



Université Mohamed Khider de Biskra
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE MÉCANIQUE

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Ayoub MANSOUL

Le : lundi 14 septembre 2020

Rafrâichissement de l'air d'un local par la géothermie échangeur enterré air /sol, de forme zig zag.

Jury :

Dr. NINE Brahim	MCA	Université de Biskra	Président
Dr. ALIOUALI Abdelouahad	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. BEN ARFAOUI Arfaoui	MCB	Université de Biskra	Examineur



Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier ALAH Grâce à lui, nous avons fait ce travail humble.

Nous tenons à exprimer mes remerciements et ma gratitude au professeur superviseur Ali Oli Abdel Wahed pour tous les conseils, instructions et notes qu'il nous a fournis afin de mener à bien ce travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont eu l'honneur de lire cet humble ouvrage.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements et mes remerciements à tous les travailleurs du département de mécanique, y compris les professeurs et administrateurs, et à tous les amis et collègues, en particulier.



Dédicace

*Je dédie d'abord ce
modeste travail à mes
chers parents, à mes
frères et sœurs et à
tous mes amis et
collègues.*

Liste des figures

Figure 1.1	Schéma de puits canadien.	3
Figure 1.2	Représentation de l'échangeur géothermique à air.	4
Figure 1.3	Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juin.	4
Figure 1.4	Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juillet.	5
Figure 1.5	Configuration étudiée.	5
Figure 1.6	Disposition de l'échangeur air/sol.	6
Figure 1.7	Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur.	7
Figure 1.8	Schéma simplifié d'un échangeur air/sol en forme « U ».	7
Figure 1.9	Géométrie simplifiée du puits provençal étudié.	8
Figure1.10	Schéma du système d'échangeur de chaleur air/sol.	9
Figure1.11	heure du jour en minutes * 102. (Juillet).	10
Figure1.12	heure du jour en minutes (aout).	10
Figure 2.1	Schéma de la boucle ouverte EAHE (tunnel souterrain d'air).	14
Figure 2.2	Schéma de la boucle fermée EAHE (tunnel souterrain d'air).	14
Figure 2.3	échangeur de chaleur air/sol horizontal.	15
Figure 2.4	échangeur de chaleur air/sol vertical.	15
Figure 2.5	échangeur de chaleur air/sol Serpentins.	16
Figure 2.6	Schéma de principe du puits canadien.	17
Figure 2.7	Conduite polypropylène.	19
Figure 2.8	Tuyaux le polyéthylène haute densité (pehd).	20
Figure 2.9	Conduits en Polychlorure de vinyle (PVC).	20
Figure 3.1	Lancement des différents logiciels.	26
Figure 3.2	Création d'un projet en mécanique de fluide	27
Figure 3.3	La géométrie échangeur air/sol forme zig zag.	28
Figure3.4	Maillage d'un de l'échangeur géothermique en 3D.	28
Figure3.5	Nomination des différentes partiesd'échangeur air/sol.	29

Figure 3.6	Etablir équation d'énergie.	29
Figure 3.7	Choix du modèle de K-epsilon (standard).	30
Figure 3.8	Définition les caractéristiques physiques des tubes.	30
Figure 3.9	Définition les caractéristiques physiques des fluides (air).	31
Figure3.10	Choix de la pression de référence.	31
Figure3.11	Choix de la température d'entré l'air.	32
Figure3.12	Choix de la température tube.	32
Figure 4.1	Changement de la température de l'air le long de l'échangeur air / sol en (pvc) pour différentes vitesses a)0.7 b) 1.5, c)5, d) 8.	34
Figure 4.2	Changement de la température de l'air le long de l'échangeur air / sol en (Al) pour différentes vitesses a)0.7 b) 1.5, c)5, d) 8.	35
Figure 4.3	Une courbe graphique montrant les changements de température le long de l'échangeur (Al, PVC) v=0.7.	36
Figure 4.4	Une courbe graphique montrant les changements de température le long de l'échangeur (Al, PVC) v=1.5.	37
Figure 4.5	Une courbe graphique montrant les changements de température le long de l'échangeur (Al, PVC) v=5.	37
Figure 4.6	Une courbe graphique montrant les changements de température le long de l'échangeur (Al, PVC) v=8.	38

Liste des tableaux

Table 4.1	Le changement de température sur la longueur de l'échangeur en pvc a)v=0.7.	34
Table 4.2	Le changement de température sur la longueur de l'échangeur en pvc a)v=1.5.	35
Table 4.3	Le changement de température sur la longueur de l'échangeur en pvc a)v=5.	35
Table 4.4	Le changement de température sur la longueur de l'échangeur en pvc a)v=8.	35
Table 4.5	Le changement de température sur la longueur de l'échangeur en Al a)v=0.7.	36
Table 4.6	Le changement de température sur la longueur de l'échangeur en Al a)v=1.5.	36
Table 4.7	Le changement de température sur la longueur de l'échangeur en Al a)v=5.	36
Table 4.8	Le changement de température sur la longueur de l'échangeur en Al a)v=8.	36

Nomenclature

Symboles	Définition	Unité
u	Vitesse suivant l'axe x.	m/s
v	Vitesse suivant l'axe y.	m/s
w	Vitesse suivant l'axe z.	m/s
T_{tub}	Température du tube.	k
T_{air}	Température d'air.	k
$C_{p\ air}$	Capacité de chaleur spécifique d'air.	j/kg.k
ρ	Masse volumique de l'air.	Kg/m ³
G_K	Représente la génération de l'énergie cinétique de turbulence due aux gradients moyens de vitesse.	/
G_b	Représente la génération de l'énergie cinétique de turbulence due à la flottabilité.	/
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \delta_k$	sont des constantes empiriques.	/
S_k, S_ε	Sont les limites définies pour l'utilisateur de source.	/
g	Le composant du vecteur de la gravité dans la direction i. Pour le standard et réalisable ($\kappa - \varepsilon$).	/
Pr_t	nombre turbulent de Prandtl pour l'énergie.	/
β	Le coefficient de la dilatation thermique.	/
Y_M	Représente la contribution de la dilatation de fluctuation dans la turbulence compressible au taux global de dissipation.	/
μ_t	Viscosité turbulente.	Kg/m.s
K	Énergie cinétique turbulente.	m ² /s ²
ϑ	Viscosité cinématique.	m ² /s
z	Profondeur des conduites.	m

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction Générale.....1

Chapitre1 : Recherche bibliographique.....3

Chapitre 2 : Généralités et Modélisation mathématique

2.1. Introduction	11
2.1 Géothermie.....	11
2. 1.1 Historique.....	11
2.1.2 Définition	11
2.1.3 Principe du rafraîchissement par la géothermie	11
2.1.4 Classification des ressources géothermiques.....	12
2.1.4.1 La géothermie à haute énergie.....	12
2.1.4.2 La géothermie à basse énergie.....	12
2.1.4.3 La géothermie très basse énergie	12
2.1.5 Avantages de l'énergie géothermique.....	12
2.1.6 Inconvénients de l'énergie géothermique.....	13
2.2 Les échangeurs de chaleur air/sol.....	13
2.2.1. Définition.....	13
2.2.2. Les systèmes d'échangeurs de chaleur enterrés.....	13
2.2.2.1. Systèmes ouverts	14
2.2.2.2. Systèmes fermés.....	14
2.2.3 Les différents types d'échangeurs de chaleur air/sol.....	15

2.2.3.1	Echangeur de chaleur air/sol horizontal.....	15
2.2.3.2	Echangeur de chaleur air/sol vertical.....	15
2.2.3.3	Echangeur de chaleur air/sol Serpentins.....	16
2.3	L'échangeur thermique air/sol (puits canadien.....	16
2.3.1	Principe de fonctionnement	16
2.3.2	Caractéristiques des tubes (puits canadien).....	17
2.3.2.1	Nombre de tubes.....	17
2.3.2.2	Longueur de chaque tube.....	17
2.3.2.3	Diamètre des tubes.....	17
2.3.2.4	Profondeur d'enfouissement des tubes.....	17
2.3.2.5	Matériau constitutif des tubes.....	17
2.3.3	Les avantages du puits canadien.....	18
2.3.4	Les inconvénients du puits canadien.....	18
2.5	Choix des matériaux pour le conduit.....	18
2.3.5.1	Le polypropylène.....	19
2.3.5.2	Polyéthylène haute densité (PEHD).....	19
2.3.5.3	Polychlorure de vinyle (PVC).....	20
2.6	Description du système.....	20
2.6.1	Hypothèses simplificatrice	21
2.7	Modélisation thermique de la température du sol constante.....	21
2.8	Équations générales (Équations gouvernantes des problèmes étudiés).....	21
2.9	Modélisation de la turbulence.....	20
2.10	Modélisation des conditions aux limites.....	24
	Conclusion	24

Chapitre 3: Simulation numérique

3.1	Introduction.....	26
3.2	Présentation du logiciel de simulation (ANSYS Fluent).....	26
3.3	Procédures du calcul.....	26
3.4	Les différentes étapes du calcul.....	27
3.5	Les processus de la simulation	27
3.5.1	Création de la géométrie.....	27
3.5.2	Maillage.....	28
3.5.2.1	Génération de maillage.....	28

3.5.2.2 Nomination des surfaces.....	29
3.6 Paramétrage des données des calculs.....	29
3.6.1 Choix l'équation d'énergie.....	29
3.6.2 Choix du model de résolution.....	30
3.6.3 Choix les caractéristiques physiques des tubes.....	30
3.6.4 Choix les caractéristiques physiques.....	31
3.6.5 Operating conditions.....	31
3.6.6 Condition aux limites.....	32
3.7 Conclusion.....	33

Chapitre 4: résultats et discussions

4.1 Introduction.....	34
4.2 Résultats.....	34
4.2.1 Première cas (pvc)	34
4.2.2 Deuxième cas (aluminium)	35
4.3 Commente les résultats.....	38
4.4 Conclusion.....	38

Introduction générale

Le développement démographique va croître très vite et leurs besoins d'énergie seront très importants.

A l'horizon 2050, la terre sera peuplée de 8 à 10 milliards de personnes. Selon les statistiques de l'année 2006, un américain consomme 8 fois plus d'énergie qu'un européen et 16 fois plus qu'un africain.

Aujourd'hui, l'épuisement annoncé des ressources d'énergie d'origine fossile qui représentent actuellement 90 % de la consommation mondiale d'énergie qui affecte l'environnement (pollution+effet de serre)

Le secteur du bâtiment très énergivore représente une part très importante des consommations d'énergie (30 %) et des émissions de gaz à effet de serre. La réduction des Consommations d'énergie est urgente, non seulement pour des raisons écologiques, mais aussi pour des raisons économiques.

Nous devons alors construire des maintenant un avenir énergétique différent dans le secteur industriel et du bâtiment pour réduire radicalement la facture énergétique en base sur les deux principes paramètre:

- ✓ Construire en respectant l'architecture bioclimatique;
- ✓ L'implication des énergies renouvelable.

L'énergie renouvelables ou spécialement le rafraîchissement par la géothermie, est une technique utilisée traditionnellement dans notre région de SAHARA, Les gens construisent leurs maisons sous sol (les caves) pour rafraîchir les habitas en été, on veut développer cette technique traditionnelle avec une étude scientifique approfondie et par des méthodes nouvelles qui nous permettent de l'utiliser convenablement et dans les meilleures conditions dans une société moderne.

Cette technique nouvelle consiste à alimenter un habitat avec de l'air frais qui passe par un tube enterré à une certaine profondeur sous sol, qui quelles que soient les conditions climatiques extérieures, le rafraîchit par l'air froid ou le réchauffe par l'air chaud en utilisant l'inertie thermique du sol, l'air prend le rôle de fluide caloporteur et le tube comme un échangeur thermique tout en canalisant l'air jusqu'à l'habitat [3].

Nous nous intéresserons ici à la technique de rafraîchissement utilisant l'échangeur de chaleur air-sol (appelé puits canadien ou encore puits provençal), son principe est simple, on

fait passer l'air de renouvellement, avant qu'il n'entre dans la maison, dans un tube enterré. En hiver, l'air est ainsi préchauffé car le sol est plus chaud que l'air extérieur. En été, l'air est rafraîchi car c'est le phénomène inverse qui se produit.

Le dimensionnement d'un puits canadien est assez délicat du fait du nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre, profondeur d'enfouissement, débit de ventilation.

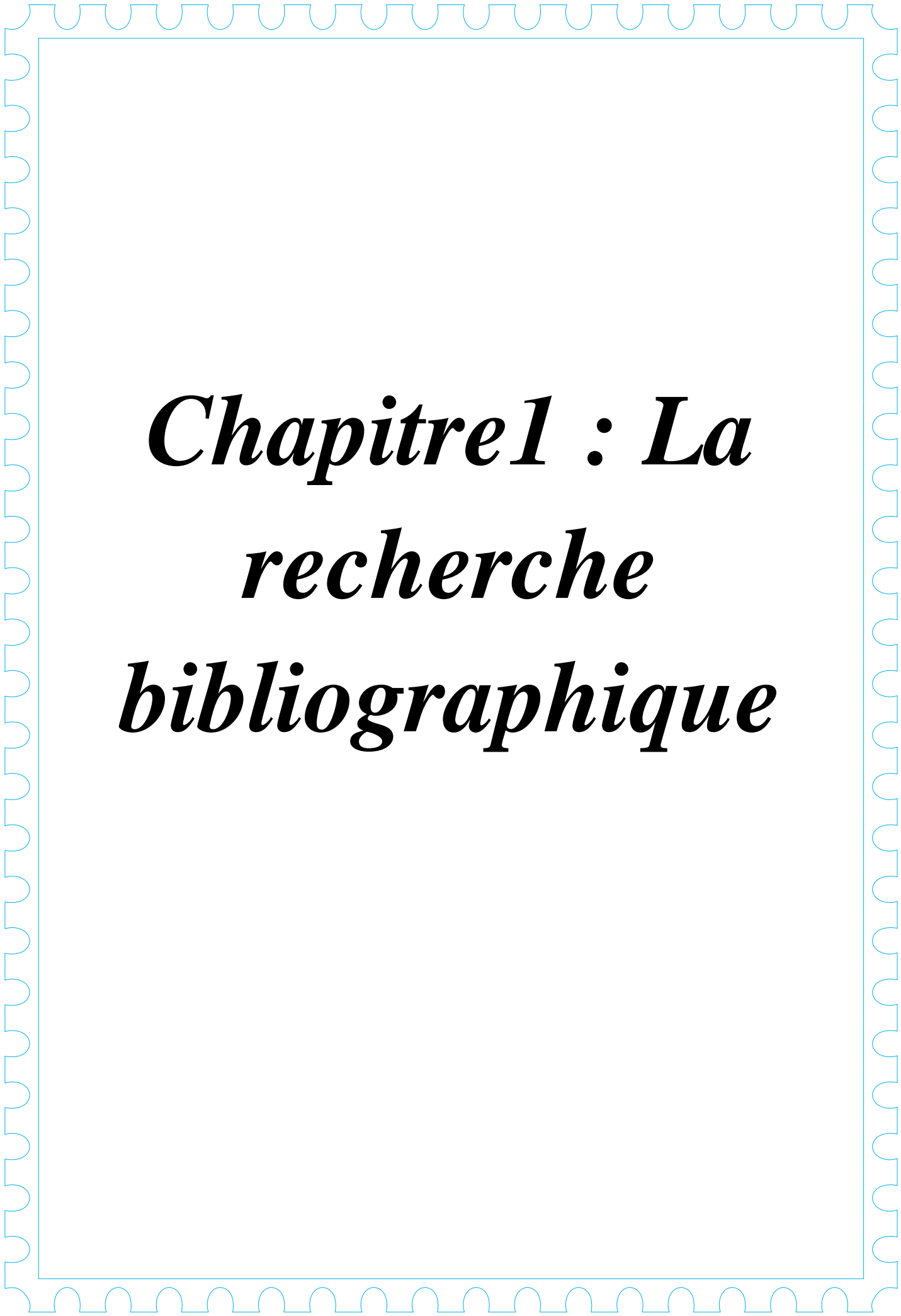
La notice de dimensionnement présentée ici a pour but de proposer des critères objectifs pour le choix de ces différentes caractéristiques. Notre travail se compose de quatre chapitre principaux.

Le premier chapitre nous présentons quelques travaux des chercheurs disponibles dans la littérature qui mènent les phénomènes des échanges thermique dans des échangeurs de type aie/sol. Dans ce qui suit nous exposons les travaux antérieurs de quelques chercheurs dans ce Domaine.

Le deuxième chapitre nous présenterons une vue d'ensemble de l'énergie géothermique, à travers une explication de certains des termes qui y sont liés. Dans le dernier, nous donnerons la formule mathématique et les équations qui régissent le phénomène de convection dans le système stable à l'intérieur du tube de l'échangeur de chaleur air / sol, afin d'étudier le comportement thermique de l'air.

Le troisième chapitre dédié à fournir une introduction au logiciel CFD et comment résoudre un problème à l'aide de simulations à l'aide du logiciel CFD et du logiciel de calcul ANSYS (_FLUNTE).

Enfin, conclusion générale dans laquelle sont résumés les principaux résultats obtenus en mettant l'accent sur les facteurs essentiels de ce processus d'amélioration des performances de ces technologies. Dans la partie jointe, il y a des tableaux liés à la partie expérimentale. Ces tableaux regroupent les différents paramètres de mesure.



***Chapitre 1 : La
recherche
bibliographique***

Chapitre 1: Recherches bibliographiques

1.1. Introduction :

Un échangeur géothermique air-sol est un système qui utilise l'énergie thermique du sol pour chauffer ou refroidir une partie de l'air de renouvellement d'un local. Il est parfois appelé puits canadien ou puits provençal. Le principe du système consiste à faire passer, avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf de renouvellement par des tuyaux enterrés dans le sol, à une profondeur de l'ordre de 1 à 3 mètres.

Nous présentons dans ce chapitre quelques travaux des chercheurs disponibles dans la littérature qui mènent les phénomènes des échanges thermique dans des échangeurs de type air/sol.

Dans ce qui suit nous exposons les travaux antérieurs de quelques chercheurs dans ce Domaine :

1.2. Travaux précédents :

H. Nebbar, Nouredine Moumni et al (2014), [1], ont établi une étude relative à un échangeur air /sol, deux modèles :

1. Un modèle thermique pour chercher la température du sol.
2. Un modèle pour trouver la température de l'air dans l'échangeur air /sol.

À travers ces deux modèles on affecte l'allure de l'échangeur pour voir l'influence de quelques paramètres principaux conceptuels (géométrie de l'échangeur) et environnementaux (Site, sol, rayonnement solaire) ainsi que ceux relatifs aux propriétés physiques du fluide caloporteur sur l'évolution de la température de l'air à la sortie l'échangeur

Présentation de la configuration étudiée :

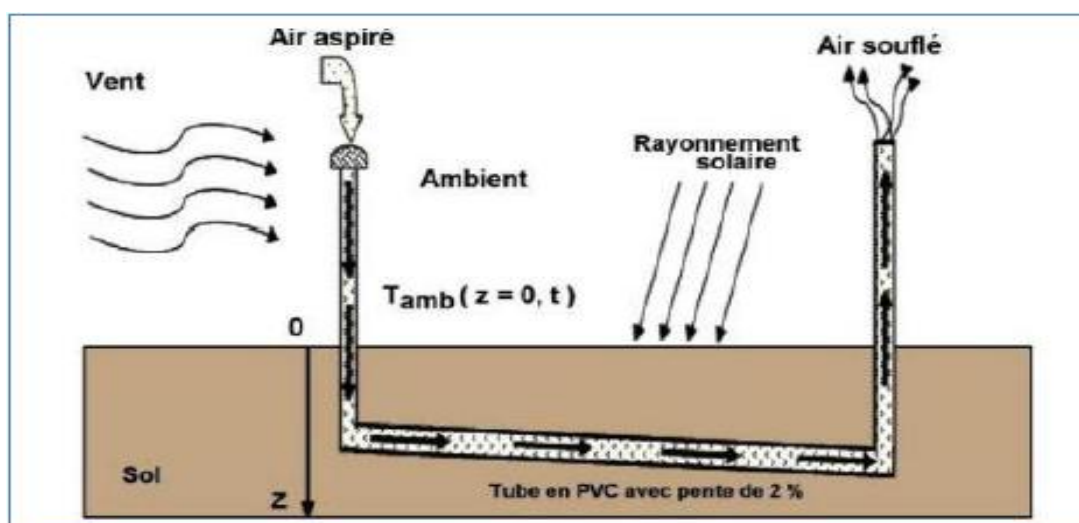


Figure 1.1: Schéma de puits canadien [1]

Chapitre 1: Recherches bibliographiques

M. Benhammou et al [2] en 2011, dans leur étude ont montrés que la climatisation électrique est très énergivore et l'offre ne peut plus satisfaire à la demande accrue surtout dans les saisons chaudes. L'utilisation des systèmes de rafraîchissement par géothermie constitue une bonne alternative notamment dans la région du sud de l'Algérie, où la période estivale est très longue et très chaude. Dans leur travail, ils ont présenté une étude qui a été effectuée sur un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments. Les résultats obtenus sont très encourageants et indiquent que cette technique est très économique peut couvrir une bonne partie de nos besoins en matière de climatisations domestiques. Cette étude a permis également d'examiner l'influence des paramètres de l'échangeur sur son efficacité moyenne quotidienne et sur la température de l'air refroidi à la sortie de l'échangeur enterré.

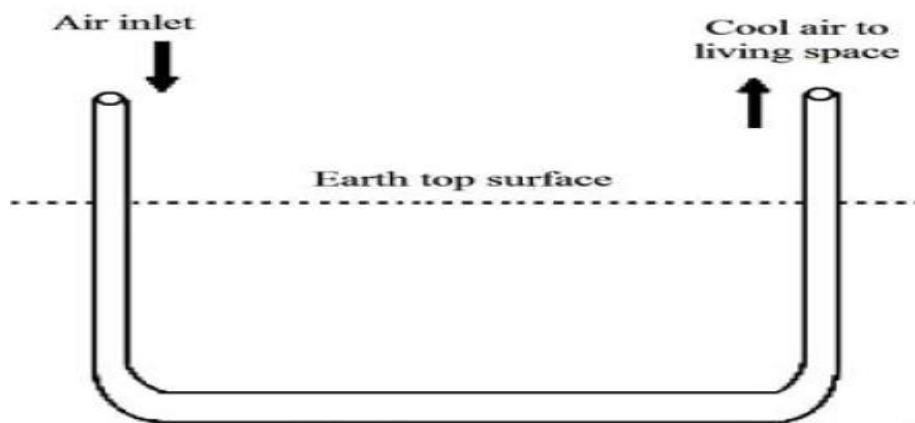


Figure 1.2 : Représentation de l'échangeur géothermique à air [2]

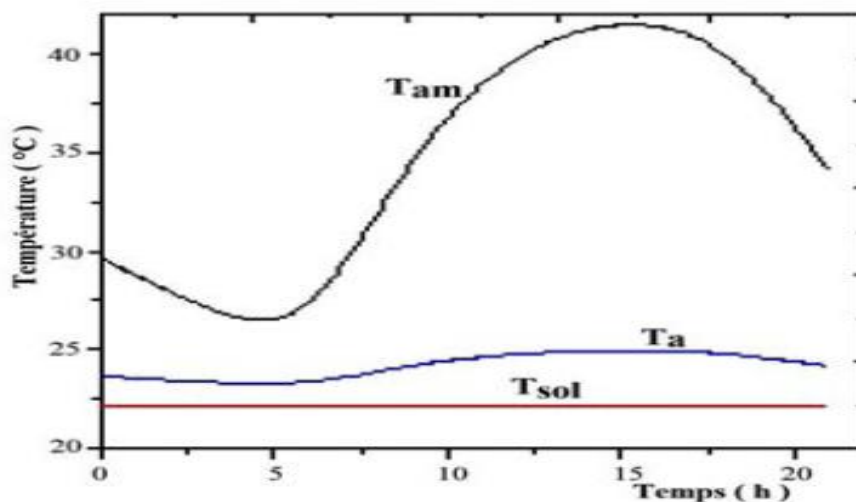


Figure 1.3: Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juin [2]

Chapitre 1: Recherches bibliographiques

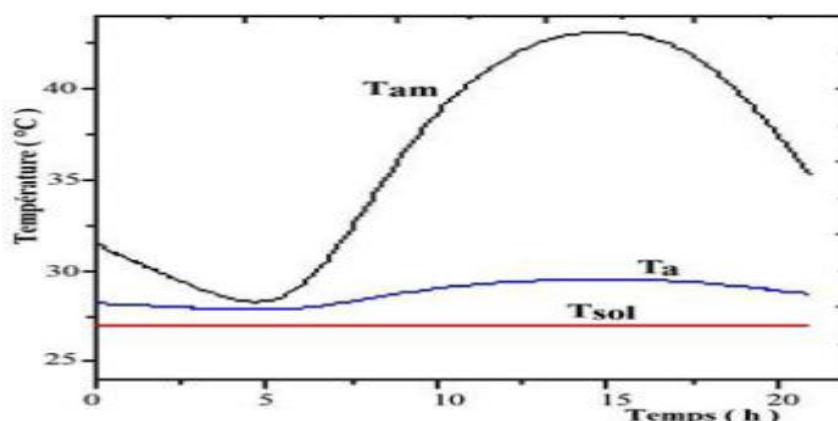


Figure 1.4: Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juillet

Dans ce travail, ils ont présentés une étude sur un échangeur géothermique a destiné la Production du froid. Cette étude est effectuée dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie. Les résultats obtenus montrent que cette technique est prometteuse et elle peut être substituée à la climatisation conventionnelle.

B. Mebarki et al (2012), [3], ont étudié les performances d'un échangeur air-sol, ont été entreprises par une voie de la modélisation analytique. Ils ont premièrement validé le modèle de la température de sol et la température de l'air dans l'échangeur, puis ils ont analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir: la profondeur, le diamètre et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur

Présentation de la configuration étudiée :

Il s'agit d'un échangeur enterré constitué d'un seul tube qui va être utilisé dans la ville de Béchar.

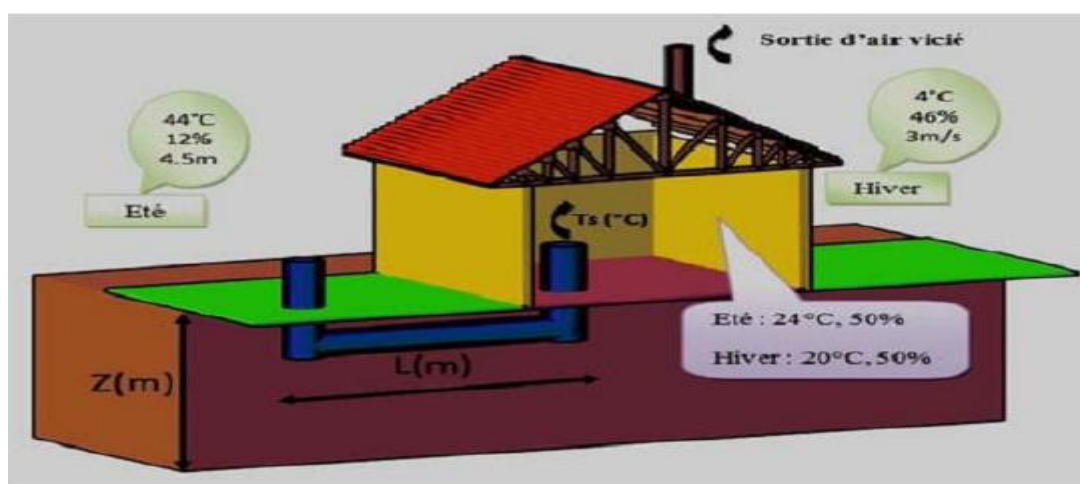


Figure 1.5 : Configuration étudiée [3]

Chapitre 1: Recherches bibliographiques

N. Moumimi et al [4], au laboratoire de génie mécanique de l'Université de Biskra. Ils ont étudié analytiquement et expérimentalement un échangeur air/sol pour déterminer les caractères principaux qui influent sur la performance de ce système présenté dans la figure 1.6.

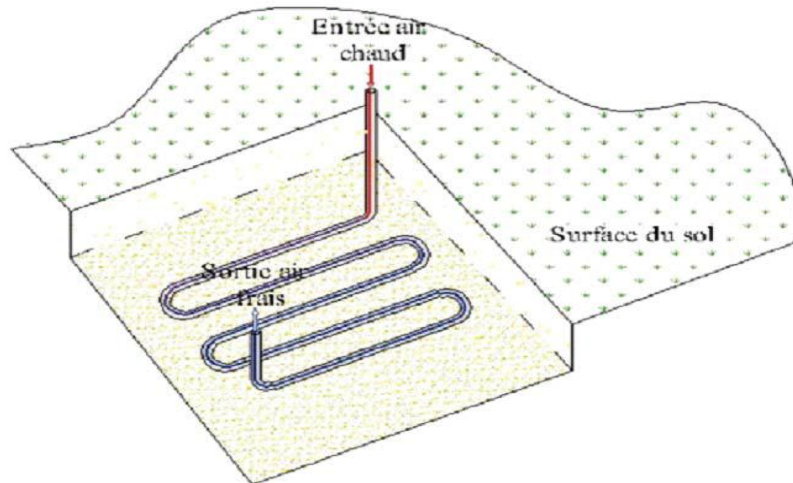


Figure1.6: Disposition de l'échangeur air/sol [4]

Dans cette étude, ils ont considéré que:

- L'échange thermique se fait en régime stationnaire.
- Le sol est considéré homogène.
- Les caractéristiques de l'air et du sol sont considérées constantes.
- Dans une section du conduit perpendiculaire à l'écoulement, l'air est considéré homogène, l'échange convectif est régi par un coefficient convectif moyen.
- La température extérieure du tube est constante.
- La vitesse de l'air est considérée constante le long du conduit.

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

$$T_a = T_{ae} \times \exp\left(\frac{-2L}{\rho \times c \times r \times v \times R}\right) + T_{sol} \left(1 - \exp\left(\frac{-2L}{\rho \times c \times r \times v \times R}\right)\right)$$

Ils ont fait une comparaison avec des résultats théoriques et expérimentaux pour un débit 121,52 m³/h, ils ont constaté que la température du fluide continue à chuter avec la longueur de l'échangeur et le régime thermique est loin d'être établi et l'écart significatif entre le

Chapitre 1: Recherches bibliographiques

modèle théorique et les résultats expérimentaux. Ceci est dû aux hypothèses considérées et principalement aux valeurs approximatives des propriétés du matériau du conduit et celles du sol.

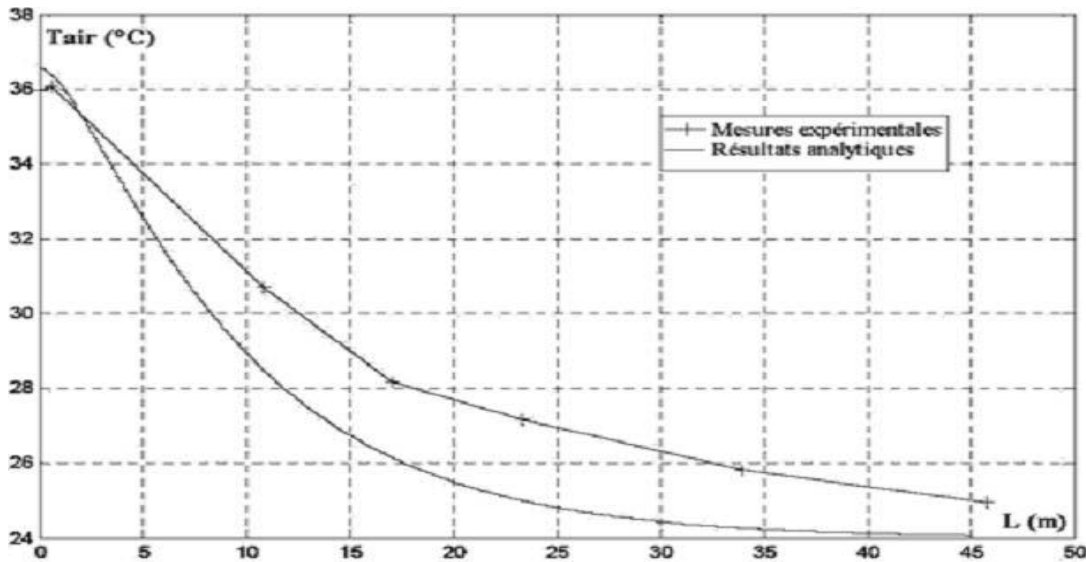


Figure 1.7: Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur [4].

CHEBANA Abdel basset et A. BRIMA(2016), [5], ont étudié la distribution de la température à l'intérieur du sol et aussi à l'intérieur et à travers l'échangeur géothermique et l'étude de son efficacité a aussi établi une étude d'un échangeur géothermique au niveau de l'université de Biskra cette étude servira comme support de comparaison entre les rapproches ces deux études.

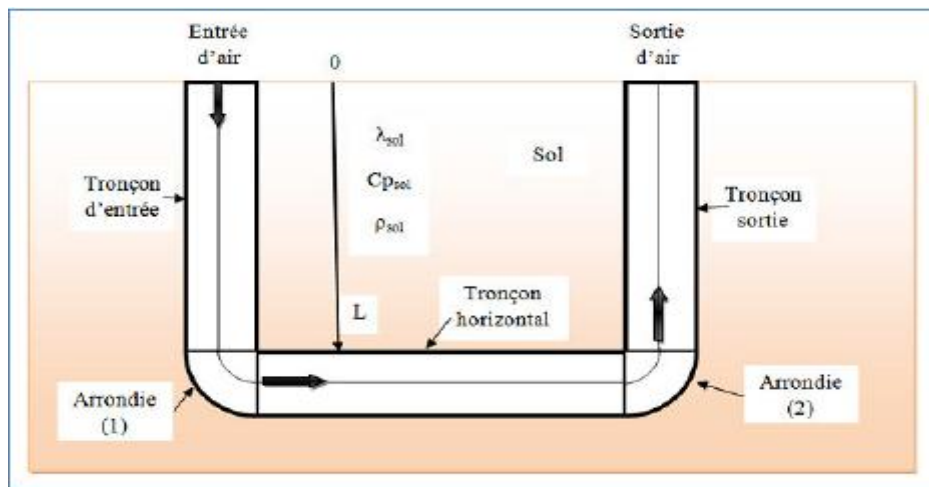


Figure 1.8 : Schéma simplifié d'un échangeur air/sol en forme « U » [5]

Chapitre 1: Recherches bibliographiques

P. Hollmuller [6] dans une étude théorique et expérimentale a utilisé l'échangeur air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement de l'HABITAT. Cette étude est basée sur des mesures récoltées et une simulation effectuée par un modèle numérique développé, où il s'est intéressé à une analyse théorique du phénomène à travers la simulation des performances thermiques de ces systèmes. Il s'agit de connaître l'évolution de la température de l'air frais depuis l'entrée jusqu'à la sortie de l'échangeur.

Boureima KABORE et al [7], étudié le fonctionnement annuel d'un échangeur air-sol en utilisant la modélisation analytique. Où il a rappelé pour la première fois l'expression analytique qui traduit l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur. Il a ensuite déterminé l'évolution mensuelle des températures d'entrée et de sortie des puits 1992-2001 Prévisions météorologiques à Ouagadougou. Cela a permis de déterminer les flux de chaleur, puis a libéré les périodes de refroidissement et de chauffage.

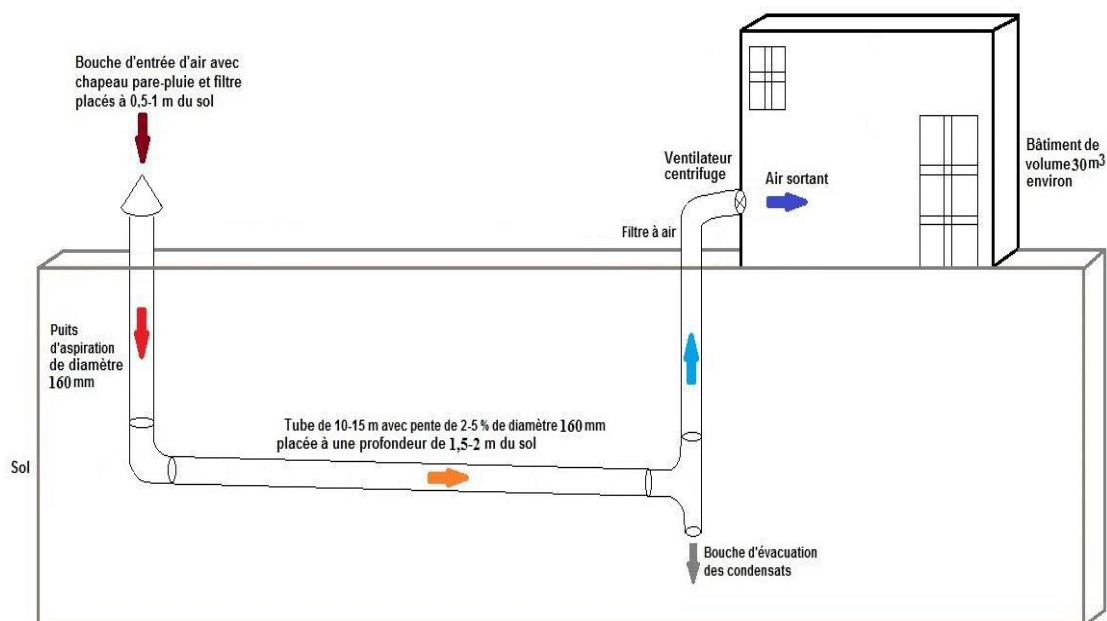


Figure 1.9 : Géométrie simplifiée du puits provençal étudié

Les résultats obtenus grâce à ce travail

- * les températures de sortie de l'air de l'échangeur, varient entre 27,5°C et 28,5°C ;
- * durant les périodes chaudes (périodes de refroidissement), l'air récupère dans le sol, des flux thermiques compris entre -32,43 Wh et -641,15 Wh ;
- * durant les périodes froides (périodes de chauffage), l'air récupère dans le sol, des flux thermiques compris entre 68,61 Wh et 377,95 Wh.

Chapitre 1: Recherches bibliographiques

Le puits provençal peut donc apporter confort thermique dans une habitation durant les périodes chaudes.

Dans les zones sahéliennes, il est préférable de ne pas utiliser ce système durant les périodes froides.

A. Brima et al[8], L'étude a été réalisée par simulation par la mécanique des fluides, il a donc fallu respecter les vraies dimensions de l'échangeur lors de la conception, pour cela ils ont utilisé le programme GAMBIT en tenant compte des conditions marginales appropriées, et ils ont également comparé les résultats simulés obtenus par FLUENT avec les résultats expérimentaux, Où ils ont trouvé une convergence de ces résultats.

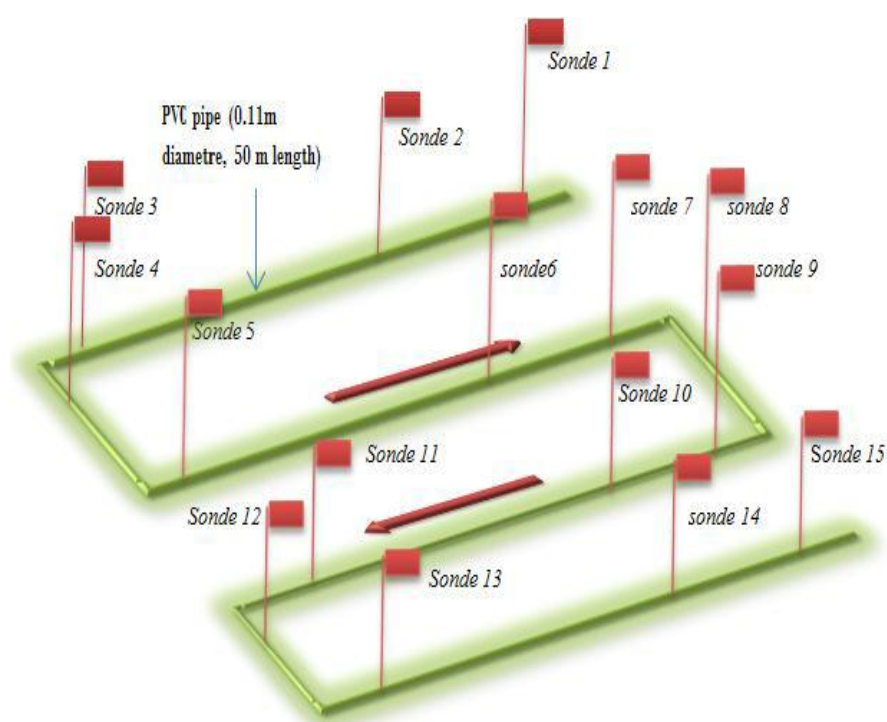


Figure 1.10 : Schéma du système d'échangeur de chaleur air/sol

Il a effectué des tests en juillet et août, les deux mois de l'année, pour étudier le comportement de l'échangeur et son efficacité, et la figure (10) montre la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur enfoui pendant trois jours consécutifs pendant deux mois.

Chapitre 1: Recherches bibliographiques

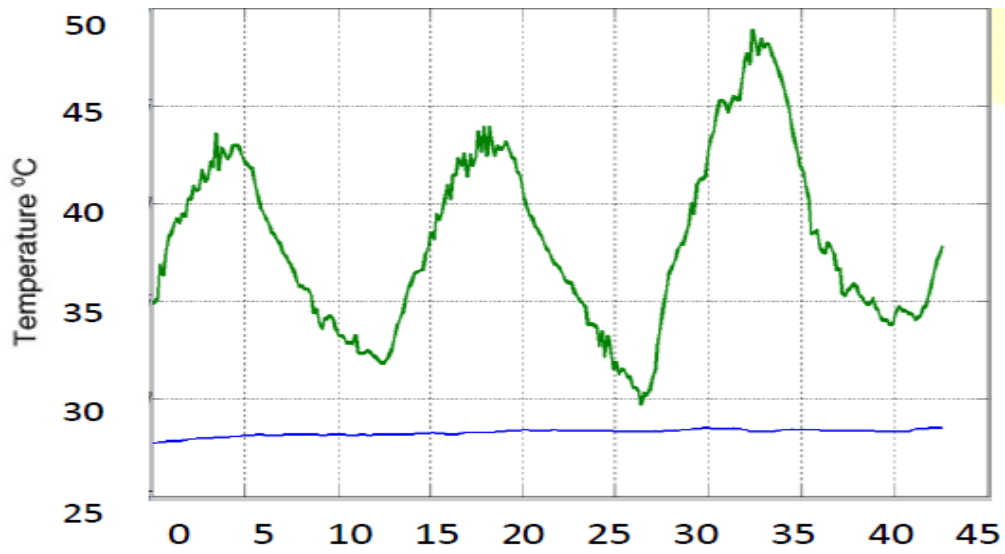


Figure1.11 : Heure du jour en minutes * 102. (Juillet)

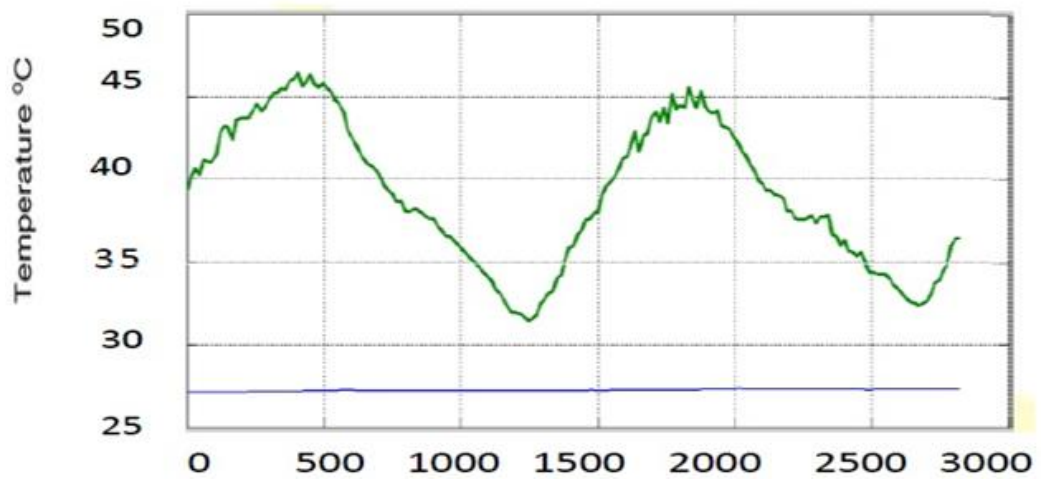
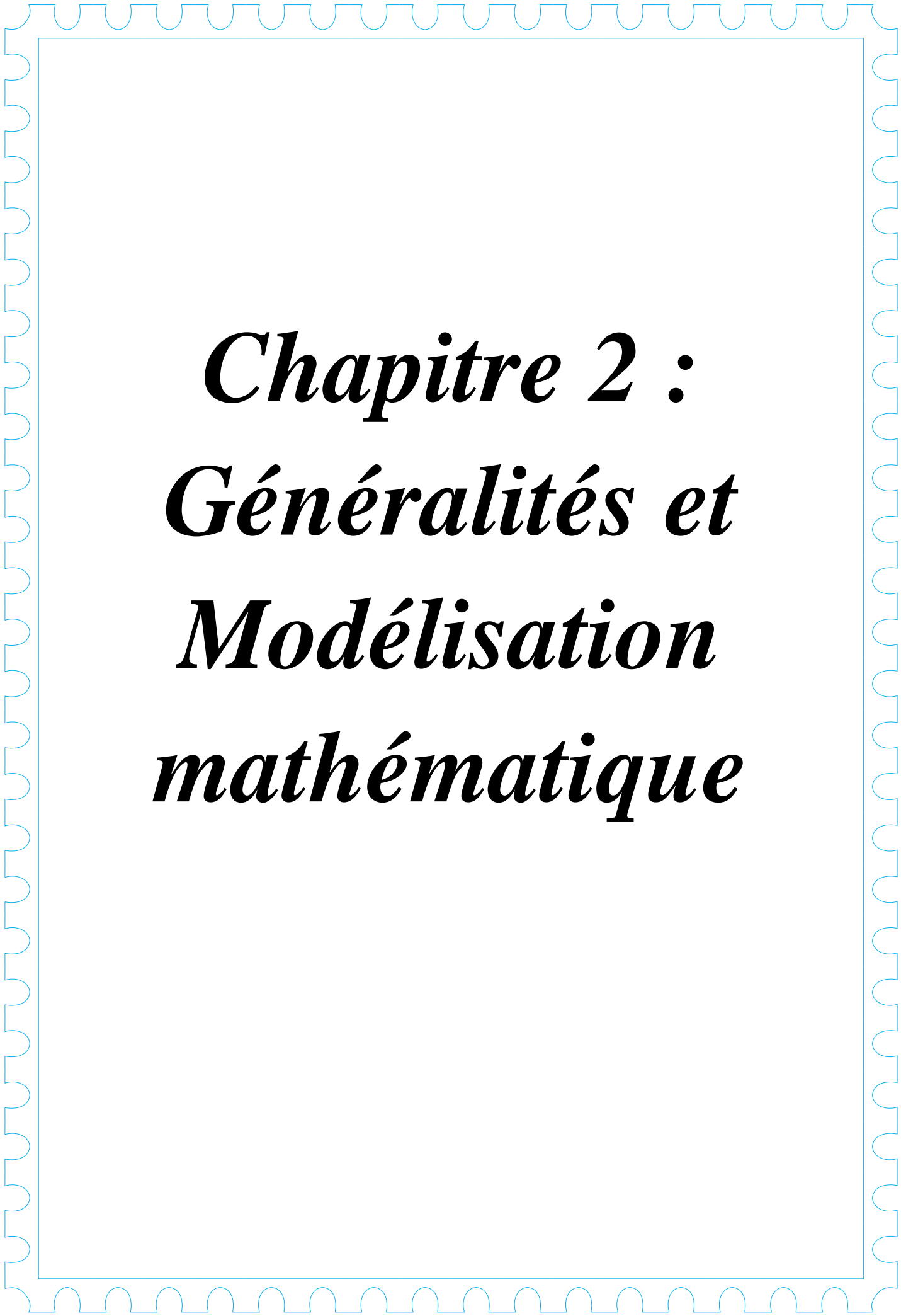


Figure1.12 : Heure du jour en minutes (aout)



Chapitre 2 :
Généralités et
Modélisation
mathématique

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

2.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons une vue d'ensemble de l'énergie géothermique, à travers une explication de certains des termes qui y sont liés. Dans le dernier, nous donnerons la formule mathématique et les équations qui régissent le phénomène de convection dans le système stable à l'intérieur du tube de l'échangeur de chaleur air / sol, afin d'étudier le comportement thermique de l'air.

2.1 Géothermie :

2.1.1 Historique :

Les premières traces d'utilisation de la géothermie par l'homme remontent à une période lointaine, tout au long de l'histoire des civilisations, la pratique des bains thermaux s'est multipliée et depuis un siècle, les exploitations industrielles se sont développées pour la production d'électricité et le chauffage urbain. S'il faut trouver des origines lointaines à l'utilisation de la géothermie, pourquoi ne pas se demander, comme les historiens de la Préhistoire, quel rôle jouèrent les sources chaudes dans la résistance de l'humanité aux dernières glaciations. Les plus anciens vestiges en rapport avec la chaleur de la Terre, retrouvés sur le site de Niaisât au Japon, sont des objets en pierre volcanique taillés (outils ou armes) datant du troisième âge glaciaire, il y a 15 ou 20000 ans. Les régions volcaniques ont donc constitué, très tôt, des pôles d'attraction, du fait de l'existence de fumerolles et de sources chaudes que l'on pouvait utiliser pour se chauffer, cuire des aliments ou tout simplement se baigner [9].

2.1.2 Définition :

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° [10].

2.1.3 Principe du rafraîchissement par la géothermie :

Le phénomène du rafraîchissement par la géothermie s'appuie principalement sur le fait qu'en été la température du profond du sol étant basse par comparaison à celle de l'air

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

ambiant. La température du sol influe principalement sur les performances d'un tel échangeur, car le sol, à une certaine profondeur, devient le facteur principal aux échanges thermiques qui ont lieu entre l'air qui circule à l'intérieur de l'échangeur et le milieu qui l'entoure. Le dispositif utilisé (Fig. 1) pour le rafraîchissement, consiste à utiliser de l'air ambiant qui a préalablement cédé sa chaleur au sol à travers un échangeur tubulaire enterré à une certaine profondeur. Cette profondeur, qui dépend des contextes géographiques et climatique servira de base pour le dimensionnement d'un tel système pour qu'il puisse être exploité [11].

2.1.4 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 [12].

2.1.4.1 La 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 [12].

2.1.4.2 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 [12].

2.1.4.3 La géothermie très basse énergie :

La géothermie très basse énergie est rencontrée à des faibles profondeurs (nappes phréatiques) ou la température est de l'ordre de 10 à 12°C. Elle est utilisée pour le rafraîchissement, chauffage des bâtiments à travers les puits canadiens [12].

2.1.5 Avantages de l'énergie géothermique :

- ✓ La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- ✓ C'est une source d'énergie quasi-continue.

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

- ✓ Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne) et disponible dans tous les sous-sols de la planète.
- ✓ La géothermie est une énergie renouvelable et propre (pas de déchets à stocker, très peu d'émissions de CO₂) [13].

2.1.6 Inconvénients de l'énergie géothermique :

- ✓ Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- ✓ Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques
- ✓ Risque de réchauffement du site de forage.
- ✓ Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- ✓ Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental [13].

2.2 Les échangeurs de chaleur air/sol :

2.2.1. Définition :

L'échangeur air-sol est un système géothermique consiste à rafraîchir l'air pour ventilation des bâtiments. Il suffit d'enterrer un ou plusieurs tuyaux sur un trajet suffisamment long et de faire circuler l'air. L'air extérieur transite dans ce réseau de gaines par convection forcée, se réchauffe en hiver ou se refroidit en été, avant d'être soufflé dans le bâtiment. Le principe de l'échangeur air-sol est de faire circuler l'air neuf dans un conduit enterré grâce à un ventilateur, avant de l'insuffler dans le bâtiment. En hiver, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré, le puits est alors dit puits canadien. En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à celle d'extérieure, le puits est alors dit puits provençal [14].

2.2.2. Les systèmes d'échangeurs de chaleur enterrés :

Il existe deux systèmes d'échangeurs de chaleur enterrée, un système ouvert et un autre fermé. Dans le système ouvert, la terre peut être employée directement pour chauffer ou refroidir un milieu qui peut lui-même être employé pour le chauffage ou le rafraîchissement d'espace. En outre, la terre peut être employée indirectement à l'aide d'un échangeur de chaleur comme milieu porteur qui est distribué dans un système fermé [15].

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

2.2.2.1. Systèmes ouverts :

Dans les systèmes ouverts, l'air ambiant traverse des tubes enterrés dans le sol pour le préchauffage ou le rafraîchissement (figure 1).

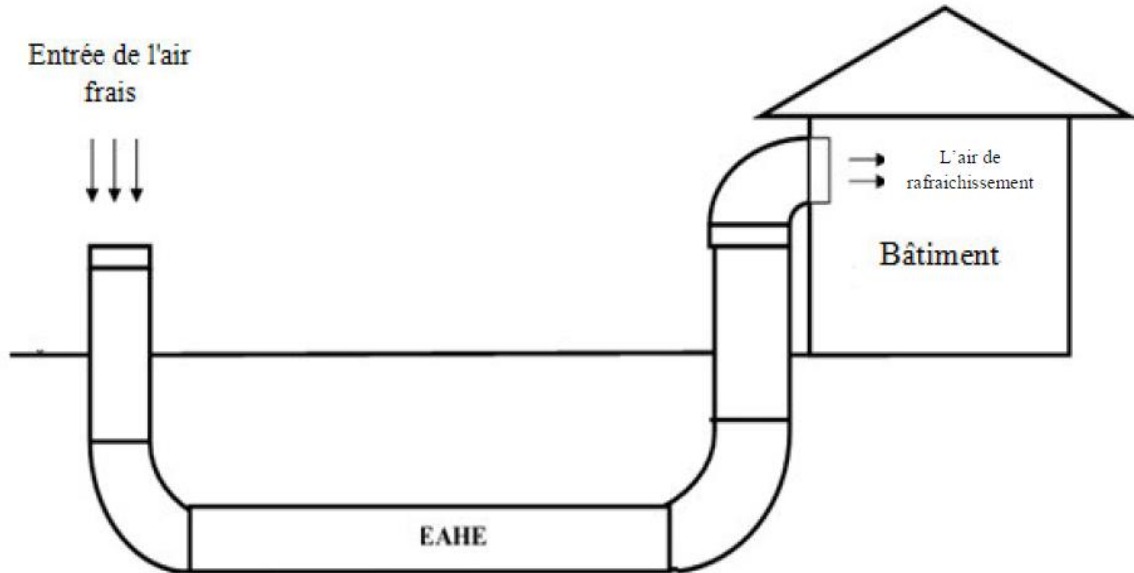


Figure2.1. Schéma de la boucle ouverte EAHE (tunnel souterrain d'air) [15]

2.2.2.2. Systèmes fermés :

Dans les systèmes fermés (figure 1), la formation d'une boucle partant du sous-sol pour revenir au bâtiment est avantageuse sur le plan thermique. Ces systèmes restent efficaces même pour un temps humide. Toutefois, ils ne contribuent pas au renouvellement de l'air intérieur, ce qui nécessite alors un second circuit d'air pour l'habitation [15].

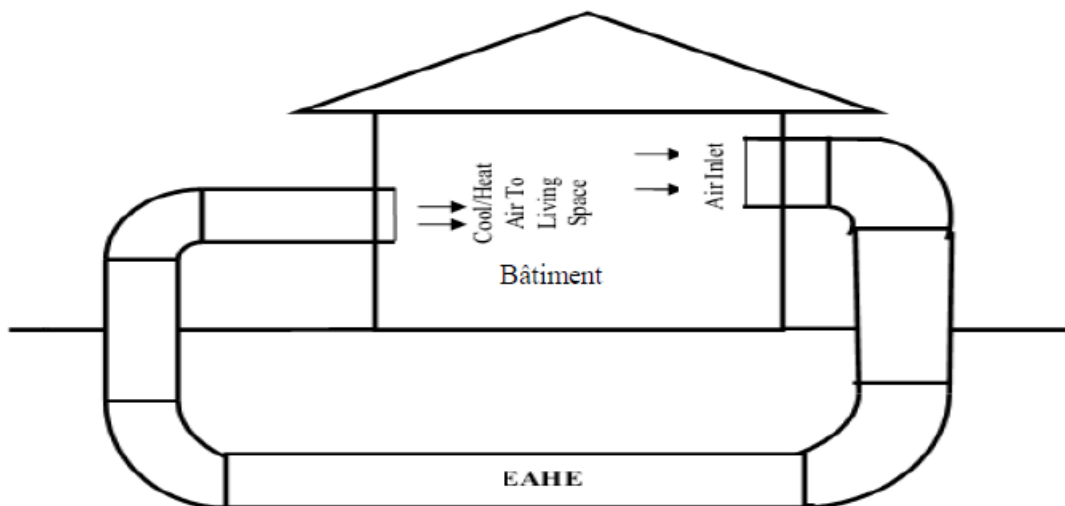


Figure2.2. Schéma de la boucle fermée EAHE (tunnel souterrain d'air) [15]

2.2.3 Les différents types d'échangeurs de chaleur air/sol :

On distingue dans l'industrie comme dans l'habitat plusieurs types d'un échangeur de chaleur air/sol, cette variété est basée sur plusieurs paramètres tels que: le volume d'air de local à refroidir et/ou réchauffer, sur les obstacles géométriques et dimensionnelle, la nature de sol et sur les zones climatiques [16].

2.2.3.1 Echangeur de chaleur air/sol horizontal :

Il n'existe actuellement pas de réglementation ou de normes concernant la mise en œuvre des capteurs horizontaux utilisés dans des installations géothermiques. Seules des recommandations et des conseils pratiques sont accessibles [16].

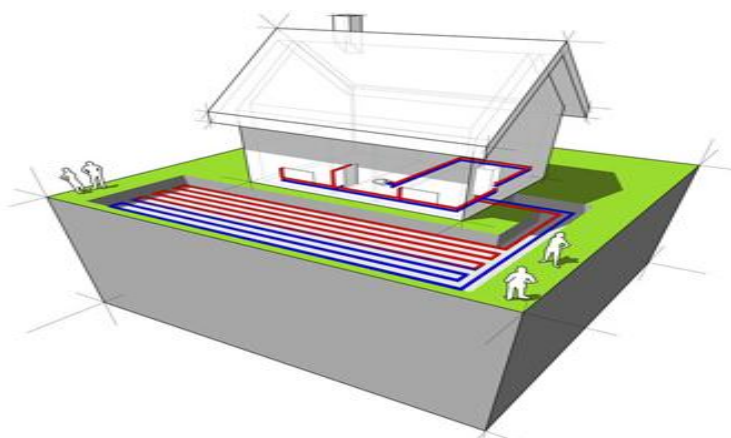


Figure 2.3: échangeur de chaleur air/sol horizontal [16]

2.2.3.2 Echangeur de chaleur air/sol vertical :

Les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment. La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau glycolée. L'emprise au sol est minimale par rapport aux capteurs horizontaux [16].

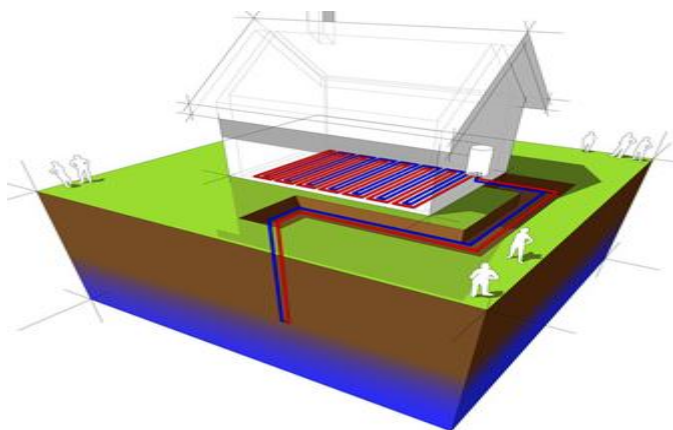


Figure 2.4: Echangeur de chaleur air/sol vertical [16]

2.2.3.3 Echangeur de chaleur air/sol Serpentins :

Les nappes de tubes (serpentins) sont enterrées sur un plan horizontal jusqu'à une profondeur maximale de 3 m dans le sol et en soutirent ou ajoutent de la chaleur. Comme les nappes de tubes ne sont normalement disposées qu'à une profondeur de 0,5 à 3 m, le climat joue un rôle pour ce genre d'exploitation de la chaleur. Dans ce cas précis, le sol sert d'accumulateur d'énergie solaire, l'énergie géothermique proprement dite ne revêt alors qu'un rôle secondaire. Selon l'altitude topographique [16].

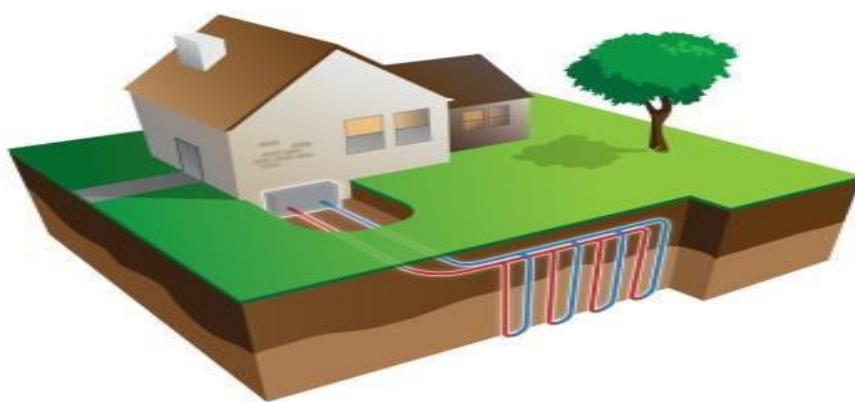


Figure 2.5: échangeur de chaleur air/sol Serpentins [16]

2.3 L'échangeur thermique air/sol (puits canadien) :

2.3.1 Principe de fonctionnement :

Le puits canadien, appelé aussi puits provençal, est un système géothermique qui utilise l'inertie thermique du sous-sol à une profondeur limitée de 2 à 3 m. Ce système sert pour le préchauffage de l'air en hiver et pour le rafraîchissement en été. Il est basé sur le simple constat que la température à 2 mètres de profondeur est à peu près constante, environ 12°C en été et 7°C en hiver. Si l'on fait circuler de l'air dans une canalisation enterrée à faible profondeur, il ressortira plus chaud que l'air extérieur l'hiver, et plus frais que l'air extérieur l'été, d'où l'application de ce principe pour le renouvellement de l'air d'une habitation pour réaliser des économies d'énergie.

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

En demi-saison la différence de température entre l'air extérieur et le sol n'est pas significative et la circulation dans le sous-sol n'est pas nécessaire [17].

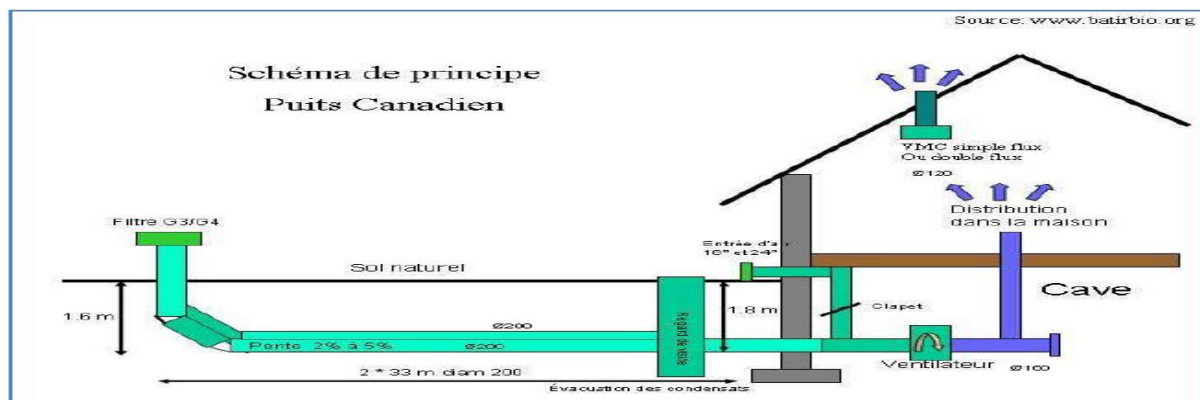


Figure 2.6: Schéma de principe du puits canadien [17]

2.3.2 Caractéristiques des tubes (puits canadien) :

2.3.2.1 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

2.3.2.2 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 choisi [18].

2.3.2.3 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

2.3.2.4 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 7 et 12 °C en moyenne). Il est cependant possible d'enfouir les tubes plus profondément mais cela augmente les contraintes de terrassement et de pose du conduit [18].

2.3.2.5 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

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

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 structurés ou gaines type TPC) emprisonnant des bulles d'air, ce qui diminue l'échange thermique sol/conduit. Le recours à ce type de tube est donc déconseillé [18].

2.3.3 Les avantages du puits canadien :

- ✓ Economie d'énergie : des économies sur votre facture de chauffage ;
- ✓ Ecologie : une énergie propre, gratuite et inépuisable ;
- ✓ Performance énergétique : les coefficients de performance peuvent atteindre des Valeurs entre 10 et 20 (contre 2 à 4 pour des climatisations classiques) ;
- ✓ Coût énergétique : très faible par rapport à une climatisation classique ;
- ✓ Coût de maintenance : très faible par rapport à une climatisation classique ;

Intégration possible avec d'autres systèmes de climatisation [19].

2.3.4 Les inconvénients du puits canadien :

La pose d'une ventilation double flux nécessite d'être planifiée dès la conception de la maison [19].

2.3.5 Choix des matériaux pour le conduit :

Le conduit est l'élément le plus important du puits canadien. C'est lui qui échange des calories avec le sol.

Le choix des matériaux est également primordial pour la durée de vie de votre puits canadien. Voici les caractéristiques optimales conseillées : Paroi intérieure lisse : évite les dépôts de saletés et de bactéries : Paroi extérieure annelé :

- ✓ Conductivité ;
- ✓ Matériau résistant aux fortes chaleurs : sans dégagement de vapeurs toxiques ;
- ✓ Matériau offrant une bonne conductivité thermique ;
- ✓ meilleur Matériau résistant : évite les risques de déchirures et donc assure une bonne Étanchéité [20].

2.3.5.1 Le polypropylène :

Ce matériau est spécialement conçu pour les conduits de puits canadien :

- ✓ Bonne conductivité : 7 fois supérieure au PVC ;
- ✓ Couche anti bactérienne à l'intérieur
- ✓ Excellente longévité ;
- ✓ Matériau très résistant ;
- ✓ Etanchéité assurée.



Figure 2.7 : Conduite polypropylène [20]

Le polypropylène est un matériau cher mais son prix se justifie par ses caractéristiques. Parfaitement adaptées pour les conduits extérieurs [20].

2.3.5.2 Polyéthylène haute densité (PEHD) :

Le PEHD est très utilisé pour la réalisation des puits canadiens :

- ✓ Intérieur lisse ;
- ✓ Extérieur annelé ;
- ✓ Très rigide : excellente résistance.

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

- ✓ Excellente conductivité : 2,5 fois supérieure au PVC ;
- ✓ Pas de dégagements toxiques en cas de fortes chaleurs [20].

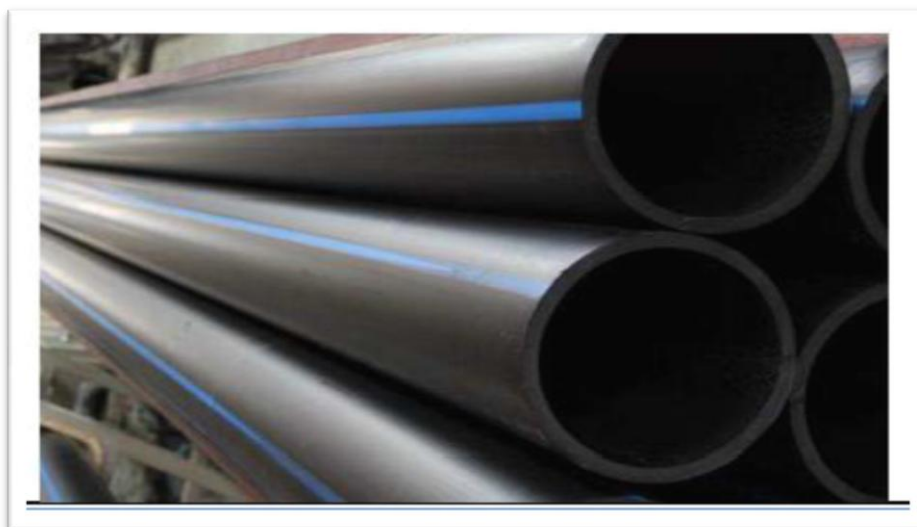


Figure 2.8: tuyaux le polyéthylène haute densité (pehd) [20]

2.3.5.3 Polychlorure de vinyle (PVC) :

Le moins cher, pas très écologique. Il peut "éventuellement" dégager des vapeurs nocives dues au mode de fabrication [20].

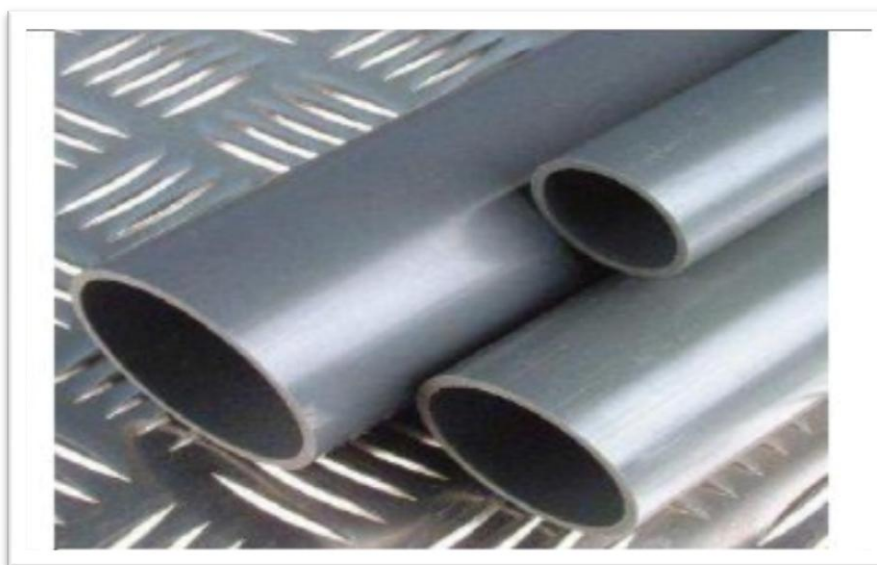


Figure 2.9 : conduits en Polychlorure de vinyle (PVC) [20]

2.6 Description du système :

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

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

diamètre intérieur $D_i = 200$ mm et de diamètre extérieur $D_e = 204$ mm et longueur $L=60$ m, soumis à une température de constante $T=297$ K sur toute la longueur de conduit.

2.6.1 Hypothèses simplificatrice :

Pour simplifier le modèle mathématique, on considère les hypothèses les plus couramment utilisées dans ce type de problème. Nous supposons alors que :

1. L'écoulement du fluide (l'air) est considéré, newtonien, incompressible et écoulement turbulent à trois dimensions.
2. L'échange thermique se fait en régime stationnaire.
3. il n'y a ni réaction chimique ni source de chaleur et de masse.
4. Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable

2.7 Modélisation thermique de la température du sol constante :

Dans le cas où la température est constante, peut être calculée par la valeur moyenne

$$\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

2.8 Équations générales (Équations gouvernantes des problèmes étudiés) :

La modélisation mathématique d'un phénomène de la mécanique de fluide ; est régime Par les équations de conservation qui sont :

- ✓ Equations de quantité de mouvement ;
- ✓ Equation de continuité de Navier-Stockes ;
- ✓ Equation de l'énergie.

Dans le cas des écoulements à trois dimensions avec les hypothèses de l'incompressibilité et d'un régime stationnaire ; les équations de transfert de la chaleur et de la masse sont données comme suit :

Équation de continuité :

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0 \quad 2.1$$

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

Équations de quantité de mouvement :

Sur l'axe ox :

$$\left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \mathcal{G} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad 2.2$$

Sur l'axe oy :

$$\left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \mathcal{G} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad 2.3$$

Sur l'axe oz :

$$\left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \mathcal{G} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad 2.4$$

Équation d'énergie, pour un écoulement stationnaire, sans source interne ni dissipation visqueuse

$$\left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad 2.5$$

2.9 Modélisation de la turbulence :

En ce qui concerne les modèles de turbulences on a plusieurs modèles mathématiques sont présentés, le modèle Spalato-Allumeras, le modèle (k- ε), le modèle (k- ω), le modèle RSM (Reynolds Stress Modèles), modèle (DES), modèle (LES).

Notre choix dans cette étude c'est le Modèle standard k-ε [Lander et spalding (1972)] qui se base sur le concept bousinesq (1977), notre choix du modèle de turbulences est dépend avec les ressources informatiques et la quantité de temps disponible pour la simulation.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i}) = 0 \quad 2.6$$

Les équations de conservation et de quantité de mouvement :

$$\frac{D}{D_t} (\rho \overline{u_i}) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u \frac{\partial u_i}{\partial u_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad 2.7$$

L'équation de conservation de l'énergie :

$$\frac{D}{D_t} (\rho c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial u_i}{\partial u_j} - \rho \overline{u_i T} \right) \quad 2.8$$

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

Les équations RANS “Les équations (2.6) et (2.8) présentent des inconnues d’ordre supérieur. Pour résoudre ce problème de fermeture, Bousines a introduit en 1877 une approximation pour la modélisation des contraintes de Reynolds et des composantes de flux de chaleur turbulente. L’approximation de Bousines est la suivante :

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \kappa \quad 2.9$$

$$-\rho \overline{u'_i T} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad 2.10$$

La viscosité turbulente est calculée à partir de l’expression :

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad 2.11$$

$$K^2 = \sqrt{C_\mu \delta_\varepsilon} (C_{2\varepsilon} - C_{1\varepsilon}) \quad 2.12$$

Les équations de transport du modèle standard $(\kappa - \varepsilon)$ peuvent s’écrire, pour un écoulement compressible, sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} S_\varepsilon \quad 2.13$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_b - \rho \varepsilon + G_\kappa - Y_M + S_\kappa \quad 2.14$$

En prenant en compte l’hypothèse de stationnarité et l’incompressibilité on aura :

$$\rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} S_\varepsilon \quad 2.15$$

$$\rho u_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_b - \rho \varepsilon + G_\kappa - Y_M + S_\kappa \quad 2.16$$

G_κ : Représente la génération de l’énergie cinétique de turbulence due aux gradients moyens de vitesse, calculée comme suit :

$$G_\kappa = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \quad 2.17$$

G_b : Représente la génération de l’énergie cinétique de turbulence due à la flottabilité, calculée comme cela :

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

$$G_b = g_i \beta \frac{\mu_t}{P_\tau} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad 2.18$$

Y_M : Représente la contribution de la dilatation de fluctuation dans la turbulence compressible au taux global de dissipation :

$$Y_M : 2\rho\varepsilon M_t^2$$

P_τ : Est le nombre turbulent de Prandtl pour l'énergie.

β : Le coefficient de la dilatation thermique.

g : Le composant du vecteur de la gravité dans la direction i . Pour le standard et réalisable $(\kappa - \varepsilon)$.

Où : $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ et $\sigma_\varepsilon, \delta_\kappa$ sont des constantes empiriques.

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.3, C_{\mu} = 0.09, \delta_\kappa = 1, \delta_\varepsilon = 1.03$$

S_ε et S_κ : Sont les limites définies pour l'utilisateur de source.

2.9 Modélisation des conditions aux limites :

$$T_{tub} = 297$$

$$T_{air} = 320$$

Conclusion :

Un puits climatique est un transformateur de chaleur de surface avec un objectif :

- ✓ chauffer l'air en hiver et le rafraîchir en été, car cela dépend de l'échange thermique entre l'air ambiant extérieur et le sol;
- ✓ Rajeunissez l'air dans les bâtiments.

Le climat utilise bien l'énergie renouvelable gratuite.

Le modèle mathématique est alors constitué d'un système d'équations, complétées par des conditions aux limites. Il s'agit d'un système complexe formé par des équations qui sont issues de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Les équations de bilan sont donc connues.

- ✓ la résolution analytique de ces équations de bilan n'est pratiquement jamais réalisable,
- ✓ les non linéarités visibles dans les équations sont principalement à l'origine des difficultés pour obtenir une solution analytique.

Chapitre 2: Analyse théorique et Formulation mathématique

Donc, l'utilisation des méthodes numériques s'avère indispensable pour la résolution des équations de bilan. Dans notre étude, on a utilisé le logiciel WorkBench Ansys 19.0 basé sur la méthode des volumes finis pour résoudre les différentes équations. La procédure et les étapes suivies sont exposées dans le chapitre prochain ainsi que tous les détails de la simulation numérique.



Chapitre 3:
Simulation
numérique

3.1 Introduction :

Après avoir fourni un résumé biographique et donné un aperçu du sujet, tout en mentionnant les relations mathématiques régissant le phénomène.

Dans ce chapitre, nous fournirons une introduction au programme CFD et comment résoudre le problème en utilisant la simulation à l'aide du programme CFD et du programme de calcul ANSYS (_ FLUNTE).

3.2 Présentation du logiciel de simulation (ANSYS Fluent) :

ANSYS FLUENT est un logiciel de simulation CFD qui permet de modéliser l'écoulement du fluide, le transfert de chaleur, et les réactions chimiques dans des géométries complexes. Ce programme est écrit dans le langage C de programmation et permet d'utiliser pleinement la flexibilité et la puissance offerte par cette langue. ANSYS FLUENT utilise une architecture client / serveur, ce qui lui permet d'exécuter des processus simultanés distinctes sur plusieurs postes de travail client et serveurs de calcul puissants. Cette architecture est essentielle pour une exécution efficace, un contrôle interactif, et une flexibilité totale entre les différents types de machines ou de systèmes d'exploitation [21].

3.3 Procédures du calcul :

Le WorkBench permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique [22].



Figure 3.1 : lancement des différents logiciels

3.4 Les différentes étapes du calcul :

Les étapes de calcul se composent de 5 étapes:

1. Géométrie : Utilisé pour importer ou de créer ou de modifier ou de mettre à jour un modèle qui peut être utilisé pour l'analyse.
2. Maillage : Discrétiser le domaine, c'est-à-dire le découper en mailles de calcul.
3. Configuration : Choisir les modèles physiques et les hypothèses adaptés au problème.
4. Solution : Les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur CFD après avoir discrétisée et mise sous forme algébrique. Cette résolution se fait par un algorithme itératif jusqu'à la convergence.
5. Résultats : Visualiser et analyser les résultats Comme on le verra, un premier calcul ne sera souvent pas convenable et il faudra recommencer le processus.

3.5 Les processus de la simulation :

3.5.1 Création de la géométrie :

Le logiciel ANSYS Design Modeler permet de réaliser des tracés 2d (Sketch), de créer à partir des sketches des objets 3d (par extrusion etc....) et de manipuler les objets 3d. Pour créer la géométrie du problème [22].

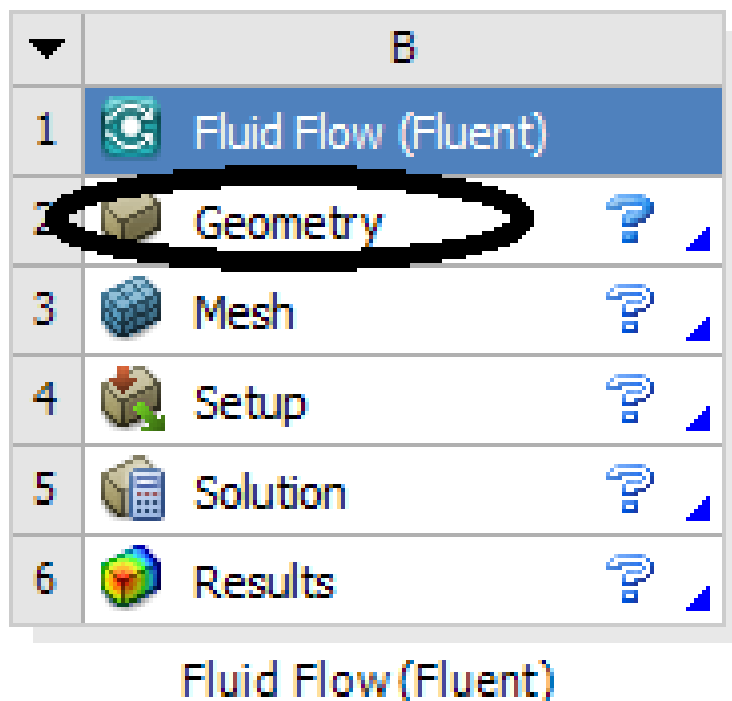


Figure 3.2: Création d'un projet en mécanique de fluide

La figure suivante représente de un échangeur air/sol sous le logiciel ANSYS Design Modeler :

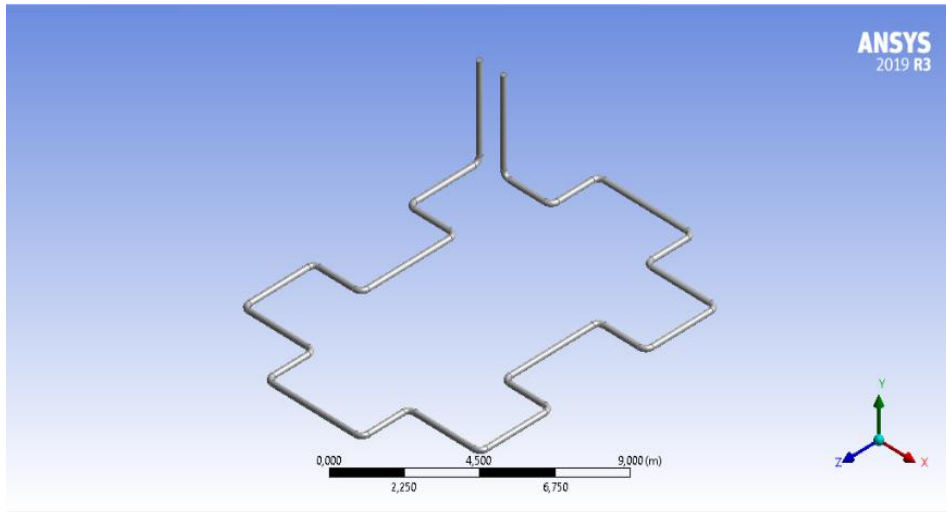


Figure 3.3: la géométrie échangeur air/sol forme zig zag

3.5.2 Maillage :

Comme l'étape précédente est validée, cela ouvre directement le logiciel de maillage ANSYS Maillage et charge la géométrie créée lors de l'étape 2.

Dans le WorkBench, double cliquer sur la case Engrener maintenant affectée du symbole.

3.5.2.1 Génération de maillage :

Le maillage avec les options par défaut est généré et apparait dans la fenêtre de visualisation.

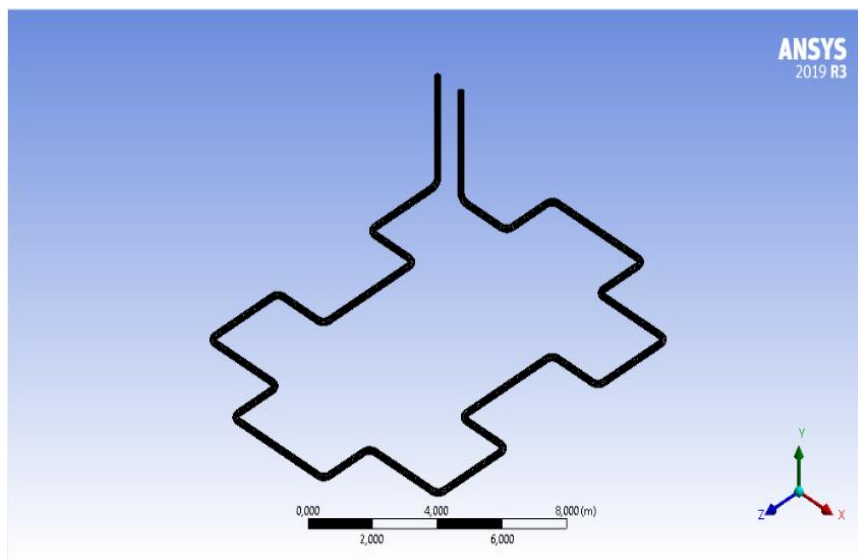


Figure 3.4 : Maillage d'un de l'échangeur géothermique en 3D

3.5.2.2 Nomination des surfaces :

Dentifié et à nommer différentes parties de la géométrie afin de :

- définir les conditions aux limites du problème (entrées, sortie etc. ...),
- définir des conditions sur le maillage au niveau des différentes sélections Pour repérer les entrées, sorties etc.... en 3d, il faut sélectionner les différents engés (arrêtes) de la géométrie.

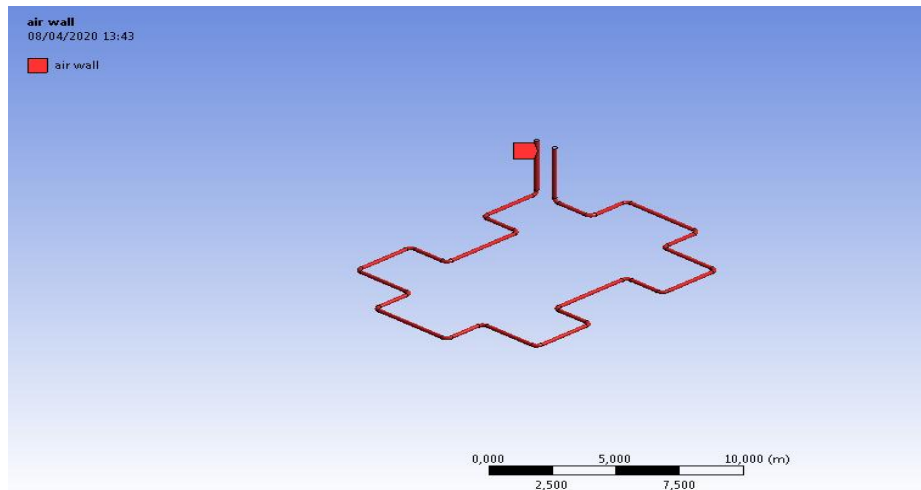


Figure 3.5: Nomination des différentes parties d'échangeur air/sol

3.6 Paramétrage des données des calculs :

3.6.1 Choix l'équation d'énergie:

Nous avons utilisé les équations de Navier-Stokes moyennées avec un modèle la turbulent .

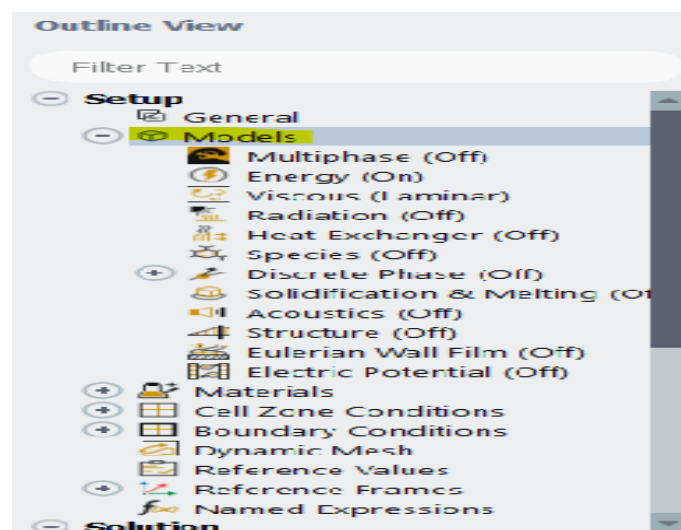


Figure 3.6 : établir équation d'énergie

Chapitre 3: Simulation numérique

3.6.2 Choix du modèle de résolution :

Le transfert de chaleur en activant l'équation d'énergie, et pour cela il faut suivre les étapes suivantes :

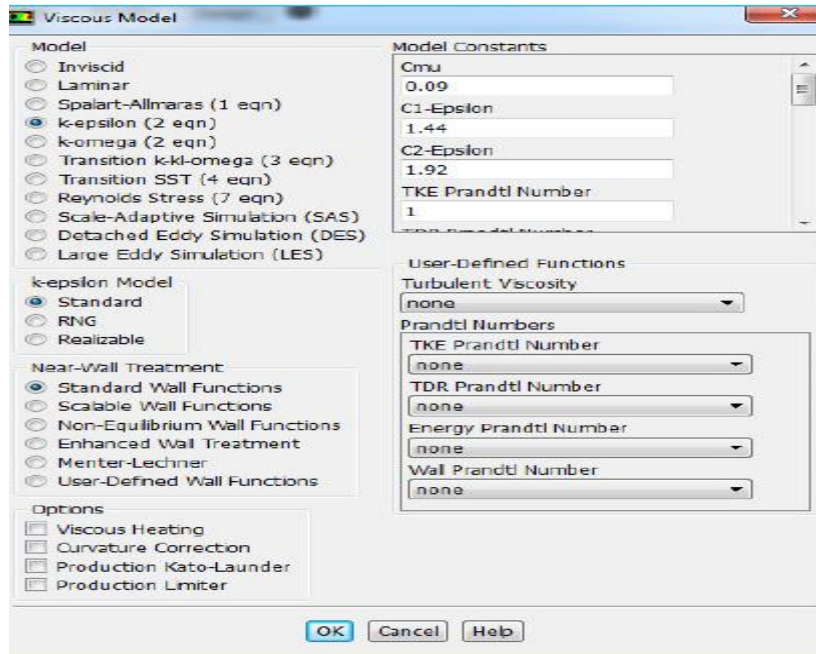


Figure 3.7: Choix du modèle de K-epsilon (standard)

3.6.3 Choix les caractéristiques physiques des tubes :

Les caractéristiques du tube sont chargées à partir de la bibliothèque des données de fluent.

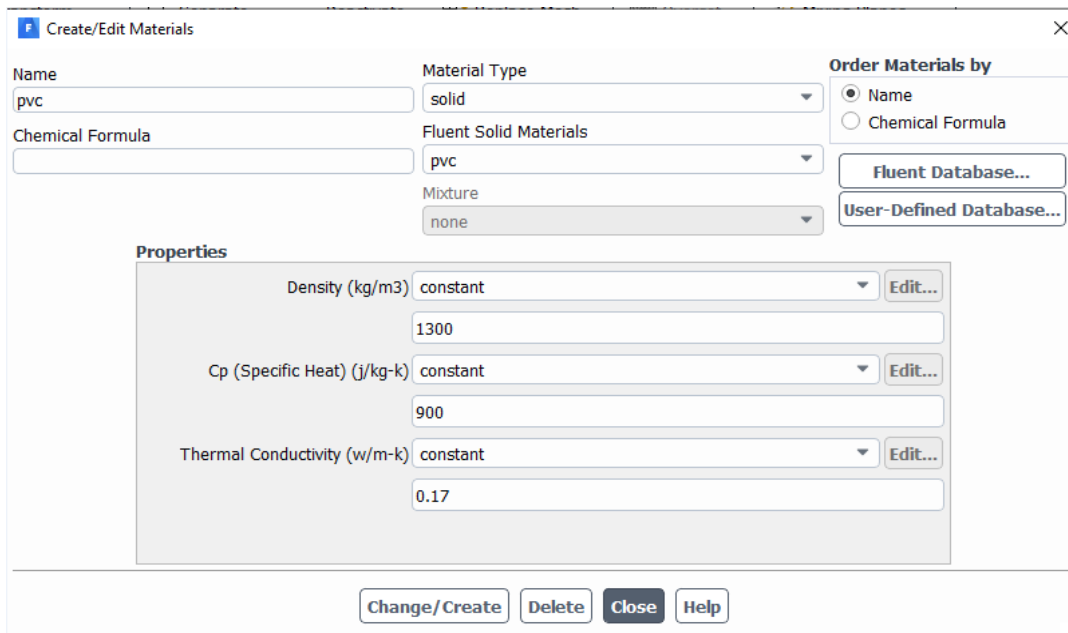


Figure 3.8 : définition les caractéristiques physiques des tubes

3.6.4 Choix les caractéristiques physiques des fluides :

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque des données de Fluent. Pour notre problème de fluide et l'air :

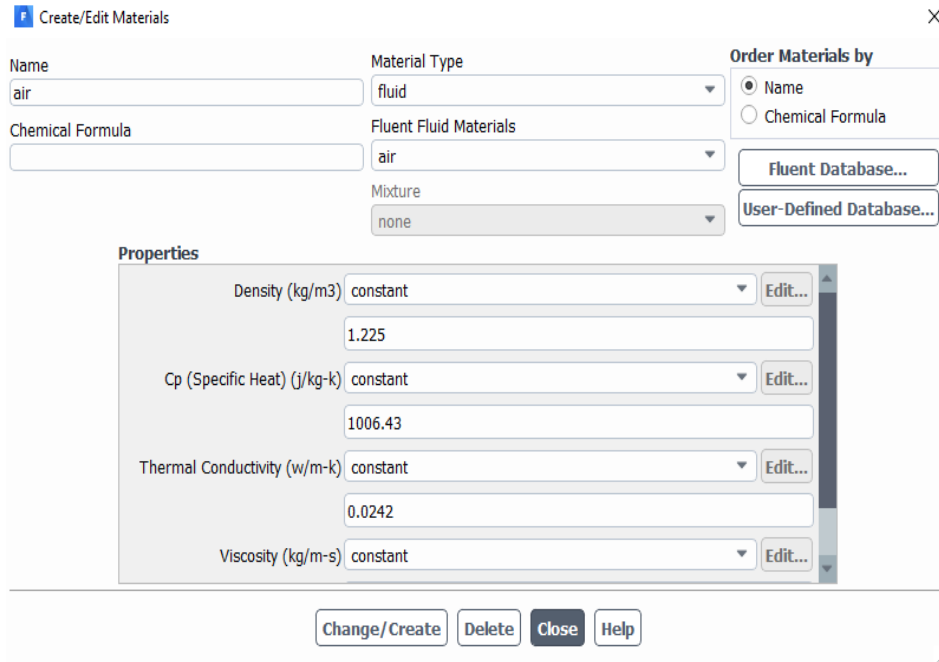


Figure 3.9: définition les caractéristiques physiques des fluides (air)

3.6.5 Operating conditions :

Avant de choisir des conditions aux limites, nous devons d'abord choisir une valeur Pression de référence pour les conditions de fonctionnement.

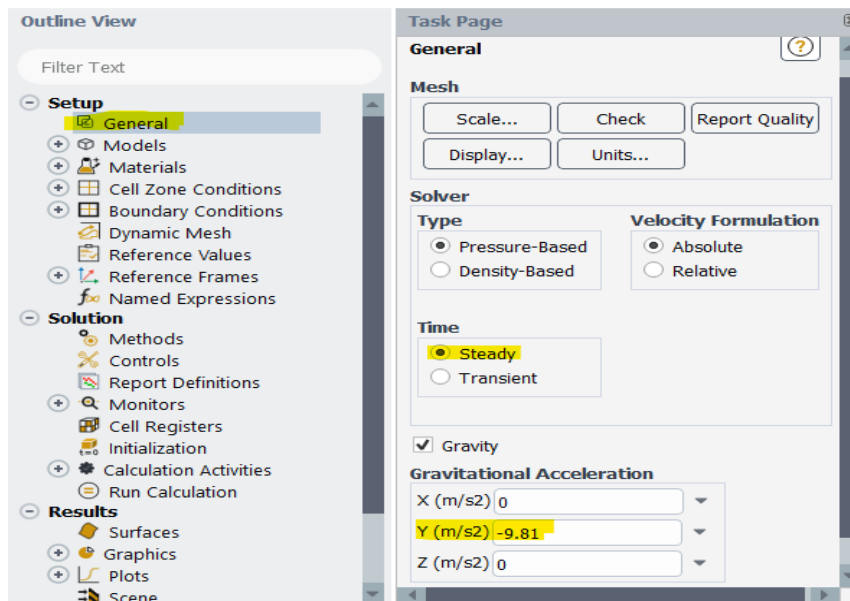


Figure 3.10: Choix de la pression de référence

3.6.6 Condition aux limites :

Les conditions aux limites sont très importantes pour nous Obtenez une solution précise avec une convergence rapide

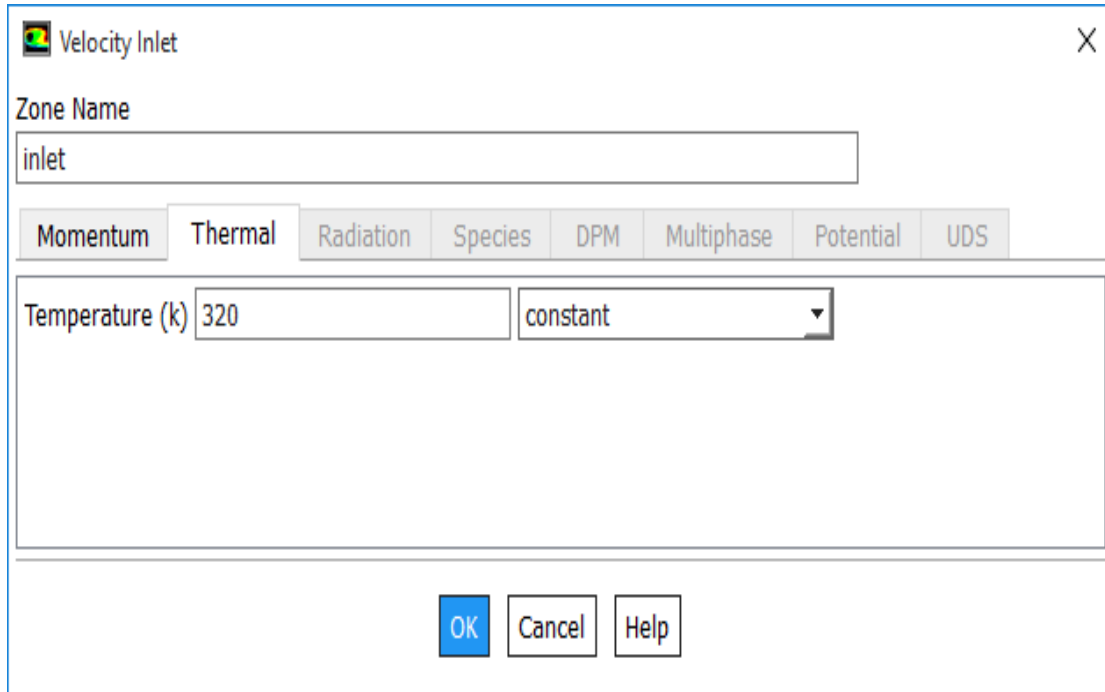


Figure 3.11 : choix de la température d'entré l'air

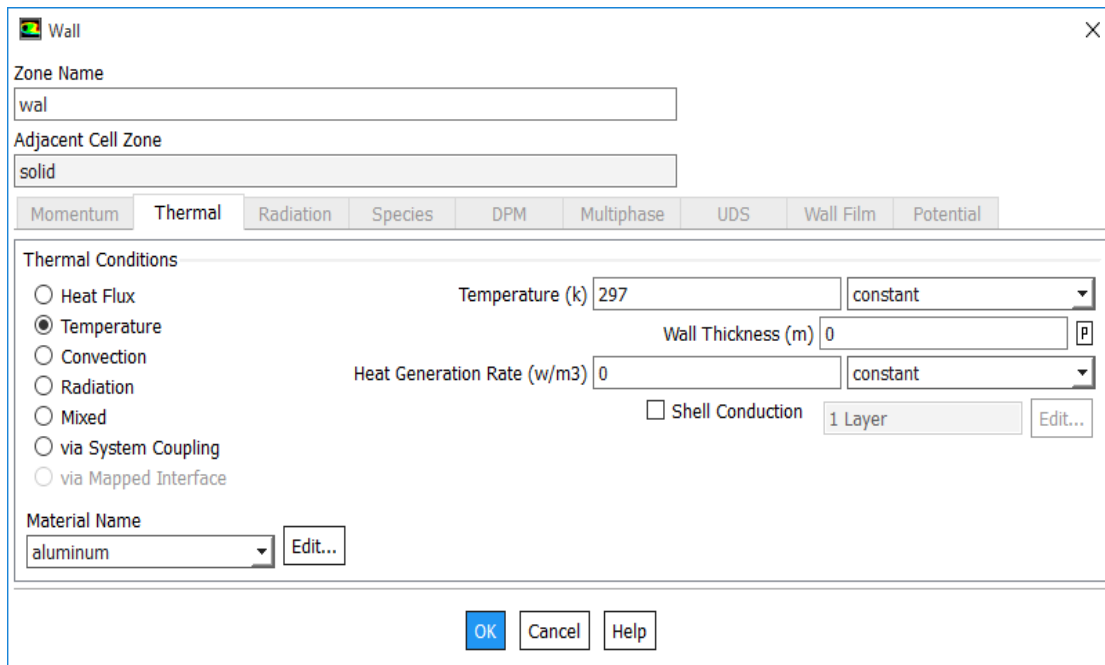


Figure 3.12 : choix de la température tube

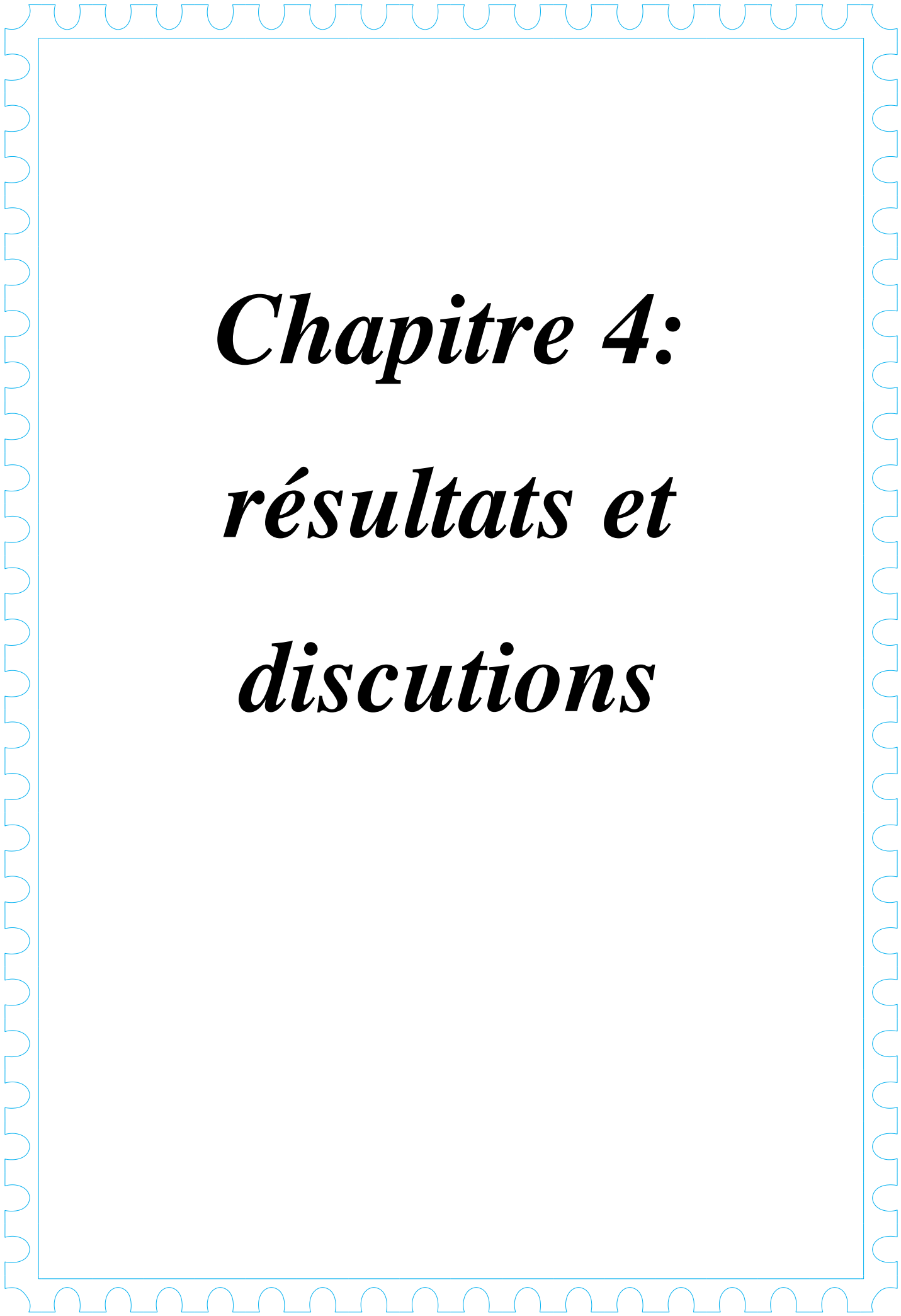
Chapitre 3: Simulation numérique

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes de calcul avec le logiciel ANSYS Utilisé dans cette simulation numérique CFD.

CFD est l'endroit où les fichiers seront créés, l'exécution du programme et la gestion des fichiers. Interactions entre différents programmes utilisés dans l'ingénierie, l'inter verrouillage et la simulation .Bonet post-traitement.

Nous verrons également qu'Ansys WorkBench permet d'automatiser les procédures, Comparez les résultats de différentes simulations, etc.



Chapitre 4:
résultats et
discussions

4.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, les résultats obtenus grâce au processus de simulation conduit par le programme Fluent seront présentés sur deux types de métaux (PVC, aluminium).

4.2 Résultats

4.2.1 Première cas (pvc) :

Cette expérience a été menée sur un échangeur de chaleur en PVC d'une longueur de $L = 60$ et d'une température de $T_{tub} = 297$. Avec la température de l'air entrant $T_{air} = 320$.

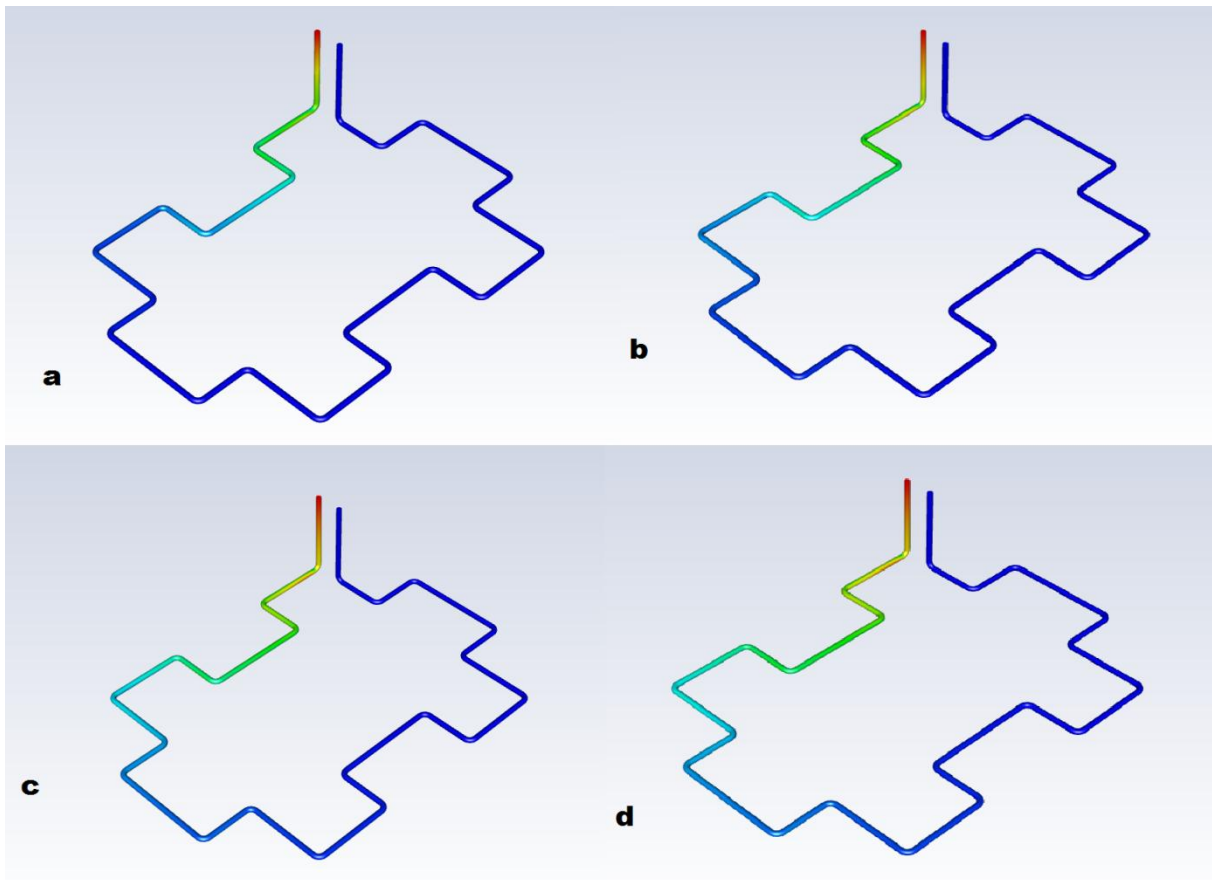


Figure 4.1 : Changement de la température de l'air le long de l'échangeur air / sol pour différentes vitesses a)0.7 b) 1.5, c)5, d) 8

La figure 4.1 montre les résultats des calculs obtenus à l'aide du programme fluide, qui ont été effectués sur du matériau (pvc) à différentes vitesses (0.5, 1.5 ,5 ,8) ce qui nous a permis d'obtenir les résultats suivants:

$V=0.7$

Longer(m)	0	3.5	6	11	18	25.5	37	46.5	60
Température(K)	320	311	305.5	302.5	298.5	298	297.5	297	297

Table 4.1 : changement de température sur la longueur de l'échangeur en pvc a)v=0.7

Chapitre 4: Résultats et Discussions

V=1.5

Longer(m)	0	3.5	6	11	18	25.5	37	46.5	60
Température(K)	320	312	307.5	305	300.5	299.3	298	297.3	297

Table 4.2 : changement de température sur la longueur de l'échangeur en pvc a)v=1.5

V=5

Longer(m)	0	3.5	6	11	18	25.5	37	46.5	60
Température(K)	320	313	309.7	306.5	303	300.5	298.2	297.2	297

Table 4.3 : changement de température sur la longueur de l'échangeur en pvc a)v=5

V=8

Longer(m)	0	3.5	6	11	18	25.5	37	46.5	60
Température(K)	320	314.7	310.8	307.5	304	301.3	299.5	298.5	297.2

Table 4.4 : changement de température sur la longueur de l'échangeur en pvc a)v=8

4.2.2 Deuxième cas (aluminium)

Cette expérience a été menée sur un échangeur de chaleur en aluminium d'une longueur de $L = 60$ et d'une température de $T_{tub} = 297$. Avec la température de l'air entrant $T_{air} = 320$.

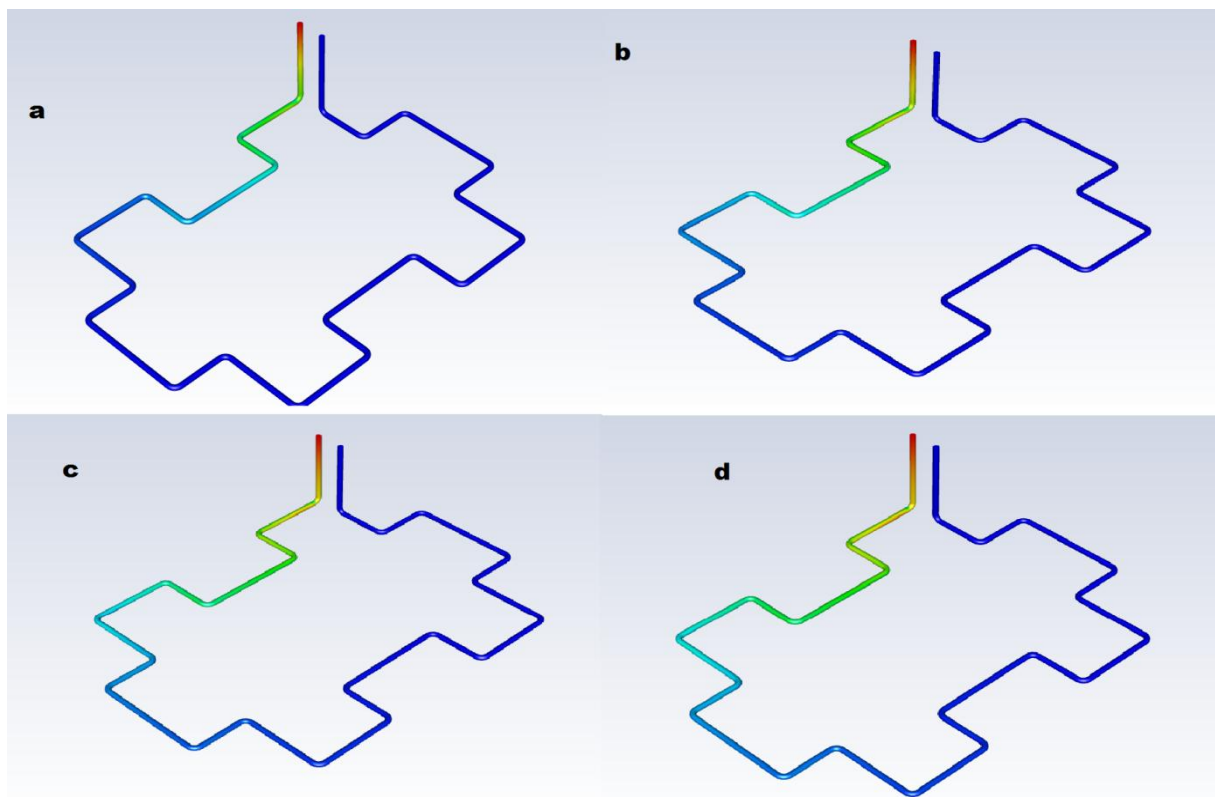


Figure 4.2 : Changement de la température de l'air le long de l'échangeur air / sol en (Al) pour différentes vitesses a)0.7 b) 1.5, c)5, d) 8

Chapitre 4: Résultats et Discussions

La figure 4.2 montre les résultats des calculs obtenus à l'aide du programme fluide, qui ont été effectués sur du matériau (aluminium) à différentes vitesses (0.7, 1.5, 5, 8) ce qui nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

V=0.7

Longer(m)	0	3.5	6	11	18	25.5	37	46.5	60
Température(K)	320	309	304	301.5	298	297.5	297	297	297

Table 4.5 : changement de température sur la longueur de l'échangeur en Al a)v=0.7

V=1.5

Longer(m)	0	3.5	6	11	18	25.5	37	46.5	60
Température(K)	320	310.7	306.2	302.5	299.2	298	297.5	297	297

Table 4.6:changement de température sur la longueur de l'échangeur en Al a)v=1.5

V=5

Longer(m)	0	3.5	6	11	18	25.5	37	46.5	60
Température(K)	320	312	308.5	305	301.5	299.5	297.3	297	297

Table 4.7 : changement de température sur la longueur de l'échangeur en Al a)v=5

V=8

Longer(m)	0	3.5	6	11	18	25.5	37	46.5	60
Température(K)	320	313	309.5	306.5	303	300.7	298.2	297.2	297

Table 4.8 : changement de température sur la longueur de l'échangeur en Al a)v=8

V=0.7

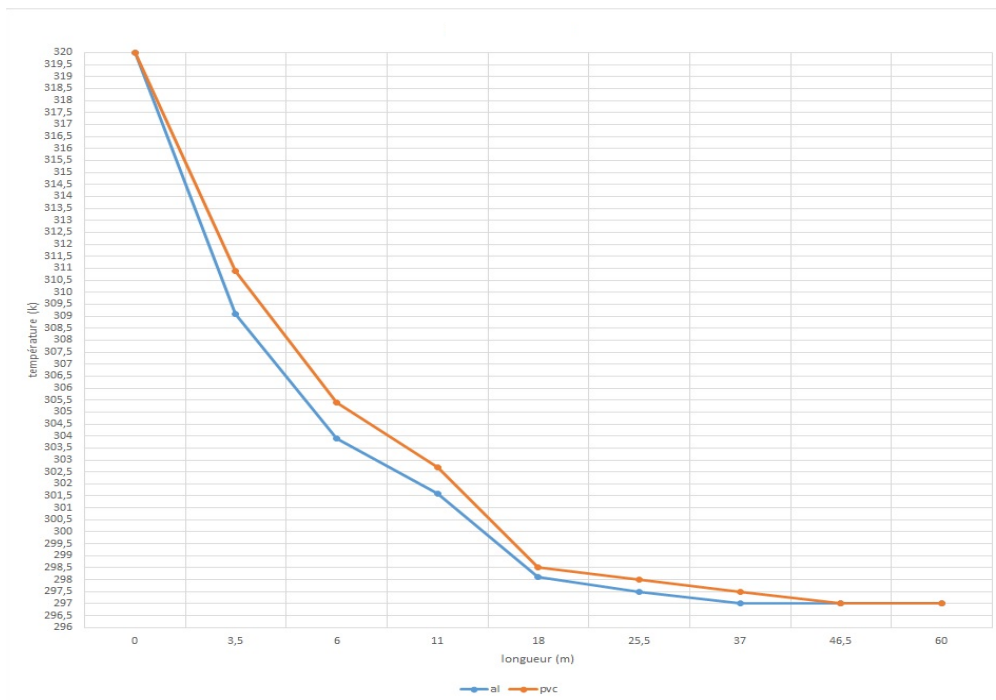


Figure 4.3 Une courbe graphique montrant les changements de température le long de l'échangeur (Al, PVC) v=0.7

V=1.5

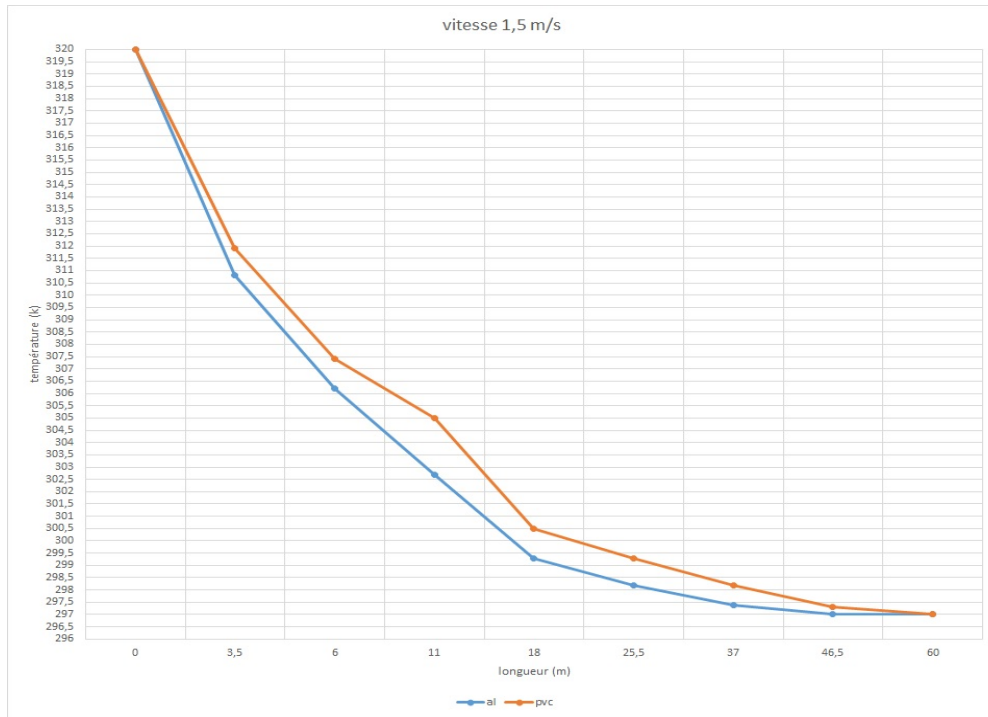


Figure 4.4 : Une courbe graphique montrant les changements de température le long de l'échangeur (Al, PVC) $v=1.5$.

V=5

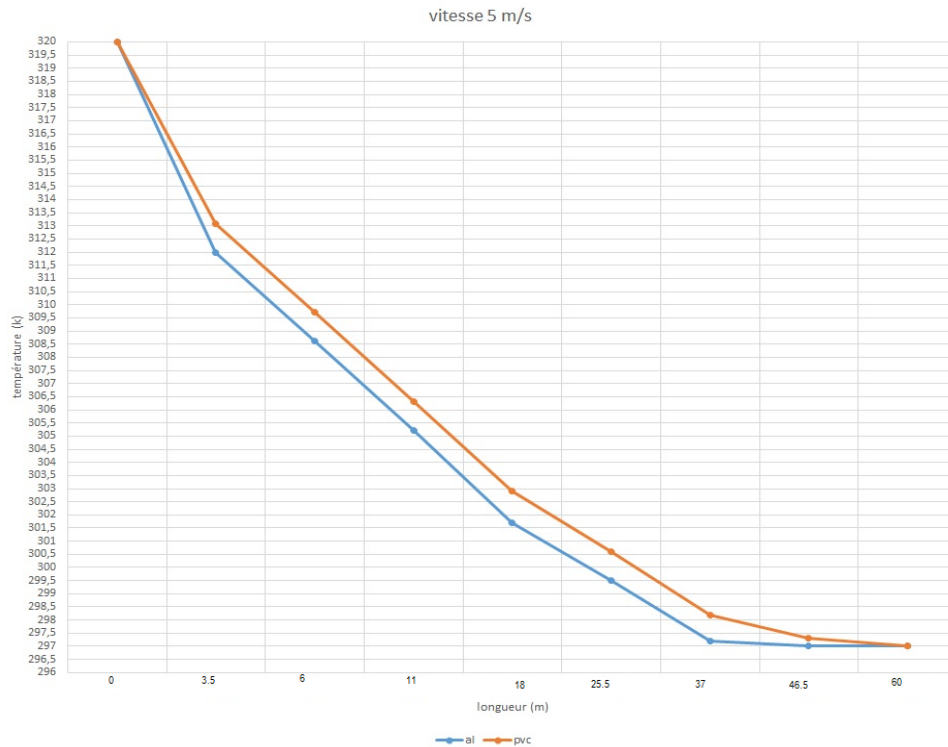


Figure 4.5 : Une courbe graphique montrant les changements de température le long de l'échangeur (Al, PVC) $v=5$.

V=8

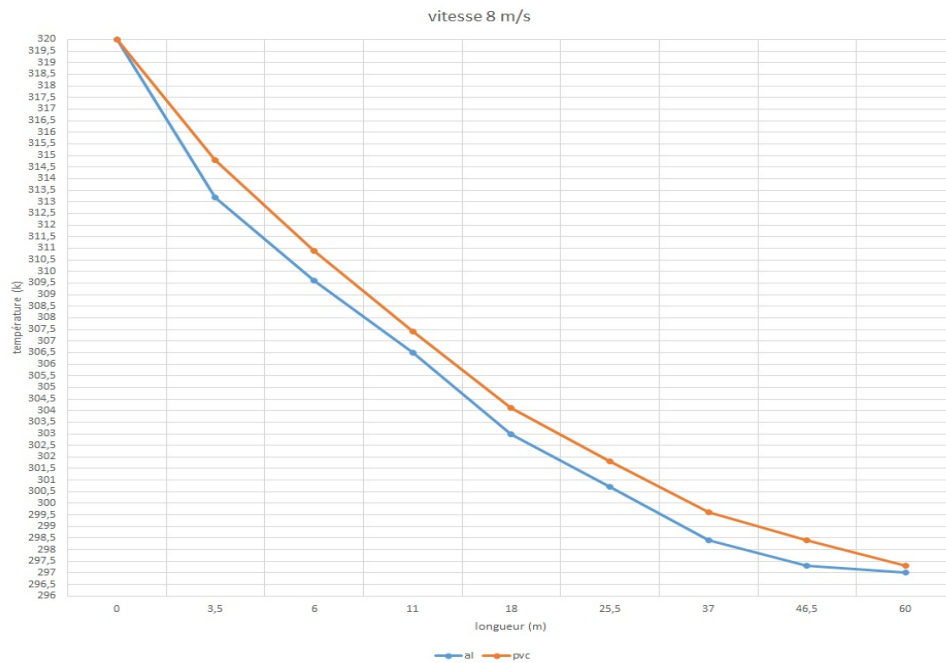


Figure 4.6 : Une courbe graphique montrant les changements de température le long de l'échangeur (Al, PVC) $v=8$.

4.3 Nos résultats montrent :

- Selon la longueur parcourue dans le tube, qu'à la sortie de l'échangeur la température de l'air se rapproche de la température d'équilibre (air-tube) c'est-à-dire la température du lieu considéré du sous sol. Le flux de chaleur échangée diminue en se rapprochant de la sortie de l'échangeur air-sol suivant la longueur parcourue.

- l'influence de la matière constituant le tube, selon qu'elle est isolante ou bonne conductrice de la chaleur.

Comme exemple d'isolant thermique nous avons choisis le matériau : PVC, la diffusion de la chaleur de l'air vers le sol à travers l'épaisseur du tube se trouve diminuée et par conséquent le refroidissement aussi.

Par contre pour le cas de l'aluminium qui est relativement plus conducteur thermique, le refroidissement est plus important. En effet l'évacuation de la chaleur échangée à travers la paroi du tube est plus favorisée que dans le cas du PVC.

- Un autre facteur est mis en évidence est celui du débit ou de la vitesse d'écoulement de l'air à l'intérieure du tube. L'échange de chaleur par convection air- paroi du tube, est défavorisé par l'accroissement de la vitesse d'écoulement de l'air, par contre au cas où la vitesse diminue l'échange de chaleur est agrandis et par conséquent le refroidissement.

4.4 Conclusion :

Nous avons mené cette étude numérique en utilisant le code de calcul FLUENT. Le régime d'écoulement considéré est turbulent stationnaire. Elle concerne l'échangeur air /sol de forme zigzag, enfouis dans le sous sol à une profondeur où la température reste constante en équilibre avec la température de paroi du tube. L'air entrant dans l'échangeur est l'air ambiant extérieur considéré ici chaud. L'ensemble de nos résultats présentés, caractérisent le refroidissement de l'air chaud entrant dans l'échangeur géothermique air / sol.

Ils montrent l'influence de différents paramètres sur l'échange de chaleur air-tube (refroidissement dans notre cas). Ces paramètres sont : l'écart de température entre l'air et le tube, le débit d'écoulement et la nature du matériau du tube de l'échangeur.

Conclusion générale

Dans cette étude nous avons considéré l'écoulement turbulent et stationnaire d'un fluide dans un échangeur air /sol d'une géométrie considérée à parois maintenues à une température moins élevée que la température ambiante.

La configuration étudiée est simulée numériquement par le code fluent résolution directe des équations de Navier –Stokes.

Les résultats obtenus pour des vitesses très différentes sont utiles et donnent beaucoup d'informations sur le comportement dynamique de l'échangeur de chaleur

Les résultats de notre étude montrent l'influence des paramètres sur l'échange de chaleur air-tube (refroidissement dans notre cas).

Les paramètres sont l'écart de température entre l'air et le tube .Aussi le débit et la nature du matériau de l'échangeur sont également deux facteurs d'influence.

Bibliographie

- [1] B. Kaboré, S. Kam, G.W.P. Ouédraogo, B. Zeghmati and D.J. Bathiébo, " Echangeur de chaleur air-sol à Ouagadougou: Revue de la littérature, étude analytique expérimentation" , Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°3, pp. 363-375, 2017.
- [2] M. Benhammou et B. Draoui, "Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie", Revue des Energies renouvelables, Vol. 15 N°2 (2012) pp.275-284.
- [3] B. Mebarki, B. Draoui, S. Abd essemmed, A. Keboucha, S. Drici and A. Sahli, " Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar", des énergies renouvelables, Vol. 15 N°3 pp. 465-478, 2012.
- [4] N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi et S.Youcef Ali, " Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra", Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3, 399 – 406p, 2010.
- [5] P. F. Olivier and M. Denis, "modélisation des systèmes géothermiques à boucles horizontales pour chauffer les bâtiments et prévenir la fonte du pergélisol", mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maitrisées sciences appliquées, université de Montréal, 99p, 2010.
- [6] P. Hollmuller, 'Utilisation des Echangeurs Air/Sol pour le Chauffage et le Rafrâichissement des Bâtiments', Thèse de Doctorat, Université de Genève, 125 pp, 2002.
- [7] Boureia KABORE, Siée KAM, Amadou KONFE et Dieudonné Joseph BATHIEBO " Étude analytique du fonctionnement annuel d'un puits provençal pour la détermination des différences de température, des flux thermiques et des périodes de refroidissement dans une habitation à Ouagadougou", Revue des Energies Renouvelables Vol .13 N°1,118 – 128p, 2017.
- [8] M. E. Ben hamza, A. Brima, S. Houda, L.Serrir" Étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur air/sol horizontal ", Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°3, pp. 1-9, 2017.

- [9] AD Salah Eddine "Dimensionnement d'un échangeur air/sol enterré destiné au rafraîchissement de l'air", Mémoire de master, Université de Biskra 2014.
- [10] BENDJENIDI Bachir, ADDOUN Ben aissa" Simulation d'un échangeur de chaleur air /sol de forme spirale ", Mémoire de magistère, Université de Ouargla 2017.
- [11] N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi et S.Youcef Ali, Le rafraîchissement par la géothermie : étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra " Revue desEnergies Renouvelables Vol. 13 N°3 pp (399 – 406), (2010).
- [12] Salma OUALI, "Etude Géothermique du sud de l'Algérie", Mémoire de magistère, Université de Boumerdes 2006.
- [13] Mohamed Aymen KETHIRI"Exploitation de géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation des palmiers dattiers dans la région de Biskra ", Mémoire de master, Université de Biskra 2019.
- [14] Romuald Jobert, Le puits canadien ou puits provençal, Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Lyon (CETE), (novembre 2005).
- [15] L.Ozgener, Renvie sur les analyses expérimentales et analytiques des systèmes d'échangeur d'humidité terre-air (EAHE) à Turek. Revues sur les énergies renouvelables et durables, vol. 15, pages 4483 à 4490, 2011.
- [16] Mouloud AISSANI.et ALL Simulation des Flux Thermiques lors du soudage TIG et Prédiction de la taille des zones du cordon dans les tôles d'Acier 304L
- [17] Jean Lemale. La géothermie. Le moniteur. © Dunod, Paris 2009. ISBN 978-2-10-0052879-05.
- [18] Belloufi Yousef," Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux ", Mémoire de magistère, Université de Biskra 2012.
- [19] M. Saad-Eddine, " Identification et analyse des principaux facteurs influant Comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré", Mémoire de magister, Université de Biskra, pp. 6-40, 2012.
- [20] Hocine TERCHA," Etude numérique d'un échangeur géothermique," Mémoire de master, Université de Biskra 2019.
- [21] modelisation numerique en mecanique des fluides prise en main ansys/fluent.

[22] renan hilbert "modelisation numerique en mecanique des fluides prise en main ansys/fluent",2015.

ملخص

مهما كانت درجة حرارة الهواء على سطح الأرض متغيرة . فان درجة حرارة التربة ثابتة على عمق معين. هذه الخاصية يمكن استغلالها في التبريد, باستعمال مبادل حراري (هوائي/ارضي) ذو شكل متعرج. لقد قمنا في هذه الدراسة بمحاكاة عددية اجرية علي مبادل حراري ارضي , حيث استعملنا برنامج ansys WorkBench . حيث قمنا بحساب التغير الذي يحدث لدرجة الحرارة علي طول المبادل الحراري. ثم قمنا بتحليل تأثير بعض العوامل مثل: سرعة دخول الهواء و نوع معدن المبادل.

الكلمات المفتاحية : مبادل حراري (هوائي/ارضي) , محاكاة عددية , ورك بانث.

Résumé

Quelle que soit la température de l'air à la surface du sol variable, la température du sol est constante à une certaine profondeur Cette propriété peut être exploitée en refroidissement, à l'aide d'un échangeur de chaleur (air / sol) en forme de zigzag.

Dans cette étude, nous avons réalisé une simulation numérique sur un échangeur de chaleur au sol, à l'aide du programme ansys WorkBench. Là où nous avons calculé le changement de température le long de l'échangeur de chaleur, nous avons ensuite analysé l'effet de certains facteurs tels que: la vitesse d'entrée dans l'air et le type de métal de l'échangeur.

Mots clés: échangeur de chaleur (air / sol), simulation numérique, bouquet de hanches