le flux est maximal à la surface de la terre et diminue avec la profondeur à cause de la réduction de la quantité de matériel radioactif sous-jacent.

-Le flux varie géométriquement mais relativement uniforme sur une vaste étendue.

Pour la majorité des problèmes d'intérêt, compte tenu des faibles profondeurs et de l'étendue restreinte des études hydrogéologiques, même régionales, le flux géothermique pourra être considéré constant à la fois en fonction de la profondeur et sur l'ensemble de la région d'étude considérée. Pour les continents, le flux géothermique moyen varie entre 40 MW/m² dans les cratons stables et 70 MW/m² dans les provinces tectoniques tertiaires. [1]

I.4.1. Avantages de l'énergie géothermique

En général les avantages de l'énergie géothermie sont supérieurs aux inconvénients .nous énumérons ci-dessus les principaux avantages de ce type d'énergie renouvelable.

a. Source d'énergie renouvelable pour la production de chaleur seulement.

b. La chaleur est utilisée directement dans le chauffage des bâtiments, l'agriculture, l'industrie, l'aquaculture, la culture en serres, les thermopompes et les thermes.

c. Source d'énergie à haute température de l'ordre de 2000°C, propre, fiable et économique.

d. Possibilité du couplage avec les centrales électriques, les réseaux de chaleur et de faire de la cogénération. Le séchage de bois, le chauffage des serres ou d'installations touristiques, la pisciculture, les séchages agricoles, également dans l'industrie tel que le lavage de la laine, distillation et réfrigération.

I.4.2. Inconvénients de l'énergie géothermique

Les Inconvénients de l'énergie géothermie sont inférieure aux Avantages .nous énumérons ci-dessus les principaux Inconvénients de ce type d'énergie renouvelable.

a. Les sites les plus intéressants sur la planète sont déjà exploités.

b. Source d'énergie non renouvelable pour la production d'électricité (en raison du tarissement des puits géothermique).

c. Coût très élevé en raison du prix de réalisation du forage qui parfois ne peut rentable qu'à une profondeur considérable.

d. Nécessité de pose d'un terrain suffisant pour l'exploitation de l'énergie géothermique. [1]

I.5. Rappels sur le transfert thermique

Un transfert thermique est le transfert d'énergie thermique d'une source à une autre, il se transmet spontanément de celui qui a la température la plus élevée à celui qui a la température la moins élevée .c'est un transfert d'énergie irréversible.

I.5.1.Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température: La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température.

Nous distinguerons deux cas : [3]

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.

- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

I.5.2 Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \dots\dots\dots (I.2)$$

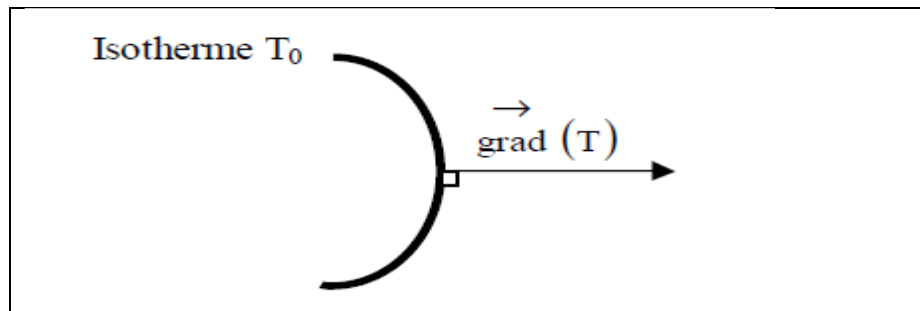


Figure I.7 : Isotherme et gradient thermique [3]

I.6 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$q = \frac{1}{s} \frac{d\varnothing}{dt} \dots\dots\dots (I.3)$$

On appelle flux(\varnothing) de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface (S) par unité de temps:

$$Q = \frac{d\varnothing}{dt} \dots\dots\dots (I.4)$$

I.7 Formulation d'un problème de transfert de chaleur [3]

I.7.1 Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système.

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

Q_{st} : flux de chaleur stocké

Q_g : flux de chaleur généré

Q_e : flux de chaleur entrant

Q_{st} : flux de chaleur sortant

$$Q_e + Q_g = Q_s + Q_{st} \dots \dots \dots (I.5)$$

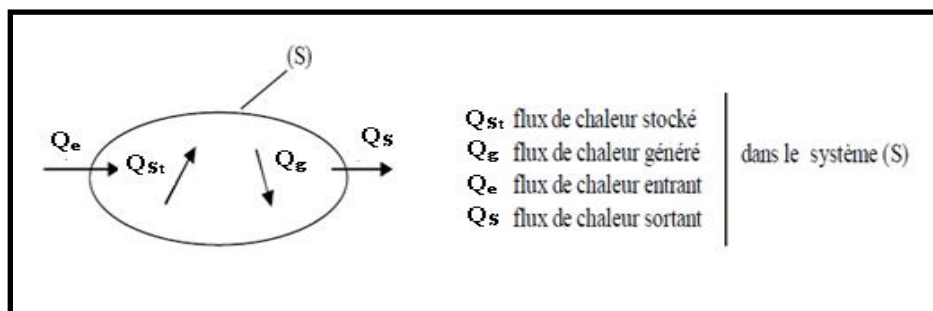


Figure I.8: Système et bilan énergétique [3]

I.8. Les différents modes de transfert de chaleur

Il est habituel dans l'étude des transferts thermiques, de distinguer trois grandes parties se rattachant chacune à un mode de transfert particulier de la chaleur. La conduction, la convection et le rayonnement.

Chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, comme l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants fondamentaux ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes, électrons libres,) ceux-ci pourront échanger tout ou une partie de leur énergie thermique, c'est-à-dire gagner ou perdre l'énergie cinétique:

-Soit par interaction directe avec les particules voisines (choc de molécules par exemple), ce qui correspond à la conduction.

-Soit par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement.

Enfin dans le cas d'un gaz ou d'un liquide, on considère également, mais cette fois à l'échelle macroscopique, comme un mode de transfert de chaleur appelé convection, les échanges résultants du déplacement des diverses parties d'un fluide à des températures différentes. [3]

I.8.1 Rayonnement

Les corps émettent de l'énergie par leur surface, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques, et ce d'autant plus que leur température est élevée.

Inversement, soumis à un rayonnement, ils en absorbent une partie qui se transforme en chaleur. Le rayonnement est un processus physique de transmission de la chaleur sans support

matériel. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par du vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid, le corps chaud émet un flux Q_1 et absorbe une partie du flux Q_2 émis par le corps froid. Comme $Q_1 > Q_2$, le bilan du flux est tel que le corps chaud cède de l'énergie au corps froid.

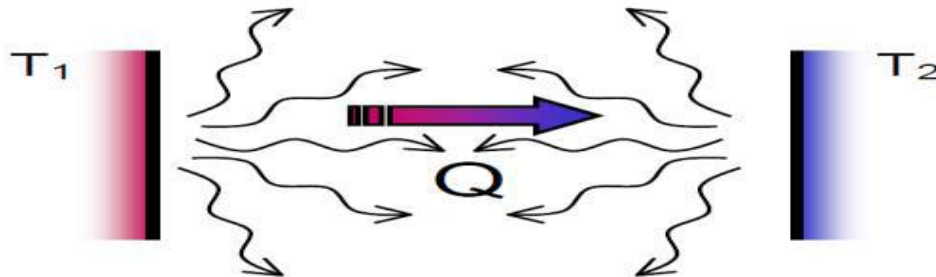


Figure I.9: Schéma représentatif du rayonnement [3]

A l'inverse, le bilan du flux peut être retrouvé sur le corps froid qui émet moins d'énergie qu'il n'en absorbe.

La densité maximum du flux thermique émise par un corps à la température T est donnée par la loi de "Stefan-Boltzmann" : [3]

$$P_r = \sigma T^4 \dots\dots\dots (I.5)$$

Où T est la température absolue en K, σ est la constante de "Stefan-Boltzmann" $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/M}^2$ et P_r est appelée la puissance émissive du corps noir.

Seulement un " radiateur idéal " ou le corps noir peut émettre un flux thermique en concordance avec la relation (I.5). Le flux thermique émis par un radiateur réel, à la température T est plus petit que le flux thermique donné par la relation (I.6) et il s'exprime :

$$q = \epsilon \sigma T^4 \dots\dots\dots (I.6)$$

Où :

ϵ est l'émissivité qui varie entre 0 et 1 (pour tous les corps réels; ϵ est inférieure à 1).

I.8.2.Effet dû à la radiation:

Il s'agit des échanges de rayonnement infrarouge avec les parois qui peuvent être froides ou chaudes. La température de rayonnement correspond à la température des surfaces avec lesquelles le corps humain échange de la chaleur. Le flux radiatif dépend de la constante de

Stefan-Boltzmann, de l'émissivité des corps, des différences des puissances de températures des surfaces et des facteurs de forme.

I.8.3. Convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide.

Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas, l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :[3]

$$Q_{cv} = h_{cv} (T_s - T_f) \dots \dots \dots (I.7)$$

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue:

- La convection libre ou naturelle
- La convection forcée
- La convection mixte

I.8.3.1. La convection libre ou naturelle:

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).[3]



Figure I.10: Schéma représentatif de la convection naturelle. [3]

I.8.3.2. La convection forcée

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...etc.). L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi. Ils sont d'autant plus intenses lorsque la vitesse de l'air est importante et que l'écart de température entre l'air et le corps est grand.

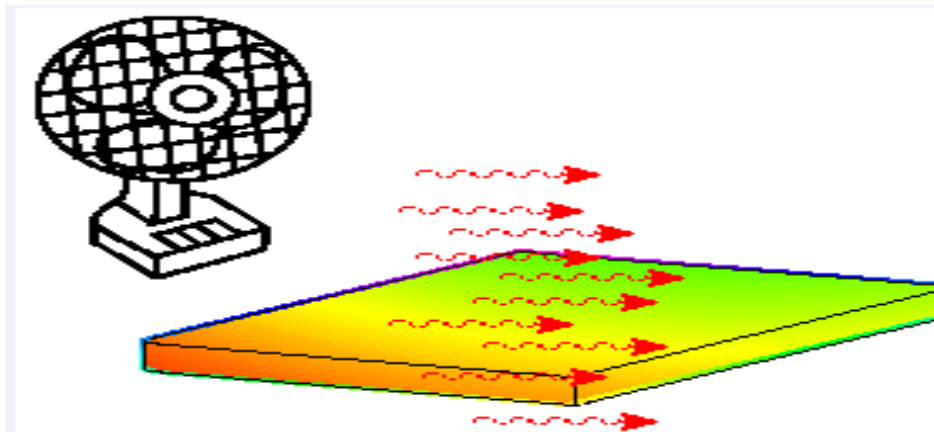


Figure I.11 : Schéma représentatif de la convection forcée.[3]

I.8.3.3. La convection mixte

C'est la coexistence de convection naturelle et forcée. L'étude de la convection dans les cavités a suscité l'intérêt de nombreux scientifiques et industriels. Ainsi le développement rapide de la technologie des cartes électroniques a conduit à des assemblages de plus en plus compacts et dissipatifs. Un contrôle rigoureux des températures de fonctionnement des composants électroniques dans ces assemblages est devenu indispensable pour éviter leurs endommagements par d'éventuelles surchauffes résultant de la dissipation de l'énergie des composants.

I.8.4. Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps ou entre des corps en contact s'effectue selon deux mécanismes distincts: une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température : [3]

$$Q_{cd} = -\lambda \text{ grad } T \dots\dots\dots (I.8)$$

Ou sous forme algébrique :

$$q_{cd} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \dots\dots\dots (I.9)$$



Figure I.12. Schéma représentatif de la conduction thermique.[3]

Et enfin on explicite ici le cas d'une chambre figure ci-dessous sous l'influence des trois modes transfert de chaleur

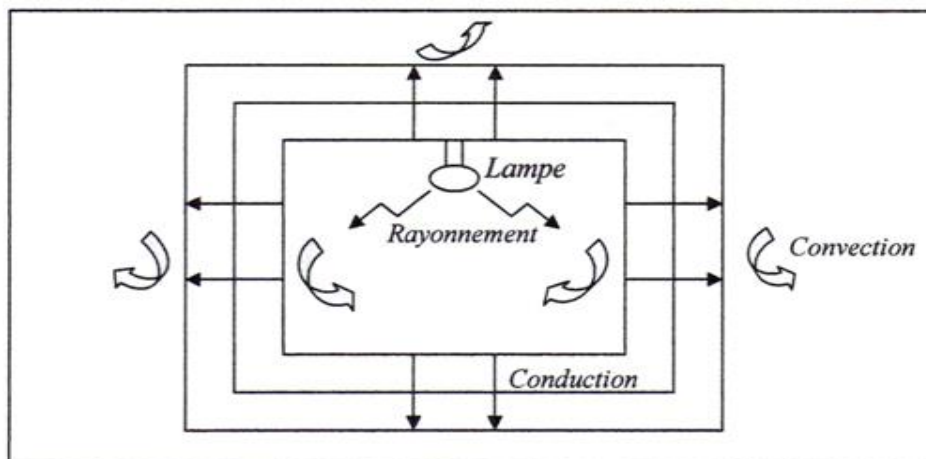


Figure I.13. Illustration du phénomène de transfert de chaleur se produisant dans une chambre. [15]

- La conduction à travers les murs, le parquet et le toit de la chambre.
- La convection qui prend place grâce au mouvement de l'air à l'extérieur et à l'intérieur de la chambre.
- Le rayonnement de la lampe éclairant la chambre.

I.9. confort thermique

Le confort est une notion étroitement liée à la sensation de bien être et qui ne possède pas de définition absolue.

Au sens général du terme, le confort consiste en tout ce qui contribue, à la sensation agréable procurée par la satisfaction des besoins physiques, l'absence de tensions psychologiques.

Il existe divers confort associés à chacun de nos sens: le confort visuel, le confort acoustique, le confort olfactif et finalement le confort thermique [9].

Le confort thermique a été défini comme étant la condition dans laquelle aucune

Contrainte significative n'est imposée aux mécanismes thermorégulateurs du corps humain.

Le confort thermique permet l'obtention de conditions optimales pour tous les systèmes fonctionnels de l'organisme ainsi qu'un haut niveau de capacité' de travail.

Dans sa définition, le confort thermique est considéré autant qu'une moyenne des sensations physio-psychologiques perçue par un groupe d'individus soumis à un environnement identique et ayant une même activité et un habillement semblable.

D'un point de vue physiologique, Givoni donne une définition plus exacte au confort qui le rattache aux conditions sous lesquelles les mécanismes autorégulateurs du corps sont dans un état d'activité minimum. Effectivement, s'il y a une diminution de la température interne, l'organisme frissonne afin de tenter de rapprocher la température à la normale. Au contraire, s'il y a une augmentation de la température interne, l'excès de chaleur va être évacué par l'organisme en augmentant sa sudation [9].

I.9.1 paramètre effectuant du confort thermique

-La sensation de confort thermique est fonction de plusieurs paramètres : Les paramètres physiques d'ambiance, au nombre de quatre, sont : la température de l'air, la température de paroi (radiante), la vitesse de l'air, et l'humidité relative de l'air.

-Les paramètres liés à l'individu, ils sont multiples, on recense notamment deux paramètres principaux qui sont l'activité et la vêtue de l'individu.

-Les paramètres liés aux gains thermiques internes, gains générés dans l'espace par des sources internes autres que le système de chauffage. (Éclairages, appareils électriques, postes informatiques) [14].

I.9.1.1. températures

La température de l'air, ou température ambiante (T_a), est un paramètre essentiel du confort thermique. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires. Dans un local, la température de l'air n'est

pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe. [14]

I.9.1.2. Humidité relative

L'air contient de la vapeur d'eau. Le taux d'humidité (qui varie de 0 à 100%), mesure la quantité d'eau. Plus la température augmente, plus l'air peut contenir de la vapeur d'eau: à 15° C, l'air contient 10g de la vapeur d'eau par kg d'air, alors qu'à 20° C, cette quantité passe à 15g. Entre 30 et 70%, l'humidité relative pèse peu sur la sensation de confort thermique. Nous restons dans la zone de confort. Sous 20%, l'air est trop sec et au de la de 80%, trop humide [16].

I.9.1.3. vitesse de l'air

La vitesse de l'air (et plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu) est un paramètre à prendre en considération car elle influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. A l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que l'impact sur le confort des occupants est négligeable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s [15].

I.9.1.4. métabolisme

L'activité est un paramètre essentiel pour la sensation thermique de l'individu, définissant directement le métabolisme de l'individu, c'est-à-dire la quantité de chaleur produite par le corps humain.

Dans le cas d'une très forte activité, elle peut être responsable de sensations d'inconfort chaud, même en précise la condition météorologique très favorable. Il est à noter toutefois que, dans le cas d'une activité classique de bureau, les plages de variation du métabolisme demeurent limitées [15].

I.9.1.5. L'habillement

L'habillement représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la Surface de la peau et l'environnement. [15]

Il joue un rôle très important, dont la manière est ressentie les effets de ces échanges qui se font suivant ces mécanismes suivants:

I.10. Données climatiques et le confort

Le climat est l'ensemble des circonstances atmosphériques propres à une région du globe, il exprime les conditions dominantes, et se détermine par différentes éléments, leurs combinaisons et leurs interactions. Lorsqu'on considère le confort humain et l'habitat, les éléments climatiques principaux sont: Le rayonnement solaire, la température, l'humidité, les précipitations et le vent [17].

La terre connaît cinq grands types de climats classés selon la température et l'humidité: climat tropical, climat sec, climat tempéré chaud, climat tempéré froid et climat froid. Cette classification peut encore être affinée par les caractéristiques géographiques comme la proximité des océans, l'altitude e les forêts.

I.11. Classification du climat en Algérie

L'Algérie occupe une vaste étendue territoriale, sa superficie est de 2.381. 741 Km².

Plus de 4/5 de sa superficie est désertique. D'où une large variété géographique et climatique allant du littoral au désert. La classification climatique en Algérie permet de distinguer quatre zones principales Figure(I.17)

- Zone A : Littoral marin
- Zone B : Arrière littoral montagne
- Zone C : Hauts plateaux
- Zone D : Pré - saharien et saharien

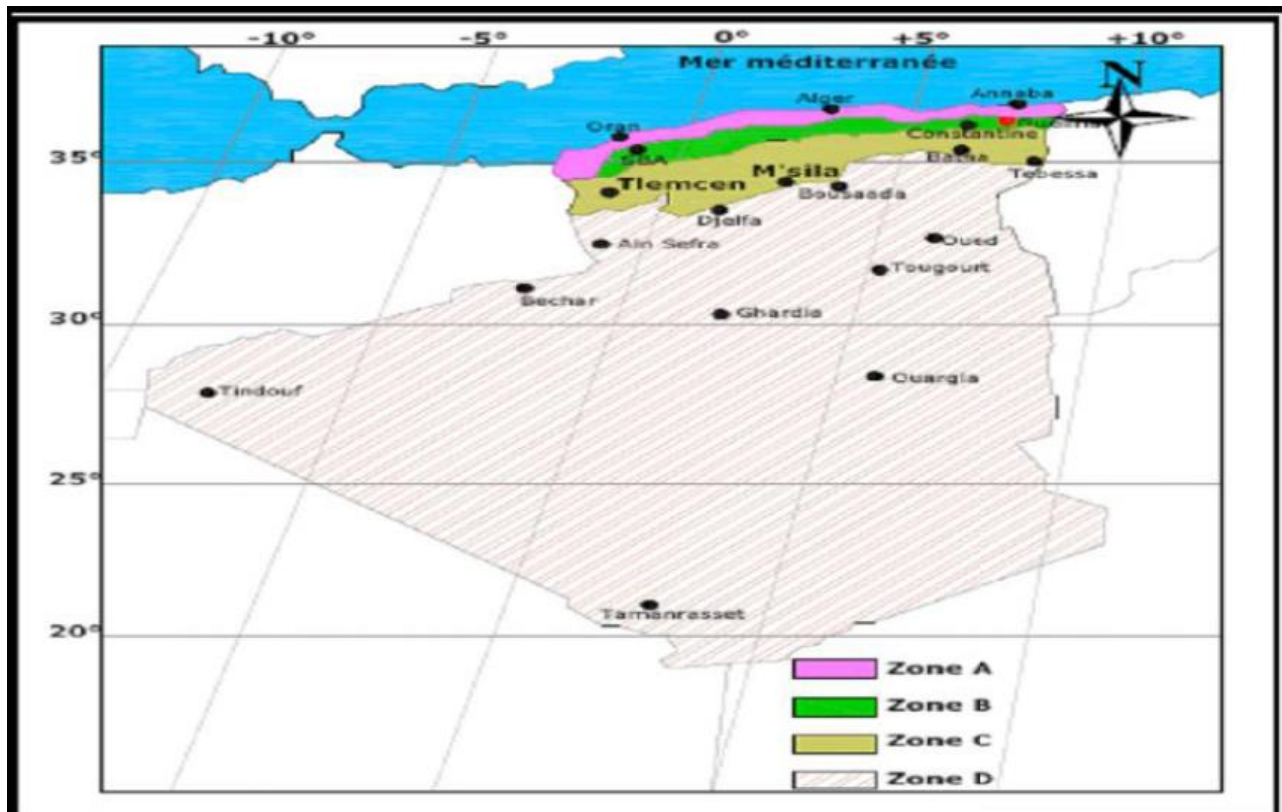


Figure I.14: Classification du climat en Algérie [17]

I.12.Écoulement d'un fluide dans le cas laminaire et turbulent

En va expliquer la différence entre les écoulements laminaire et turbulent

1.12.1 Définition des notions d'écoulement laminaire et turbulent

Lorsqu'un fluide s'écoule dans un tuyau comme s'il glissait parallèlement aux parois qui le guident, on dit que l'écoulement est laminaire. La répartition des vitesses est bien régulière. De tels écoulements génèrent très peu de bruit à cause de leur structure de vitesse bien ordonnée.

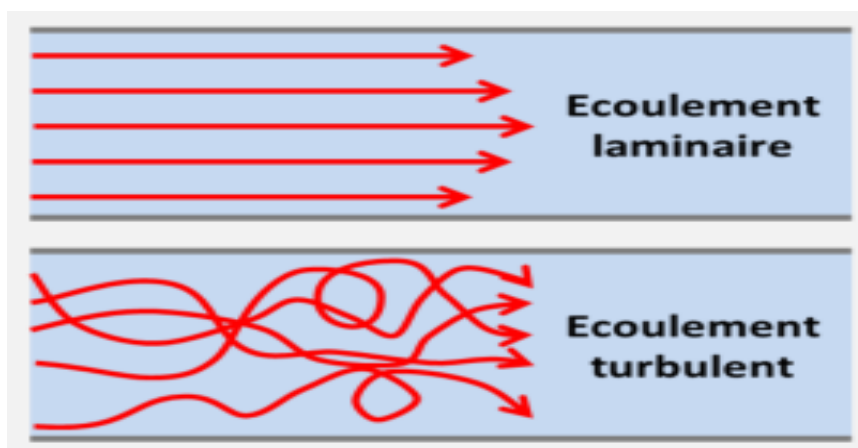


Figure I.15 : Écoulement laminaire et écoulement turbulent [22]

Lorsqu'un fluide s'écoule avec des variations de vitesse brusques et aléatoires en chaque point, on dit que l'écoulement est turbulent. De tels écoulements génèrent du bruit à cause de leur structure chaotique, ce qui se produit communément dans les forts remous d'un torrent de montagne que l'on peut entendre à plusieurs centaines de mètres.[22]

1.12.2. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est une grandeur sans unité que l'on calcule pour déterminer la nature laminaire ou turbulente d'un écoulement. [22]

$$R_e = \frac{\rho d v}{\eta}$$

R_e : nombre de Reynolds

ρ : Masse volumique du fluide (en kg. m^{-3})

d : dimension caractéristique de l'écoulement (en m)

v : vitesse moyenne d'écoulement (en m.s^{-1})

η : viscosité dynamique du fluide (en Pa.s)

Remarque

1. dans le cas d'un écoulement dans une canalisation, d représente le diamètre interne de la canalisation ou sa plus petite cote intérieure pour une canalisation rectangulaire ;
2. (\mathbf{v}) représente la vitesse moyenne d'écoulement de toutes les particules de fluides (à la sortie d'un robinet par exemple) et non pas la vitesse d'une seule particule de fluide, car elles diffèrent en direction sens et intensité pour chacune d'elle dans le cas général :

$$\mathbf{v} = \|\vec{\mathbf{v}}_{\text{moyen}}\| = \frac{1}{n} \|\sum_{i=1}^n \vec{\mathbf{v}}_i\| \dots \dots \dots (I.10)$$

Avec :

$\vec{\mathbf{v}}_i$: Vecteur vitesse de la particule i

n : nombre total de particules de fluide (sortant du robinet pendant l'intervalle de temps Δt).

v : vitesse moyenne d'écoulement (en m. s^{-1})

I.13. Classification des écoulements

Les écoulements de fluides peuvent donc être classés selon deux catégories:

-Les écoulements dits « laminaires » pour une vitesse d'écoulement faible par rapport à la viscosité de ce fluide. Les trajectoires des particules du fluide sont parallèles au conduit.

-Les écoulements dits "turbulents" pour des vitesses d'écoulement élevées.

(Toujours en fonction de la viscosité du fluide). Les trajectoires des particules du fluide sont quelconques.

Selon leur nature physique, géométrique ou cinématique, on peut classer les écoulements des fluides comme suit :

Si $Re < 2000$: le régime est laminaire

Si $2000 < Re < 3000$: le régime est transitoire

Si $Re > 3000$: le régime est turbulent

Fluide	air	Eau	huiles	bétons	Boues	bitumes
Viscosité dynamique $\eta(\text{Pa.s})$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$ A $1,2 \cdot 10^{-3}$	10 A 400	$1 \cdot 10^{-3}$ A 20	10 A 10^8

Tableau I.2: Représente les viscosités dynamiques de quelques milieux

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé de la nature du sol qui est l'un des principaux éléments à prendre en compte lors de la conception d'un puits canadien et les performances du puits qui sont directement liées à la capacité calorifique et la conductivité thermique, afin d'aboutir aux attentes des objectives et aux résultats valables et vérifiables .

Et pour les transferts de chaleur nous avons distingué trois modes qui sont : par convection, conduction, et par rayonnement.

Il faut définir un système (S) avec ses limites et différents inventaires des flux de chaleur afin d'élaborer un bilan d'énergie.

Chapitre I

Généralité

Chapitre II
Puits canadien et
modélisation mathématique

II.1.Introduction

Dans ce chapitre on mène une description d'un puits canadien ainsi que la façon de son installation et de son fonctionnement. Elle est basé sur les méthodes de calculs définis afin d'installer un puits canadien dans les normes.

II.2.Le puits canadien

Le puits canadien est un système géothermique, il consiste à utiliser l'inertie thermique du sol pour prétraiter l'air neuf de renouvellement d'air de la maison, des bureaux, et de la construction.

La température de l'air extérieur ce varie toute au long de l'année contrairement à celle du sol qui est doué d'une stabilité remarquable, qui est généralement autour de 12°C en moyenne, et ce à quelques mètres de la profondeur.

L'air extérieur circule via des canalisations enterrées, posées la plupart du temps lors de la construction, se réchauffe en hiver pour atteindre une température de 2 à 5°C lorsqu'elle atteint -15°C à l'extérieur.

En été, de la même manière l'air passant dans les tubes enterrés récupère la fraîcheur du sol et l'introduit dans la maison ou l'immeuble des bureaux (applications tertiaires). Dans le cas d'une température de $+30^{\circ}\text{C}$ en extérieur, l'air introduis se réduit à 15°C environ.

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour garantir un bon fonctionnement du puits canadien.

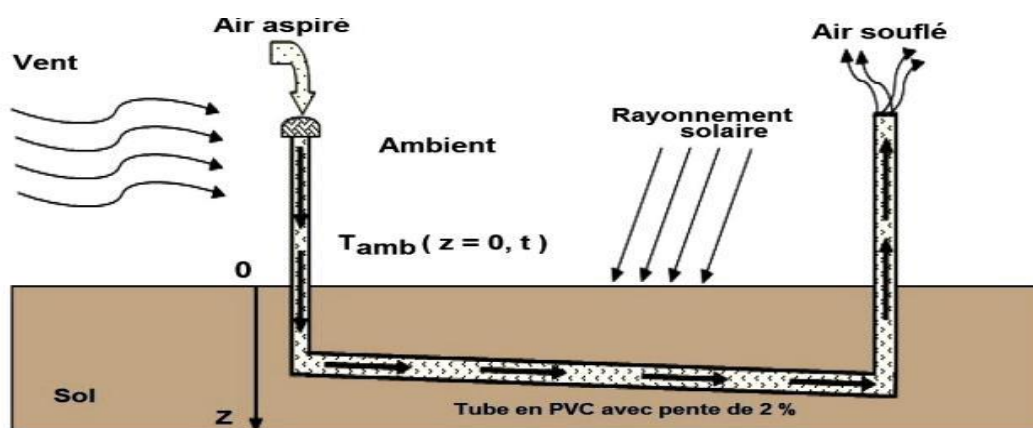


Figure II.1: Schéma de puits canadien [8]

II.2.1.Principe de fonctionnement

Le puits canadien exploite ce principe géothermique pour réguler la température ambiante de l'air de votre habitation. Le puits canadien est en fait un réseau de tuyauterie qu'on fait circuler entre une prise d'air à l'extérieur, le sous-sol et un système d'admission d'air qui injecte l'air traité ou non au sein de votre habitation. Le réseau doit être assez grand pour permettre un échange maximal des calories (température) entre les différents milieux (air extérieur, sous-sol et air de l'habitation).

Ainsi lorsqu'il fait froid en hiver, le puits canadien vous permettra, gratuitement et sans émissions polluantes ou à effet de serre, de réchauffer passivement votre maison. De même, lorsqu'il fera chaud en été, le puits climatique vous permettra d'abaisser la température de l'air ambiant dans votre maison comme s'il s'agissait d'un climatiseur.

II.2.1.1.En saison froide

En hivers à deux mètres de profondeur, la température du sol est comprise entre 4 et 7°C, dans le cas d'une température extérieure de -10°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +2°C permettant ainsi une économie de chauffage pouvant aller jusqu'à 15% suivant les régions. Le puits canadien permet également de maintenir hors gel un bâtiment. Lorsque ces puits sont couplés à un système de ventilation double flux avec échangeur. D'autre part avec le puits canadien, il n'est plus nécessaire de prévoir un dispositif anti-condensation, permettant ainsi de réaliser des économies de chauffage en cas d'utilisation d'un échangeur thermique [7].

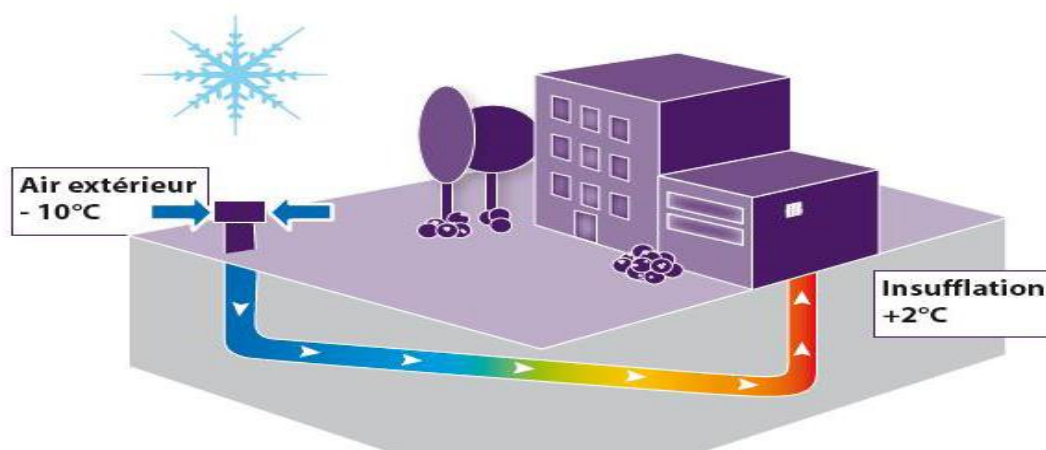


Figure II.2 : Description d'un puits canadien en Hiver [7]

II.2.1.2. En saison chaude

En été à deux mètres de profondeur, la température du sol est d'environ 15°C, dans le cas d'une température extérieure de +30°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +24°C permettant un rafraîchissement de l'air ambiant sans avoir recours à un système de climatisation et de renoncer à une climatisation classique en raison des avantages obtenus qui permettent d'obtenir des conditions de vie acceptables, un logement sain et agréable [7]

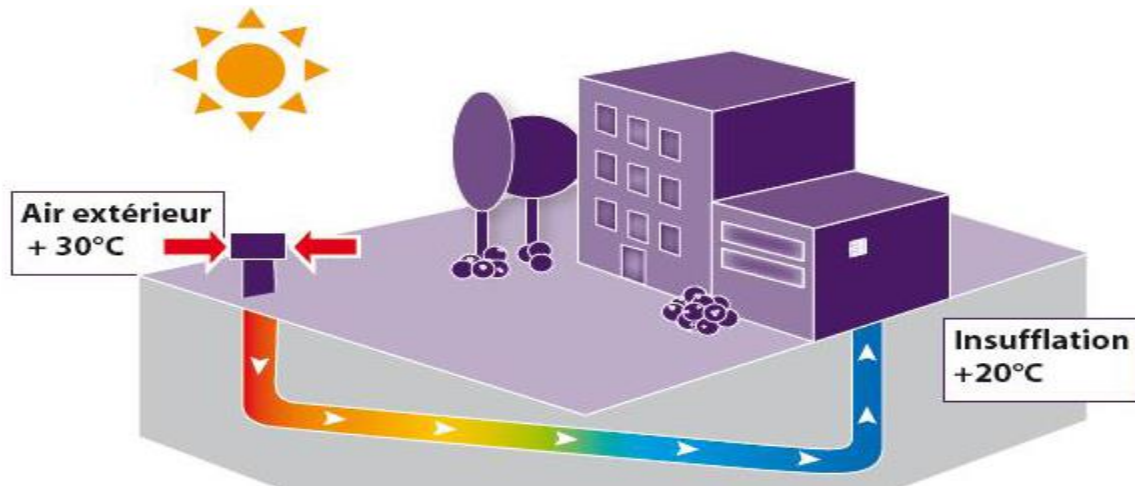


Figure II.3 : Description d'un puits canadien en été [7]

II.2.1.3. En périodes intermédiaires

L'amenée d'air neuf passe soit par le collecteur enterré soit par la prise d'air directement, en fonction de la température extérieure. La commande est automatique par thermostat ou manuelle. [7]

II.2.2. Principe d'installation d'un puits canadien

Afin d'obtenir un bon rendement d'échange thermique, le collecteur doit être enterré à une profondeur minimum de 1,20 mètre. A cette profondeur, la température du sous-sol reste à peu près constante toute l'année. Pour bénéficier d'une température de sous-sol plus importante et gagner en constance, il faut enfouir le collecteur plus profondément.

Lors de l'enfouissement, respecter une pente pour l'évacuation des condensats d'au moins 2%. Pour favoriser l'échange thermique, la vitesse de passage de l'air dans le tube ne doit pas dépasser 2,5m/s. Respecter une distance minimum de 1 mètre entre les collecteurs si le réseau est divisé en tronçons parallèles.

Afin de réduire les pertes de charges, il est recommandé d'avoir un rayon de courbure d'au moins 50 cm. [7]

II.2.3 Les différents éléments d'un puits canadien

Le puits canadien est constitué d'une prise d'air, d'un tuyau, siphon et le ventilateur (Figure II.4).

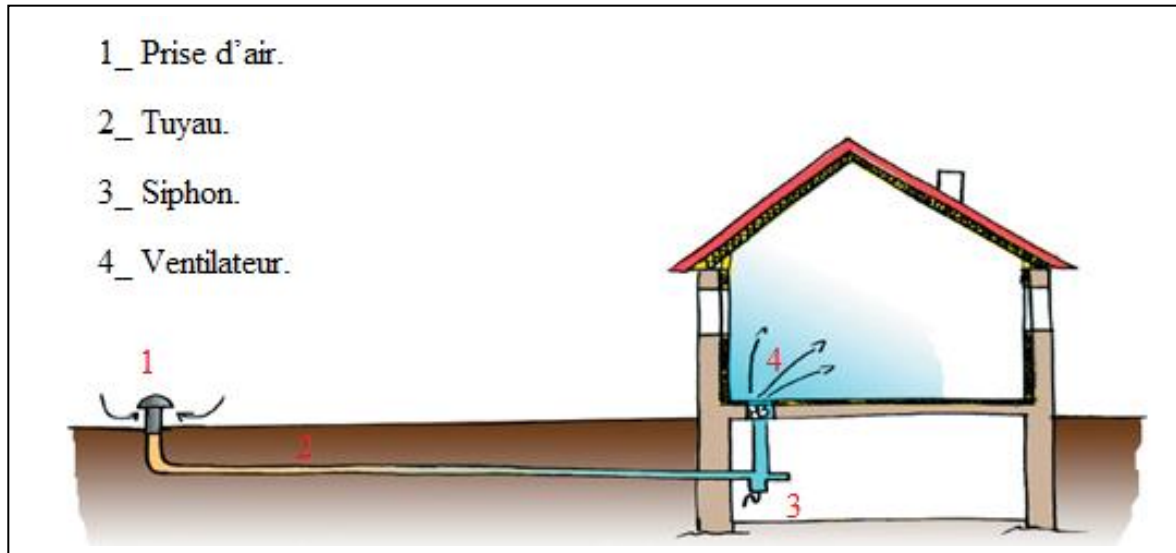


Figure II.4 : différents éléments d'un puits canadien [9]

II.2.3.1. La prise d'air extérieure

La prise d'air extérieure (Figure II.4) est caractérisés par :

a-Type d'entrée : il s'agit généralement d'une bouche extérieure pour le secteur résidentiel et d'un plénum pour le secteur tertiaire nécessitant de plus gros volumes de renouvellement d'air.

b-Hauteur de la prise d'entrée d'air neuf : elle doit être supérieure à 1,10 m pour limiter l'encrassement.

c-Chapeau de protection : il permet d'éviter les infiltrations d'eau de pluie à l'intérieur du puits.

d-Grille de protection à fin maillage : elle est indispensable pour éviter l'intrusion de rongeurs, oiseaux, insectes. Elle doit être facilement accessible pour nettoyage.

e - Filtres : il est conseillé de munir les entrées d'air des puits canadiens/provençaux d'un filtre. La classe du filtre à utiliser dépend de la densité et du type de poussières à proximité de l'entrée d'air. Il est recommandé d'inspecter et de changer régulièrement les filtres (3 à 4 fois par an en moyenne) car un filtre encrassé contribue à augmenter les pertes de charge du puits et donc la consommation du ventilateur.

f - Positionnement de l'entrée d'air neuf : celle-ci doit être implantée loin des sources de pollution (voirie, parking, poubelles) et loin de toute végétation pouvant produire des pollens allergisants.

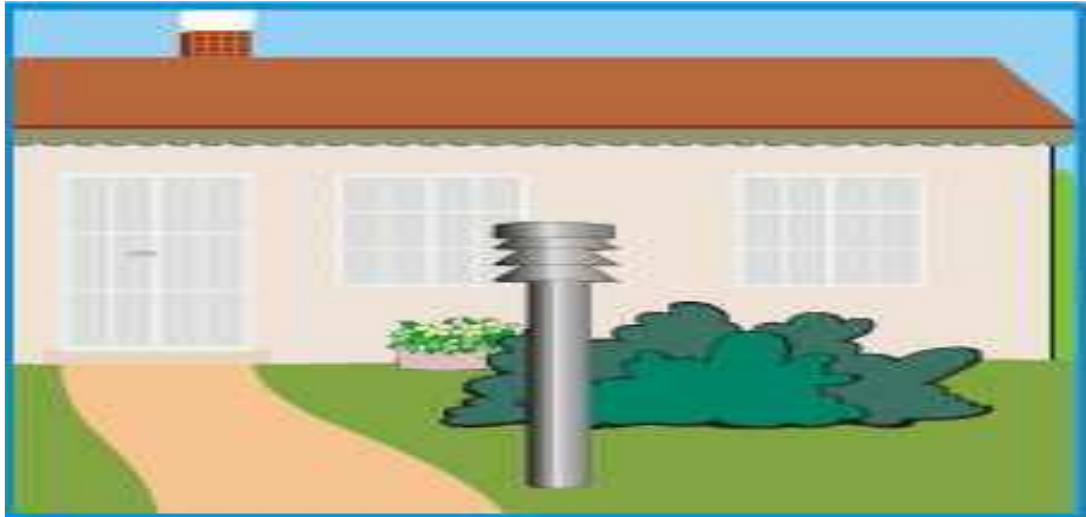


Figure II.5 : la prise d'air extérieure [3]

II.2.3.2. Les Tuyaux

Les meilleures performances sont obtenues avec un tuyau de grand diamètre (160mm) de 25 à 30m de long, enterré à une profondeur de 1,50 à 2m, ils sont caractérisés par : [3]

a- Nombre de tubes

Le conduit du puits peut être constitué d'un seul tube posé en méandre ou en boucle autour du bâtiment ou être organisé sous la forme d'un réseau de tubes parallèles installés entre des collecteurs afin d'augmenter le débit d'air circulant dans le puits (boucle de Tichelmann).

b- Longueur de chaque tube

Elle est habituellement de l'ordre de 30 à 50 m afin de limiter les pertes de charge. La longueur totale du conduit est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique (température extérieure tout au long de l'année) et du type d'installation choisie.

c- Diamètre des tubes

Pour optimiser les transferts thermiques sol/air, la vitesse de l'air au sein du puits doit être comprise entre 1 et 3 m/s. En fonction des débits d'air requis, le diamètre du conduit du puits est alors calculé pour respecter ces conditions de vitesse d'air.

d-Disposition des tubes

Afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter son entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes. Deux dispositions sont majoritairement utilisées lorsque le puits ne comporte qu'un seul tube

e-Profondeur d'enfouissement des tubes

La profondeur préconisée est souvent comprise entre 1,5 et 3 m. A ces profondeurs, la température du sol varie bien moins que la température de l'air extérieur entre l'été et l'hiver (entre 5 et 15 °C en moyenne en France). Il est cependant possible d'enfouir les tubes plus profondément mais cela augmente les contraintes de terrassement et de pose du conduit.

f-Espacement entre les tubes

il est préférable qu'il soit supérieur à 3 fois le diamètre des tubes afin de garantir un bon échange thermique de chaque tube avec le sol.

g-Pente du conduit

Elle doit être comprise entre 1 et 3% pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud est en contact avec les parois plus froides du puits.

h- Matériau constitutif des tubes

Le choix du matériau est important car il impacte directement sur les échanges thermiques sol/puits. L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits. Les matériaux utilisés doivent également avoir une bonne tenue à l'enfouissement (une classe de rigidité minimale de 8 KN/m² est conseillée). Les tubes entrant dans la composition des puits canadiens/provençaux actuellement en fonctionnement sont généralement en PVC, en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide. Certains tubes sont constitués de matières plastiques (PVC polychlorure de vinyle) structurés ou gaines type TPC (tube de des câble) emprisonnant des bulles d'air, ce qui diminue l'échange thermique sol/conduit. Le recours à ce type de tube est donc déconseillé.

i- Les différents types d'installation

On trouve dans la littérature des différents types d'installation des échangeurs air sol, la figure 6 illustre un échangeur air sol horizontal qui comporte un certain nombre de tubes

raccordés entre eux soit en série ou en parallèle. Cette configuration est habituellement la plus rentable lorsque l'espace du jardin est suffisant et les tranchées sont faciles à creuser [5].

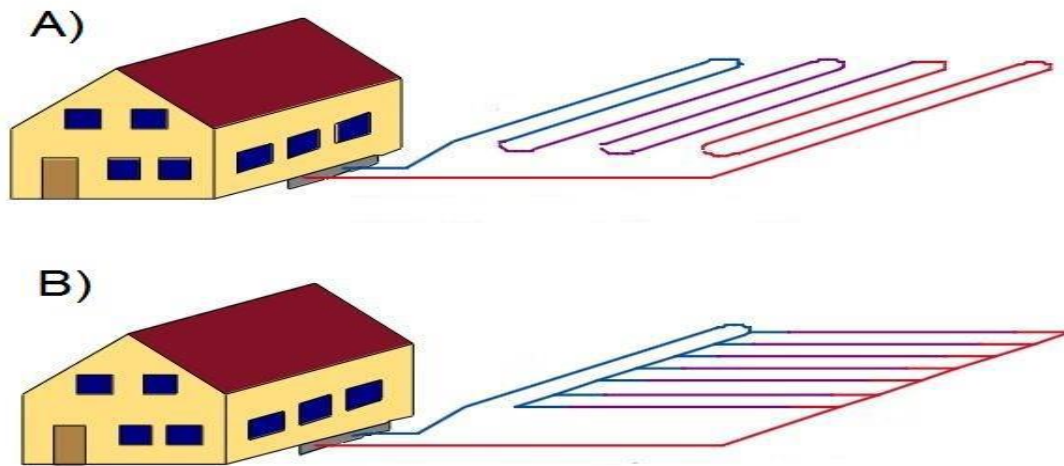


Figure II.6 : les échangeurs air sol horizontal

Aux États-Unis d'Amérique, certains échangeurs air sol spéciaux ont été développés pour les systèmes pompes à chaleur, dans lesquels les tubes sont courbés en une forme spirale (fig. 7). De cette façon, il est possible de placer plusieurs tubes dans des tranchées plus courtes afin de réduire la superficie du terrain nécessaire. Ces types des échangeurs sont mieux adaptés pour le chauffage et le refroidissement des locaux construits dans un sol à faible accumulation de l'énergie [5].

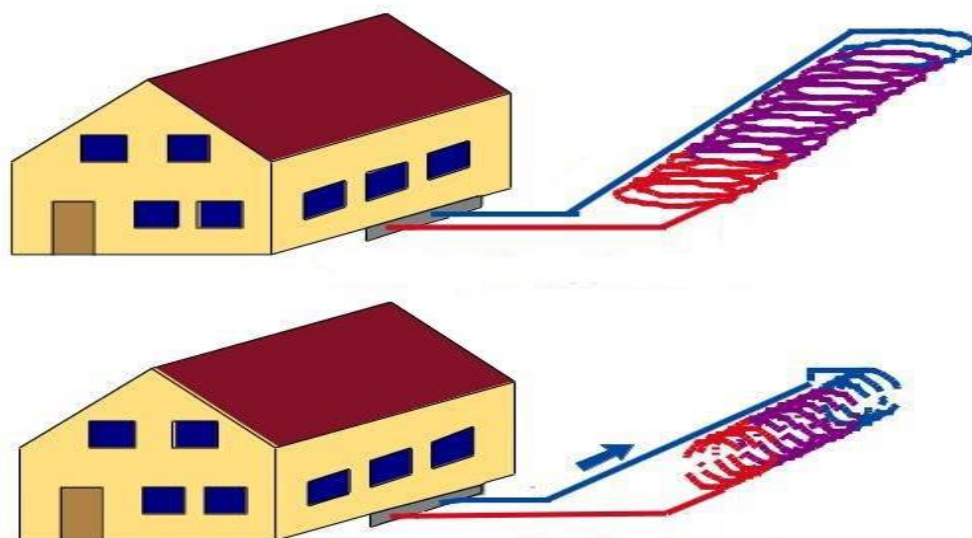


Figure : II.7.Les échangeurs air sol forme spirale

Les échangeurs air sol verticaux ou les sondes géothermiques (fig. 8) sont largement utilisés lorsqu'il est nécessaire d'installer une capacité d'échange de chaleur suffisante dans une petite superficie. Ce type des échangeurs est généralement plus cher à installer, par contre il est moins coûteux de côté tuyauterie que les échangeurs horizontaux [5].

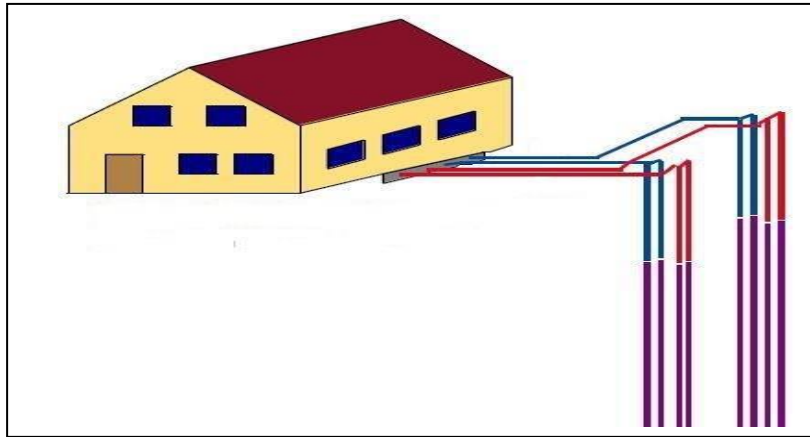


Figure : II.8 Les échangeurs air sol verticale

Remarque

- éviter les coudes à 90° (pertes de charges)
- préférer les joints à lèvres de type assainissement à la colle pour limiter les problèmes de rupture et éviter les émissions de produits nocifs dû à la colle.
- la structure du ou des conduits doit être lisse à l'intérieur (limitation des pertes de charges) et si possible munie d'aspérités sur la face externe pour un meilleur échange thermique avec le sol (exemple : les tuyaux annelés en Polyéthylène utilisés pour le passage de câbles souterrains électriques)
- choisir des matériaux peu émissifs, d'une résistance suffisante pour supporter l'enfouissement, étanche aux infiltrations d'eau souterraines et non propice à la prolifération des bactéries.

II.2.3.3.La ventilation

La ventilation est l'action qui consiste à créer un renouvellement de l'air, par déplacement dans un lieu fermé, elle peut s'effectuer avec trois différents mécanismes :

A. La ventilation mécanique contrôlée

On regroupe sous le terme VMC, « l'ensemble des dispositifs destinés à assurer le renouvellement de l'air à l'intérieur des bâtiments ». La VMC permet, en forçant l'extraction de l'air, d'assurer la maîtrise de l'humidité et le renouvellement de l'air à l'intérieur des constructions. Le principe de fonctionnement est simple : l'air vicié est évacué par des bouches situées dans les pièces humides (cuisine, salle de bains, W.C) alors que les entrées d'air frais se situent dans les pièces principales (chambre, séjour). L'air circule ensuite entre les pièces grâce à des passages d'air sous les portes. Cette circulation d'air est lente et silencieuse et la ventilation fonctionne en permanence. Il existe deux grands types de VMC:

- les VMC simple flux.
- les VMC double flux. [10]

1. Le ventilation mécanique contrôlée simple flux

Les VMC simple flux sont les systèmes les plus utilisés et les plus anciens. Un ventilateur placé généralement dans les combles permet, en extrayant l'air vicié, de mettre l'intérieur de l'habitation en légère dépression. Cette dépression force l'air extérieur à entrer dans le bâtiment.

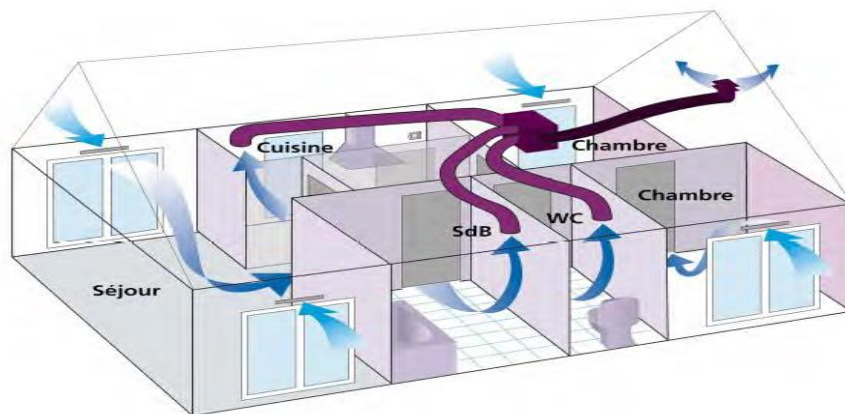


Figure II.9 : Schéma de fonctionnement d'une VMC simple flux [10]

Le débit de l'extraction de l'air ainsi que le débit de l'air neuf distribué sont assurés de façon automatique, quelles que soient les conditions atmosphériques et climatiques extérieures et quel que soit le nombre d'occupants de la pièce. Toutefois les VMC simple flux de type hydro

réglable sont équipés de capteurs d'humidité, permettant ainsi de réguler les débits d'air entrant et sortant en fonction de l'humidité de la pièce. L'inconvénient majeur de ce type de VMC est qu'elle utilise directement l'air extérieur quelle que soit sa température. La VMC va donc refroidir la maison en hiver et la réchauffer en été.

2. Le ventilation mécanique contrôlée double flux

Un second système plus récent permet de pallier cet inconvénient, il s'agit de la VMC double flux. Le principe est de préchauffer l'air neuf à l'aide de l'air vicié en le faisant transiter dans un échangeur. Une fois réchauffé l'air neuf est insufflé dans les pièces à vivre.

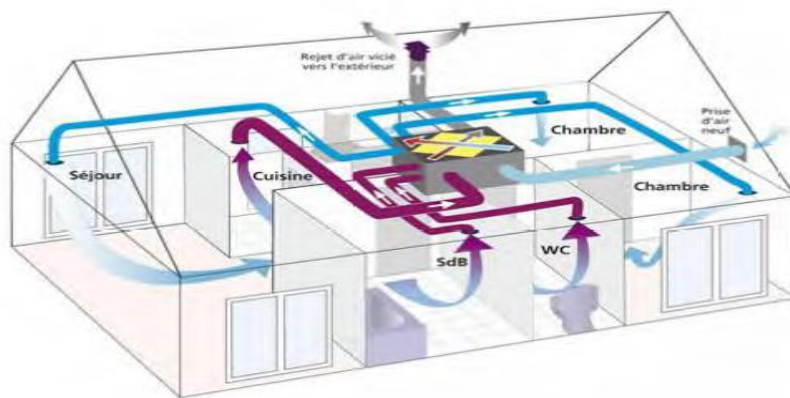


Figure II.10 : Schéma de fonctionnement d'une VMC double flux [10]

B. La ventilation naturelle

La ventilation naturelle est le flux passif intentionnelle de l'air extérieur dans un bâtiment par des ouvertures prévues (telles que les persiennes, les portes et les fenêtres).

La ventilation naturelle ne nécessite pas de systèmes mécaniques pour déplacer l'air extérieur, il repose entièrement sur des phénomènes physiques passifs, tels que la pression du vent, ou l'effet de cheminée.

C. Les systèmes mixtes de ventilation

Il utilise à la fois des procédés mécaniques et naturels. Les composants mécaniques et naturels peuvent être utilisés en conjonction avec l'autre ou séparément à différents moments de la journée ou de la saison de l'année.

D. les échangeurs

Les échangeurs de chaleur sont des systèmes servants à transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui

sépare les fluides.

La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou complexe de refroidir ou chauffer directement, par exemple l'eau d'un circuit primaire de refroidissement, d'une centrale nucléaire.

Ils peuvent être de trois types : échangeur à plaques à courant croisés, échangeur à plaques à contre-courant, échangeur rotatif.

1. Echangeur à plaques et à courants croisés

L'échangeur de chaleur est constitué d'un grand nombre de plaques de faibles épaisseurs (0,1 et 2 mm) qui séparent les veines d'air. Les plaques peuvent être en verre, en aluminium, en acier inoxydable ou en PVC. Les plaques sont assemblées par collage ou soudage et placées dans un châssis rigide. La distance entre les plaques est comprise entre 2 et 10 mm. Le fluide circule en flux croisés, c'est à dire que l'air vicié s'écoule du coin supérieur gauche vers le coin inférieur droit, alors que l'air neuf passe du coin supérieur droit vers le coin inférieur gauche. L'air vicié et l'air neuf ne se mélangent pas car la circulation s'effectue un espace sur deux :

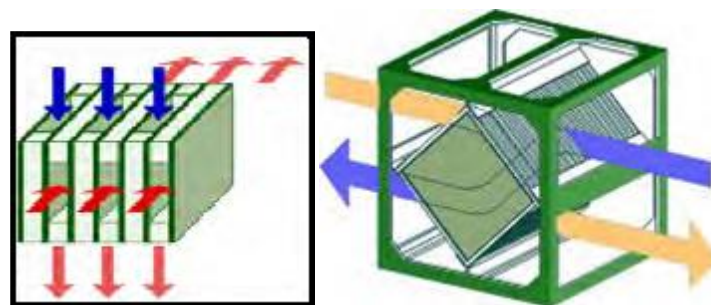


Figure II.11 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques [12]

2. Echangeur à plaques et à contrecourant

L'échangeur à contre-courant est construit sur le même modèle que l'échangeur à courants croisés sauf que cette fois les flux ne sont pas simplement croisés. Sur une partie du trajet les flux se retrouvent à contre-courant, ce qui permet d'augmenter le rendement d'échange.



Figure II.12 : Comparaison échangeur à courant croisé (à gauche) et à contre-courant (à droite) [13]

3. Echangeur rotatif

Un matériau accumulateur cylindrique en rotation (5 à 20 tours/min) est traversé dans une direction par l'air rejeté et dans l'autre par l'air neuf. La roue est constituée d'aluminium, d'acier inoxydable ou d'un matériau synthétique formant de très nombreux petits canaux.

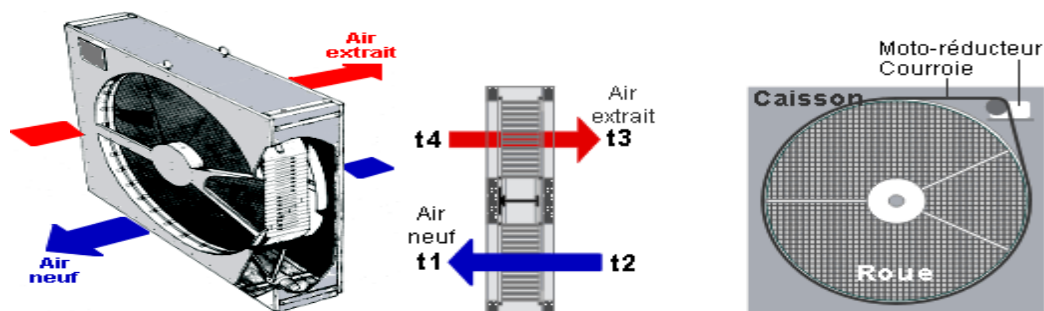


Figure II.13 : Principe de fonctionnement d'un échangeur rotatif [12]

Le matériau accumulateur est alternativement traversé par l'air chaud rejeté où il se charge d'énergie, et l'air neuf froid où il se décharge. L'échange s'effectue donc à contre-courant. Afin d'éviter le mélange d'air neuf et d'air vicié un secteur de nettoyage permet de chasser l'air rejeté et de le remplacer par l'air neuf, toutefois une légère contamination est inévitable. Les pertes de charge sont assez faibles mais l'entraînement de la roue nécessite l'apport d'énergie électrique.

II.2.3.4.Évacuation des condensats

En été, Lorsque l'air se refroidit, de l'eau peut se condenser. Des bactéries pathogènes pourront se développer dans ces conditions, polluant l'air, il convient d'évacuer ces condensats. Mais il est rare d'en observer, car l'air se recharge très vite en humidité. Donc un ou plusieurs siphons sont indispensable et sont placés aux points les plus bas de la pente de la canalisation afin d'évacuer ces condensats.

Le passage de l'air va avoir tendance à assécher le siphon. Un système simple consiste à placer un tuyau dans un récipient rempli d'eau. Une contenance suffisante en fonction du débit va éviter que le siphon ne se dessèche. L'excédent peut être évacué dans un écoulement des

eaux usées. On place un deuxième siphon dans ce cas pour éviter d'aspirer des mauvaises odeurs. [9]

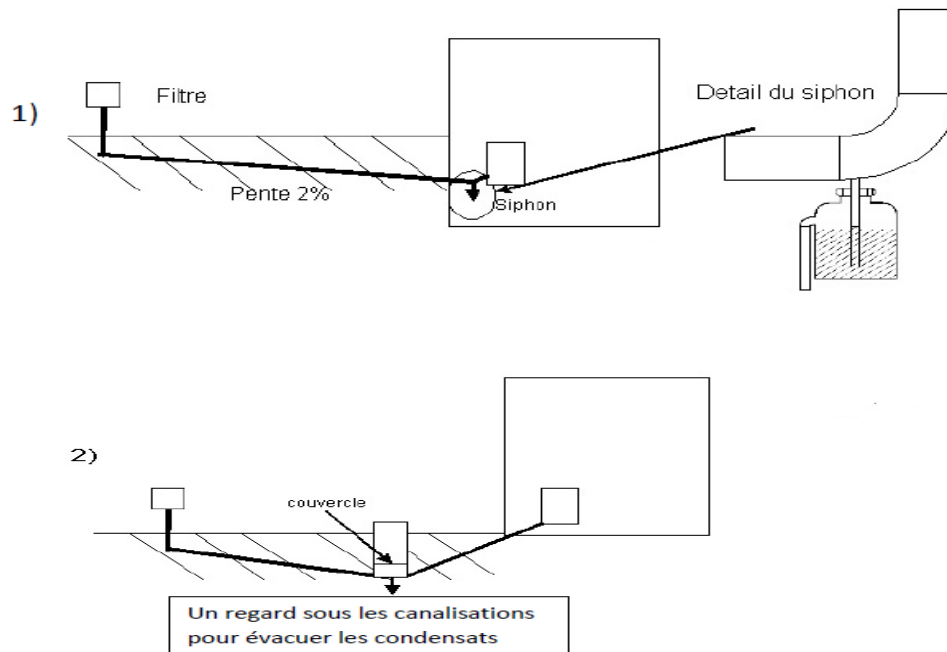


Figure II.14 : Quelques possibilités des évacuations des condensats [9]

II.3. Avantages et inconvénients du puits canadien

Le tableau suivant représente l'ensemble des avantages et inconvénients du puits canadien (Tableau II.1).

Avantages	Inconvénients
Apport d'air neuf filtré	Efficacité des grilles anti- rongeurs imparfaite
Apport gratuit de chaleur et de rafraîchissement sans fluide frigorigène	Difficultés pour nettoyer correctement le ou les conduits
Coût d'utilisation réduit	Nettoyage régulier des filtres nécessaire
Possibilité de raccorder le puits à un caisson de VMC double flux	Risque sanitaire, si la pente n'est pas suffisante pour évacuer les condensats.

Tableau II.1. Avantages et inconvénients du puits canadien.

Remarque

- vérifier et nettoyer, si besoin est, le filtre tous les mois.
 - vérifier l'écoulement des condensats avant chaque été.
 - chaque année, en intersaison, faites une vérification générale de l'installation.
- avant la mise en route, nettoyer le ou les conduits par l'injection d'eau (attention, si vous utilisez un produit contenant de l'eau de javel vérifier la compatibilité avec le réseau d'assainissement), ce qui permettra le contrôle de l'écoulement futur des condensats et leur bonne évacuation.
- le ventilateur peut-être situé à l'entrée ou en sortie du puits.
 - utiliser un filtre anti-poussières de 2 à 5 microns.
 - pour une meilleure efficacité du puits canadien en été (climatisation naturelle), limiter les apports solaires sur les murs exposés à l'Ouest et au Sud (le soleil arrive au pied des murs en été). En hiver, l'objectif est de profiter des apports solaires (exemple : véranda intégrée dans le mur exposé sud).
 - si votre maison est équipée d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC), celle-ci implique l'aspiration d'air neuf venant de l'extérieur (ouvertures artificielles pratiquées dans les fenêtres) et le rejet de l'air vicié à l'extérieur. Pour limiter les pertes d'énergie en hiver et éviter la surchauffe de l'air intérieur en été, il est fortement conseillé d'installer un caisson double flux. L'évacuation de l'air vicié et chaud à 19°C en hiver permettra ainsi de réchauffer l'air entrant par le puits provençal, pour obtenir une température de l'air de renouvellement avoisinant les 10/11°C.

II.4.Modélisation mathématique du puits canadien

Afin de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre on doit utiliser les équations de la thermodynamique.

Aussi la thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

II.4.1.Conservation de mouvement

On considère l'écoulement permanent d'un fluide Newtonien, incompressible à

viscosité constante dans un tube de section circulaire, on supposera que le régime dynamique est établi ou permanent.

A. Equation de mouvement [20]

Les équations de Navier-stokes s'écrivent pour un écoulement tridimensionnel :

$$u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} + w \frac{du}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \nabla^2 u \dots\dots\dots (2.1)$$

$$u \frac{dv}{dx} + v \frac{dv}{dy} + w \frac{dv}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \nu \nabla^2 v \dots\dots\dots (2.2)$$

$$u \frac{dw}{dx} + v \frac{dw}{dy} + w \frac{dw}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \nu \nabla^2 w \dots\dots\dots (2.3)$$

En respectant les hypothèses précédentes alors :

$$\frac{dp}{dy} = 0, \quad \frac{dp}{dz} = 0 \frac{dy}{dx}, \quad P(x) = p$$

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{dU}{dx} + \frac{dV}{dY} + \frac{dW}{dZ} = 0 \dots\dots\dots (2.4)$$

Avec :

$$\frac{dv}{dy} \rightarrow 0, \quad \frac{dw}{dz} \rightarrow 0, \quad \frac{du}{dx} = 0$$

L'équation (2.1) s'écrit :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \cdot \nabla^2 u \dots\dots\dots (2.5)$$

En coordonnées cylindrique :

$$\mu \nabla^2 u = \frac{dp}{dx}$$

Avec : $u = f(x)$

Le vecteur de vitesse a pour composantes :

$$\vec{v} \begin{pmatrix} u(r) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{\rho} \nabla \left[\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dr}{dr} \right] = \frac{\mu}{\rho} \nabla + \frac{1}{r} \frac{dr}{dr} + \left[r \frac{du}{dr} \right] \dots \dots \dots (2.6)$$

Cette égalité n'est possible que si les deux nombres sont égaux à une constante désignée par $(-\alpha)$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{\rho} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \left[r \frac{du}{dr} \right] = -\alpha \dots \dots \dots (2.7)$$

Les conditions aux limites

A) cas d'un flux constant à la paroi

Pour résoudre l'équation différentielle en T, on doit poser les conditions aux limites adéquates :

Le fluide entre dans la conduit à l'instant $t \geq 0$ avec une température

$$T_1(x = 0, T = T_1)$$

La condition de symétrie se traduit par :

$$\frac{dT}{dr} = 0, \text{ pour } r = 0$$

A la surface de contact (fluide /sol), on impose une densité de flux

$$q_0 = \lambda_{\text{fluide}} \frac{dT}{dr} \quad \text{pour } r = R$$

Faisons le changement de variables suivant :

$$T^* = \frac{T-T_i}{q_0 \left(\frac{R}{\lambda}\right)}, \quad r^* = \frac{r}{R}, \quad x^* = \frac{r}{R}, \quad X^* = \frac{x}{R} \frac{y}{R_e \cdot P_r}$$

Avec :

$$P_r = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_f}, \quad R_e = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu}, \quad y = \frac{c_p}{c_v}$$

Commençons par le premier terme :

$$\rho c_v u \frac{dT}{dx}$$

$$\text{Avec : } u = \frac{2U}{R^2} (R^2 - r^2)$$

$$\rho c_v u \frac{dT}{dx} = \rho c_v \frac{2U}{R^2} (R^2 - r^2) \frac{q_0 R}{\lambda_f} \cdot \frac{dT}{dx} = 2\rho c_v \frac{UR^2}{R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \frac{q_0 R}{\lambda_f} \cdot \frac{dT}{dx} \dots (2.8)$$

Après simplification on aura :

$$2\rho c_v U \left(1 - r^{*2}\right) \cdot R \frac{q_0}{\lambda_f} \cdot q_0 \frac{dT^*}{dx} = \frac{U \cdot 2 \cdot R \cdot \mu \cdot \rho c_v}{\mu \cdot \lambda_f} \cdot q_0 \frac{dT^*}{dx} \left(1 - r^{*2}\right) \dots (2.9)$$

Or:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \Rightarrow c_v = \frac{c_p}{\gamma}, \quad R_e \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_f} \cdot \frac{1}{\gamma} q_0 \frac{dT^*}{dx} \left(1 - r^{*2}\right) \dots (2.10)$$

On choisit :

$$X^* = \frac{x}{R} \cdot \frac{y}{R_e \cdot P_r}$$

On aura après simplification et arrangement :

Le terme de gauche s'écrit :

$$\frac{R_e \cdot p_r}{\gamma} \cdot q_0 \frac{dT^*}{dx} (1 - r^{*2})$$

Le terme de droit s'écrit :

$$\frac{\lambda_f}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{\lambda_f}{R \cdot r^*} \frac{d}{R \cdot dr^*} \left(R r^* \left(R \frac{q_0}{\lambda_f} \right) \frac{dT^*}{R \cdot dx} \right) \dots (2.11)$$

L'équation après développement s'écrit :

$$\frac{\lambda_f}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{\lambda_f \cdot R^2}{r^* \cdot R^2 \cdot \lambda_f \cdot R \cdot r^*} \frac{1}{r^*} \left(r^* \cdot \frac{dT^*}{dr^*} \right) = \frac{q_0}{R r^*} \frac{d}{dr^*} \left(r^* \cdot \frac{dT^*}{dr^*} \right) \dots (2.12)$$

On aura :

$$(1 - r^{*2}) \cdot \frac{R_e \cdot P_r}{\gamma} \cdot q_0 \frac{dT^*}{dx} = \frac{q_0}{R r^*} \left(r^* \cdot \frac{dT^*}{dr^*} \right) \dots (2.13)$$

Après simplification on aura l'équation (2.12) sous la forme :

$$R \cdot \left(\frac{R_e \cdot P_r}{\gamma} \right) \cdot (1 - r^{*2}) \frac{dT^*}{dx} = \frac{1}{r^*} \frac{d}{dr^*} \left(r^* \cdot \frac{dT^*}{dr^*} \right) \dots (2.14)$$

Nécessairement :

$$x^* = \frac{x}{R} \cdot \frac{\gamma}{R_e \cdot P_r} \Rightarrow x = x^* \cdot R \frac{R_e \cdot P_r}{\gamma}$$

C'est-à-dire :

$$\frac{x}{R} \cdot \frac{\gamma}{R_e \cdot P_r} = x^*$$

On aura finalement :

$$(1 - r^{*2}) \cdot \frac{dT^*}{dx^*} = \frac{1}{r^*} \frac{d}{dr^*} \left(r^* \cdot \frac{dT^*}{dr^*} \right) \dots \dots \dots (2.15)$$

Les conditions aux limites associées au problème (2.14) sont :

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

Cas d'une variation de la température à la paroi :

Après le développement cette équation $(\rho c_v u \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda_f}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right))$ on aura :

$$\rho c_v u \frac{dT}{dx} = \lambda_f \left(\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right) \dots \dots \dots (2.16)$$

Avec :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\lambda_f}{\rho_f c_f u} \left(\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right) \dots \dots \dots (2.17)$$

On peut simplifier l'équation (2.16) comme suit :

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

L'équation sera :

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

II.4.2. Formulations Mathématiques

Nous admettons ici les hypothèses suivantes

- Le sol garde une température constante pendant les échanges thermiques, c'est à dire que l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangées de l'air. A partir d'une certaine profondeur δ les températures restent constantes dans le sol.
- Le coefficient d'échange convectif est constant le long de l'échangeur air/sol.
- L'échange thermique se fait en régime stationnaire et la conduction longitudinale est négligeable.

Divisons l'échangeur en trois tronçons, l'un horizontal et deux verticaux (fig.II.15).

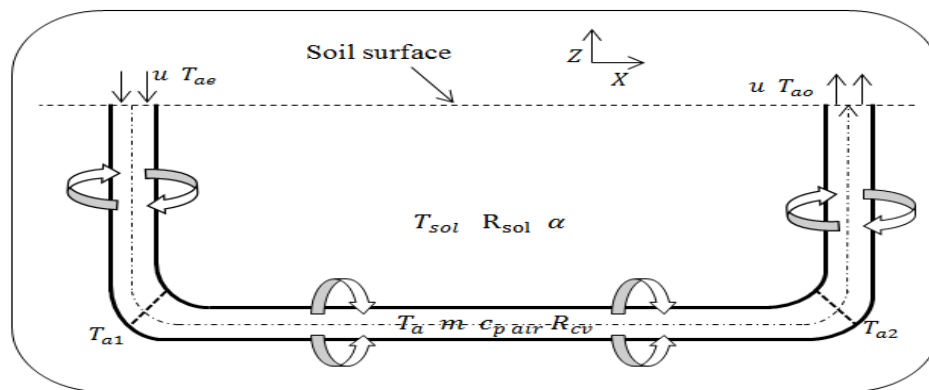


Figure II.15 : Schéma descriptif de l'échangeur air/sol [20]

II.4.2.1 Modélisation de la température de l'air

On considère l'écoulement permanent d'un fluide Newtonien, incompressible dans un tube de section circulaire on suppose que le régime dynamique établi

A. Tronçon vertical 1.

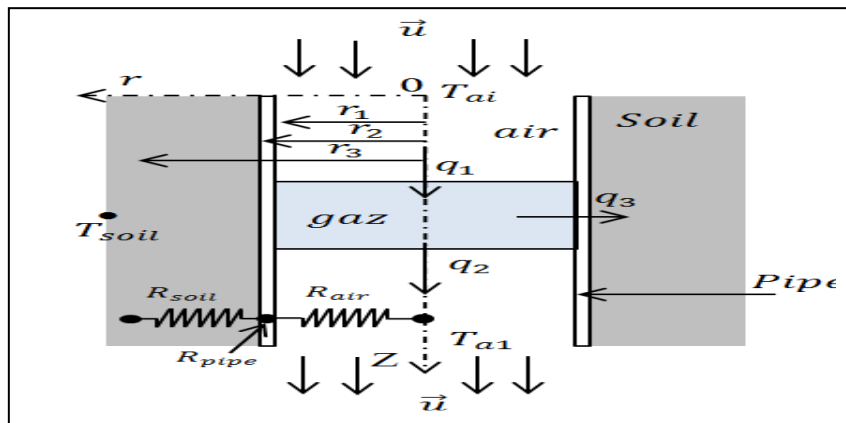


Figure II.16 Schéma descriptif de l'échangeur vertical d'entrée 1.

1. Température du sol autour de l'échangeur

La température du sol est régie par l'équation de la chaleur :

$$\frac{\partial^2 T_{sol}}{\partial Z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_{sol}}{\partial t} \dots\dots\dots (2.18)$$

Nous nous intéressons d'abord au régime stationnaire, donc le profil de température s'écrit :

$$T_{sol}(z) = a \cdot z + b$$

$$T_{sol}(z = 0) = T_p$$

$$T_{sol}(z = \delta) = T_i$$

δ Etant la profondeur d'enfouissement de l'échangeur, T_i la température initiale du sol et T_p étant la température à la paroi du sol, où on assure la continuité du flux de chaleur entre le sol et l'air ambiant pour la déterminer.

$$T_p = \frac{\lambda}{\lambda - \delta \cdot h} T_i - \frac{\delta \cdot h}{\lambda - \delta \cdot h} T_{ae} \dots\dots\dots (2.19)$$

Alors, la température du sol autour de l'échangeur vertical 1 s'écrit :

$$T_{sol}(z) = \frac{T_i - T_p}{\delta} \cdot z + T_p \dots\dots\dots (2.20)$$

2. Température de l'air le long de l'échangeur

Le bilan d'énergie entre deux sections du tube distante de Δz Fig. (II.12) s'écrit :

$$m \cdot c_{p_{air}} \cdot \frac{DT_a}{Dt} = q_1 - q_2 - q_3 \dots\dots\dots (2.21)$$

$$-\lambda_{\text{air}} \cdot S \cdot \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = -\lambda_{\text{air}} \cdot S \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} \Big|_Z + \lambda_{\text{air}} \cdot S \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} \Big|_{Z+\Delta Z} + \frac{(T_{\text{sol}}-T_a)}{R_{\text{totale}}} \dots (2.22)$$

Où

U : la vitesse de circulation de l'air à l'intérieur du tube ;

S : la section interne du tube, $S = \pi r_1^2$

La résistance thermique totale (R_{totale}) est composée d'une part, de la résistance à la conduction du sol (R_{sol}) et celle du tube (R_{tube}), et d'autre part de la résistance convective de l'air (R_{cv}).

$$\rho \cdot S \cdot c_{p_{\text{air}}} \cdot \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = \lambda \cdot S \cdot \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} + \frac{(T_{\text{sol}}-T_a)}{R_{\text{itotale}}} \dots (2.23)$$

Soit :

R_{itotale} : est la résistance thermique totale par unité de longueur et r_3 est le rayon de la couche adiabatique du sol, $r_3 = 2r_1$.

Tenant compte du fait que le transfert est permanent et la convection domine la conduction, l'équation (2.23) se réduit à :

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{p_{\text{air}}} \cdot u \frac{dT_a}{dZ} = \frac{(T_{\text{sol}}-T_a)}{R_{\text{itotale}}} \dots (2.24)$$

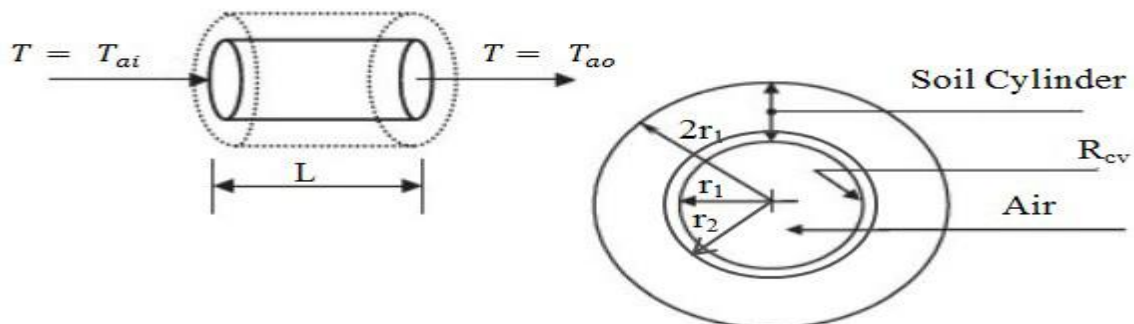


Figure II.17: Schéma représentatif d'un échangeur air/sol en coupe transversale.

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{p_{air}} \cdot u \cdot R_{itotale} \frac{dT_a}{dz} + T_a = \frac{T_i - T_p}{\delta} \cdot z + T_p \dots\dots\dots (2.25)$$

$T_a(z=0) = T_{ae}$ qui est la température ambiante.

La solution générale est la somme des deux solutions homogène T_{ah} et particulière T_{ap} .

$$T_a(z) = \left(T_{ae} - T_p + \beta \cdot \frac{T_i - T_p}{\delta} \right) \exp\left(-\frac{1}{\beta} z\right) + \frac{T_i - T_p}{\delta} \cdot z - \beta \cdot \frac{T_i - T_p}{\delta} + T_p \dots\dots\dots (2.26)$$

Avec $\beta = \rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{p_{air}} \cdot u \cdot R_{itotale}$

B. Tronçon Horizontal 2

L'échangeur horizontal est placé à une profondeur δ suffisamment profond pour que la température du sol T_{sol} ne varie pas et reste constante égale à T_i .

Le raisonnement fait sur le tronçon vertical 1 reste valable mais ici la température du sol T_{sol} est constante (**Figure II.18**). De l'équation (2.26) on a :

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{p_{air}} \cdot u \frac{dT_a}{dx} = \frac{(T_{sol} - T_a)}{R_{itotale}} \dots\dots\dots (2.27)$$

$T_a(x=0) = T_{a_1}$ qui est la température à la sortie du tronçon vertical 1

La solution qui fournit la température d'un point quelconque de l'air dans l'échangeur horizontal 2, s'écrit :

$$T_a(x) = T_{sol} + (T_{a_1} - T_i) \cdot \exp\left[-\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{p_{air}} \cdot u \cdot R_{itotale}} x\right] \dots\dots\dots (2.28)$$

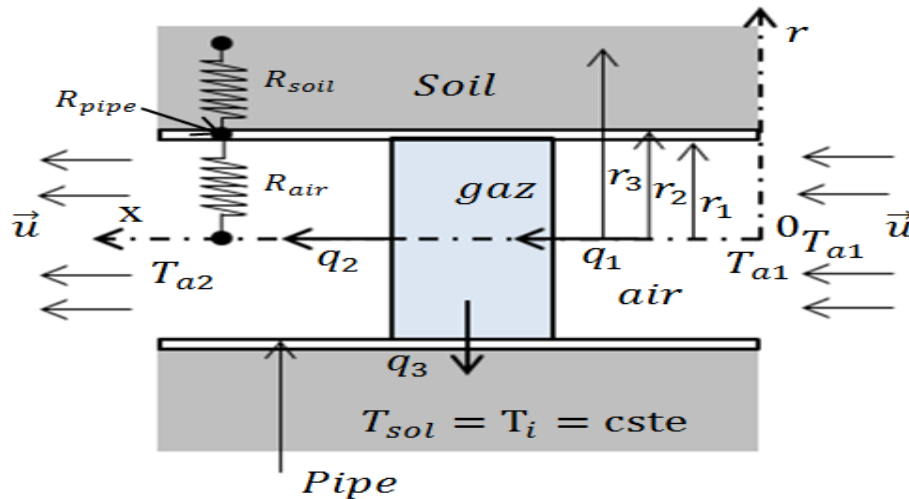


Figure II.18 : Schéma descriptif de l'échangeur horizontal 2.

C. Tronçon Vertical 3

1. Température du sol autour de l'échangeur

Le profil de température du sol dans le nouveau repère s'écrit :

$$T_{sol}(z) = a_1 \cdot z + b_1$$

$$T_{sol}(z = 0) = T_i$$

$$T_{sol}(z) = \frac{T_p - T_i}{\delta} \cdot z + T_i \dots \dots \dots (2.29)$$

Tel que T_p : représente la température à la surface du sol.

$$T_{sol}(Z) = \frac{T_p - T_i}{\delta} \cdot z + T_i \dots \dots \dots (2.30)$$

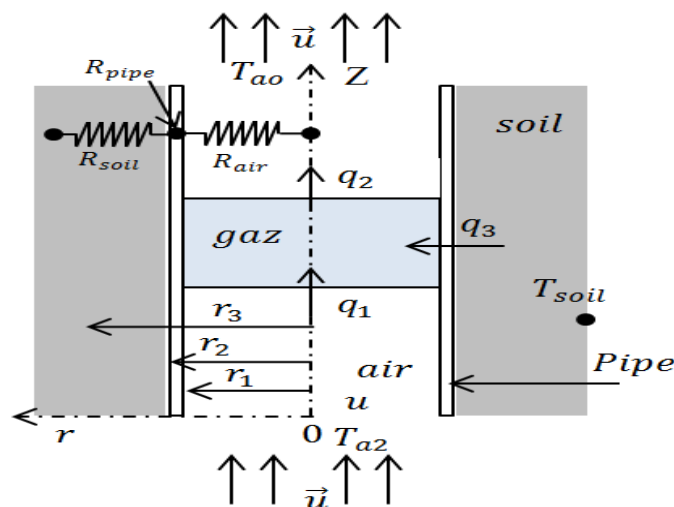


Figure II.19 : Schéma descriptif de l'échangeur vertical de sortie 3

2. Température de l'air le long de l'échangeur

Le bilan d'énergie pour ce type d'échangeur de sortie (**fig. II.19**) avec les hypothèses citées ci-dessus, s'écrit comme suit :

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{p_{\text{air}}} \cdot u \frac{dT_a}{dz} = \frac{T_{\text{sol}} - T_a}{R_{\text{itotale}}} \dots \dots \dots (2.31)$$

$$T_a(z = 0) = T_{a_2}$$

La solution de l'équation (13) après sommation des solutions homogène *Tah* et particulière *Tap* s'écrit de la façon suivante :

$$T_a(z) = \left(T_{a_2} - T_i - \beta \frac{T_p - T_i}{\delta} \right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\beta} z\right) + \frac{T_p - T_i}{\delta} \cdot z + T_i - \beta \frac{T_p - T_i}{\delta} \dots \dots \dots (2.32)$$

II.4.2.2. Quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur

On note : quantité de chaleur échangée de l'air dans le tube vers le sol.

$$q = \frac{(T_{\text{sol}} - T_{a(l)})}{R_{\text{totale}}} \dots \dots \dots (2.33)$$

Donc la quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur prendra la forme suivante :

$$q/l = (T_{\text{sol}} - T_{a(l)}) / \left(\frac{1}{\lambda_{\text{sol}} \cdot 2\pi} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{\lambda_{\text{gaine}} \cdot 2\pi} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) + \frac{1}{h_{\text{cv}} \cdot 2\pi \cdot r} \right) \dots \dots \dots (2.34)$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué le puits canadien, qui est un système géothermique (échangeur air/sol) qui utilise l'énergie présente dans le sol à proximité de sa surface pour chauffer ou refroidir l'air neuf de ventilation.

A partir d'une certaine profondeur les températures restent constantes dans le sol. Et cela met un conditionnement favorable pour la transaction refroidissement et échauffement.

Chapitre III

Dimensionnement et simulation

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré aux étapes de réalisation et dimensionnement d'un échangeur de chaleur air/sol dit « puits canadien ». Ce choix, est pris selon les avantages de point de vue économique, environnemental et du confort. En va finir avec une simulation numérique et discussion des résultats.

III.2. Dimensionnement du puits canadien

III.2.1. L'étude de site

Dans notre étude, on a choisi l'atelier 05 dans le hall technologie situe ou niveau de l'université de Bejaia.

III.2.2. Nature du sol

La nature de sol au niveau de hall technologie est l'argile [21].

III.2.3. Localisation géographique

Notre site de dimensionnement d'un puits canadien se situe au niveau de l'université de Bejaïa précisément à Targua Ouzemour,



Figure III.1 : Vue de ciel de l'ensemble du local [22].

Le local dimensionné est une structure métallique de deux étages, le rez-de-chaussée est constitué de deux bureaux, des ateliers, un sanitaire et une grande surface libre appelé salle des machines. L'atelier est entre deux ateliers un à droite et un à gauche. (Figure III.2)

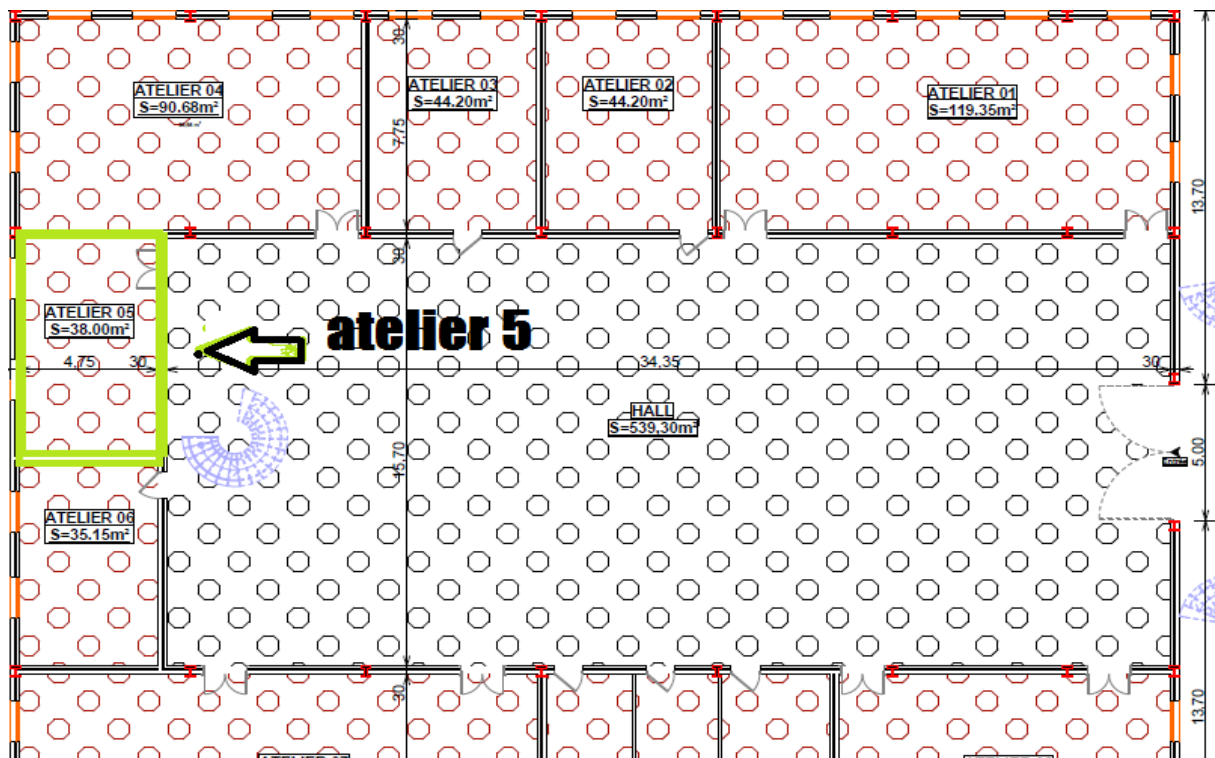


Figure III.2: Plan de RDC de local [22].

Et par un terrain d'une superficie étant égale à 352 m^2 et juste en face le hall technologie comme on le voit clairement sur la Figure (III.3).



Figure III.3: vue de terrain en face de l'atelier [22].

III.2.4. Place disponible pour l'enfouissement du conduit

L'emplacement choisie pour notre projet d'étude est le terrain en face du local .C'est un espace vert d'une superficie égale à 352 m^2 qui est largement suffisant pour l'enfouissement.

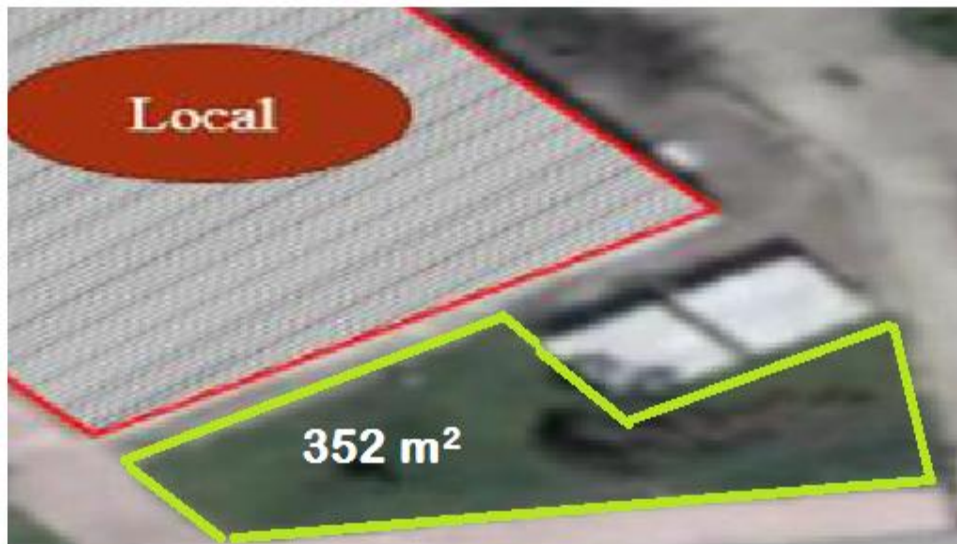


Figure III.4 : Vue de la surface d'enfouissement [22].

III.2.5. Mise en œuvre de l'installation

Notre installation sera répartie selon les éléments suivants :

1. Entrée d'air neuf ;
2. Conduit ;
3. Système d'évacuation des condensats ;

Tout d'abord on commence par des calculés du débit d'air total dans notre atelier :

Le débit total de l'air circulant dans le puits canadien doit assurer l'ensemble des besoins de renouvellement d'air des pièces à ventiler. Le régime de ventilation peut varier selon le mode de fonctionnement (réduit en préchauffage, plus élevé en rafraîchissement).

La détermination du débit d'air total maximal constitue l'un des premiers paramètres de dimensionnement d'un puits canadien.

Le débit d'air est donné par l'équation suivante :

$$q_v = \tau \times v \dots \dots \dots (III.1)$$

Pour calculer le débit il faut d'abord calculer le volume de l'atelier alors :

On a les dimensions de l'atelier :

- la longueur $L = 8.74m$
- la largeur $l = 4.75m$
- la hauteur $H = 3.64m$

Application numérique :

$$\begin{aligned} \text{Le volume de l'atelier : } V &= L \times l \times H \\ V &= 8.74 \times 4.75 \times 3.64 \\ V &= 151.12 \text{m}^3 \end{aligned}$$

Dans ce tableau on va choisir le Taux de brassage pour notre cas:

Type de ventilation	Taux de brassage
Aération standard	$\tau=0.5$ à 2 [L/h]
Chauffage	$\tau= 2$ à 5 [L/h]
Climatisation	$\tau=5$ à 10 [L/h]

Tableau III.1 : Taux de brassage dans tout type de ventilation

Le taux de brassage de l'air dans notre cas est de 0.5 à 2, en prend une valeur de $\tau = 2$ vue que c'est une Aération standard (sol/air)

Selon la relation (III.1) on a :

$$q_v = 2 \times 151.12$$

$$q_v = 302.23 \text{ m}^3/\text{h}$$

L'entrée et sortie d'air neuf

III.2.5.1. Hauteur et type d'entrée : on a choisi une entrée simple résidentielle d'une hauteur de 1.2m au niveau de sol (**figure III.5**).

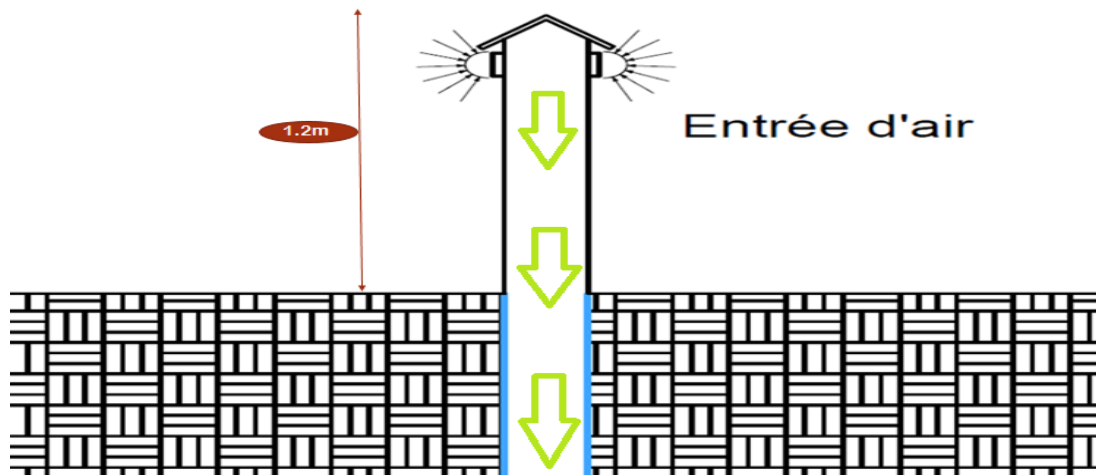


Figure III.5 entrée d'air

- ✓ **Sortie** : La sortie de conduit est positionnée approximativement à la porte d'entrée de l'atelier. (Figure III.).

III.2.5.2. Sortie d'air

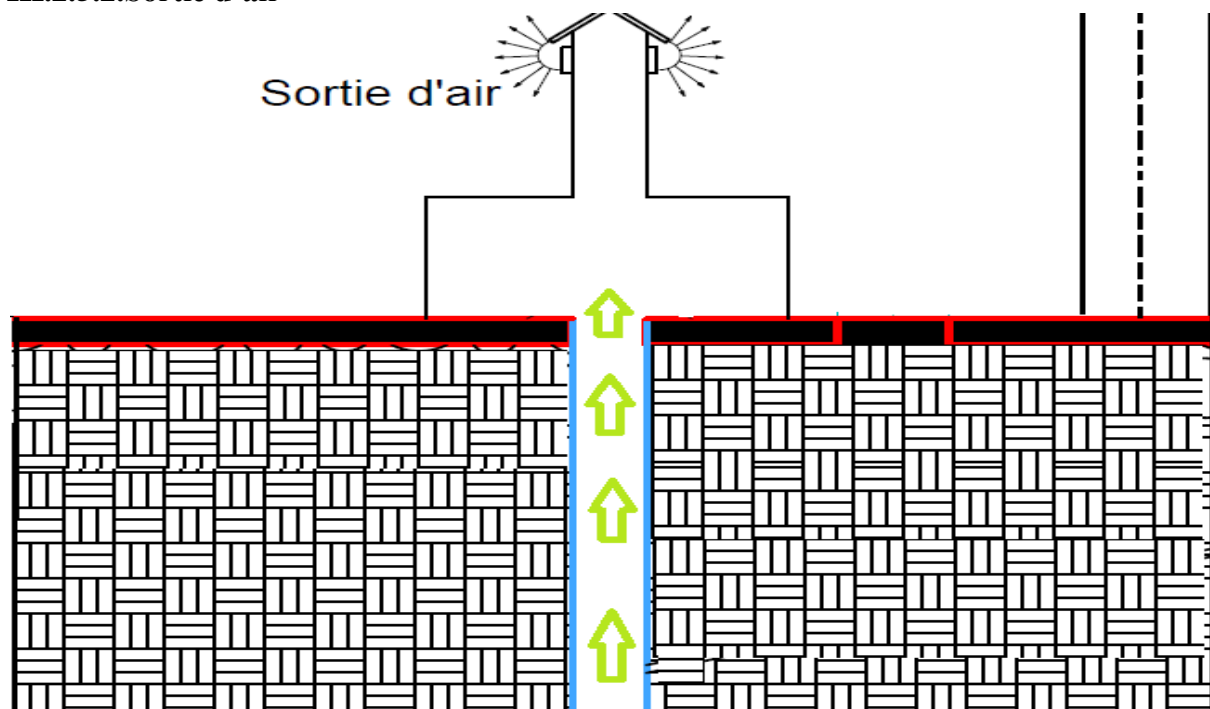


Figure III.6 : Sortie d'air

III.2.6 : Conduit et caractéristiques

- Longueur de tube.
- Diamètre de tube.
- Pente du conduit

Le tableau (III.2) montre les différentes conduites selon leurs longueurs et leurs diamètres en fonction de rendement de chaque conduite.

Débit par conduite [m ³ /h]	Diamètre 100 mm	Diamètre 150 mm	Diamètre 200 mm	Diamètre 250 mm	Diamètre 300 mm
100	10.6	11.7	13.3	/	/
200	11.3	12.7	14.3	15.9	17.2
300	/	13.1	15.1	17.2	19
400	/	13.7	15.9	17.7	20.4
500	/	14.1	16.4	19	21.6

Tableau III.2 : Débit en fonction du diamètre des conduites pour obtenir un échange thermique de 80%. [15]

Donc pour subvenir aux besoins d'air nécessaire pour un volume de 151.12m³, il faut un débit de 302m³/h

Selon le tableau (III.2) précédant on prendra un tube de 19m de longueur et 300mm de diamètre et on prend en considération la superficie de la place disponible pour l'enfouissement de la conduite.

a. Matériau constitutif de tube

Dans notre cas, on a choisi le PVC comme matériau constitutif de tube du conduit.

PVC : désigne une matière plastique particulière. Il renvoie à un polymère thermoplastique qu'on obtient par polymérisation du chlorure de vinyle.

Pour l'enfouissement du tube on a opté pour 3m de profondeur ou la température du sol est bien inférieure à celle de l'air extérieur entre l'été et l'hiver. Ceci est représenté sur (la figure III.7).

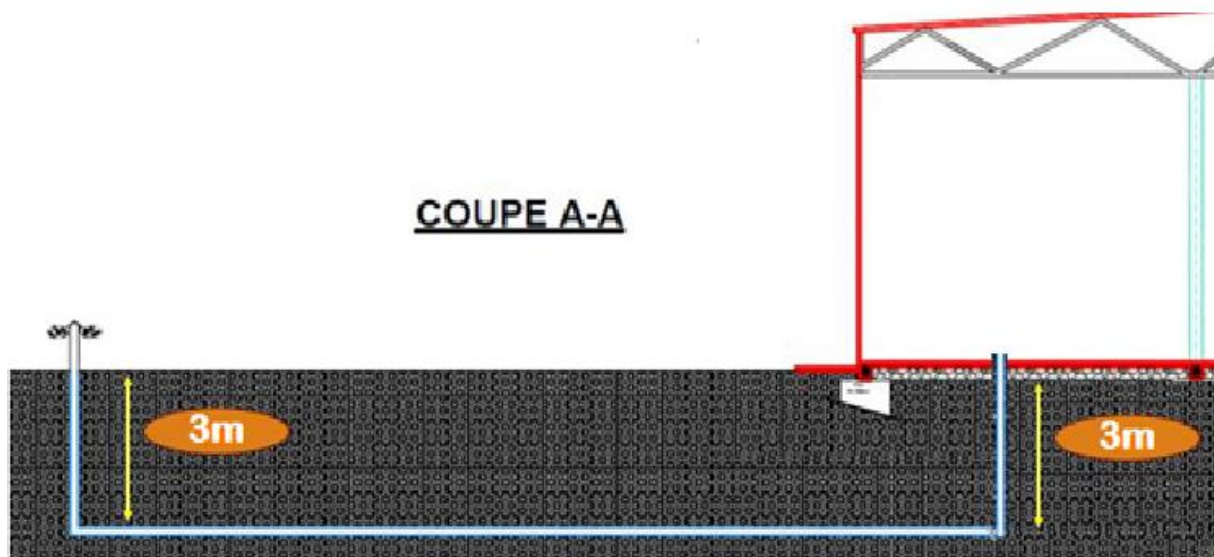


Figure III.7 : Profondeur d'enfouissement de tube

-b **Pente du conduit** : elle doit être comprise entre 1 et 3% pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud est en contact avec les parois plus froides du puits alors nous on a choisi la pente 2% pour éviter la cumulation des condensat

III.3. procédure numérique

III.3.1. Description du système

Il s'agit d'un conduit souterrain cylindrique de forme **U** à une section circulaire constante. Dans lequel s'écoule un fluide Newtonien et incompressible (l'air) en écoulement laminaire et l'échange thermique se fait en régime stationnaire.

Le conduit est d'épaisseur fine $e = 2$ mm et de diamètre intérieur $D_i = 300$ mm et de diamètre extérieur $D_e = 302$ mm soumis à une température de sol constante $T_s = 288$ K sur toute la longueur de conduit horizontale de 19m et une température variable au niveau des conduites verticales $Z_1 = 3$ m et $Z_2 = 3$ m. A l'entrée du conduit, l'air se présente avec une vitesse constante selon les nombres des Reynolds qu'on a ($Re = 500, 1000, 1500$ et 2000) et une température ambiante constante $T_a = 308$ K. Les propriétés thermo physiques du fluide, la conductivité thermique et la viscosité, sont supposées constantes. On considère aussi que le sol est homogène.

La géométrie du système est représentée dans la figure (III.8) :

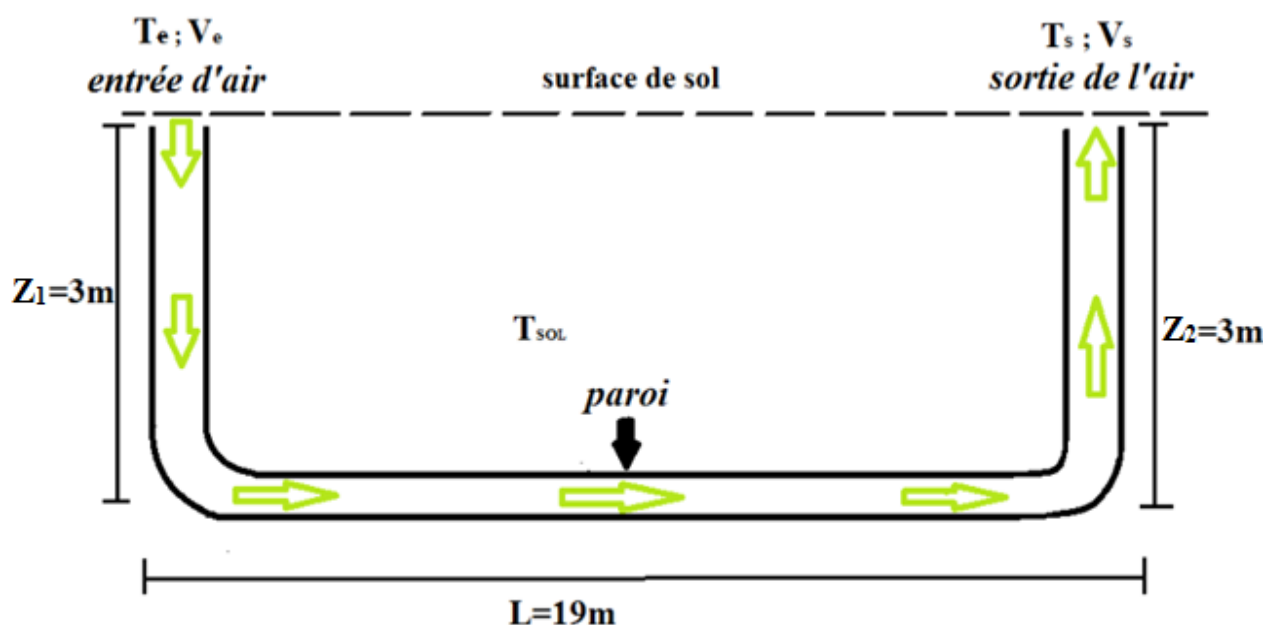


Figure III.8. Schéma descriptif de l'échangeur air/sol.

III.3.2. Les paramètres géométriques du local étudié

Les paramètres géométriques de l'atelier 5

	Logeur L (m)	Largeur l (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)
Dimension de l'atelier	8.74	4.75	3.64	151.12

Tableau (III.1) : les dimensions de l'atelier 5.

❖ Hypothèses

Hypothèses thermiques:

Dans cette étude, on a considéré que:

- Le fluide Newtonien et incompressible (l'air) ;
- L'échange thermique se fait en régime stationnaire ;
- Le sol est considéré homogène ;
- Les caractéristiques de l'air et du sol sont considérées constantes. ;
- La température extérieure du tube est constante ;
- La vitesse de l'air est considérée constante le long du conduit.

III.3.3. Construction de la géométrie

La construction de la géométrie est effectuée par le préprocesseur Gambit.

Les procédures sont les suivants :

A l'aide de la fonction géométrie on doit créer une conduite en forme U qui se compose de trois sections, deux verticales qui ont la même longueur 3m et le même diamètre 0,3m et l'autre horizontale sa longueur 19m et diamètre 0,3m.

III.3.4 La création du maillage :

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



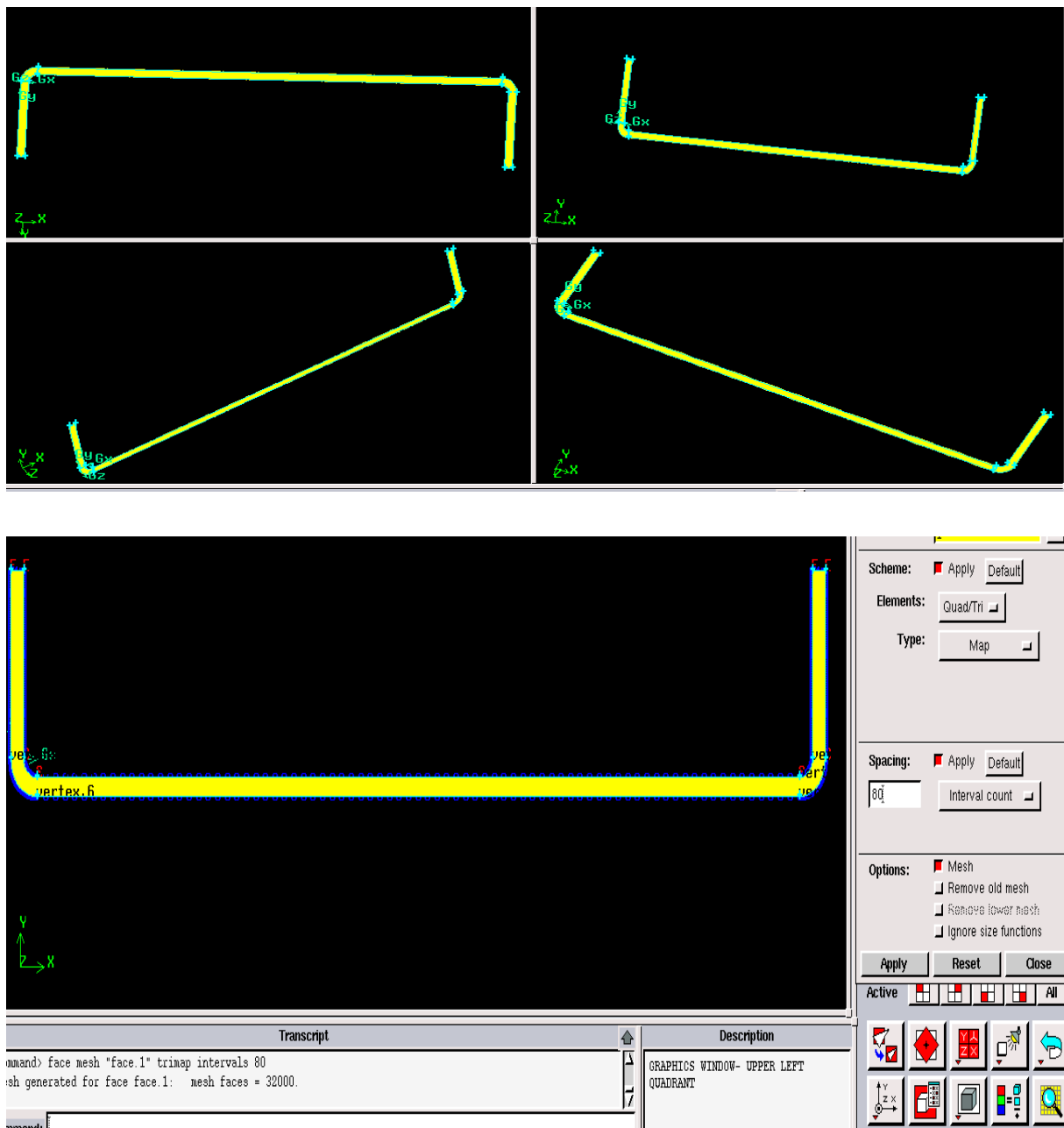


Figure III.9 : la création de maillage du tube

III.3.5. Les conditions aux limites

Pour préciser les conditions aux limites on doit utiliser la commande **SPECIFYING ZONE TYPES**. Cette commande permet de définir les caractéristiques physiques et opérationnelles du modèle à ses limites et dans des régions spécifiques de son domaine:

- Paroi → (Wall)
- Flux sortant → (Outflow)
- vitesse d'entrée → (Velocity inlet)

Région	Géométrie
Entrée	vitesse d'entrée (velocity inlet)
Sortie	flux sortant (outflow)
Paroi	paroi (wall)

Tableau (III.2): Les conditions aux limites dans GAMBIT

III.3.6. Simulation sous solveur Fluent

Le code Fluent est un programme de simulation numérique des écoulements de fluide compressible, incompressible, stationnaire ou in stationnaire impliquant divers phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, la turbulence, les écoulements dans les machines tournantes, et ce pour des géométries industrielles très complexe.[20]

Ce code permet aussi le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenus.

Pour commencer la simulation

- il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit ;
- vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de domaines négatifs ;
- IL faut fixer les valeurs des conditions aux limites ;
- Activer le traçage des résidus en cochant **plot** ;
- En ajoutant les valeurs des critères de convergence souhaitables.
- Pour démarrer le calcul en demandant nombre d'itérations puis cliquant sur **Iterate**.

Après avoir réglé les paramètres on a les résultats suivants :

La figure (III.10) représente l'interface des résiduels (la vitesse de l'air selon X et Y et la continuité, l'énergie).

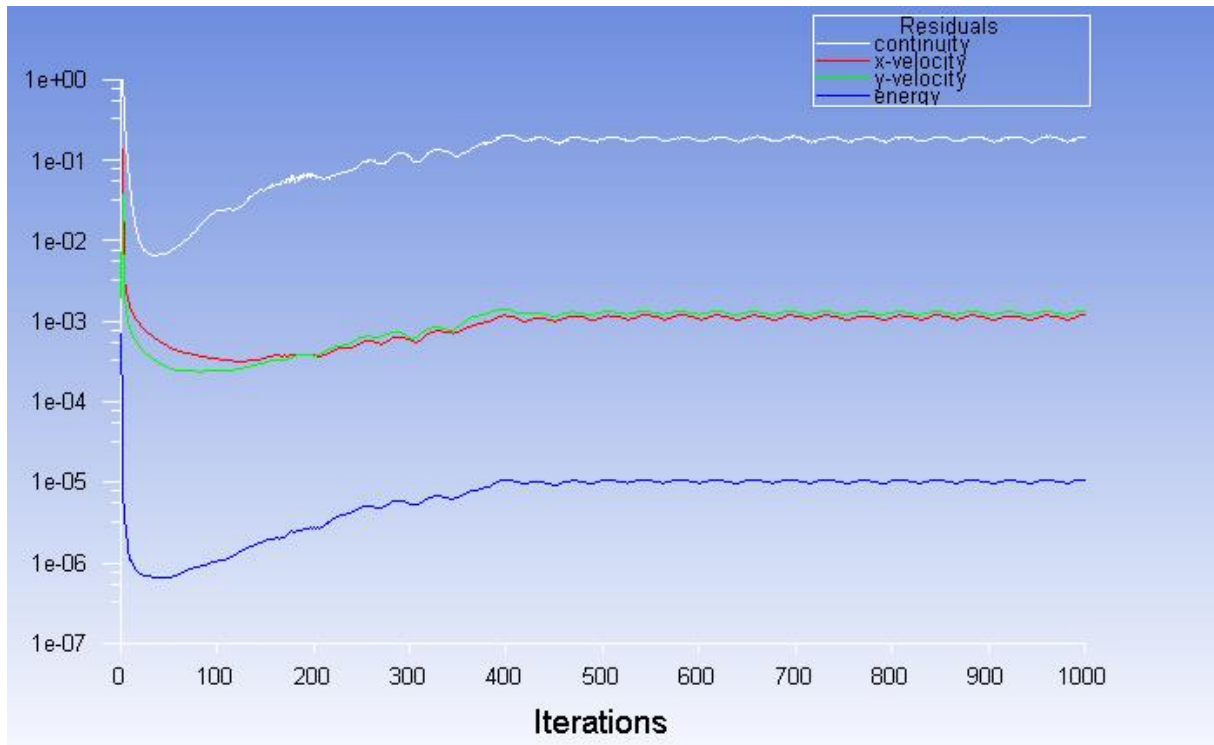


Figure (III.10): Interface des résiduels

III.4. Résultats et discussion

Pour cette expérimentation, nous avons mis en œuvre divers dispositifs afin d’aboutir aux résultats fiables, parmi ces dispositifs On a visualisé les résultats avec le logiciel (tec plot 360).

Pour notre cas on a obtiens des résultats suivant

➤ **Champs de température pour refroidissement**

La figure (III.11) représenté la variation de la température pour le cas de refroidissement.

Total Temperature Dataset: TEMP.[TOT].N 1 1 0



La figure (III.11) : la variation de la température a refroidissement

III.4.2. Champs de température pour le réchauffement

Total Temperature Dataset: TEMP.[TOT].N 1 1 0



La figure (III.12) : la variation de la température pour le réchauffement

III.4.3. Influence de nombre de Reynolds

Dans cette partie, nous avons analysé l'écoulement d'air dans la conduite, en gardant la même géométrie et en faisant varier le nombre de Reynolds en fonction de la vitesse d'air d'entrée. Les résultats de la vitesse d'air entrée en fonction du nombre de Reynolds sont donnés par le tableau III.3 pour chaque nombre de Reynolds, nous avons déterminé les champs des température et champs de vitesse pour les deux cas refroidissement (puits canadiens pour climatisation) et de l'échauffement (puits canadiens pour chauffage).

Nombre de Reynolds	500	1000	1500	2000
Vitesse d'air entré [m/s]	0.024	0.048	0.073	0.097

Tableau III.3 : Les paramètres de la simulation pour chaque cas.

Voici quelques résultats obtenues sous le phénomène de refroidissement et perte de chaleur du fluide (air) en faveur du sol, avec les différents nombres de Reynolds.

III.4.3.1. Refroidissement

On a considéré que la température d'entrée est de 308K (35°C)

a. L'écoulement à nombre de Reynolds (Re =500)

➤ Champs de température

Total Temperature Dataset: TEMP.[TOT].N 1 1 0



Figure (III.13) : la variation de la température pour $Re = 500$

La figure (III.13) montre pour le nombre de Reynolds $Re = 500$, la variation de la température T_{air} de l'air dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie le long de l'échangeur. Le contour montre que la T_{air} de l'air diminue graduellement jusqu'à une longueur de 6 m, avec un écart de $8^\circ C$ est obtenu. Ensuite la T_{air} de l'air continue à diminuer brusquement jusqu'à la valeur de $19^\circ C$ pour une longueur de 19m. Et à partir de cette longueur aucune baisse de la T_{air} n'est remarquée. On remarque également une stabilisation de la T_{air} de l'air à partir de la longueur de 19 m jusqu'à la sortie est on obtient la valeur de la T_{air} de l'air de sortie 291K ou $18^\circ C$ a un écart de $17^\circ C$

➤ Champs de vitesse

La figure (III.14) représente la variation de la vitesse le long du puits

velocity-magnitude Dataset: UNKNOWN.[velocity-magnitude].N 1 1 0

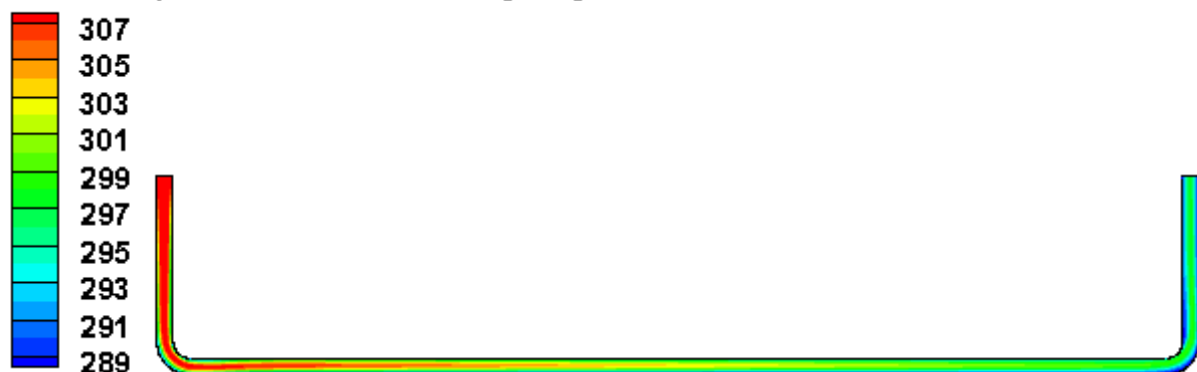


La figure (III.14) : le contour de variation de la vitesse pour le nombre de Reynolds $Re = 500$

Et pour la vitesse de l'air dans le tub de l'entrée jusqu'a la sortie le long de l'échangeur elle varie graduellement entre (0.024 a 0.013 m/s)

b-L'écoulement à $Re = 1000$ ➤ **Champs de température**

Total Temperature Dataset: TEMP.[TOT].N 1 1 0



La figure (III.15) : le contour de la variation de la température pour $Re = 1000$

La figure (III.15) montre pour le nombre de Reynolds $Re = 1000$, la variation de la température T_{air} de l'air dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie le long de l'échangeur, le contour montre que la T_{air} de l'air diminue graduellement jusqu'à une longueur de 7 m, a un écart de $9^\circ C$ est obtenu. Ensuite la T_{air} de l'air continue à diminuer brusquement jusqu'à la valeur de $21^\circ C$ pour une longueur de 19m et à partir de cette longueur aucune baisse de la T_{air} n'est remarquée et stable à partir de la longueur de 19m jusqu'à la sortie est obtenu la valeur de la T_{air} de l'air de sortie 296K ou $21^\circ C$ a un écart de $14^\circ C$.

➤ **Champs de vitesse**

La figure (III.16) représente la variation de la vitesse le long du puits

velocity-magnitude Dataset: UNKNOWN.[velocity-magnitude].N 1 1 0

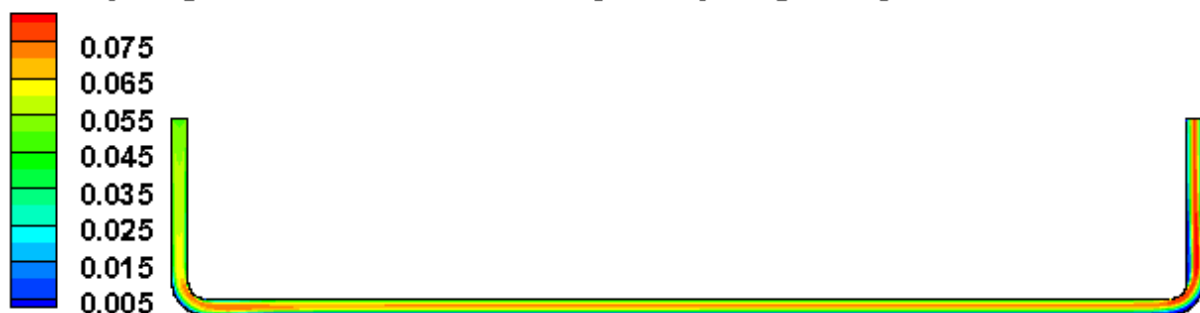


Figure (III.16): contour de variation de la vitesse pour le nombre de Reynolds $Re=1000$

Et pour la vitesse d'écoulement d'air dans le tub de l'entrée jusqu'a a la sortie le long du puits elle varie graduellement entre (0.048 a 0.035 m/s).

-c L'écoulement à $Re=1500$ **➤ Champs de température**

Total Temperature Dataset: TEMP.[TOT].N 1 1 0

**Figure (III.17)** : la variation de la température pour $Re = 1500$

La figure (III.17) montre pour le nombre de Reynolds $Re = 1500$, la variation de la température T_{air} de l'air dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie le long de l'échangeur. Le contour montre que la T_{air} de l'air diminue graduellement jusqu'à une longueur de 10 m, a un écart de $5^{\circ}C$ obtenu. Ensuite la T_{air} de l'air continue à diminuer brusquement jusqu'à la valeur de $25^{\circ}C$ pour toute la longueur et à partir de 19 m jusqu'à la sortie aucune baisse de la T_{air} n'est remarquée et stable à une valeur de sortie de 298K ou $25^{\circ}C$ et un écart de $10^{\circ}C$.

➤ Champs de vitesse

La figure (III.18) représente la variation de la vitesse le long du puits

velocity-magnitude Dataset: UNKNOWN.[velocity-magnitude].N 1 1 0

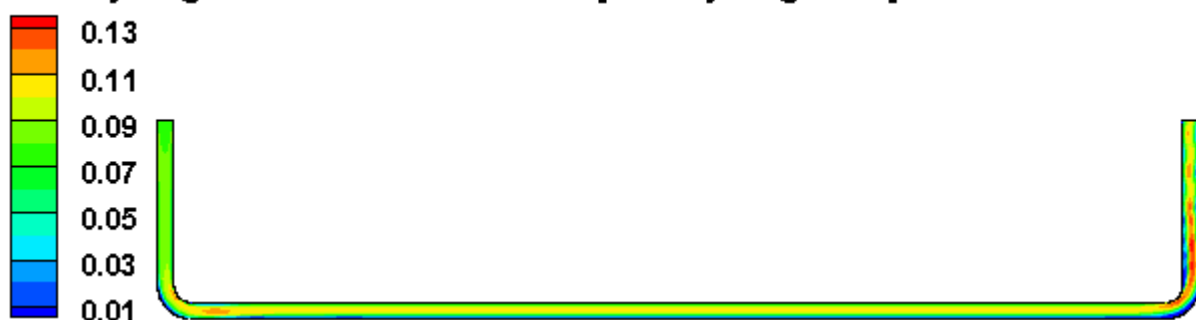


Figure (III.18) : le contour de variation de la vitesse pour le nombre de Reynolds $Re=1500$ Et pour la vitesse d'écoulement d'air dans le tub de l'entrée jusqu'a la sortie en fonction de la longueur du puits elle variera graduellement entre (0.073 a 0.09 m/s).

d-L'écoulement à $Re=2000$ ➤ **Champs de température**

La figure (III.19) représente la variation de la température le long du puits

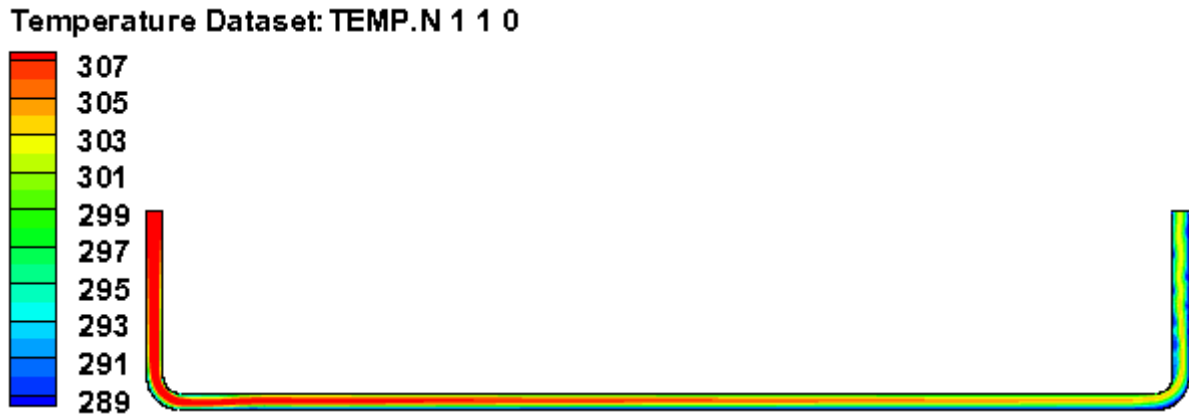


Figure (III.19) : la variation de la température pour $Re = 2000$

La figure (III.19) montre pour le nombre de Reynolds $Re = 2000$ la variation de la température T_{air} de l'air dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur d'échangeur. Le contour montre que la T_{air} de l'air diminue brusquement jusqu'à une longueur de 18m, à un écart de $7^{\circ}C$ obtenu. Ensuite à partir de cette longueur aucune baisse de la T_{air} n'est remarquée. La valeur de température à la sortie est 301K ou $28^{\circ}C$ et un écart de $7^{\circ}C$.

➤ **Champs de vitesse**

La figure (III.20) représente la variation de la vitesse le long du puits



Figure (III.20) : contour de variation de la vitesse pour le nombre de Reynolds $Re=2000$

Et pour la vitesse d'écoulement d'air dans le tub de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur du puits elle variera graduellement entre (0.073 à 0.09 m/s).

III.4.3.2. Chauffage

On considère la température à l'entrée est de 283k (10°C).

a- L'écoulement à $Re=500$

➤ Champs de température

La figure (III.21) représente la variation de la température le long du puits

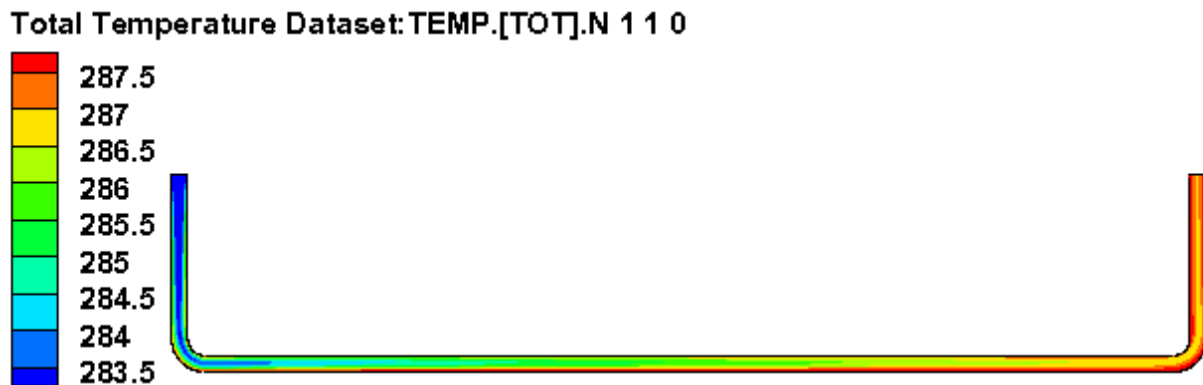
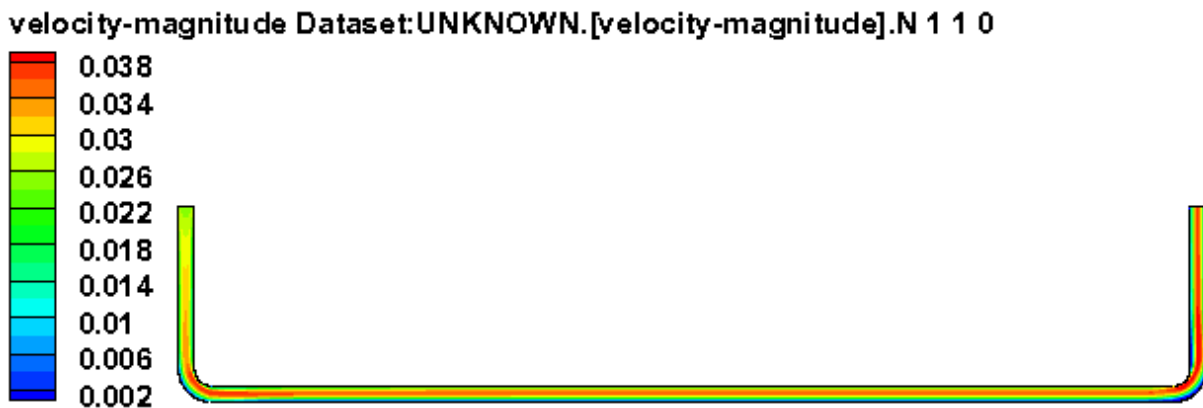


Figure (III.21) : contour de variation de la température pour le nombre de Reynolds $Re= 500$

➤ Champs de vitesse

La figure (III.22) représente la variation de la vitesse le long du puits



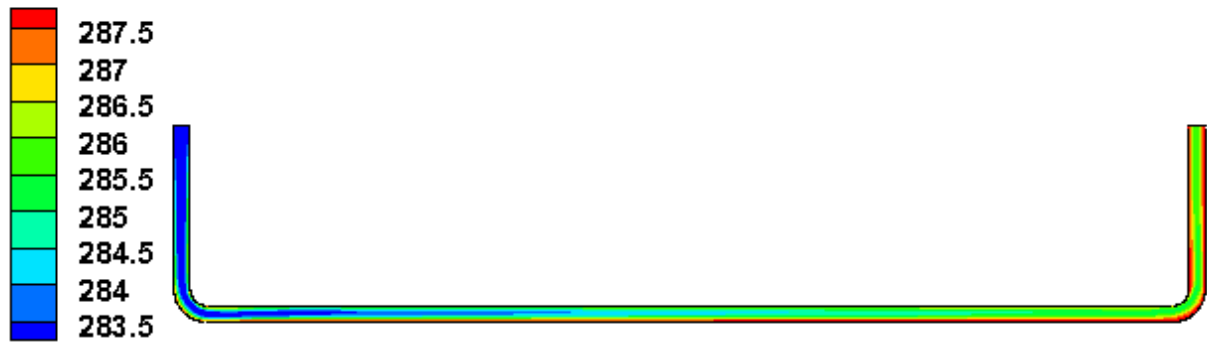
Figure(III.22) : Contour de la température et la vitesse pour $Re=500$

b-L'écoulement à $Re=1000$

➤ Champs de température

La figure (III.22) représente la variation de la vitesse le long du puits

Total Temperature Dataset: TEMP.[TOT].N 1 1 0



➤ Champs de vitesse

La figure (III.18) représente la variation de la vitesse le long du puits

velocity-magnitude Dataset: UNKNOWN.[velocity-magnitude].N 1 1 0



Figure(III.22) : Contour de la température et la vitesse pour Re=1000

c-L'écoulement à Re=1500

➤ Champs de température

Total Temperature Dataset: TEMP.[TOT].N 1 1 0



➤ Champs de vitesse

velocity-magnitude Dataset:UNKNOWN.[velocity-magnitude].N 1 1 0



Figure(III.23) : Contour de la température et la vitesse pour Re=1500

d-L'écoulement à Re=2000

➤ Champs de température

Total Temperature Dataset:TEMP.[TOT].N 1 1 0



➤ Champs de vitesse

La figure (III.25) représente la variation de la vitesse le long du puits

velocity-magnitude Dataset:UNKNOWN.[velocity-magnitude].N 1 1 0



Figure(III.25) : Contour de la vitesse pour Re=2000.

Nous avons conclu qu'à partir de la discussion des résultats, Un écart de 6°C pour le meilleur nombre de Reynolds qui est le $Re = 500$, alors il n'ya pas une augmentation de la température et cela revient aux conditions climatiques de la ville de Bejaia ou les températures ne baissent pas a un niveau qui favorise l'opération de chauffage avec le puits canadien.

Dans les figures précédentes en globalité on a constaté que la variation de la température T_{air} de l'air dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur du puits n'est pas satisfaisante pour l'installation merveilleuse du puits.

III.5. Conclusion

D'après la conception de ce chapitre, la configuration étudiée est simulée numériquement par le code fluent à résolution directe des équations de Navier –Stokes.

Les résultats obtenus pour des différents nombres de Reynolds sont très significatifs et donnés beaucoup d'informations sur le comportement dynamique et thermique de l'échangeur.

Les calculs ont montré que la variation des paramètres influe sur l'écoulement et principalement la température de l'air de sortie. Cette dernière diminue quand le nombre de Reynolds diminué.

Dans notre étude le meilleur résultat obtenu est utilisant $Re=500$ pour lequel on a trouvé une valeur de la température de sortie de l'air $T= 292K$ ou $17^{\circ}C$; Alors l'échangeur fait réduire la température du fluide de sortie environ $17^{\circ}C$ pour le refroidissement,

Mais pour le chauffage alors il n'ya pas une augmentation de la température considérable et cela revient aux conditions climatiques de la ville de Bejaia ou les températures ne baissent pas a un niveau qui favorise l'opération de chauffage par puits canadiens.

Conclusion générale

Ce travail constitue une contribution à l'étude de l'exploitation d'un échangeur géothermique air/ sol pour le réchauffement ou le refroidissement d'un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l'habitat.

Dans ce travail nous avons présenté :

La description et la technique d'installation d'un puits canadiens dans l'atelier 5 situé au HALL de technologie, ainsi que les principaux paramètres de dimensionnement. Allons des généralités et arrivons à l'exploration terrain puis interpréter les résultats et voir l'impossibilité d'installation pour l'échauffement et la possibilité pour le refroidissement comme un résultat final ; d'après les résultats qu'on obtenu grâce aux nombres de Reynolds et beaucoup plus à $Re=500$ qui nous a permis d'enregistrer un écart de 17 °C comme le plus grand écart observé dans le sol de l'atelier 5 du HALL Technologie du campus targua-Ouzemour dans la localité de Bejaia ville .

Avant d'entamer la simulation numérique, une validation des résultats numériques développés avec ceux conçus théoriquement (généralité sur le puits) ainsi qu'avec d'autres résultats issus de notre présente expérience réalisée sur le site local.

A cet effet nous avons l'immense honneur de vous présenter quelques recommandations inspiré de cette expérimentation qui est première en son genre par rapport à l'université Abderrahmane mira de Bejaia :

Cette étude est réalisé grâce à des logiciels (Gambit ,fluent 15.0 et tec plot 360).

Perspective

Finalement, on suggère ici des perspectives à explorer par les futurs travaux de recherche dans ce domaine :

Connexion du puits canadien au système de ventilation mécanique double flux ou simple flux centralisée ou non. Mais Actuellement, de plus en plus les puits en cours d'installation en Europe sont connectés à des caissons de ventilation double-flux centralisée.

Dans tous les cas, le ventilateur d'extraction utilisé doit être dimensionné afin d'éviter tout les risques de mettre l'habitation en surpression.

Ou bien Coupler l'échangeur air sol avec d'autres systèmes de ventilation telle que la cheminée solaire et la tour du vent pour aspirer l'air de l'ambiance.