

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

**UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION**

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Génie
Mécanique
Spécialité : Energétique

Intitulé du sujet

**Etude paramétrique d'un échangeur vertical
air-sol**

Présenté Par :

**SLIMANI Lilia
KECILI Idir**

Devant le jury composé de :

M. HAMDAD

Président

M.NEBBALI

Promoteur

M.MEDJKANE

Examineur

Soutenu le 01/10/2016

Promotion : 2015/2016

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce rapport, nous remercions avant tout, Dieu le Tout Puissant de nous avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à remercier en particulier Mr NEBBALI Rezki, notre promoteur, qui a été remarquablement patient avec nous, et qui nous a beaucoup aidé et guidé par ses conseils, durant toute la période de ce projet de fin d'études.

Nous remercions les membres du jury qui ont pris sur leur temps et aménager leur volonté pour examiner et porter une analyse critique sur mon travail.

Nous remercions vivement nos parents et nos proches pour tous les efforts qu'ils ont déployés pour nous aider et nous soutenir moralement et financièrement.

Nous adressons pareillement nos remerciements à tous les enseignants du Département de mécanique qui ont contribué à notre formation pendant ces années.

Et enfin nous tenons à remercier particulièrement M. Tizi Rabah pour nous avoir porté aide.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail aux deux êtres
qui me sont les plus chères au monde : mon
père et ma mère, que dieu me les garde pour
toujours (inchallah)*

A mes frères et sœurs

*A toute la famille de Département de Génie
Mécanique*

Et à tous ceux que je connais de près ou de loin

Slimani. L

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à:

Mes très chers parents ;

Ma sœur et son époux ;

Mes frères ;

Ma grand-mère ;

Ma grande famille, oncles, tantes, cousins et cousines ;

Mes amis d'enfance ;

*Au groupe « les enfants » avec qui j'ai passé cinq
merveilleuses années à la Résidence Universitaire
Tanda.II, et qui m'a soutenu et encourager jusqu'au
bout ;*

Les GP ;

Achrik, Pedro, Zahia ;

Toute la famille génie mécanique ;

La promotion MII énergétique 2015-2016 ;

Tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Kecili. I

Sommaire

Sommaire

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I

1. Définition de la géothermie..... 3

1-2. Types de géothermie 4

1-3. Phénomène d'emmagasiner et de dégagement de chaleur..... 5

2. Principe de fonctionnement d'un échangeur air/ sol 6

3. Eléments de la conception d'un puits canadien/provençal..... 8

3-1. Nature du sol 8

3-2. Critères d'enfouissement..... 9

4. Recommandation de mise en œuvre..... 9

4-1. Géométrie et dimensions de l'échangeur 10

4-2. Longueur des tubes : 10

4-3. Diamètre des tubes : 11

4-4. Profondeur d'enfouissement de tubes : 11

4-5. Espacement entre les tubes..... 11

4-6. Matériau constitutif des tubes 11

4-7. Pente de conduite 12

4-8. prise d'air..... 12

5. Ventilation et qualité d'air intérieur 13

6. Avantages et inconvénients de l'échangeur air/sol 14

7. Echangeur vertical..... 15

Conclusion..... 16

Chapitre II

1. Introduction 17

2. Distribution de la température dans un milieu semi-infini..... 17

2-1. Définition 17

Sommaire

2-2. Condition aux limites et initiales.....	19
Conclusion.....	22
Chapitre III	
1. Introduction	23
2. Position du problème.....	24
3. Définition du logiciel Gambit	25
4. Procédure de résolution	25
4-1. Réalisation de la géométrie :	25
4-2. Génération du maillage	26
4-3. Conditions aux limites.....	27
4-4. Milieux fluide et solide	27
4-5. Résolution sous Fluent	27
4-5-1. Choix de la session.....	27
4-5-2. Importation de la géométrie (*.msh).....	28
4-5-3. Vérification du maillage importé	28
4-5-4. Vérification de l'échelle	29
4-5-5. Choix du solveur	29
4-5-6. Activation de l'équation de l'énergie	30
4-5-7. Choix du modèle de turbulence.....	30
4-5-8. Définir les propriétés des matériaux.....	31
4-5-9. Définir les conditions aux limites.....	32
4-5-10. Choix de solution	32
4-5-11. Initialisation des calculs	33
4-5-12. Sauvegarde du fichier *.cas.....	33
4-5-13. Choix des critères de convergence.....	33
4-5-14. Exécution des calculs	34
5. Interprétation des résultats	36

Sommaire

Conclusion générale	47
---------------------------	----

1-Nomenclature

symbole	signification	unité
C_p	Capacité thermique massique	J/kg.K
D	Diamètre	m
L	Longueur de l'échangeur	m
\dot{m}	Débit massique	Kg/s
T_i	Température initiale	°C
T_s	Température du sol	°C
x,y,z	Variables d'espace	m
q	Densité de flux de chaleur	w/m ²
Z	Profondeur	m
erf	Fonction d'erreur	-
t	Temps	s

2-Caractères grecs

symboles	signification	unités
λ	Conductivité thermique du sol	w/m.K
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
α	Diffusivité thermique	m ² /s
θ	Température	°C
χ	Teneur du matériau	m ³ matériau/m ³ sol
Φ	Flux de chaleur	w

3. Sigles

Sigle	Signification
PVC	Polyvinyl chloride (Polychlorure de vinyle)
VMC	Ventilation mécanique contrôlée
TPC	Tube de protection des câbles
CFD	Computational fluid dynamiqus

Liste des figures

Chapitre I

Figure I 1 :Schéma descriptif des niveaux de températures dans le sol.....	4
Figure I 2 :Différents types de géothermie et leurs utilisations	5
Figure I 3 :Schéma d'un échangeur air-sol (puits canadien/provençal).....	6
Figure I 4 :composants d'un puits canadien.....	7
Figure I 5 :conductivité thermique du sol en fonction de la teneur en eau	8
Figure I 6 :Schémad'installation d'un puits canadien.....	12
Figure I 7 :Couplage d'un puits canadien à une VMC.....	13
Figure I 8 :Echangeur verticale air/sol	15

Chapitre II

Figure II 1Propagation de la chaleur dans un corps semi-infini	17
Figure II 2Représentation schématique d'un milieu semi-infini.....	18
Figure II 3Evolution de la densité de flux de chaleur au cours du temps	22

Chapitre III

Figure III 1 :principe d'un échangeur vertical coaxial air/sol.....	24
Figure III 2 :construction de la géométrie	25
Figure III 3 :générations du maillage.....	26
Figure III 4 :Paramètres thermo-physiques du sol et de l'air.....	27
Figure III 5 :mode d'utilisation du logiciel fluent.....	28
Figure III 6 :Vérification du maillage	28
Figure III 7 :Vérification de l'échelle	29
Figure III 8 :choix du solveur.....	29
Figure III 9 :Activation de l'équation de l'énergie	30
Figure III 10 :régime d'écoulement	30
Figure III 11 :propriétés du fluide	31
Figure III 12 :propriétés du solide.....	31
Figure III 13 :équation à résoudre	32
Figure III 14 :initialisation des calculs	33
Figure III 15 :critères de convergence.....	34
Figure III 16 :Exécution des calculs.....	35
Figure III 17 :Evolution de la température à la sortie de l'échangeur au cours du temps pour le cas ou D=10cm, L=2m	37

Liste des figures

Figure III 18 :Evolution du flux de chaleur à travers la paroi de l'échangeur au cours du temps : D=10cm, L=2m	37
Figure III 19 :Température de l'air et du sol à t=8h, D=10cm, Débit = 3g/s, L=2m	38
Figure III 20 :Température de l'air et du sol à t=8h, D=10cm, Débit=10g/s, L=2m	38
Figure III 21 :Température de l'air et du sol à t=8h, D=10cm, Débit=20g/s, L=2m	39
Figure III 22Evolution de la température à la sortie de l'échangeur au cours du temps : D=20cm, L=2m	40
Figure III 23 :Evolution du flux de chaleur à travers la paroi de l'échangeur au cours de temps :D=20cm,L=2m	40
Figure III 24 :Température de l'air et du sol à t=6h40min, D=20cm, Débit=20g/s, L=2m.....	41
Figure III 25 :Température de l'air et du sol à t=7h05min, D=20cm, Débit=20g/s, L=2m.....	41
Figure III 26 :Température de l'air et du sol à t=5h25min, D=20cm, Débit=40g/s, L=2m.....	42
Figure III 27 :Température de l'air et du sol à t=5h50min, D=20cm, Débit=40g/s, L=2m.....	42
Figure III 28 :Evolution de température à la sortie de l'échangeur au cours du temps : D=20cm L=4m	44
Figure III 29 :Evolution du flux de chaleur à travers la paroi de l'échangeur au cours du temps : D=20cm, L=4m	44
Figure III 30 :Température de l'air et du sol à t=5h50min, D=20cm, Débit=40g/s, L=4m.....	45
Figure III 31 :Température de l'air et du sol à t=6h40min, D=20cm, Débit=40g/s, L=4m.....	45
Figure III 32 :Température de l'air et du sol à t=3h20min, D=20cm, Débit=80g/s, L=4m.....	46
Figure III 33 :Température de l'air et du sol à t=4h10min, D=20cm, Débit=80g/s, L=4m.....	46

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les études démographiques indiquent que la population des pays en développement 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 [1].

L'énergie renouvelables ou spécialement le rafraichissement par la géothermie, est une technique utilisée traditionnellement dans notre région du SAHARA, Les gens construisent leurs maisons en sous sol (les caves) pour rafraichir leurs habitations en été, c'est dans cette perspective que l'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 nouvelle technique consiste à alimenter une habitation avec de l'air frais qui passe par un tube enterré à une certaine profondeur sous le sol, quelles que soient les conditions climatiques extérieures.

Dans ce travail, il s'agit de voir l'influence de quelques paramètres (diamètre et longueur ainsi que le débit d'air) sur les performances thermiques, à savoir l'efficacité et l'évolution de la température de sortie de l'air de cet échangeur air/sol.

Pour atteindre les objectifs fixés dans ce travail, on a traité cette problématique en trois chapitres essentiels :

Le premier chapitre comporte la description des échangeurs utilisés dans le sol et les bases fondamentales et techniques du rafraichissement par échangeur géothermique.

Dans le second chapitre on s'est intéressé à décrire le phénomène de transfert thermique dans le sol ; une résolution analytique est présentée pour le cas d'un milieu semi-infini dont la température à la surface est imposée. Ce qui a permis d'évaluer l'évolution du flux de chaleur au cours du temps.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre on montre les résultats obtenus. La distribution de la température dans l'échangeur ainsi que l'évolution de la température de sortie d'air au cours du temps ont constitué les principales variables de sortie du modèle.

On conclura notre étude par une conclusion générale résumant le travail fait et les perspectives qui en découlent.

Chapitre I

Généralités sur les échangeurs
air/sol

1. Définition de la géothermie

La géothermie est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre. Par extension, ce terme désigne aussi l'ensemble des applications techniques qui permettent d'exploiter les sources d'énergie géothermique.

En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau) en faisant un ou plusieurs forages profonds.

La terre est chauffée ou refroidie en même temps par : le soleil, l'air, le vent et l'eau de pluie. Ainsi, le sol constitue un réservoir qui reçoit en permanence de l'énergie sous forme de calories. Le gradient de température n'est pas le même entre le centre de la terre et la couche terrestre.

Plus l'on fore profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente. En moyenne, l'augmentation de température est de l'ordre de 20 à 30 degrés par kilomètre. Ce gradient thermique dépend beaucoup plus de la région du globe considérée.

Il peut varier de 3°C par 100 m (régions sédimentaires) jusqu'à 15°C ou même 30°C (régions volcaniques, zones de rift comme en Islande ou en Nouvelle-Zélande).

La radioactivité naturelle des roches produisant des quantités énormes d'énergie réchauffe les nappes phréatiques souterraines. Si elle trouve une faille, cette eau chaude remonte par des puits artésiens et produit des sources chaudes, dans le cas contraire, il faut avoir recours au pompage de l'eau chaude profonde.

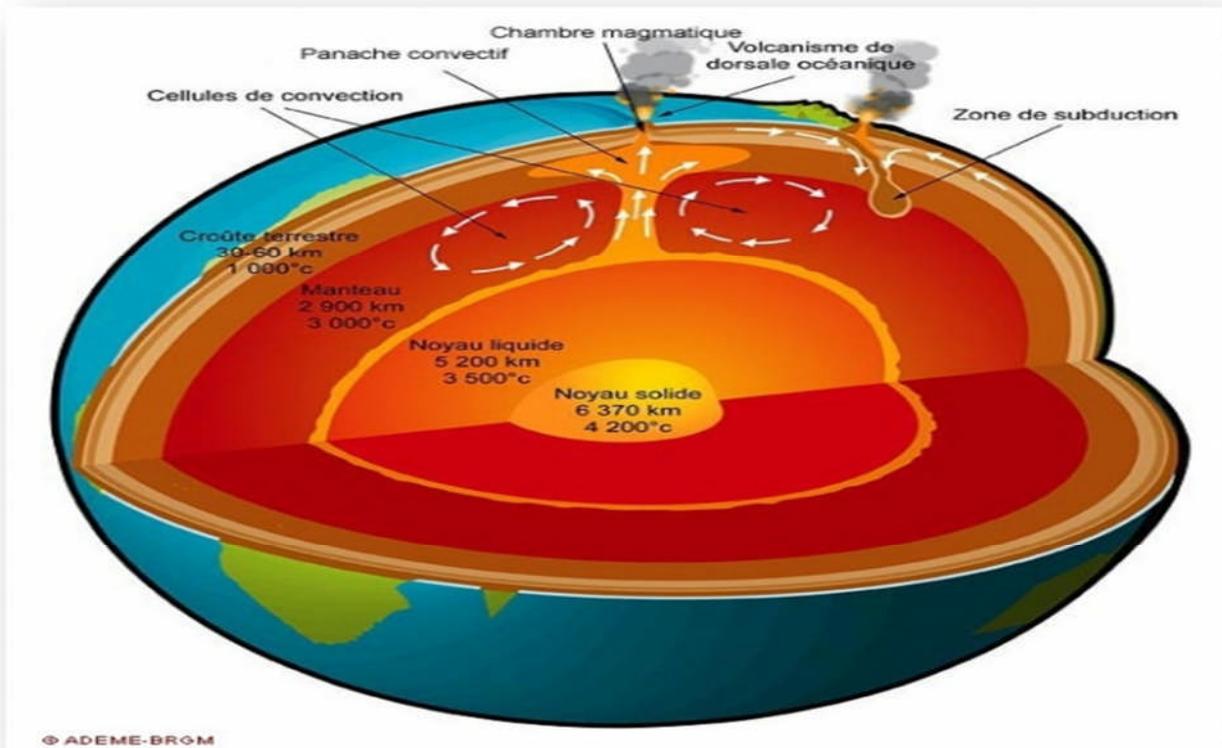


Figure (I-1) Schéma descriptif des niveaux de températures dans le sol

1-2. Types de géothermie

On distingue quatre types principaux de géothermie :

- ❖ **La géothermie très basse énergie** : La température du fluide caloporteur étant inférieure à 30 degrés environ. C'est le type de géothermie le plus utilisé pour les pompes à chaleur géothermiques. En effet, la température disponible n'est pas directement exploitable, il est nécessaire de la récupérer par un procédé facilitant son extraction.
- ❖ **Énergie géothermique à basse énergie** : Pour l'utilisation de fluides à des températures comprises entre 30 et 100°C. Cela concerne les installations industrielles et les établissements thermaux.
- ❖ **Énergie géothermique à température moyenne** : Pour l'utilisation d'eau surchauffée et des vapeurs, à des températures comprises entre 100 et 180°C. En chauffant un fluide secondaire plus volatil, on peut produire de l'énergie électrique.

Généralités sur les échangeurs air/sol

- ❖ **Énergie géothermique à haute température** : Pour l'utilisation d'eau surchauffée et des vapeurs, à des températures supérieures à 180°C. Cela permet de produire de l'énergie électrique.

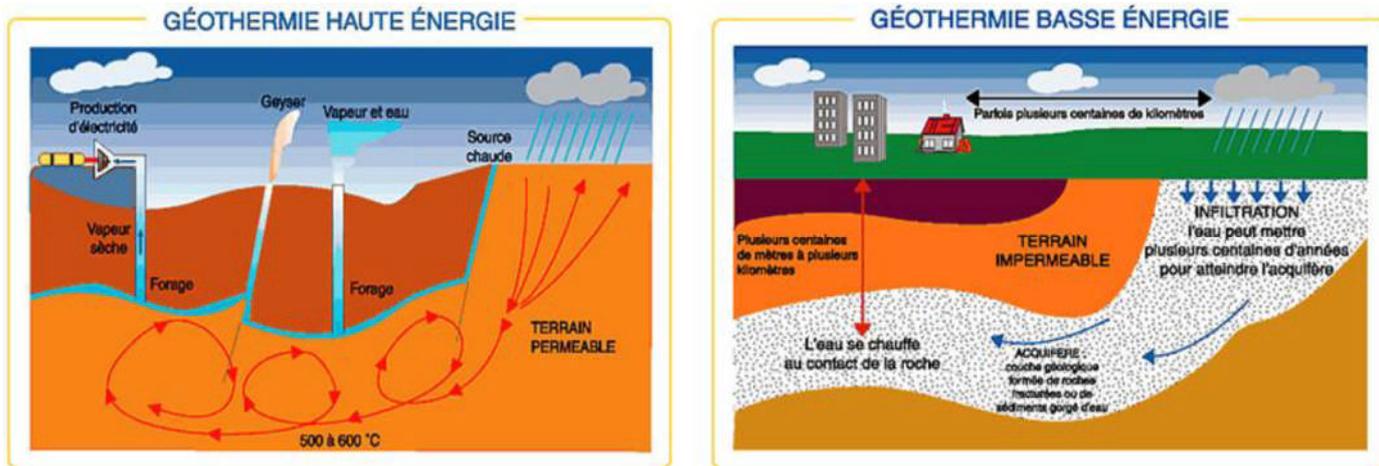


Figure (I.2) : Différents types de géothermie et leurs utilisations

1-3. Phénomène d'emmagasinage et de dégagement de chaleur

Le système d'échange entre l'air et le sol est produit par la différence de température entre la surface de la terre et celle en profondeur.

Cette profondeur est bien déterminée pour chaque utilisation de cette énergie, dans la présente étude on s'intéresse aux échanges thermiques entre l'air et le sol d'une profondeur de 1 à 5m.

Le sol emmagasine l'énergie thermique qui provient du soleil pendant l'été avec une durée de jour relativement longue par rapport à une journée d'hiver. Il est donc possible d'exploiter le sol comme source de chaleur en hiver et puits en été. Pour ce faire, on utilise des échangeurs de chaleurs air/sol.

2. Principe de fonctionnement d'un échangeur air/ sol

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique entre deux milieux à de températures différentes. Au sein de la paroi séparatrice des deux milieux, le mécanisme de transmission de la chaleur est la conduction, et si l'une des surfaces ou les deux sont en contact avec un fluide ce sont presque toujours les phénomènes de convection qui prédominent. A titre d'exemple, on peut citer les échangeurs les plus courants tels que les radiateurs d'automobiles et les évaporateurs de climatiseur et bien sûr les échangeurs air/sol qui nous intéressent dans notre étude.

L'utilisation d'un échangeur air/sol, système appelé communément « puits canadien » et parfois « puits provençal », connaît un développement important depuis quelques années. Il consiste à utiliser comme entrée pour la ventilation de la maison, de l'air qui a préalablement circulé dans un tube enterré à une certaine profondeur. 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, alors qu'en été il est rafraîchi. Il s'agit ainsi du système de géothermie le plus simple qui soit, avec une consommation électrique nécessaire seulement au fonctionnement du ventilateur.

Ce système est utilisé traditionnellement en Amérique du nord pour maintenir les habitations hors gel sans chauffage pendant l'hiver pourtant très rigoureux. En été, il permet d'abaisser la température maximale de quelques degrés.

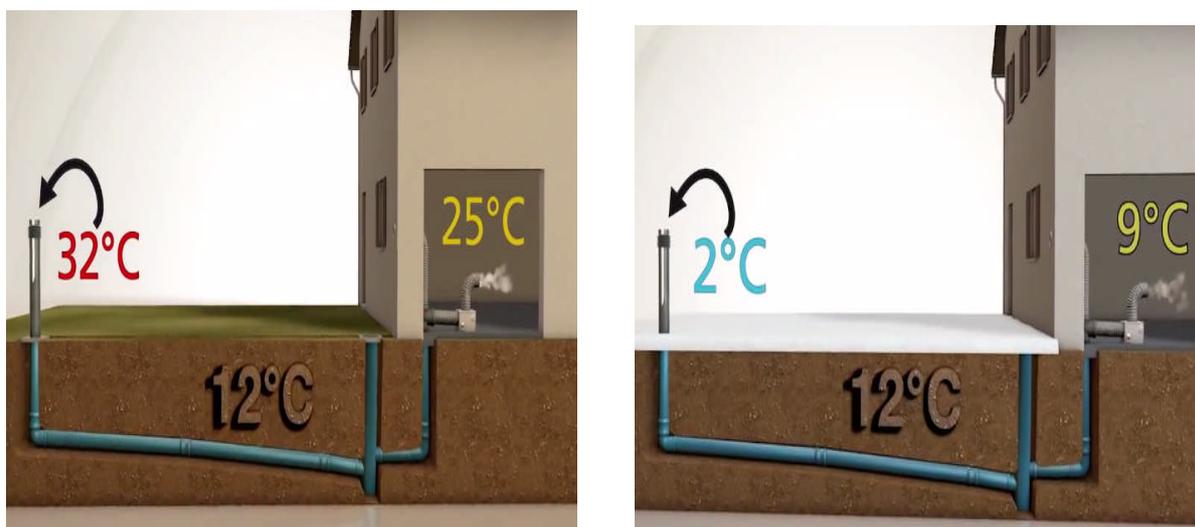


Figure (I-3).Schéma d'un échangeur air-sol (puits canadien/provençal)

Généralités sur les échangeurs air/sol

La température de la terre en profondeur varie très peu tout au long de l'année, et se situe aux alentours de 12 à 15 °C en fonction des régions, par conséquent en été l'air extérieur est rafraîchi en passant dans le puits qui devient alors un système de rafraîchissement naturel. En hiver l'air extérieur est réchauffé en passant dans le puits qui devient alors un système de préchauffage naturel. Ainsi, en utilisant l'inertie thermique du sol, le puits canadien est un moyen efficace de faire des économies d'énergie.

Le puits canadien est le seul moyen de ventilation passive permettant un rafraîchissement. Il n'est pas nécessaire de modifier l'installation pour qu'elle fonctionne correctement en été.

A l'intersaison la température extérieure et la température du sol étant pratiquement proche de celle de confort, qui est comprise entre 18 et 22°, le système peut être déconnecté par une dérivation ou bien fermé.

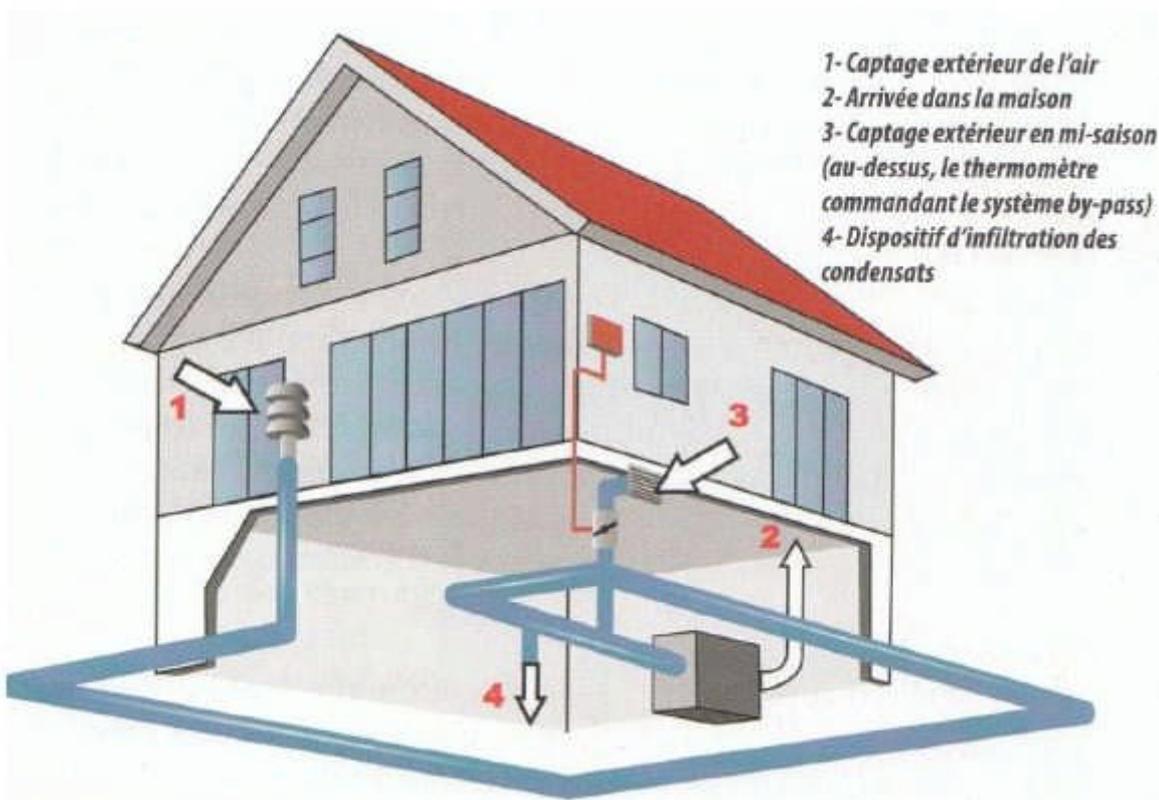


Figure (I-4) composants d'un puits canadien

Le puits canadien comporte :

- Une borne de prise d'air installée dans le jardin qui aspire l'air extérieur,
- des conduits extérieurs enterrés à 1,5 m de profondeur minimum,

- Un ventilateur qui rejette l'air à l'intérieur du logement,
- Un réseau de conduits intérieurs pour répartir l'air renouvelé dans les différentes pièces à travers des bouches d'aération.
- Des bouches d'extraction qui rejettent l'air vicié à l'extérieur,
- Un mécanisme appelé by-pass pour délivrer la température d'air la plus adéquate selon la période de l'année.

3. Eléments de la conception d'un puits canadien/provençal :

3-1. Nature du sol

La nature du sol est un facteur très important à prendre en compte lors de la conception d'un puits canadien. En effet, la capacité calorifique (comprend les capacités calorifiques de ses constituants : minéraux, matière organique, eau, air) et la conductivité thermique du sol (varie dans le temps, en fonction des évolutions de sa teneur en eau dues aux variations climatiques et au changement de saison) influencent très fortement les performances du puits.

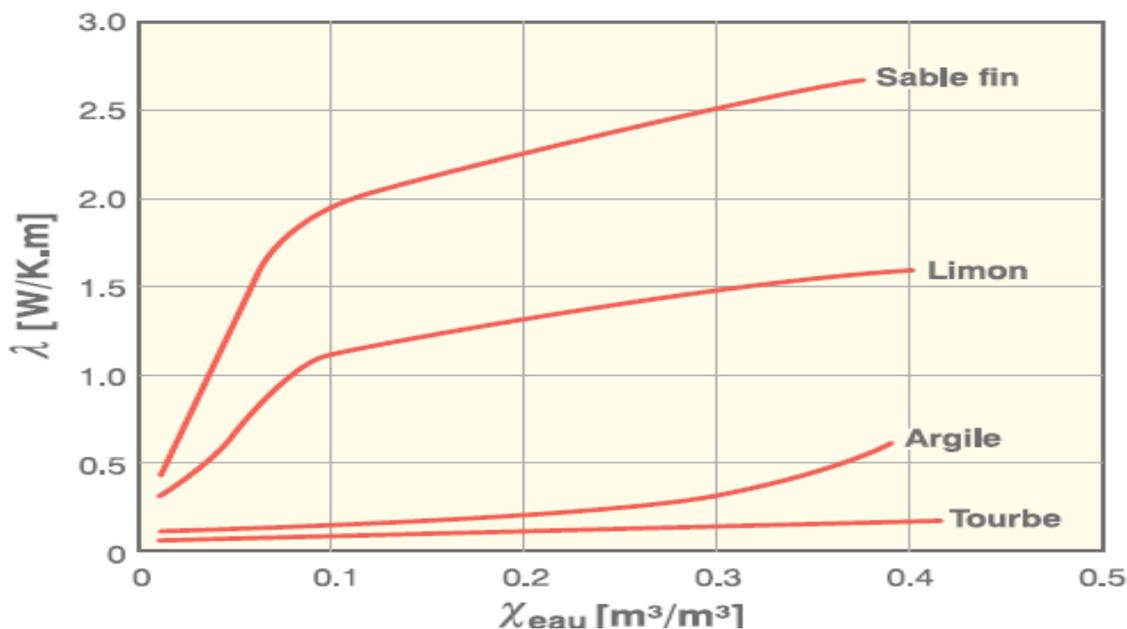


Figure (I-5). conductivité thermique du sol en fonction de la teneur en eau [2]

La figure (figure I-6) montre que le sol est d'autant meilleur conducteur de chaleur que sa teneur en eau augmente.

Généralités sur les échangeurs air/sol

Plus le sol est dense et humide, plus l'échange thermique sera important, en effet, un sol humide transmet mieux la chaleur. En termes de capacité calorifique, l'eau affiche une valeur autour de 4,2kj/kg.k, l'air ou le sable atteignent 0,9 à 1,2kj/kg.k. Un sol argilo sableux humide conduit bien mieux la chaleur qu'un sol sec constitué d'argile pure.

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. [3]

Dans tous les types de terrain, le conduit doit être entouré de sable pour assurer une bonne conductivité thermique et stabiliser les conduits.

La qualité du sol doit être estimée à la profondeur où les conduits vont être mis en œuvre.

3-2.Critères d'enfouissement

Pour mettre en place un puits canadien, il est préférable de disposer d'une grande surface dégagée pour l'enfouissement du conduit.

De plus, le coût d'installation d'un puits canadien/provençal dépend fortement du coût de terrassement. Ces deux éléments font qu'il est plus judicieux d'installer le puits pendant les travaux de fondation d'un bâtiment que pour équiper un bâtiment existant.

Les conduits doivent être situés à au moins deux mètres des fondations de la maison, si cette condition n'est pas respectée le conduit risque de capter les calories du logement.

Lors de l'enfouissement, il faut respecter une pente pour l'évacuation des condensats d'au moins 2%.

4. Recommandation de mise en œuvre

Pour déterminer les caractéristiques essentielles que doit avoir le puits selon les conditions climatiques et des besoins de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment, une étude thermique est indispensable.

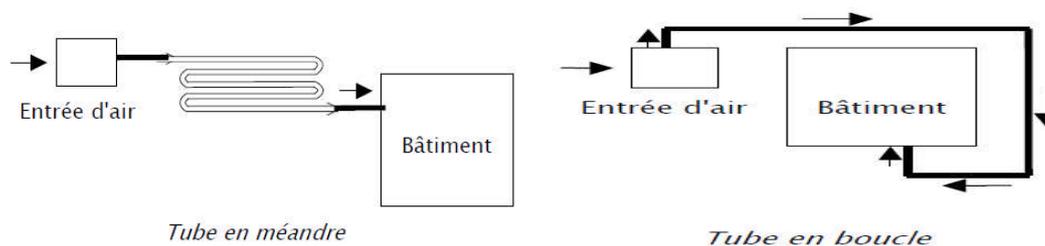
A partir du volume de l'habitat et sur la base d'un volume d'air à renouveler par heure: l'on détermine le nombre de tuyaux ainsi que leur diamètre pour une vitesse de circulation d'air, et la longueur totale selon le débit d'air, la surface d'échange et la température du sol.

Les conduits doivent résister à la pression de la terre de recouvrement, ils doivent être totalement étanches grâce à des joints profilés.

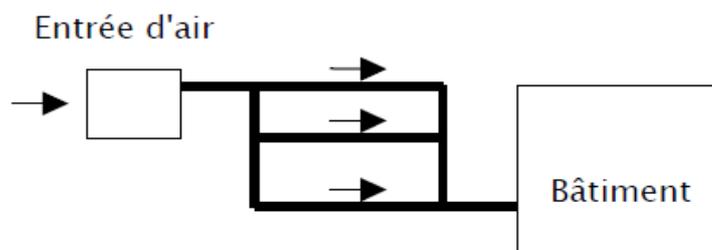
4-1.Géométrie et dimensions de l'échangeur

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.

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 et d'avoir un rayon de courbure d'au moins 50 cm. [4]. Deux dispositions sont majoritairement utilisées lorsque le puits ne comporte qu'un seul tube :



La disposition souvent utilisée lorsque le puits est constitué d'un faisceau de tubes est la suivante :



4-2.Longueur des tubes :

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.

4-3.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. [5]

4-4.Profondeur d'enfouissement de tubes :

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 mais cela augmente les contraintes de terrassement et de pose du conduit. [6]

4-5.Espacement entre les tubes

Respecter une distance minimum de 1 mètre entre les collecteurs si le réseau est divisé en tronçons parallèles.[4]

4-6.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 de l'échangeur. 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.

4-7. Pente de conduite

La vapeur d'eau contenue dans l'air circulant dans le conduit enterré peut se condenser en fines gouttelettes quand celui-ci est en contact avec les parois intérieures froides du puits. Or, ceci favorise le développement de bactéries pathogènes, pouvant altérer la qualité de l'air neuf. C'est pourquoi, le puits dont le conduit est incliné environs de 2%, doit obligatoirement être doté d'un système d'évacuation des condensats. [4]

4-8. prise d'air

La hauteur de la prise d'entrée est environ à 1,10 m pour limiter l'encrassement, et elle dotée d'un chapeau de protection qui permet d'éviter les infiltrations d'eau de pluie à l'intérieur du puits et d'une grille de protection pour éviter l'intrusion de rongeurs ou d'insectes.

D'autre part, placée loin des sources de pollution, l'entrée d'air du puits canadien doit être munie d'un filtre, qui devra être changé 3 fois par an environ.

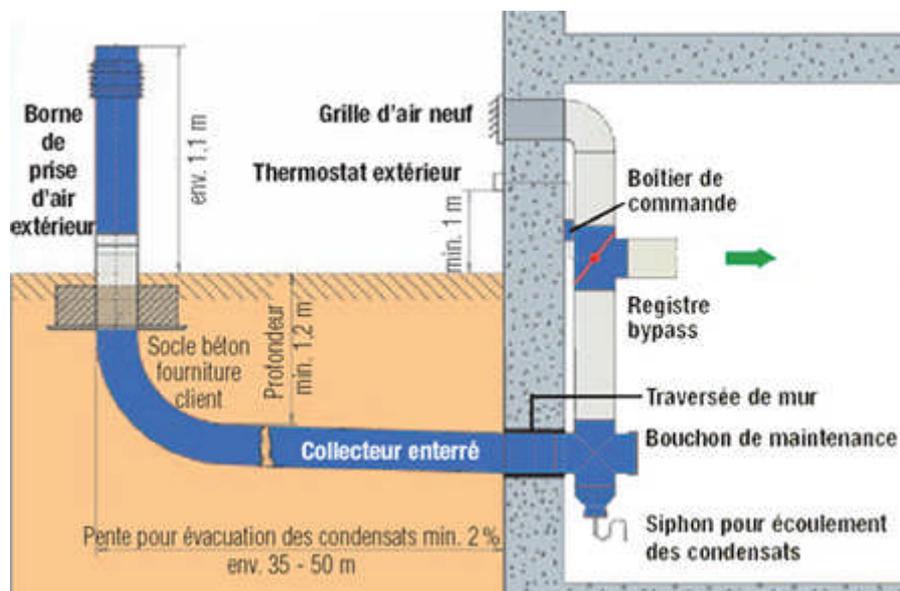


Figure (I-6). Schéma d'installation d'un puits canadien.

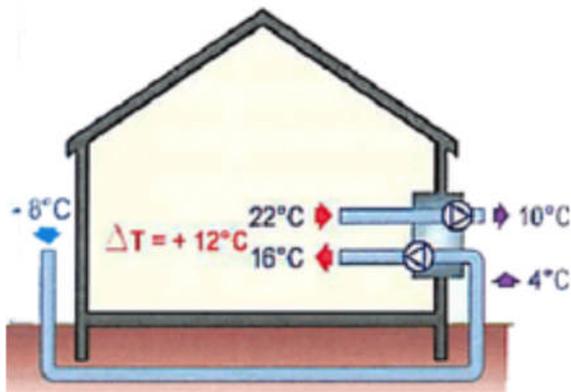
5. Ventilation et qualité d'air intérieur

L'utilisation des centrales double-flux VMC permet de réaliser d'importantes économies d'énergie.

EN HIVER

En hiver, l'air est préchauffé naturellement en captant la chaleur du sol et est introduit à une température supérieure à 0°C ;(figure I-7)

Afin de produire plus d'économies d'énergie, il est introduit via un caisson de ventilation VMC double-flux qui récupère les calories de l'air extrait.



EN ÉTÉ

En été, l'air est rafraîchi naturellement en captant les frigidités du sol et rentre dans la maison ou l'immeuble à 20°C (dans l'exemple ci-dessous). Il est nécessaire de by-pass le récupérateur d'échange sur le caisson VMC afin d'introduire en direct l'air frais.

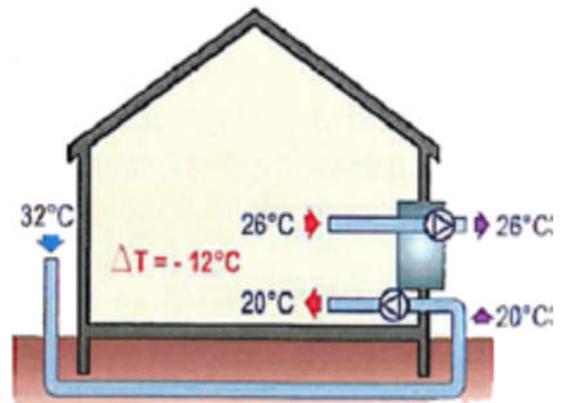


Figure (I-7) :Couplage d'un puits canadien à une VMC

Pour le bien être des habitats et préserver le bâti, une ventilation mécanique contrôlée est indispensable.

6. Avantages et inconvénients de l'échangeur air/sol

➤ **Avantage**

- **Economiques** : faible consommation électrique.
- **Ecologiques** : les puits canadien n'utilisent pas de fluides frigorigènes, ni de compresseur et consomme peu d'électricité.
- **La maintenance** est restreinte.
- **L'investissement** est en fait reporté sur l'enfouissement des puits dans le sol.
- **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.
- Possibilité de raccorder le puits à un caisson de ventilation mécanique contrôlé (VMC) double flux.

➤ **Inconvénients**

- Efficacité des grilles anti-rongeurs imparfaites
- Difficultés pour nettoyer correctement le ou les conduits
- Nettoyage régulier des filtres nécessaire
- Risque pour la santé s'ils sont mal entretenus (développement des organismes pathogènes «Légionellose »(dû à la mauvaise évacuation de condensat).

7. Echangeur vertical

Le principe du puits canadien vertical est universellement connu. Ce système de tubes fournit un refroidissement ou un chauffage naturel de l'air entrant dans la maison. Cet air chaud ou froid récupéré est ensuite utilisé au moyen d'un système de ventilation équilibré pour apporter de l'air frais refroidi ou réchauffé dans l'habitation.

Il permet des rendements élevés supérieurs sur une surface au sol nettement plus petite. Par ailleurs la surface totale du terrain n'est pas gênée par un système de tuyauterie et permet d'aménager normalement le jardin avec des arbres, buissons, étangs. [7]

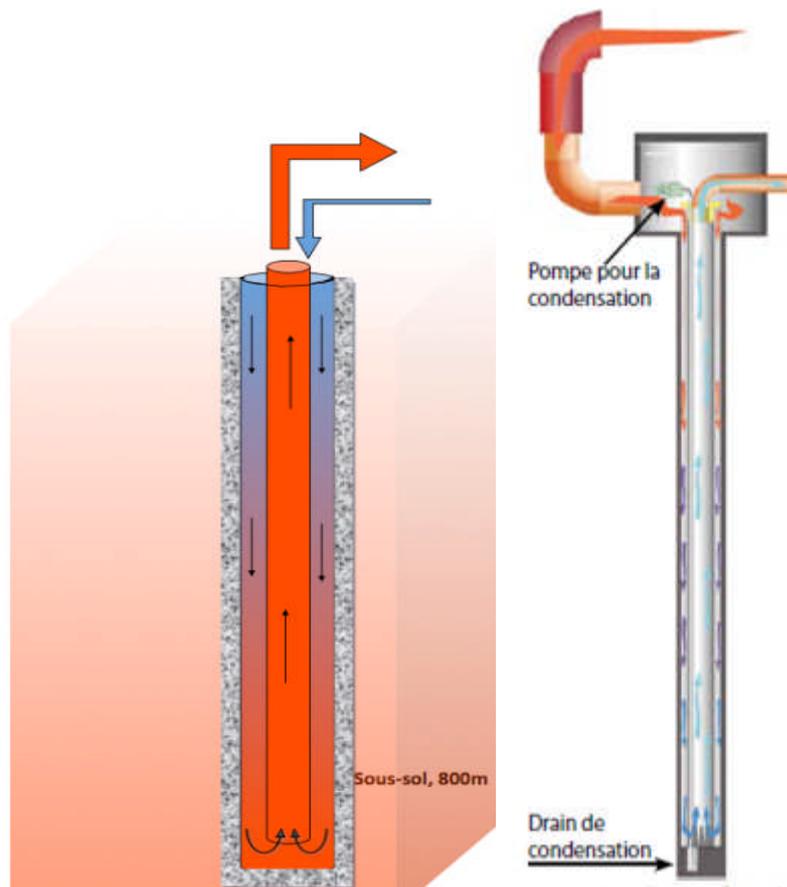


Figure (I.8) Echangeur verticale air/sol

Conclusion

L'échangeur air-sol (puits canadien) est un système de rafraîchissement du bâtiment très peu consommateur d'énergie qui exploite l'inertie thermique du sol. Le puits canadiens se répand et l'expérience montre un appoint énergétique réel dans les logements. Le puits canadien doit cependant être considéré comme un complément à un système de chauffage ou de refroidissement. Un récupérateur de chaleur sur l'air de ventilation permet de récupérer une quantité d'énergie perdue par ventilation. Cependant la qualité de l'air en période estival impose certaines précautions, d'autre part en ville les contraintes spatiales sont telles que l'installation d'un puits canadien est généralement difficile. A cet effet, on recommande la mise en œuvre de puits canadien, verticaux qui permettent de meilleurs rendements à moindre coûts.

Chapitre II

Transfert de chaleur dans un
milieu semi-infini

1. Introduction :

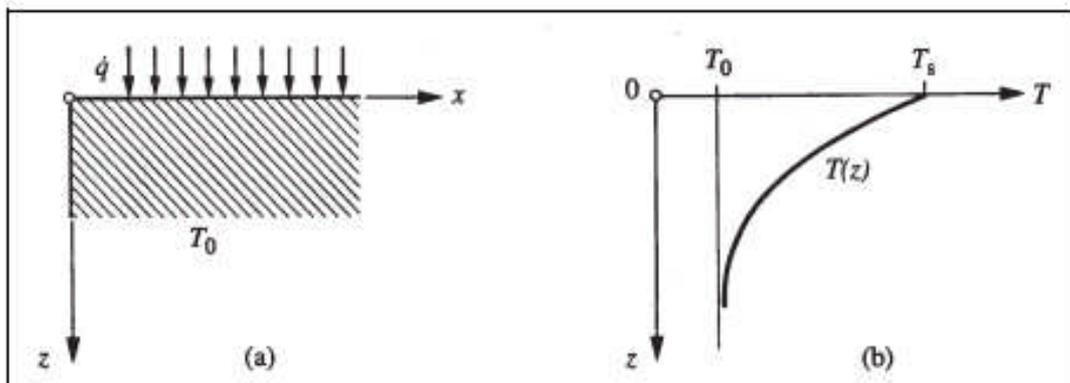
Dans les échangeurs thermiques courants, deux fluides de températures différentes sont en mouvement depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Dans le cas d'un échangeur air-sol, l'une de ces sources est l'air qui circule dans le conduit enterré, l'autre est le sol placé au contact des tubes. Ce dernier joue le rôle de la source froide pendant la saison chaude, et la source chaude pendant la saison froide. La température de l'air à l'entrée des tubes et la température du sol constituent les conditions aux limites pour l'échangeur.

La température de l'air à l'entrée de l'échangeur correspond à la température de l'air extérieur, elle est facilement mesurable ou accessible à partir de bases de données météorologiques horaires. Par contre, la température du sol non perturbée ne peut être connue sans l'usage d'un dispositif de mesure difficile à mettre en œuvre (sonde thermique placée à la profondeur d'enfouissement des tubes). Il n'existe aucune base de données qui permet de fournir cette température, c'est pourquoi une modélisation semble nécessaire, afin d'obtenir la température du sol à tout instant et à toute profondeur.

2. Distribution de la température dans un milieu semi-infini :

2-1...Définition :

Un milieu semi-infini est une paroi d'épaisseur suffisamment grande dont la perturbation thermique appliquée sur une face ne se fait pas ressentir par l'autre face. Un tel système représente l'évolution d'un mur d'épaisseur finie pendant un temps suffisamment court pour que la perturbation créée sur une face n'ait pas atteint l'autre face.



Transfert de chaleur dans un milieu semi-infini

On considère le milieu semi-infini à la température initiale uniforme T_i , puis on applique brutalement la température T_s sur sa surface, cette condition traduit la condition de DIRICHLET.

On désire alors exprimer la répartition de la température dans ce milieu, le bilan thermique effectué sur un élément de volume (**figure II-1**) permet d'écrire :

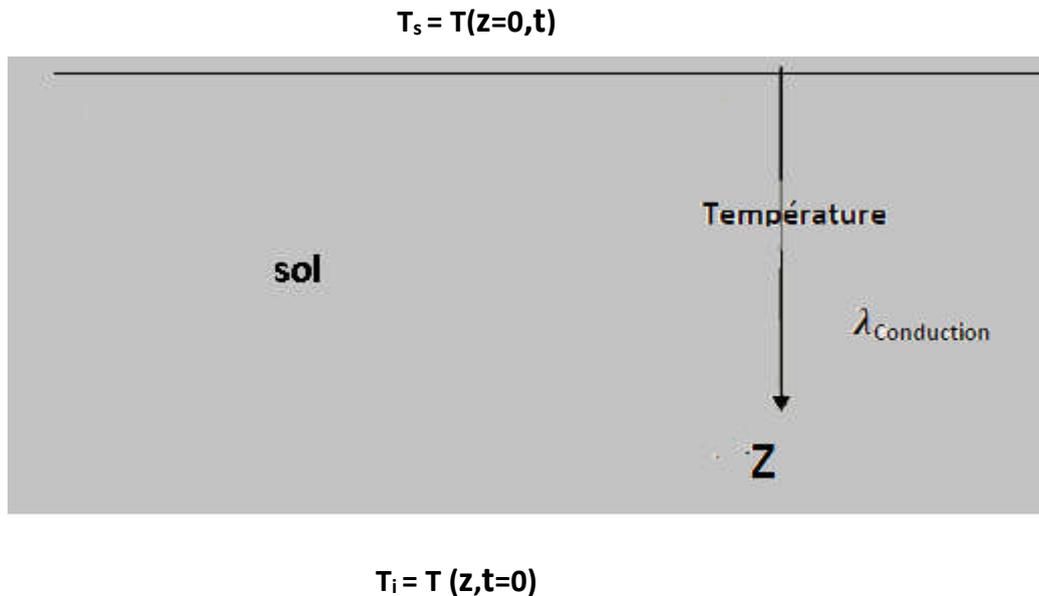


Figure (II.2). Représentation schématique d'un milieu semi-infini

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q'}{\rho c} \quad (\text{II-1})$$

Où pour un transfert unidimensionnel suivant l'axe des z , on aura :

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} = 0 \quad (\text{II-2})$$

D'autre part, si le transfert est sans source interne $Q'=0$ l'équation se réduit à :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{II-3})$$

Sachant que la diffusivité thermique est donnée par :

Transfert de chaleur dans un milieu semi-infini

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

Avec :

λ : Conductivité thermique du sol [w/m.K]

C : Capacité calorifique massique du sol [J/kg.K]

ρ : Masse volumique du sol [kg /m³]

T : Température du sol, fonction de t et de z [K]

t : Temps [s]

α : Diffusivité thermique [m²/s]

On se trouve donc confrontés à une équation aux dérivées partielles de la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{II-4})$$

2-2. Condition aux limites et initiales :

On a:

$$\frac{\partial T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II-5})$$

➤ Conditions aux limites

$$Z = 0 : T(Z = 0, t) = T_s$$

$$Z \rightarrow \infty : T(Z \rightarrow \infty, t) = T_i$$

➤ Condition initiale :

$$t = 0 : (Z, t = 0) = T_i$$

On pose :

$$\theta(Z, t) = T(Z, t) - T_s$$

L'équation (II-5) devient :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{II-6})$$

On considère le changement de variable suivant :

$$\eta = \frac{Z}{2\sqrt{\alpha t}} \rightarrow \theta(\eta)$$

$$\bullet \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \left(\frac{Z}{2\sqrt{\alpha}} \left(-\frac{1}{2} \right) t^{-\frac{3}{2}} \right) = -\frac{1}{2t} \eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \quad (\text{II-7})$$

$$\bullet \quad \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial Z} = \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \left(\frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \right)$$

$$\bullet \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \right) = \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right) =$$

$$\frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right) \frac{\partial \eta}{\partial Z} = \frac{1}{4\alpha t} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2}$$

$$\bullet \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = \frac{1}{4\alpha t} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \quad (\text{II-8})$$

On remplace (II-7) et (II-8) dans (II-6) :

$$\frac{1}{4\alpha t} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = -\frac{1}{2\alpha t} \eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = -2\eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \quad (\text{II-9})$$

On pose : $f(\eta) = \frac{\partial \theta}{\partial \eta}$

Donc : (II-8) devient :

$$\frac{df}{d\eta} = -2\eta f \Leftrightarrow \frac{df}{f} = -2\eta d\eta \rightarrow f(\eta) = A e^{-\eta^2} = \frac{\partial \theta}{\partial \eta}$$

$$\Rightarrow \theta(\eta) = A \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta + \beta \quad (\text{II-10})$$

$$Z = 0 \rightarrow \eta = 0: \theta(0) = T_s - T_s = 0 \Rightarrow \beta = 0$$

$$Z \rightarrow \infty: \eta \rightarrow \infty : \theta(\infty) = T_i - T_s = A \int_0^\infty e^{-\eta^2} d\eta$$

$$\text{Intégrale de gaussie : } \int_0^\infty e^{-\eta^2} d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

Donc :

$$A = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (T_i - T_s)$$

Ce qui donne:

$$\theta(\eta) = (T_i - T_s) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta = T_\eta - T_s \quad (\text{II-11})$$

Finalement :

$$\frac{T(Z,t) - T_s}{T_i - T_s} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta^2} = \text{erf}(\eta) \quad (\text{II-12})$$

Expression du flux de chaleur :

$$\phi(Z, t) = -\lambda s \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -\lambda s \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial Z} = -\lambda s \frac{1}{\sqrt{\alpha t}} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = -\lambda s \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} (T_i - T_s) \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\eta^2}$$

$$\phi(Z, t) = \frac{-\lambda s (T_i - T_s)}{\sqrt{\pi \alpha t}} e^{-\left(\frac{Z^2}{4\alpha t}\right)} \quad (\text{II-13})$$

La densité de flux de chaleur à Z=0 s'exprime par:

$$q(Z = 0, t) = -\frac{\lambda}{\sqrt{\pi \alpha t}} (T_i - T_s)$$

Transfert de chaleur dans un milieu semi-infini

En considérant:

$$T_i=300\text{k}, \quad T_s=310\text{k}, \quad \lambda=2 \quad \rho=1200\text{kg/m}^3 \quad c=1300\text{j/kg.k}$$

On montre qu'au cours du temps l'échange de chaleur s'atténue.

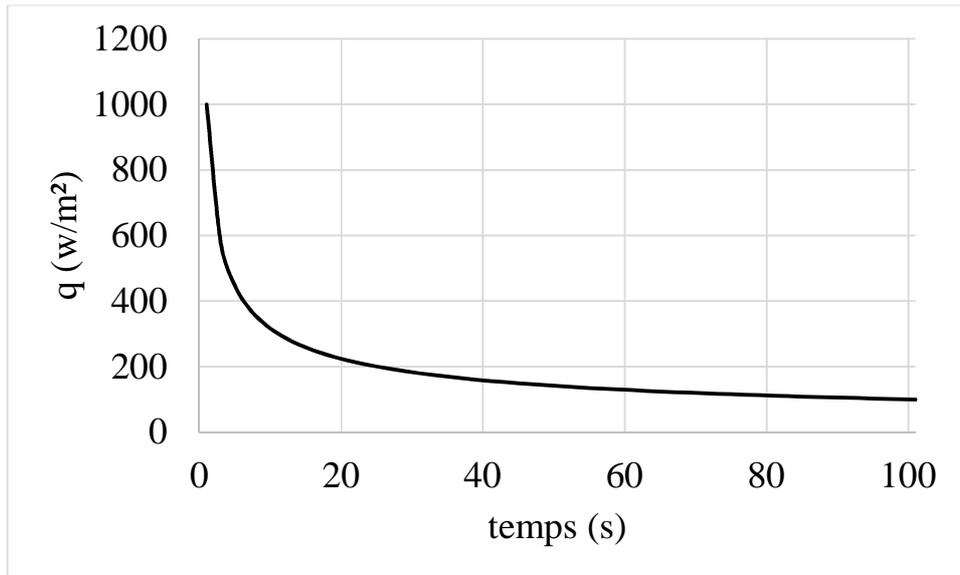


Figure (II.3) Evolution de la densité de flux de chaleur au cours du temps

Conclusion :

A travers ce chapitre on a estimé l'intensité du flux de chaleur que peut évacuer un sol quand il est en contact d'un fluide chaud. En adoptant l'hypothèse d'un milieu semi-infini le sol soustrait à l'air chaud une quantité de chaleur.

Il apparait clairement que l'utilisation du sol comme puits ou réservoir de chaleur est conditionné par l'intensité de flux de chaleur à évacuer pendant une durée de temps déterminée.

Chapitre III

Simulation numérique

1. Introduction

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

La simulation ne supplante pas l'expérimentation mais la complète. Elle permet d'effectuer l'analyse du problème dans des conditions réalistes (reproduire des tests que l'on fait en expérimentation pour mieux les comprendre et à moindre coût) ou au contraire dans des conditions d'essais extrêmes/marginales (climats extrêmes, défauts d'installations...). Ces dernières ne peuvent être faites par l'expérimentation (raison de coûts...). Ainsi, la simulation accroît le champ des tests pour un système.

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

La simulation se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatiques.

Beaucoup de difficultés sont rencontrées lors de la résolution des problèmes de la mécanique des fluides (non linéaire, tridimensionnel, instationnaire...), la simulation numérique (CFD) est un choix judicieux qui permet aux ingénieurs de franchir ces obstacles. La CFD est simplement un calcul numérique appliqué à la mécanique des fluides.

Les avantages de la simulation numérique de la MDF (CFD):

- Économie par rapport à l'expérimentation
- Rapidité d'exécution pour le développement
- Accès à toutes les données de l'écoulement
- Conditions réelles et idéales
- dimensionner et optimiser les processus qui sont mis en œuvre

2. Position du problème

Il s'agit d'un échangeur constitué de deux tubes coaxiaux enfoui verticalement dans le sol, de diamètre extérieur D , de longueur L avec un entrefer fixe égale à 1cm. Le fluide pénètre par l'entrefer pour échanger de la chaleur avec le sol, et lorsqu'il arrive au fond, il remonte à travers le tube intérieur dont la paroi est adiabatique (Fig III.1)

Trois paramètres sont étudiés, à savoir:

- Le diamètre du tube, sa longueur et le débit d'air.

C'est pourquoi on a considéré les cas suivants:

1. Diamètre extérieur $D_e = 10\text{cm}$, longueur $L = 2\text{m}$, pour des débits d'air: 3, 10 et 20 g/s.
2. $D_e = 20\text{cm}$, $L = 2\text{m}$, débit d'air: 20 et 40 g/s.
3. $D_e = 20\text{cm}$, $L = 4\text{m}$, débit d'air: 40 et 80 g/s.

Par ailleurs, pour tous les cas de figure, la T° d'entrée d'air est fixée à 310K alors que celle du sol à l'instant initial, est égale à 300K.

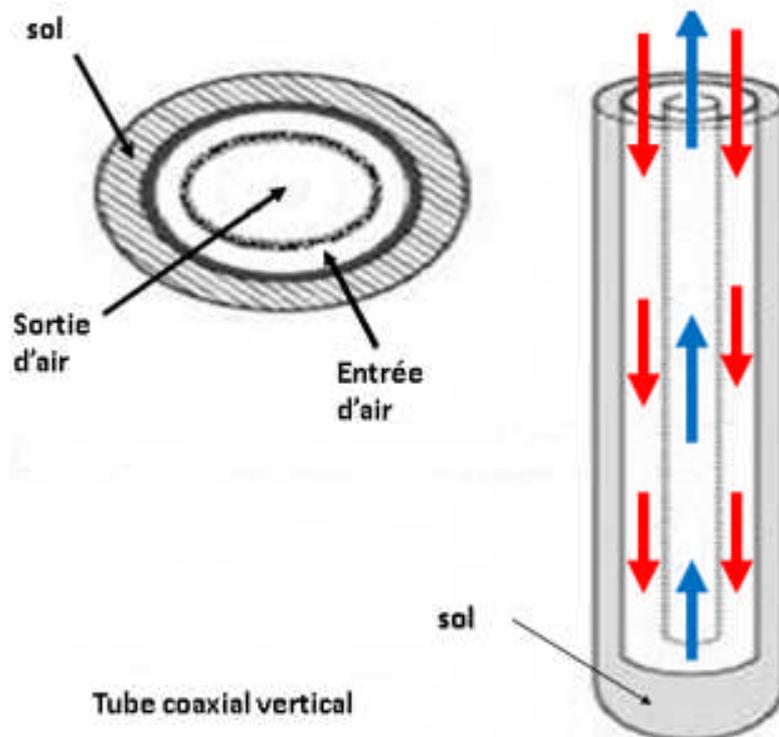


Figure (III.1): principe d'un échangeur vertical coaxial air/sol

3. Définition du logiciel Gambit

GAMBIT est un préprocesseur de Fluent qui permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau. Il permet de créer plusieurs types de maillage suivant la géométrie pouvant être utilisés en particulier sous FLUENT, et de spécifier le type de matériau (fluide ou solide).

4. Procédure de résolution

4.1 . Réalisation de la géométrie :

La géométrie est construite en 3D, par le 1^{er} menu de l'interface Gambite, ce qui a permis d'obtenir des volumes.

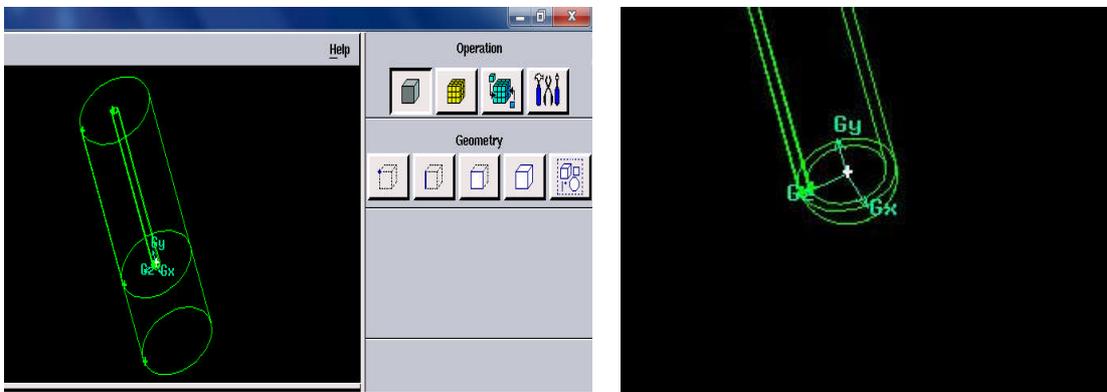


Figure (III.2): construction de la géométrie

4.2. Génération du maillage



Il est obtenu grâce au 2eme menu

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

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

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

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

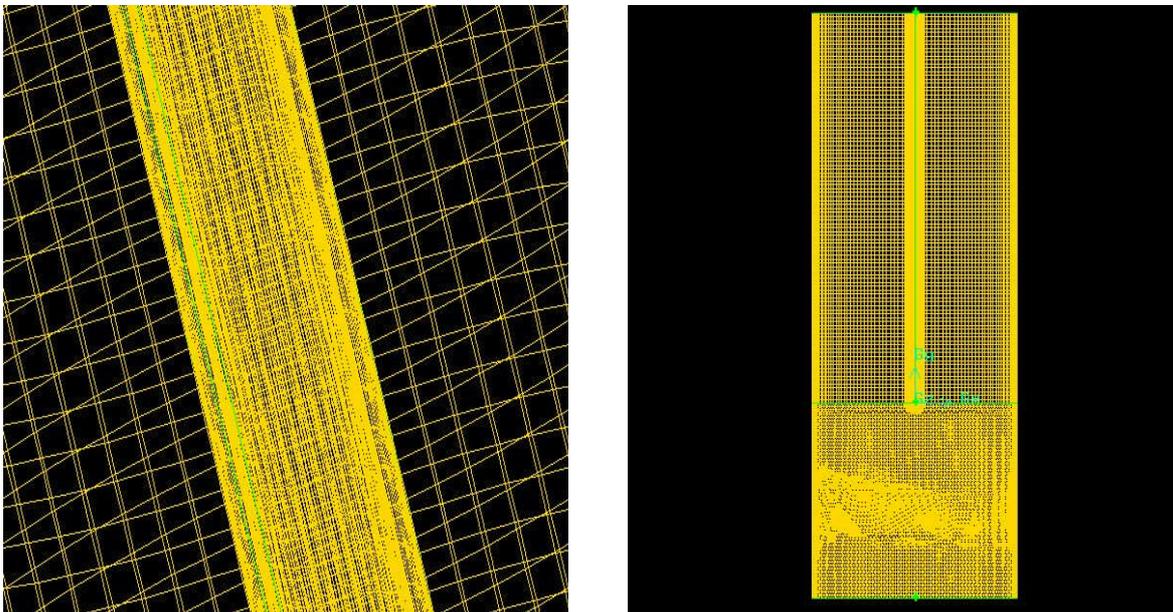


Figure (III.3): génération du maillage

4.3. Conditions aux limites



La définition des conditions aux limites se fait dans ce menu

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

4.4. Milieux fluide et solide

Le domaine d'étude, est constitué d'une zone solide (sol) et d'un milieu fluide (l'air). Leurs paramètres thermo-physiques sont consignés dans le tableau ci-dessous.

	λ w/m.K	C_p (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)
sol	2	1300	1200
air	0.0242	1006	1.2

Figure (III.4): Paramètres thermo-physiques du sol et de l'air

4.5 Résolution sous Fluent

Le code de calcul Fluent est utilisé puisque les modèles numériques conduisent généralement à des résultats très proches de la réalité.

Dans cette étude, il est impératif de prendre en compte les effets tridimensionnels de la conduction dans le sol.

4.5.1. Choix de la session

Dans toutes ses versions, "Fluent" offre deux modes de calcul : le mode "double précision" et le mode "simple précision". Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. En outre, Le mode "double précision" est préconisé, entre autres, pour les écoulements impliquant des longueurs d'échelles réduites: puisque la géométrie est en 3D, et que la géométrie est d'une longueur importante et que le tube a une épaisseur petite par

Simulation Numérique

rapport au reste du domaine de calcul, le choix du 3D double précision semble le plus approprié à notre simulation, il est donc choisi comme suit : [8]



Figure (III.5): mode d'utilisation du logiciel fluent

4.5.2. Importation de la géométrie (*.msh)

Il faut d'abord importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

- File > Read > Case...

4.5.3. Vérification du maillage importé

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

- Grid > Check

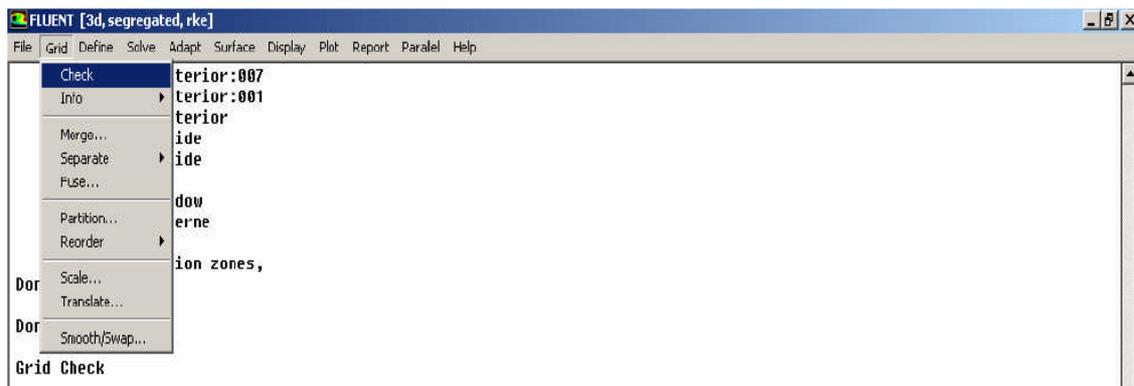


Figure (III.6): Vérification du maillage

4.5.4. Vérification de l'échelle

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

- Grid>Scale

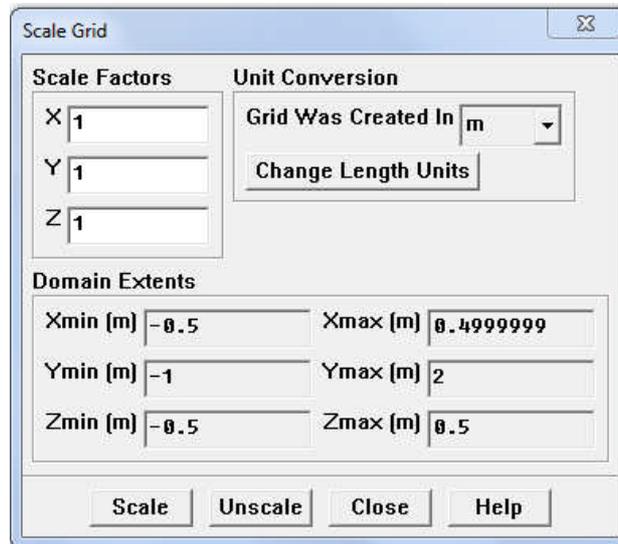


Figure (III.7): Vérification de l'échelle

4.5.5. Choix du solveur

- Define>Models>Solver

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

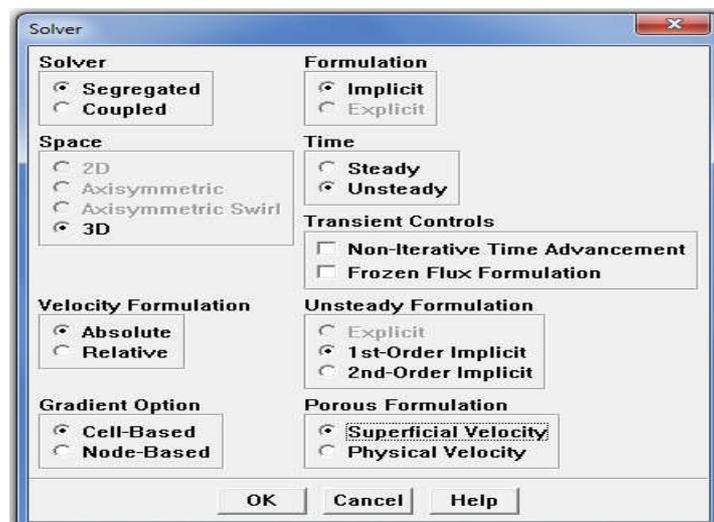


Figure (III.8): choix du solveur

4.5.6. Activation de l'équation de l'énergie

- Define>Models>Energy

Elle doit être activée pour l'étude des champs thermiques

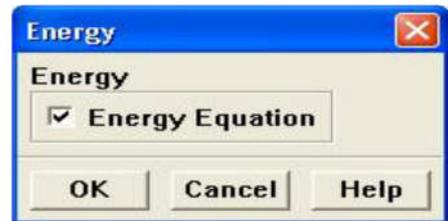


Figure (III.9): Activation de l'équation de l'énergie

4.5.7. Choix du modèle de turbulence

- Define>Models>Viscous

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

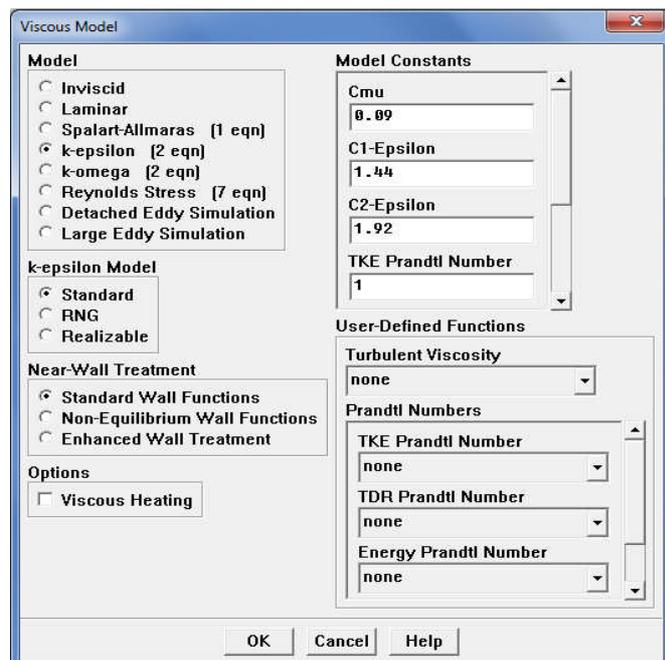


Figure (III.10): régime d'écoulement

4.5.8. Définir les propriétés des matériaux

- Define>Materials...

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

Pour le fluide :

Le fluide mis en jeu est l'air dont les propriétés sont les suivantes :

- La masse volumique $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$
- La capacité thermique massique $C_{p,\text{air}} = 1006.43 \text{ J/kg.K}$
- La conductivité thermique $\lambda = 0.0242 \text{ W/m.K}$

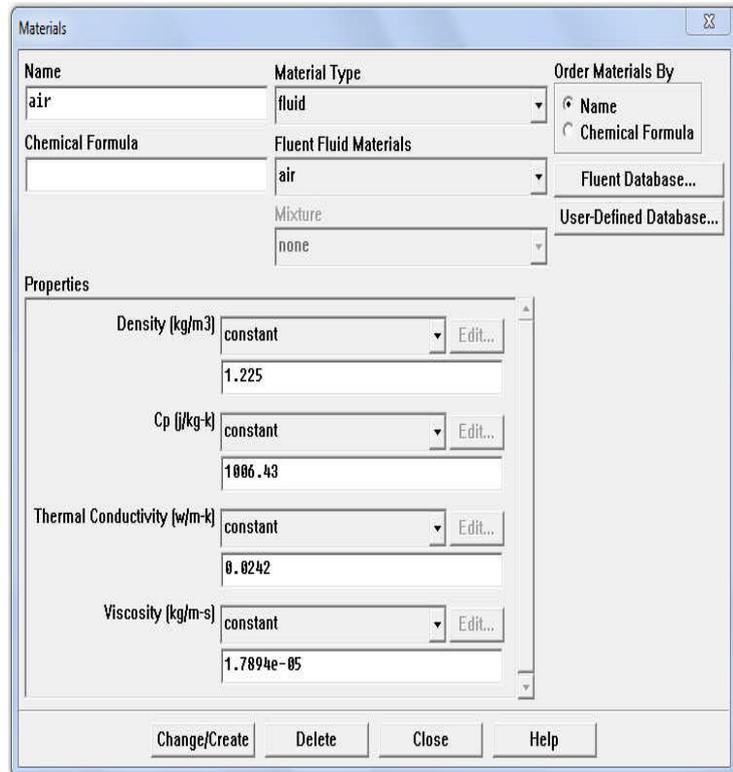


Figure (III.11): propriétés du fluide

Pour le solide:

C'est le sol qui représente la partie solide, ses propriétés sont :

- La masse volumique $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$
- La capacité thermique massique $C_{p,\text{sol}} = 1300 \text{ J/kg.K}$
- La conductivité thermique $\lambda = 2 \text{ W/m.K}$

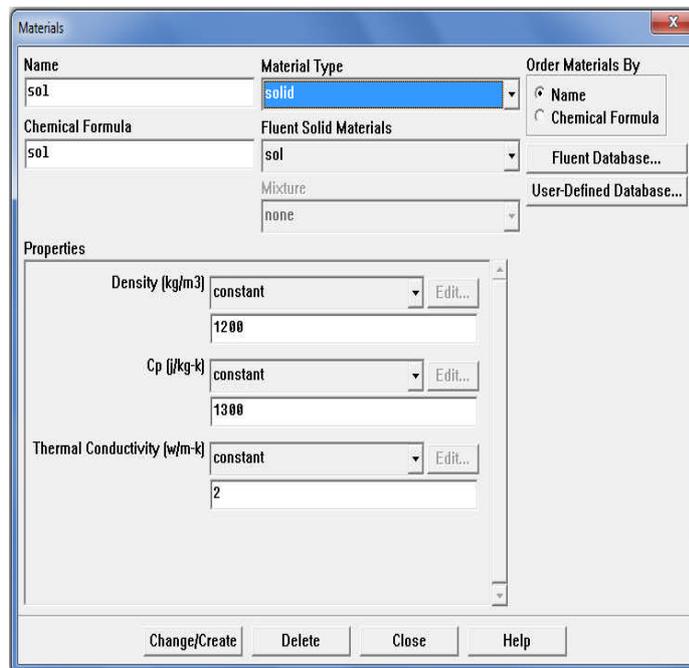
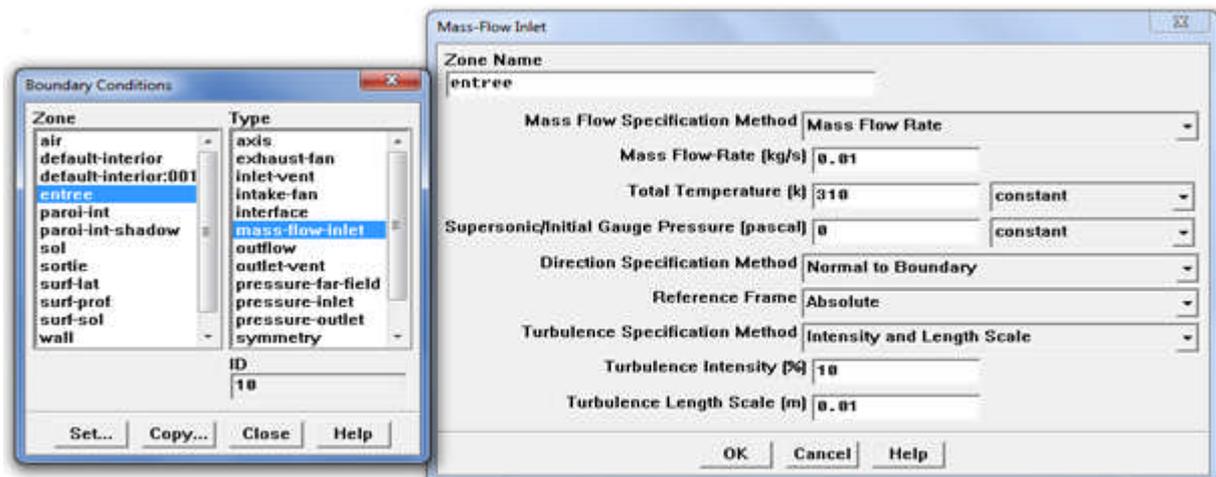


Figure (III.12): propriétés du solide

4.5.9. Définir les conditions aux limites

- Define>Boundary Conditions...

Les conditions aux limites pour chaque frontière seront définies avec la fenêtre Boundary condition. On sélectionne alors, la frontière concernée on introduit les conditions aux limites associées.



4.5.10. Choix de solution

- Solve>Controls> Solution...

Cette étape permet de choisir les équations à résoudre.

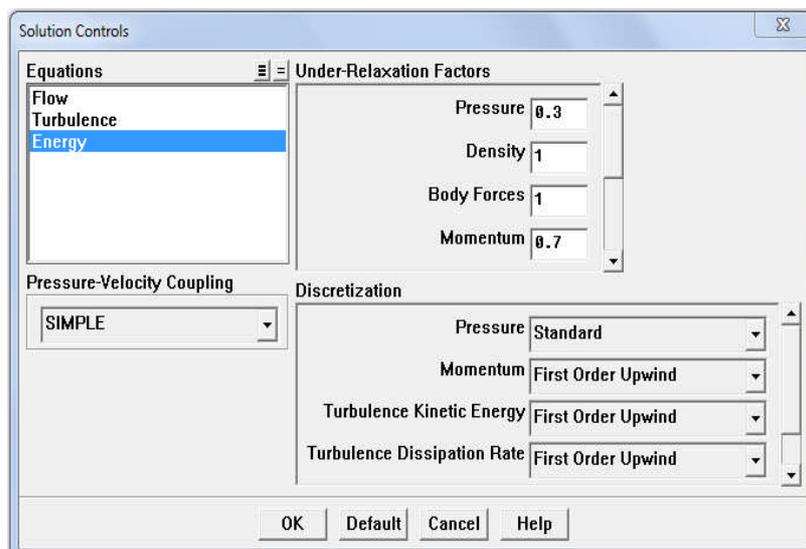


Figure (III.13): équation à résoudre

4.5.11. Initialisation des calculs

Solve>Initialize>Initialize...

Initialiser les calculs aux conditions d'entrée de l'air.

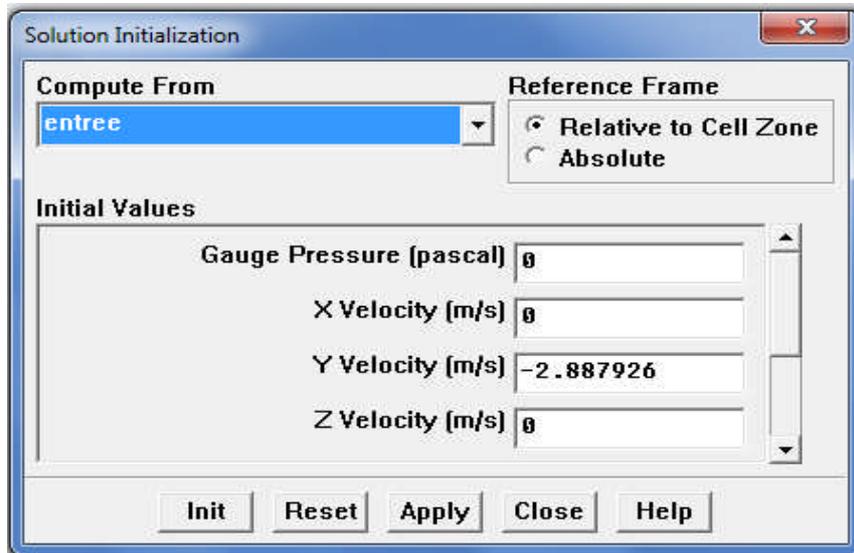


Figure (III.14): initialisation des calculs

4.5.12. Sauvegarde du fichier *.cas

File >write>case

Il est conseillé une fois le paramétrage effectué, de sauvegarder le fichier en format *.cas. S'il y a un bug durant les calculs, il suffit de charger le fichier *.cas, pour ne pas refaire le paramétrage.

4.5.13. Choix des critères de convergence

La résolution numérique nécessite un processus itératif. Pour apprécier la convergence du processus itératif, des critères de convergence doivent être pris en compte. Ainsi, la convergence du processus itératif est appréciée à travers l'évolution des résidus. Cette étape s'effectue selon la procédure suivante:

Solve> Monitors >Residual...

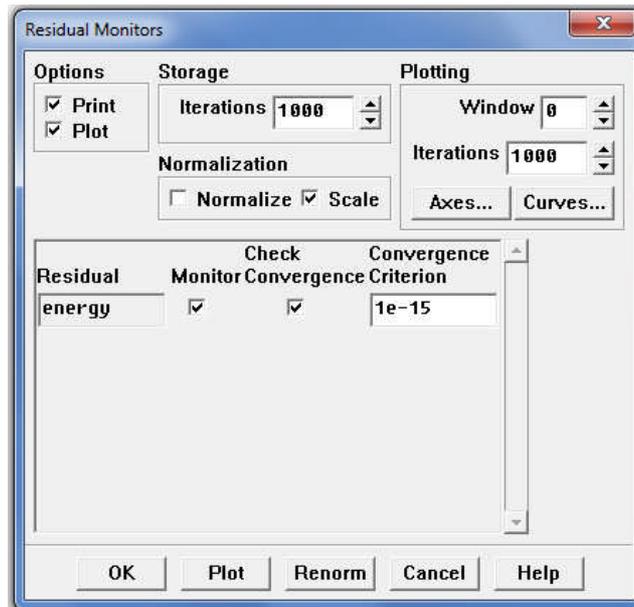


Figure (III.15): critères de convergence

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

4.5.14. Exécution des calculs

Le calcul est prêt à être lancé. **Solve>Iterate**, puisque l'écoulement est instationnaire, un pas de temps de 30s a été choisi avec un nombre de 960 équivalents à 8h, et le maximum d'itérations par pas de temps est 30. Pour commencer le calcul il faut cliquer sur **Iterate**.

Selon l'onglet Solve-Iterate, on introduit un maximum de 30 itérations par pas de temps de 30s pour une durée de 8h.

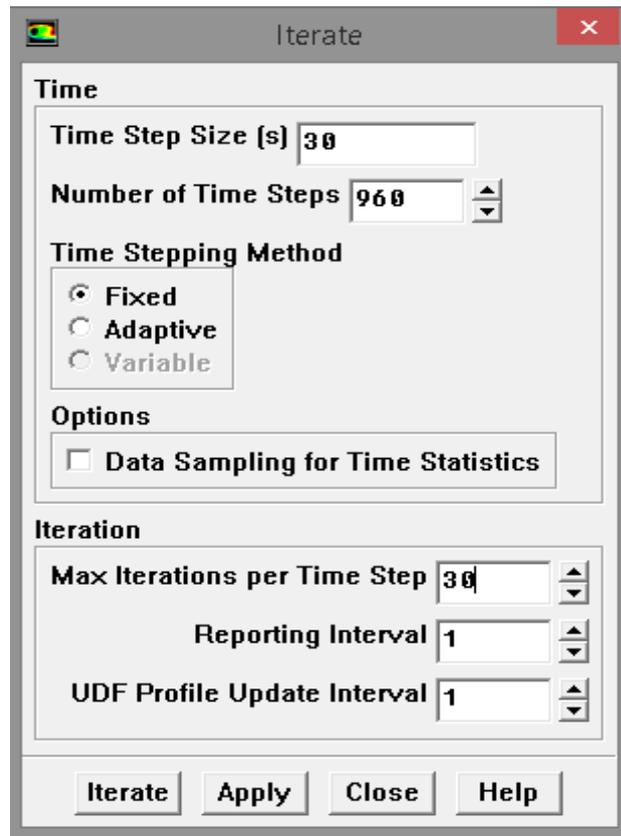


Figure (III.16): Exécution des calculs

5. Interprétation des résultats

A travers la figure III.17, il s'avère que la température de l'air à la sortie de l'échangeur augmente au cours du temps pour chaque débit. En effet les couches de sol au voisinage de la paroi de l'échangeur s'échauffent au cours du temps (figures III.19, III.20 et III.21) par conséquent les intensités de flux de chaleur diminuent au cours du temps (figure III.18).

Par ailleurs, au bout de 8 heures de fonctionnement de l'échangeur, les figures III.19, III.20 et III.21 montrent que la propagation de la chaleur n'atteint pas les frontières du domaine considéré. Ce qui permet d'exploiter cet échangeur durant une période de 8 heures.

Simulation Numérique

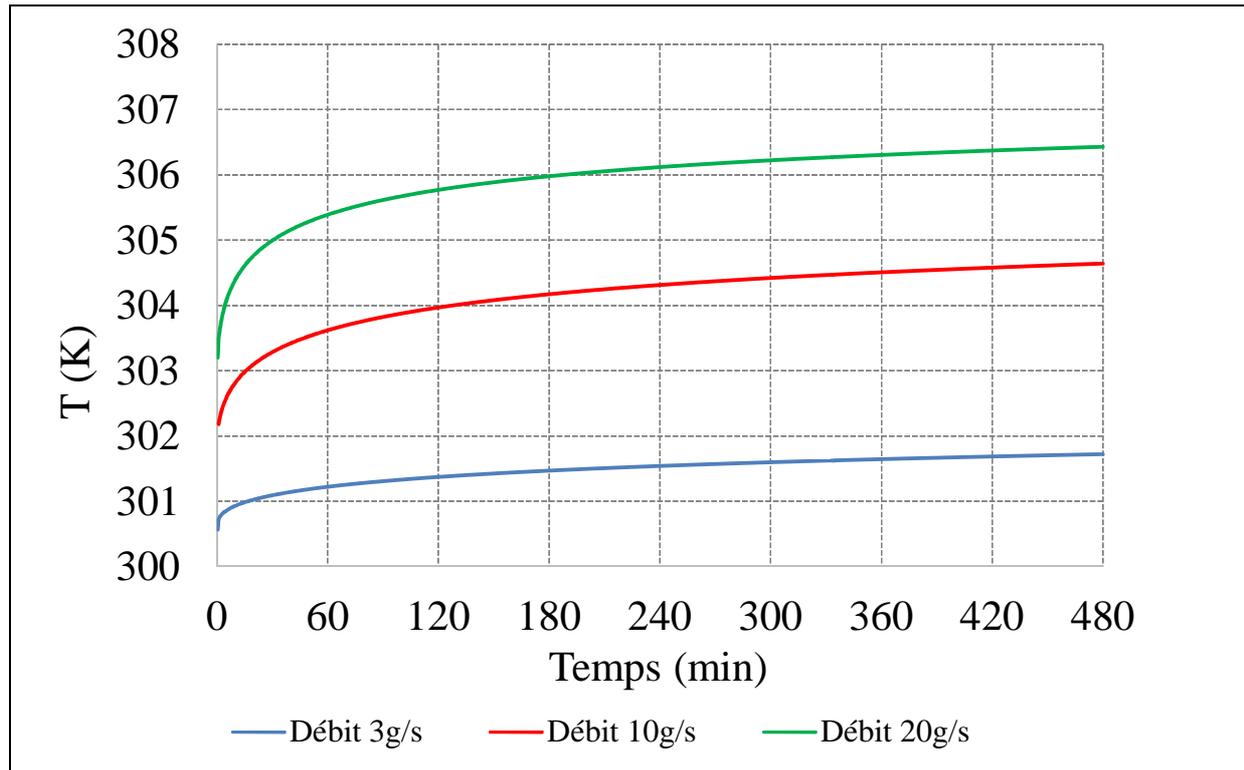


Figure (III.17):- Evolution de la température à la sortie de l'échangeur au cours du temps pour le cas ou $D=10\text{cm}$, $L=2\text{m}$

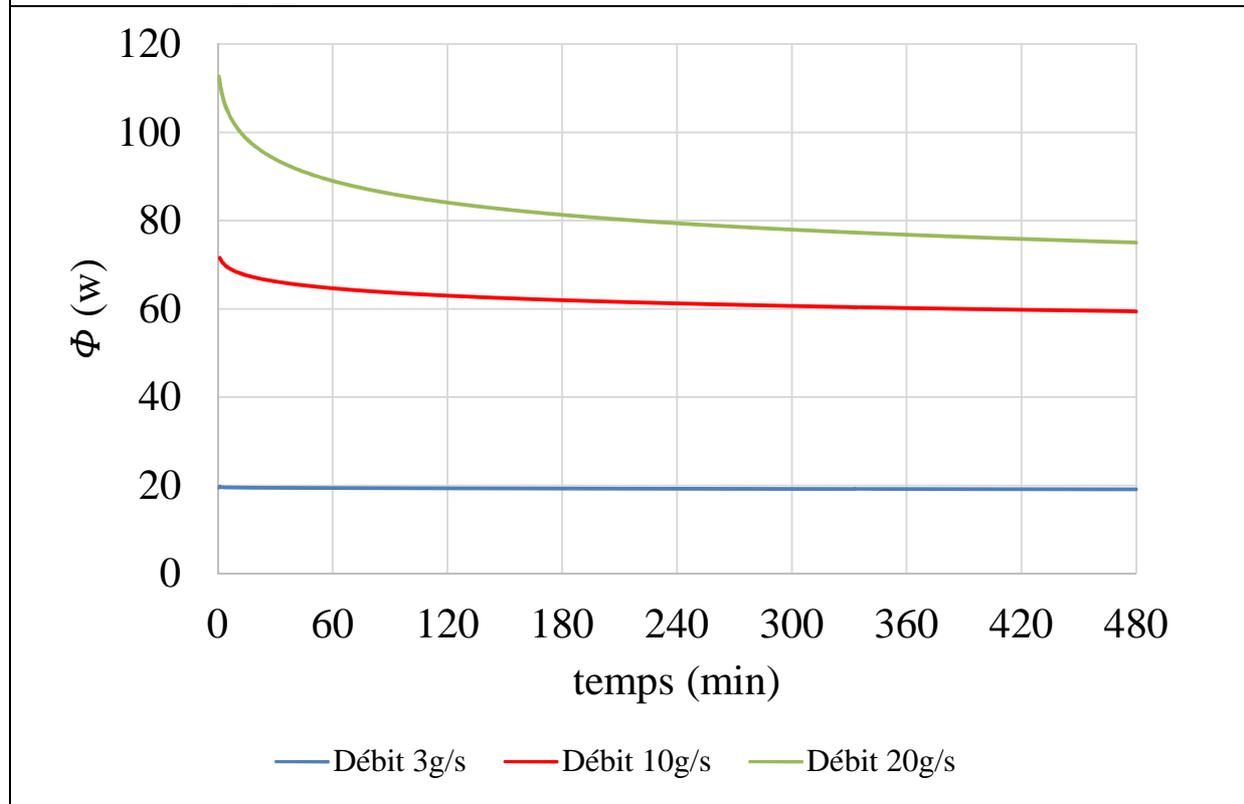


Figure (III.18): Evolution du flux de chaleur à travers la paroi de l'échangeur au cours du temps : $D=10\text{cm}$, $L=2\text{m}$

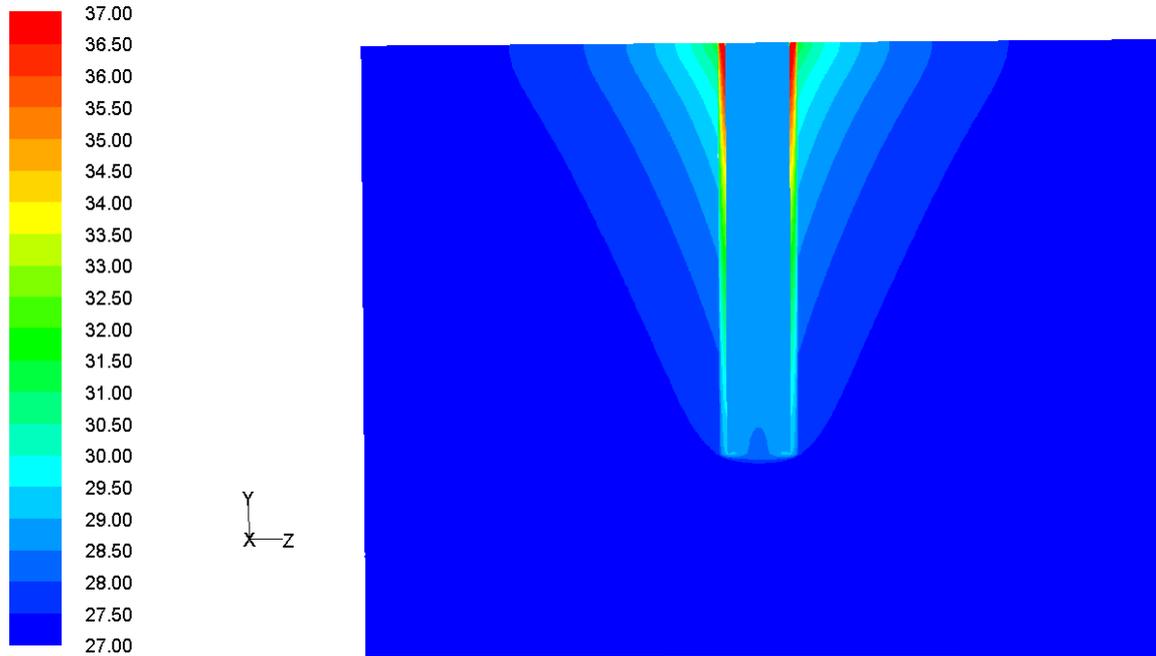


Figure (III.19):Température de l'air et du sol à $t=8h$, $D=10cm$, Débit = $3g/s$, $L=2m$

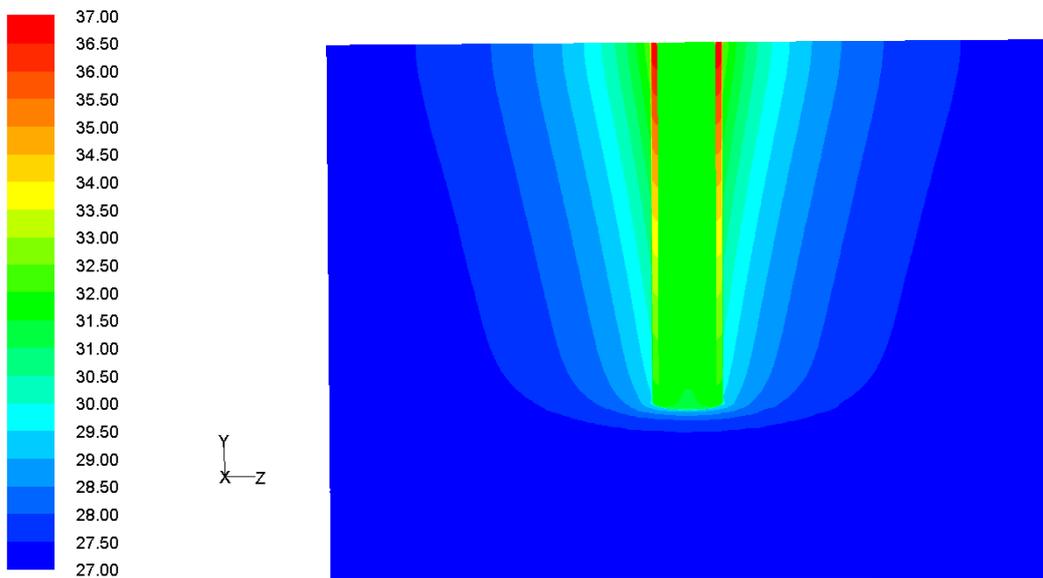
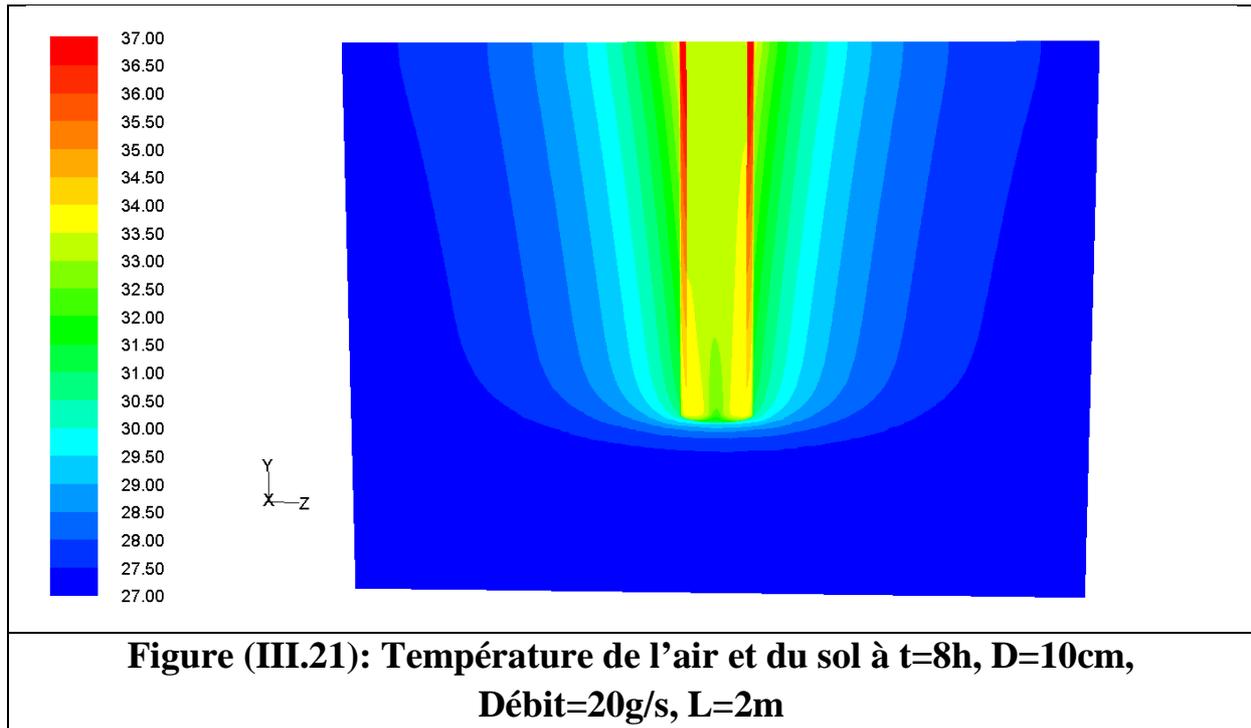


Figure (III.20): Température de l'air et du sol à $t=8h$, $D=10cm$, Débit= $10g/s$, $L=2m$



Le même constat est observé pour les autres figures (Fig. III.22 et Fig. III.23).

Cependant, pour un même débit d'air de 20g/s, l'augmentation du diamètre du tube ($D_e = 20\text{cm}$) accentue, d'une part, la surface d'échange avec le sol qui accroît le flux de chaleur cédé par l'air (Fig. III.23), et d'autre part contribue faiblement à l'effet de refroidissement (Fig. III.22) à cause de la faible circulation de l'air. En effet, pour un même instant t , 240 minutes par exemple, l'utilisation d'un débit de 20g/s dans l'échangeur de diamètre $D_e=10\text{cm}$ donne une température de sortie d'air égale à environ 306 K soit un refroidissement de 4 °C (Fig. III.17). Pour le cas d'un diamètre $D_e=20\text{cm}$, c'est-à-dire le double, on obtient une température de sortie d'air égale à 305 K soit un refroidissement de 5°C (Fig. III.22).

Ce deuxième type d'échangeur peut fonctionner durant 6h40min (Fig. III.24) avec un débit de 20g/s, et 5h25min avec un débit de 40g/s (Fig. III.26), sans que la perturbation thermique n'atteigne les frontières du domaine.

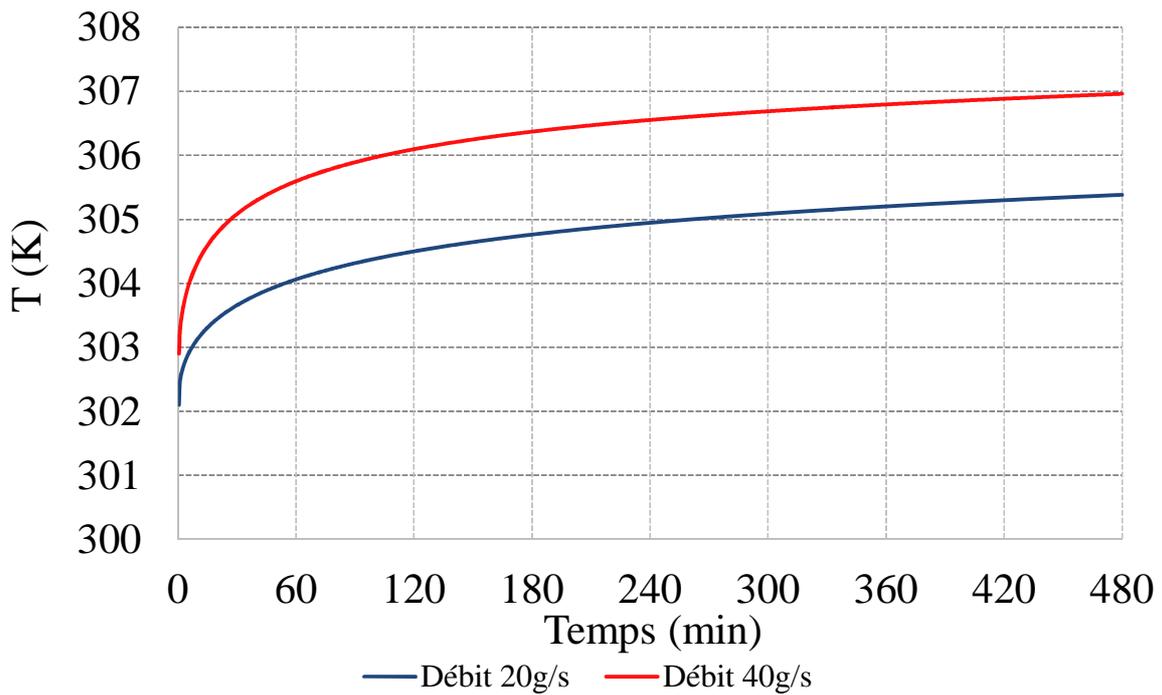


Figure (III.22): Evolution de la température à la sortie de l'échangeur au cours du temps : D=20cm, L=2m

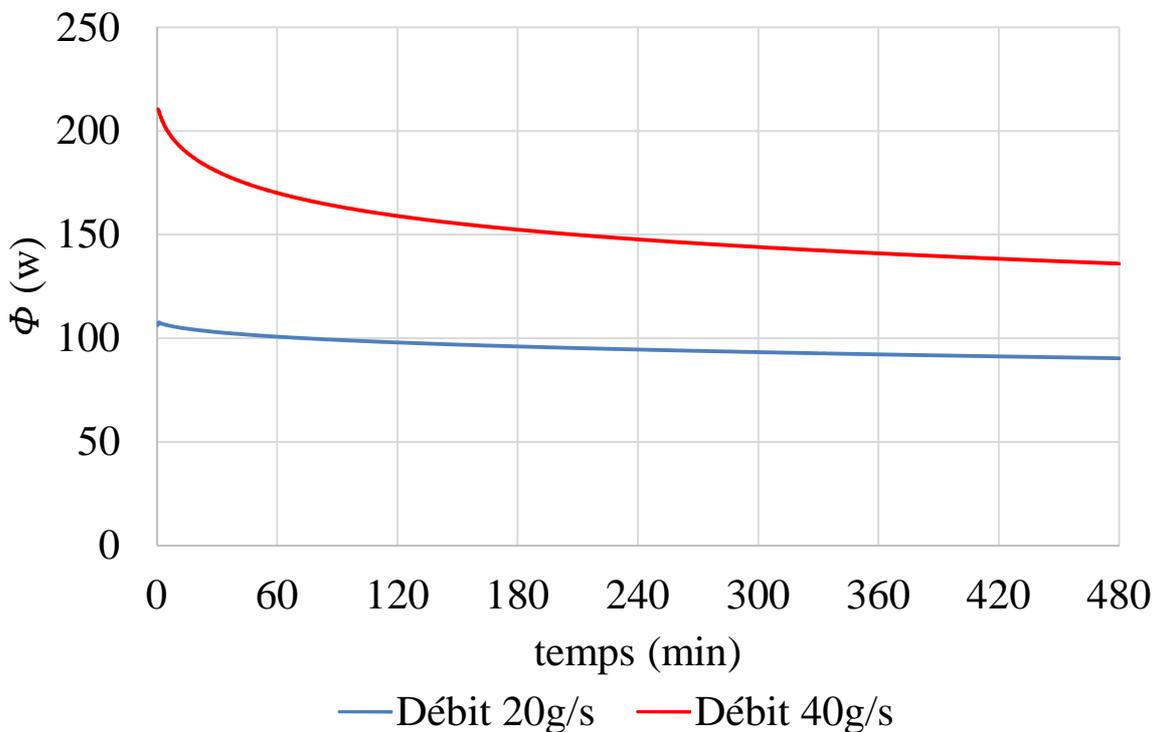


Figure (III.23): Evolution du flux de chaleur à travers la paroi de l'échangeur au cours du temps : D=20cm, L=2m

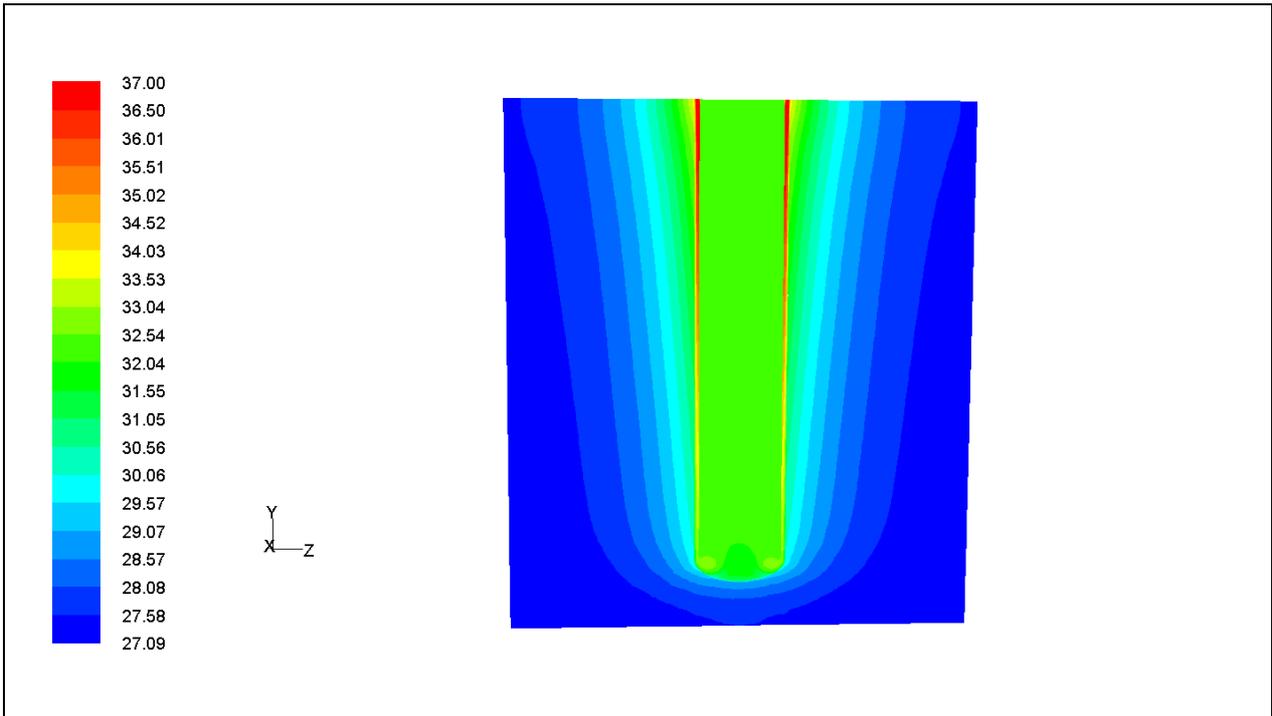


Figure (III.24):Température de l'air et du sol à $t=6\text{h}40\text{min}$, $D=20\text{cm}$, Débit= 20g/s , $L=2\text{m}$

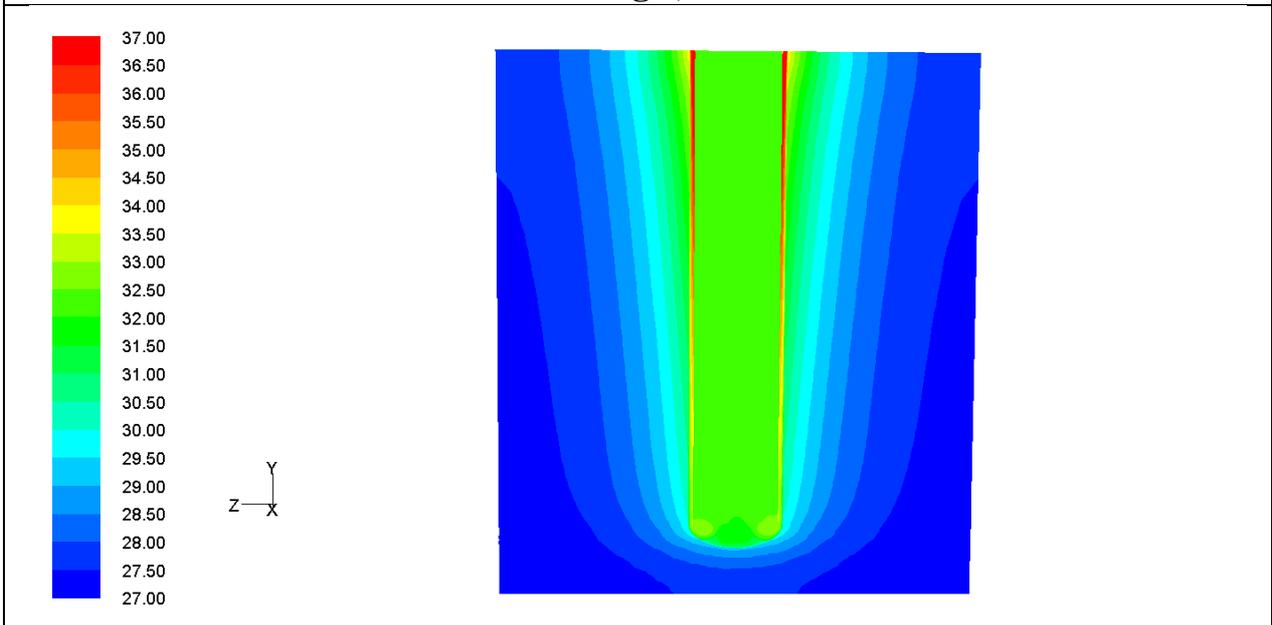


Figure (III.25):Température de l'air et du sol à $t=7\text{h}05\text{min}$, $D=20\text{cm}$, Débit= 20g/s , $L=2\text{m}$

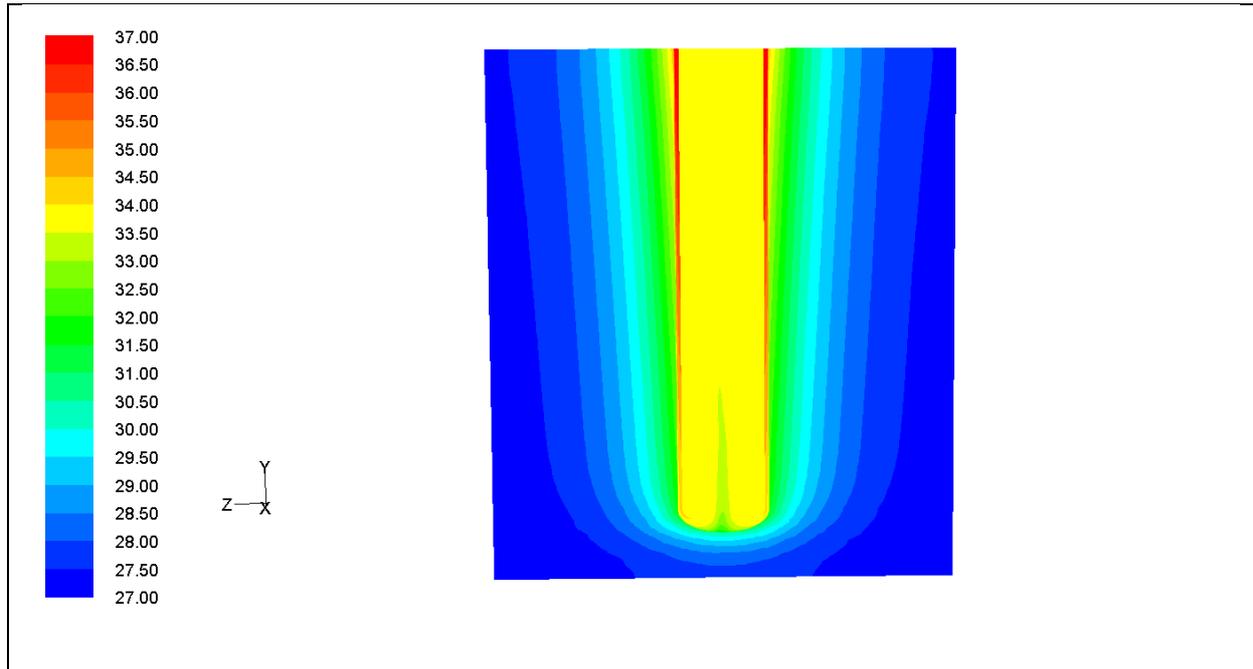


Figure (III.26):Température de l'air et du sol à $t=5h25min$, $D=20cm$,
Débit= $40g/s$, $L=2m$

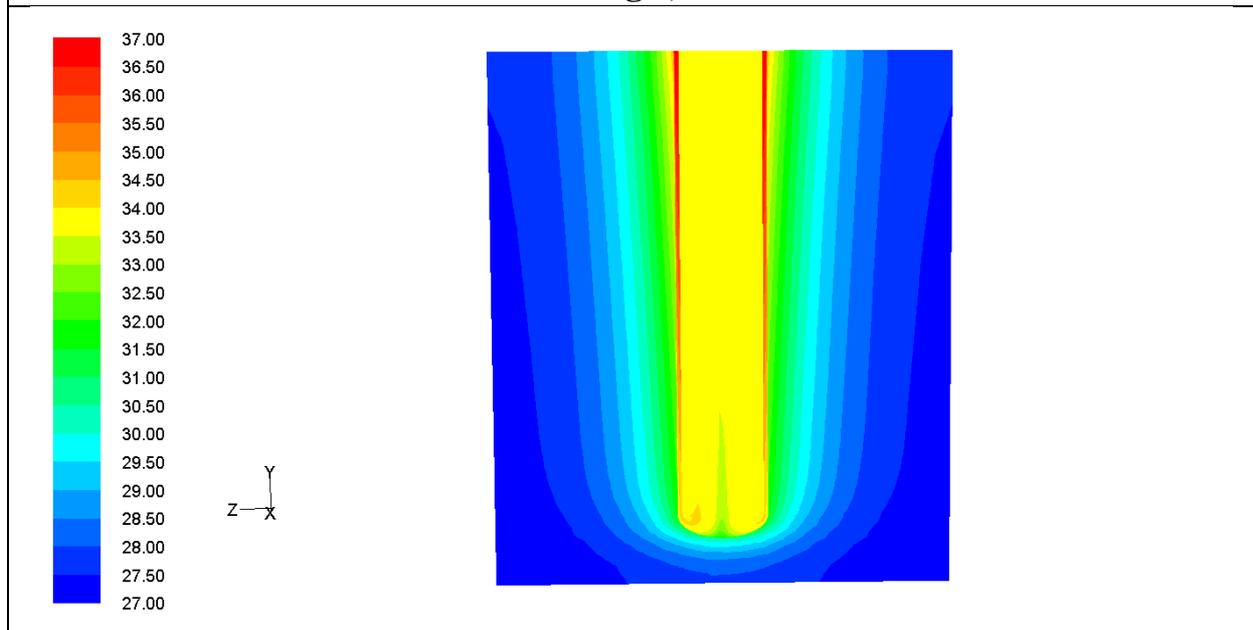


Figure (III.27):Température de l'air et du sol à $t=5h50min$, $D=20cm$,
Débit= $40g/s$, $L=2m$

Simulation Numérique

L'effet de la longueur de l'échangeur est traduit par les figures (III.28, III.29, III.30, III.31, III.32 et III.33).

Comparé à l'échangeur de longueur 2m, l'air avec un débit de 40g/s se refroidi davantage (Fig. III.28), et cède un flux de chaleur plus important (Fig. III.29). De plus, son temps de fonctionnement atteint 5h50min au lieu de 5h25min (Fig. III.30).

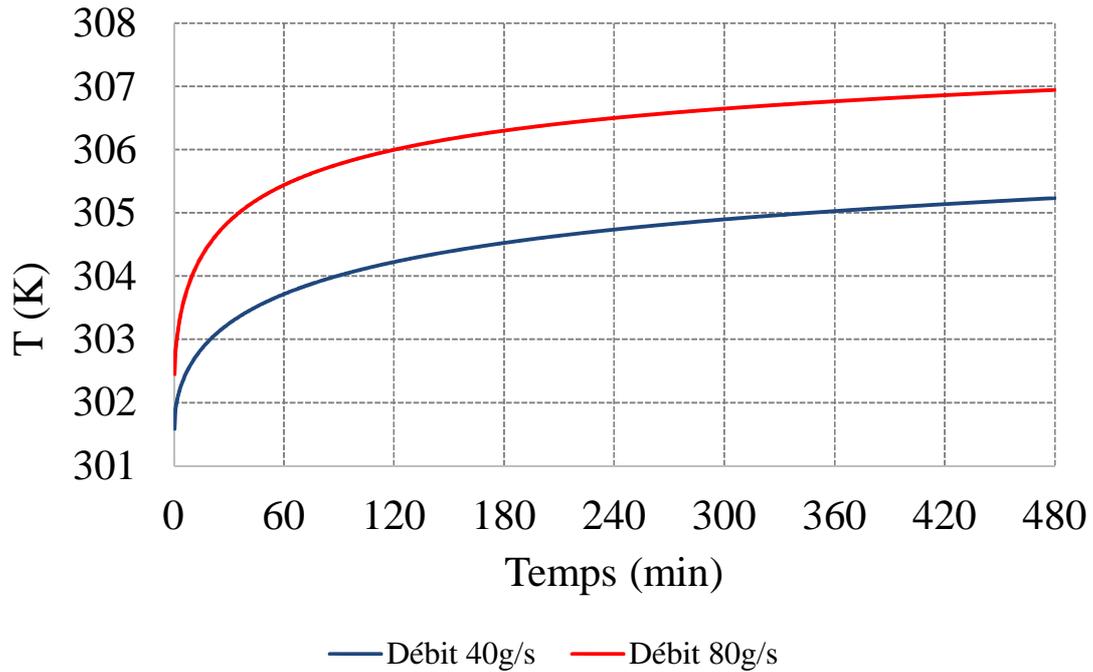


Figure (III.28): Evolution de température à la sortie de l'échangeur au cours du temps : $D=20\text{cm}$ $L=4\text{m}$

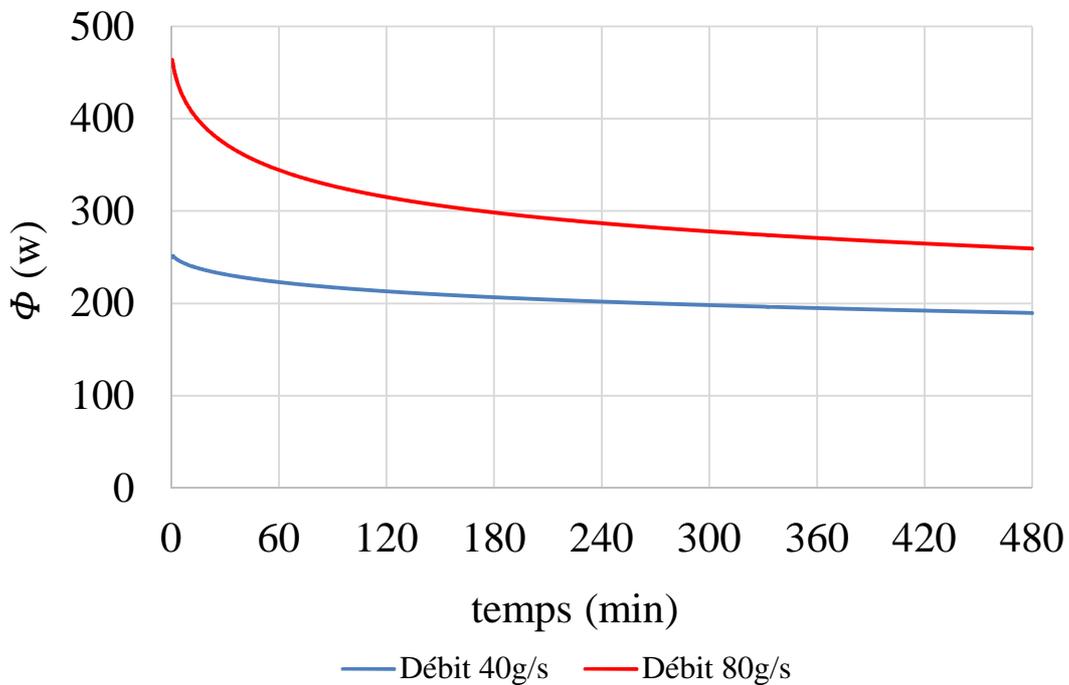


Figure (III.29): Evolution du flux de chaleur à travers la paroi de l'échangeur au cours du temps : $D=20\text{cm}$, $L=4\text{m}$

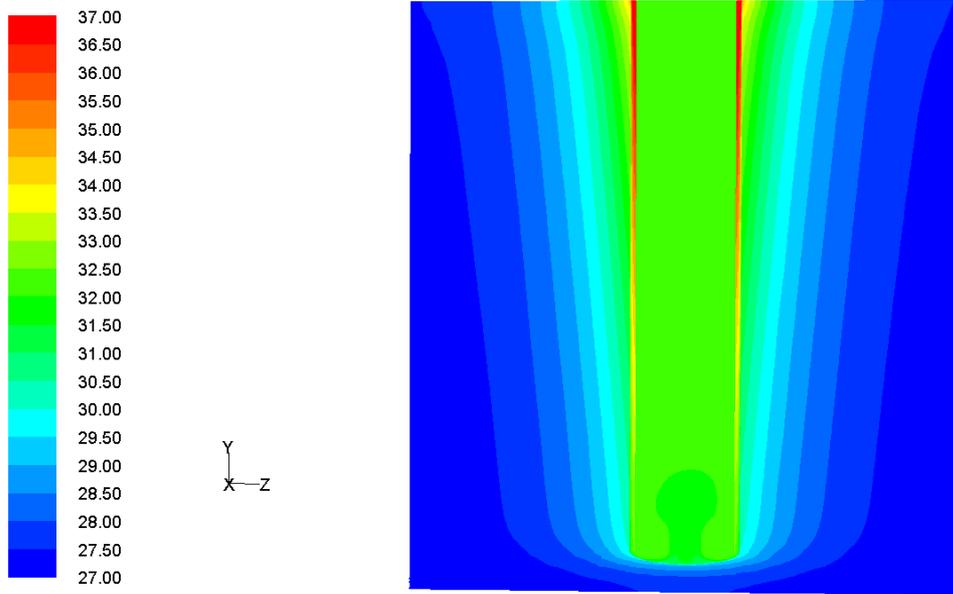


Figure (III.30):Température de l'air et du sol à $t=5\text{h}50\text{min}$, $D=20\text{cm}$,
Débit= 40g/s , $L=4\text{m}$

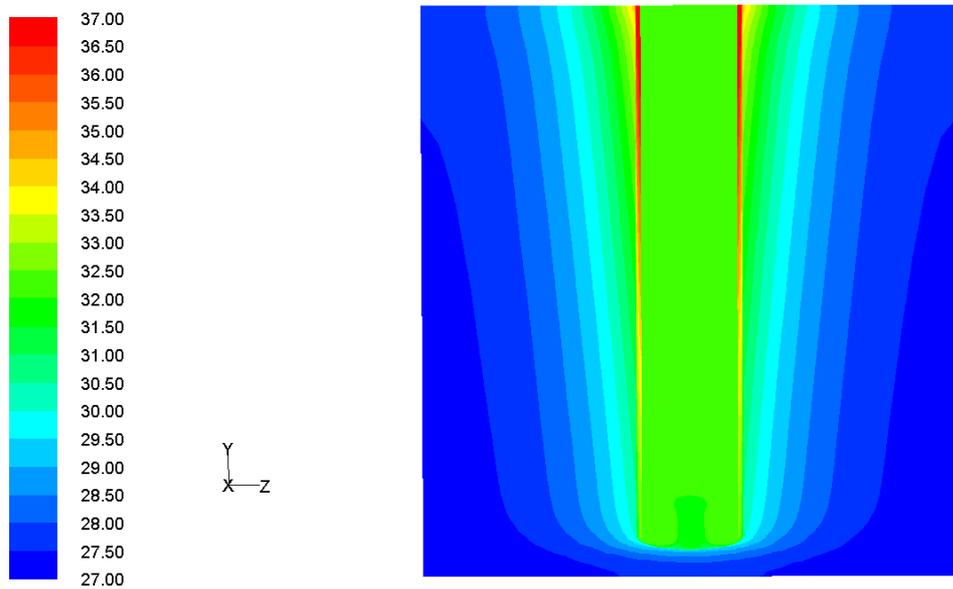


Figure (III.31):Température de l'air et du sol à $t=6\text{h}40\text{min}$, $D=20\text{cm}$,
Débit= 40g/s , $L=4\text{m}$

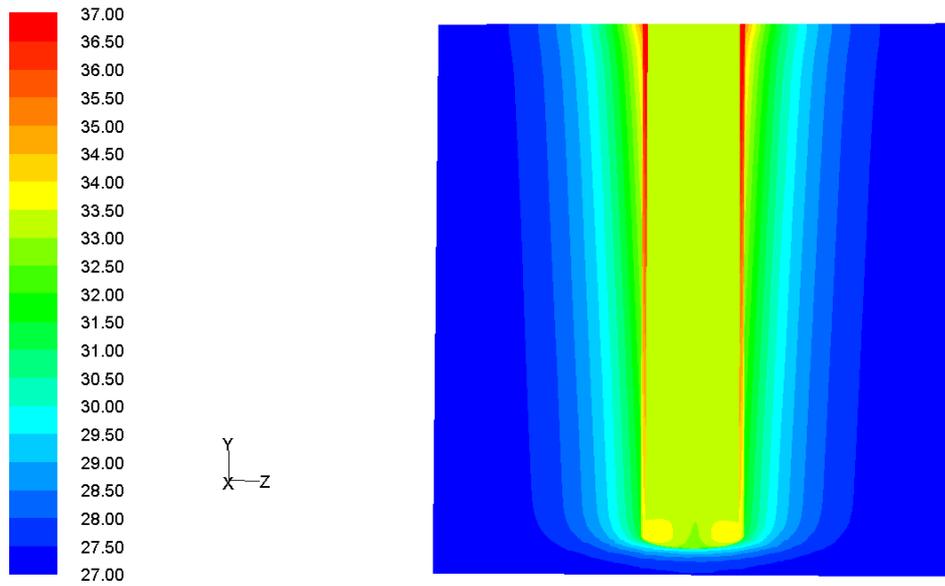


Figure (III.32):Température de l'air et du sol à $t=3h20min$, $D=20cm$,
Débit= $80g/s$, $L=4m$

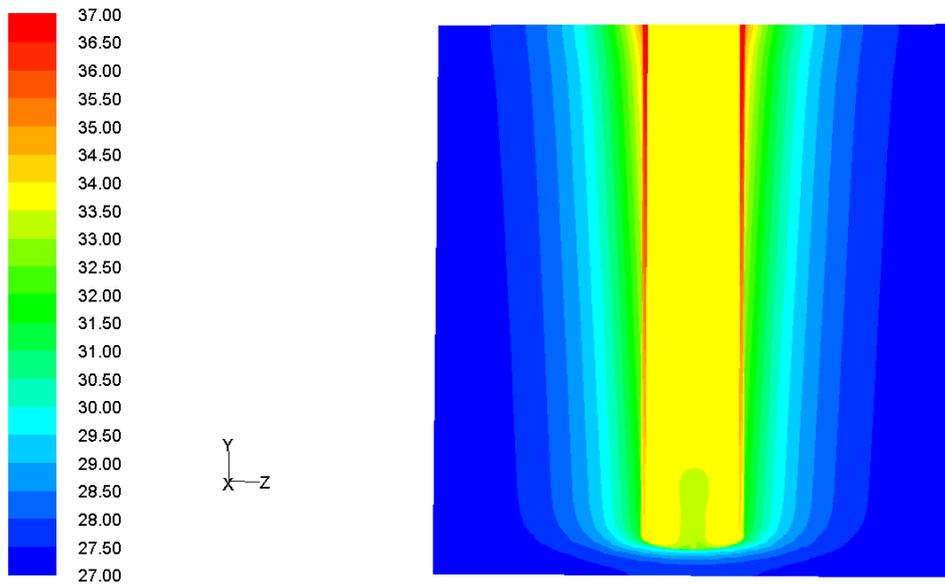


Figure (III.33):Température de l'air et du sol à $t=4h10min$, $D=20cm$,
Débit= $80g/s$, $L=4m$

Conclusion générale

Conclusion générale

A travers cette étude il a été question de voir l'influence de certains paramètres (débit d'air, diamètre, longueur) sur le comportement thermique d'un échangeur vertical air/sol, constitué de deux tubes coaxiaux, la complexité des équations mises en jeu nous a imposé de recourir à un outil commercial de simulation numérique en l'occurrence fluent.

L'analyse des résultats obtenus montre que l'augmentation du diamètre du tube accentue l'échange de chaleur air/sol mais réduit l'effet de refroidissement de l'air. Par contre l'augmentation de la longueur du tube améliore le refroidissement de l'air tout en prolongeant le temps de fonctionnement de l'échangeur. C'est pourquoi, un compromis entre ces deux variables géométriques est nécessaire, il sera dicté par le degré de refroidissement attendu par cet échangeur pour les besoins d'une installation.

Bibliographie

[1] **B. Mebarki, B. Draoui, S. Abdessemed, A. Keboucha, S. Drici et A. Sahli,**

Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar. Revue des énergies renouvelables, Vol. 15 N°3 (2012) pp.465-478

[2] A Mussy et M Soutter "Physique du sol. Coll. Gérer l'Environnement". Édition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1991

[3] **Bruno PEUPRTIER et Stéphane THIERS**

Dimensionnement du «puits climatique» Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits «canadiens» ou «provençaux»
Année : 2000

[4] EOLE. Les principes du puits canadien. Catalogue. Année: 2014.

[5] **David BARTOLOMEU**

Performance d'un échangeur thermique de type air-sol .Article . ITP à Romillé
Année : 2005

[6] **Pierre Hollmuller**

Utilisation des échangeurs air/sol pour le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Genève,
Année : 2002

[7] Ventilgeo. Echangeur géothermique verticale. Brochure

[8] Help fluent 6.3