

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option: Systèmes Energétiques Et Développement Durable

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Thème

*Dimensionnement d'un échangeur air/sol
enterré destiné au rafraichissement de l'air*

Présenté par:

AD Salah Eddine

Proposé et dirigé par:

Pr. Abdelhafid MOUMMI

Promotion : Juin 2014

DEDICACE

*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.

REMERCIEMENT

Aucun travail n'est possible dans l'isolement. Les rencontres, les conseils et les encouragements constituent des aides précieuses souvent décisives. C'est pourquoi je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué à ce travail parfois sans le savoir ou du moins sans mesurer la portée de leur influence.

Ma profonde gratitude et sincère reconnaissance envers **Pr Moummmi Abedlhafidh** pour son soutien et la disponibilité, dont il a fait preuve par sa personne et ses moyens, pour mon encadrement - Encore Merci-.

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

L'équipe pédagogique du département de « **génie mécanique** » qui n'a ménagé aucun effort pour nous donner le meilleur d'eux-mêmes.

Mes plus vifs remerciements s'adressent également à Monsieur **ZAMMAR Nabil** (Maitre assistant au département de Génie Mécanique au Centre Universitaire de Khenchela), pour ces efforts remarquables qui nous ont permis d'acquérir de précieuses connaissances scientifiques.

Je remercie tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis mes premiers jours à l'école jusqu'aujourd'hui.

Je remercie également tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce modeste travail.

Enfin, j'exprime non sincères amitiés à tous mes amis, les étudiants de 2eme Master systèmes énergétiques et développement durable, pour l'ambiance amicale qui a régné durant toute l'année.

. Salah Eddine

NOMENCLATURE

Symboles :

Symboles	Désignation	unité
a	Diffusivité thermique du sol	m^2/s
$C_{p\text{ air}}$	Capacité calorifique massique de l'air	$J/(kg \cdot ^\circ k)$
C_{sol}	Capacité calorifique massique du sol	$J/(kg \cdot ^\circ k)$
g	Pesanteur	m/s^2
h_{conv}	Coefficient d'échange convectif	$w/m^2 \cdot ^\circ k$
L	Longueur du tube	m
\dot{m}	Débit massique d'air dans la conduite	Kg/s
P	Pression de l'air	Pa
R_{int}	Rayon intérieur du tube	m
R_{ext}	Rayon extérieur du tube enterré	m
R_{sol}	Rayon de la couche adiabatique du sol	m
R_{conv}	Résistance thermique entre l'air et le tube	$^\circ k/w$
R_{pipe}	Résistance thermique du tube enterré	$m^2 \cdot ^\circ k/w$
R_{sol}	Résistance thermique entre le tube et le sol	$m^2 \cdot ^\circ k/w$
t_0	Jour de l'année où la température est maximale	Jour
T_0	Amplitude de la variation de température	$^\circ C$
T	Température	$^\circ C$
T_{sol}	Température du sol	$^\circ C$
T_{amb}	Température ambiante journalière	$^\circ C$
$T_{\text{air entré}}$	Température de l'air à l'entrée	$^\circ C$
T_{moy}	Température moyenne journalière	$^\circ C$
T_i	Température du sol à une profondeur z_i	$^\circ C$
T_{air}	Température de l'air	$^\circ C$
U	Résistance thermique totale entre l'air et le sol	$m^2 \cdot ^\circ k/w$
u	La vitesse de l'air suivant (ox)	m/s
v	La vitesse de l'air suivant (oy)	m/s
V_{air}	Vitesse de l'air	m/s
w	La vitesse de l'air suivant (oz)	m/s
Z	Profondeur en dessous de la surface du sol	m
\varnothing	Diamètre intérieur du tube	m

Lettres grecques

Lettre grecque	Désignation	unité
λ	Conductivité thermique de l'air	w/(m.°k)
λ_{sol}	Conductivité thermique du sol	w/(m.°c)
λ_{pipe}	Conductivité thermique du tube enterré	w/(m.°k)
φ	Déphasage d'oscillation	[rad]
α	Diffusivité thermique	m ² /s
ε	Efficacité du tube enterré	[-]
ω	Fréquence angulaire	Rad/jour
ρ	Masse volumique de l'air	Kg/m ³
ρ_{sol}	Masse volumique du sol	Kg/m ³
ν	Viscosité cinématique de l'air	m ² /s

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Nomenclature

Sommaire

Introduction général	Page 1
Chapitre I : <i>Analyse théorique et étude bibliographique</i>	Page 3
1 Introduction	Page 3
2 Historique	Page 5
3 Définition	Page 5
4 les profondeurs et les températures	Page 6
5 Disponibilité	Page 6
6 flux géothermique	Page 7
7 Comparisons entre différent systèmes de chauffage.....	Page 8
8 Phénomène d'emmagasiner et de dégagement de chaleur.....	Page 9
9 Principe d'exploitation du Puits Canadien ou puits provençal	Page 10
10 Recommandations à prendre durant la réalisation d'un puits canadien.....	Page 13
11.Principaux travaux de recherche réalisés sur le procédé du rafraichissement par géothermie	Page 14
Chapitre II: <i>Modélisation de la température du sol et de l'air à la sortie de l'échangeur (air/sol) enterré</i>	Page 30
1. Introduction	Page 31
2. Description de l'échangeur enterré :.....	Page 32
3. établissement des modèles mathématiques:.....	Page 33
3.1 Analyse des paramètres à modéliser	Page 33

4. Hypothèses considérées :	Page 35
5. Calcul de la température du sol en fonction du temps et de la profondeur	Page 36
6. Calcul de la température de l'air à la sortie de l'échangeur enterré	Page 41
7. Recommandations concernant le maillage du tube échangeur et la méthode des différences finies pour la simulation des échangeurs de chaleur (air/sol) enterré	Page 46
8- Efficacité de l'échangeur enterré.....	Page 51
Chapitre III: Analyse des paramètres intervenant dans le dimensionnement d'un échangeur (air/sol) enterré.....	Page 52
1. Introduction	Page 52
2. Effet de la nature de sol	Page 52
3. Effet de la matière de construction du tube échangeur enterré.....	Page 55
4. . Effet de la longueur d'échangeur.....	Page 57
5 . Effet du débit d'air injecté dans l'échangeur.....	Page 59
6- Effet du diamètre intérieur du tube échangeur	Page 60
7- Effet de l'épaisseur du tube échangeur enterré	Page 62
8. Validation	Page 64
Conclusion Générale.....	Page 67
Références bibliographiques.....	
Annexes.....	

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

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 [12].

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).

L'énergie renouvelables ou spécialement le rafraichissement par la géothermie, est une technique utilisée traditionnellement dans notre région de SAHARA, Les gens construisent leurs maisons sous sol (les caves) pour rafraichir 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 rafraichie 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

Dans ce travail, on va entamer une étude de dimensionnement des principaux paramètres physiques, thermo-physiques et géométriques qui contrôlent les performances thermiques, à savoir l'efficacité et l'évolution de la température de sortie de l'air de cet échangeur air/sol enterré. A près identification des paramètres intervenant directement dans le comportement dynamique et thermique de l'échangeur, on a réalisé un modèle mathématique qui permet de prédire et de calculer la température du sol à n'importe quelle profondeur et pour n'importe quelle journée de l'année. Ensuite une modélisation analytique a été entamée pour estimer l'évolution de la température de l'air circulant à l'intérieur de tube échangeur enterré, en fonction de la longueur, de la température extérieure et des paramètres contrôlant le fonctionnement, ce qui nous aboutit à connaître la longueur optimal qui assure un bon échange thermique entre l'air et le sol à travers la paroi d'échange tubulaire.

Introduction générale

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

Le premier chapitre comporte une étude bibliographique concernant les fondements de bases de la technique de rafraîchissement par échangeur enterré géothermique, ainsi qu'un aperçu sur les principaux travaux de recherches scientifiques dans le domaine.

Le second chapitre a été réservé à étude modélisation mathématique afin de mettre en oeuvre les approches analytiques qui permettent de prédire et d'estimer convenablement la température du sol et celle de l'air acheminé dans l'échangeur depuis l'entrée jusqu'à la sortie.

Dans le troisième chapitre, on a entamé une étude de dimensionnement thermique, après avoir inventorié les principaux paramètres géométriques, physiques et thermo-physiques, on a pu connaître l'ordre de grandeur de chaque paramètre intervenant dans le fonctionnement du dispositif échangeur (air/sol) destiné pour le rafraîchissement des locaux en particulier.

Chapitre I

Analyse théorique et étude bibliographique

I.1 INTRODUCTION

Aujourd'hui la recherche des nouvelles sources d'énergie est une obligation et n'est pas un choix, ces sources doivent obéir à des conditions de point de vue économique, écologique...telles que :

- L'abondance et la disponibilité des sources (et si la source est renouvelable il sera mieux)
- Le coût d'exploitation de ces énergies doit être acceptable.
- L'exploitation elle-même ne représente pas un danger sur l'environnement

Parmi ces sources : l'énergie solaire, biomasse, hydraulique, géothermie, celle-ci est l'objet de cette partie.

Nous nous tenons dans cette étude, le rafraîchissement et réchauffement par la géothermie, à travers des modalisations et des simulations des performances de ces systèmes, nous essayerons de poser en évidence l'impact que jouent ces énergies sur l'économie nationale. La mise en place d'un programme de recherche dans ce domaine, permet d'établir une démarche globale de maîtrise des énergies renouvelables

Dans cette étude théorique du phénomène du rafraîchissement des habitations par l'énergie géothermique, il s'agit d'un procédé qui est jusqu'à maintenant non utilisé dans notre pays. Dans le but est de connaître l'évolution de la température de l'air ambiant à la sortie de l'échangeur qu'on pourra avoir dans divers contextes structurels

Dans ce premier chapitre qui traite le principe de fonctionnement de la géothermie, une technique destinée pour le rafraîchissement en été et le réchauffement en hivers. D'autre part, un aperçu sur les principaux travaux théoriques et expérimentaux réalisés sera exposé, où on essayera de présenter pour chaque travail réalisé, les objectifs quelques résultats à travers des courbes et des tableaux. Le tableau ci-dessous résume quelques travaux réalisés et considérés comme principales ressources bibliographiques dans cette première partie théorique.

N°	Auteur	Année	Titre
1	Pierre Hollmuller	2002	Utilisation des échangeurs air/sol pour le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Thèse de doctorat présentée à la faculté des sciences de l'université de Genève.
2	David BARTOLOMEU	2005	Performance d'un échangeur thermique de type air-sol .Article . ITP à Romillé 2005
3	David AMITRANO	2006	Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit << puits canadiens >> », Article présenté à Université Joseph Fourier, Grenoble
4	N.Moumami et al.	2009	Le rafraîchissement par la géothermie : étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra, Article 'revue des Energies renouvelables'
5	B. Mebarki et al	2011	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) 465 – 478.
6	M. Benhammou et al	2011	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) 275 – 284
7	Mohammed saadeddine	2012	'Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré', Mémoire de Magister en génie Mécanique, Université de Biskra

A travers le deuxième chapitre on exposera la problématique de notre étude et puis la démarche mathématique adoptée pour l'établissement des différents modèles mathématique qui décrivent le comportement de la température à la sortie de l'échangeur en fonction des différents paramètres, géométriques, physiques et thermo physiques, l'objectif principal est de trouver pour chaque cas d'utilisation le modèle mathématique adéquat.

Dans le troisième chapitre, on présentera les résultats qui seront issus de la simulation numérique, et de voir l'influence de chacun des paramètres considérés sur la distribution de la température de l'air depuis l'entrée de l'échangeur jusqu'à sa sortie, ainsi que l'impact des paramètres qui influent directement sur les performances thermiques principalement l'efficacité de l'échangeur

En fin, une conclusion générale dans laquelle seront récapitulés les principaux résultats obtenus

I.2. 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 Niisato 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 [1].

I.3. Définition:

La géothermie est d'abord 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 [2].

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermie (la chaleur). C'est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et les techniques à utiliser.

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. Donc 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, où on peut atteindre plusieurs centaines de degrés pour de faibles profondeurs et inversement.

Plus l'on fore profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente. En moyenne, l'augmentation de température atteint 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). [1]

I.4. Les profondeurs & les températures

A chaque fois que l'on descend de 100 m sous terre, on gagne 2 à 3°C en moyenne, la radioactivité naturelle des roches produisant des quantités énormes d'énergie. Cette chaleur se dirige vers la surface et 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.

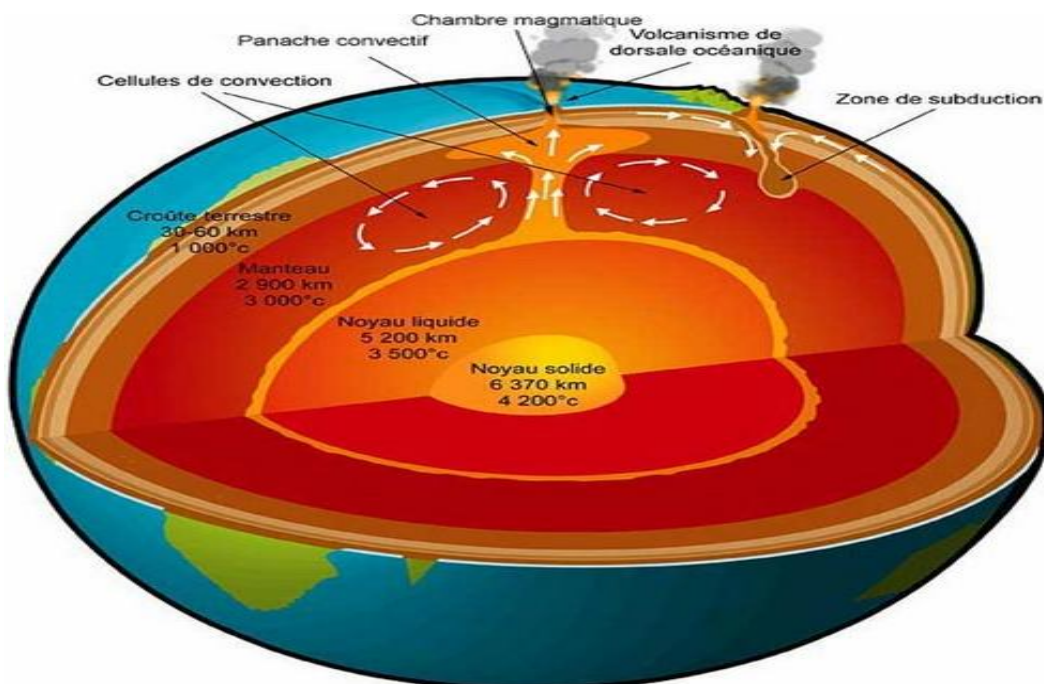


Figure (I.1) : Les profondeurs et les températures de sol [1]

I.5. Disponibilité

La terre dispose de grands et profonds bassins susceptibles de fournir de l'eau chaude pour le chauffage urbain. Les zones volcaniques et les nappes d'eau chaudes sont considérées comme sources d'énergies renouvelables. Ces eaux sont continuellement réchauffées par la chaleur du centre de la terre estimée à 4000°C.

On distingue plusieurs niveaux d'énergie dans la géothermie :

- La géothermie haute énergie, située principalement dans les zones volcaniques, à partir de fluides aquifères dont la température se situe entre 150 et 400°C. A la pression atmosphérique

il y a production de vapeur, cette vapeur est utilisée pour entraîner des turbines pour la production d'électricité.

- La géothermie moyenne énergie, où les fluides aquifères sont à des températures situées entre 70 et 150°C. Dans ce cas, utilisé pour la conversion vapeur - électricité à un bon rendement, il faut utiliser une pompe à chaleur « PAC » contenant un fluide de travail.
- La géothermie très basse énergie où les températures sont de l'ordre de 20 à 60 °C, dans certains cas l'emploi d'une PAC est nécessaire, essentiellement utilisée pour le chauffage urbain
- La géothermie de surface (celle qui nous intéresse) où les températures sont de l'ordre de 7 à 12° C et où l'emploi d'une PAC est obligatoire. Cette énergie est essentiellement l'énergie solaire. La terre stocke environ 45 à 50% de l'énergie solaire qu'elle reçoit, ce qui représente une quantité énorme pour des applications diverses notamment dans le bâtiment.

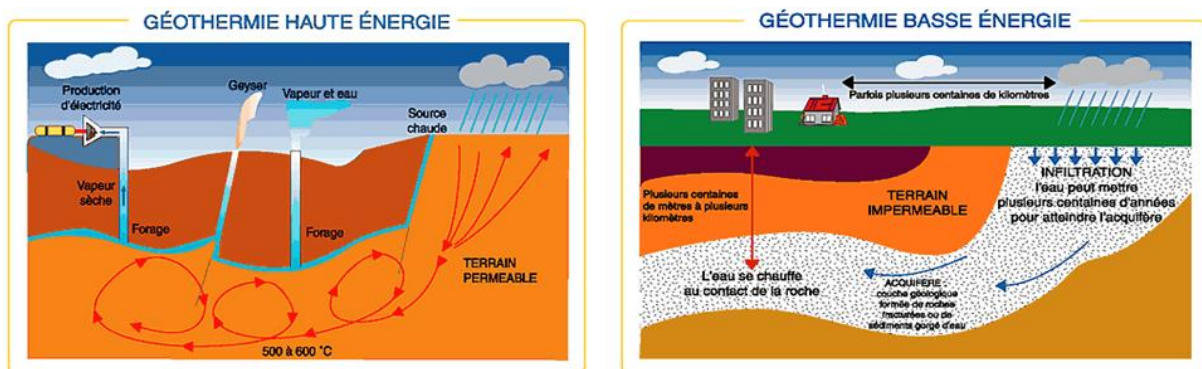


Figure (I.2) : les différents types de géothermie et leurs utilisations [2]

I.6. flux géothermique :

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

- Le flux diminue avec la profondeur à cause de la désintégration matérielle radioactive impliquée.
- Le flux est maximal à la surface de la terre et diminue avec la profondeur à cause de la réduction de la quantité de matériel radioactif sous-jacent.
- Le flux varie géométriquement mais relativement uniforme sur une vaste étendue.

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

I.6.1. Avantages de l'énergie géothermique :

1. Source d'énergie renouvelable pour la production de chaleur seulement.
2. La chaleur est utilisée directement dans le chauffage des bâtiments, l'agriculture, l'industrie, l'aquaculture, la culture en serres, les thermopompes et les thermes.
3. Source d'énergie à haute température de l'ordre de 2000°C, propre, fiable et économique.
4. Possibilité du couplage avec les centrales électriques, les réseaux de chaleur et de faire de la cogénération. Le séchage de bois, le chauffage des serres ou d'installations touristiques, la pisciculture, les séchages agricoles, également dans l'industrie tel que le lavage de la laine, distillation et réfrigération.

I.6.2. Inconvénients de l'énergie géothermique

1. Les sites les plus intéressants sur la planète sont déjà exploités.
2. Source d'énergie non renouvelable pour la production d'électricité (en raison du tarissement des puits géothermique).
3. Coût très élevé en raison du prix de réalisation du forage qui parfois ne peut rentable qu'à une profondeur considérable.
4. Nécessité de pose d'un terrain suffisant pour l'exploitation de l'énergie géothermique.

1.7. Comparaison des différents systèmes de chauffages :

Le tableau ci-dessous montre une comparaison entre les différents systèmes de production de l'énergie thermique les plus répandu dans les applications courantes.

Energie	installation	Aides (%)	investissement	cout kWh (c€)	entretien/abonnement (€)	cout global sur 15 ans (€)
fioul	6500	10	5850	9,5	160	78900
propane	6500	10	5850	13,4	160	107800
gaz naturel	6000	10	5400	6,4	300	57500
bois bûche	8000	15	6800	3,2	160	22900
bois granulé	17000	15	14450	5,7	160	39900
bois déchiqueté	23000	15	19550	3,8	160	37300
convecteurs	2000	0	2000	13,1	111	66500
pac géothermique	22000	26	16280	13,1	181	39900
pac air/eau	12000	15	10200	13,1	181	41500

Tableau (I.1) : cout globale de chauffages sur 15 ans pour différents solutions [3]

A partir de ce tableau on peut conclure que le chauffage le moins coûteux est le chauffage utilisé à partir de l'énergie géothermique.

1.8. Phénomène d'emmagasinement et de dégagement de chaleur

Le système d'échange entre l'air et le sol est principalement basé sur le phénomène de la géothermie. Ce phénomène est produit par la différence entre la température de la surface de la terre et celle de la 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 qui correspond à une couche située entre 2 à 5 m. Cette couche est caractérisée par un intervalle de température entre 20 et 27 C° en période estivale (en été) et entre 4 et 18 C° en période hivernale (en hiver), en été la surface est chaude, par contre en hiver, cette couche est relativement froide, à cette profondeur cette couche est à l'origine des échanges thermiques qui est caractérisée par un gradient de température au niveau de la surface.

La différence de température observée entre l'hiver et l'été, est induite de fait que la masse de la terre 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, pour la céder à l'air ambiant il est donc nécessaire de récupérer cette énergie pendant l'hiver par le biais de la géothermie. Le dégagement de cette énergie occasionne une diminution de la température du sol, qui va durer jusqu'à l'été, par conséquent il est possible de bénéficier de cette basse température (relativement) pour refroidir l'air ambiant extérieur qui se trouve chaud pendant l'été.

La quantité d'énergie thermique varie en fonction de la nature de la terre, l'emplacement et la condition climatique, Dans notre travail nous allons étudier le dimensionnement d'un tel système par le biais d'un dispositif dit échangeur profondeur de 03 en forme de serpent, ceci étant dans le but d'obtenir le meilleur usage possible de cette technique nouvelle dans notre pays qui est destinée dans le rafraîchissement de l'air des locaux, qui est faible, à haut rendement et dont le coût d'installation est réduit en comparaison avec d'autres systèmes conventionnels.

Le principe de fonctionnement de la géothermie est l'extraction de l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser dans le rafraîchissement en été et le réchauffement en hiver.

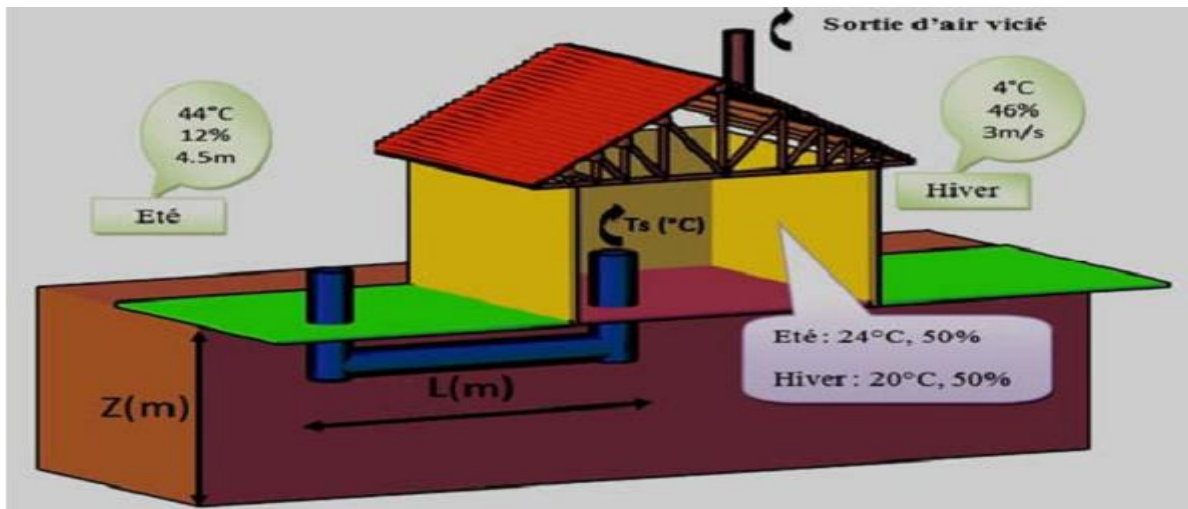


Figure (I.3) : principe de la géothermie par échangeur enterré air/sol étudié [12]

I.9. Principe d'exploitation du Puits Canadien ou puits provençal :

Le puits canadien consiste à faire passer avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf par des tuyaux enterrés, Il peut être réalisé de plusieurs façons :

- Soit en utilisant le vide sanitaire de la maison, que l'on aurait rempli de galets de grosses tailles et permettant la circulation de l'air.
- Soit en réalisant un réseau de tuyaux enterrés dans le sol, de 25 à 30 m de long, à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 mètres.

Généralement, à une profondeur située de deux à trois mètres la température du sol est pratiquement constante tout au long de l'année, elle varie entre 10 et 18°C selon les saisons, alors que l'air extérieur peut varier de -5°C à + 45°C dans la plupart des climats, l'exemple de l'Algérie. Un puits canadien semble une solution évidente pour exploiter cette température constante : l'air, au lieu d'être amené directement de l'extérieur, va circuler dans un collecteur enterré qui se trouve en contact avec le sol pour échanger ses calories. L'objectif étant que l'air à la sortie du collecteur soit très proche à la température du sol.

- En hiver, le sol à cette profondeur est donc plus chaud que la température extérieure, l'air étant froid se trouve donc préchauffé lors de son passage à travers la tuyauterie de l'échangeur enterré, est aspiré par la pompe à chaleur, n'est pas prélevé directement de l'extérieur d'où une économie de chauffage.
- En été, le sol est relativement froid que la température extérieure, ce qui permettra l'exploitation de la fraîcheur relative du sol pour tempérer l'air entrant dans le logement.[4]

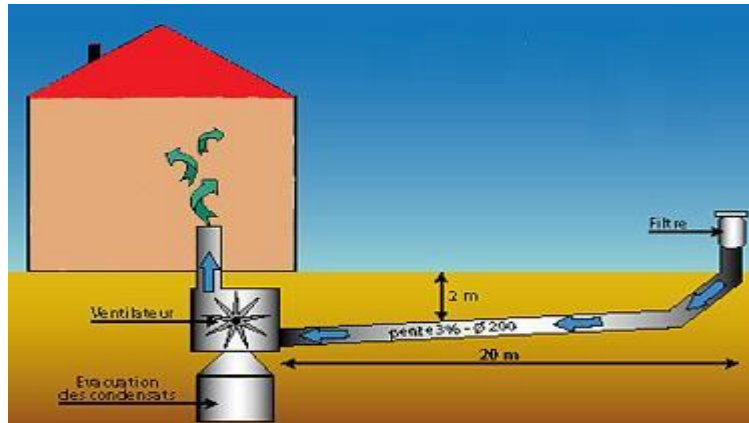


Figure (I.4) : Description d'un puits canadien [4]

Le principe d'un puits canadien consiste donc à faire acheminer l'air neuf du bâtiment dans un réseau de tubes enterrés dans le sol, un échange thermique entre le sol et l'air aura lieu permettant ainsi un pré chauffage de l'air en hiver et un rafraîchissement en été. La température du sol à 2 m de profondeur, très peu sensible aux variations du climat extérieur est généralement située entre 17°C l'été et 4°C l'hiver, l'air ainsi obtenu à l'intérieur des locaux est plus sain, chaud en hiver et frais en été.

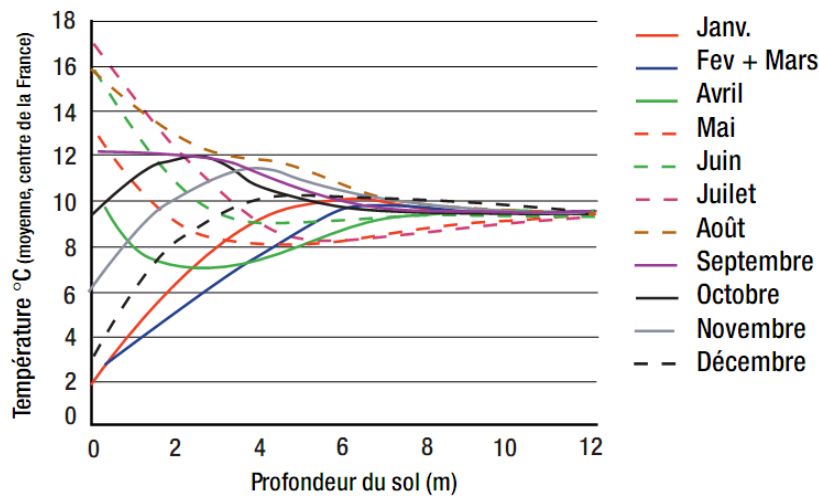


Figure (I.5) : Evolution de la température du sol en fonction de la Profondeur [5].

En hivers à deux mètres de profondeur, la température du sol est comprise entre 4 et 7°C, dans le cas d'une température extérieure de -10°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +2°C permettant ainsi une économie de chauffage pouvant aller jusqu'à 15% suivant les régions. Le puits canadien permet également de maintenir hors gel un bâtiment. Lorsque ces puits sont couplés à un système de ventilation double flux avec échangeur. D'autre part avec le puits canadien, il n'est plus nécessaire de prévoir un dispositif anti-condensation, permettant ainsi de réaliser des économies de chauffage en cas d'utilisation d'un échangeur thermique [6].

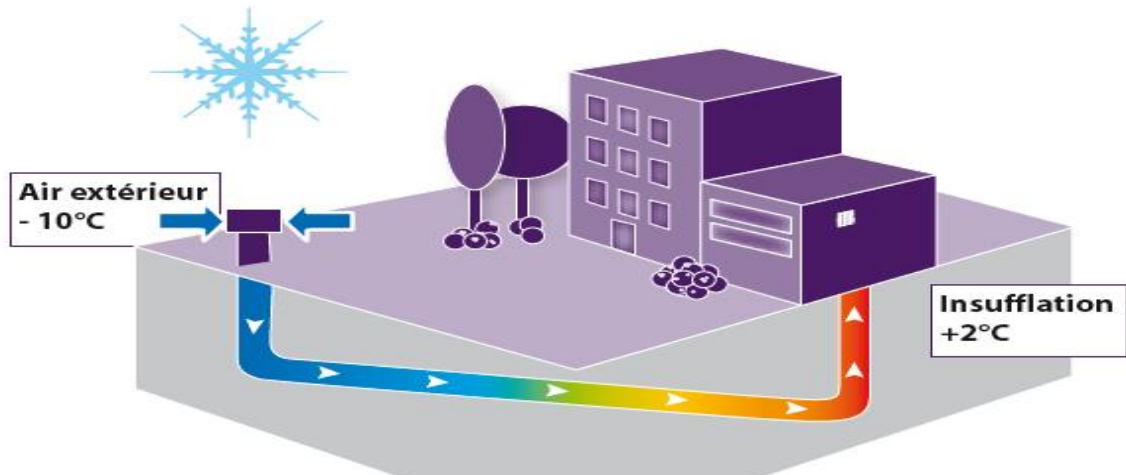


Figure (I.6) : Description d'un puits canadien en Hiver [6]

En été à deux mètres de profondeur, la température du sol est d'environ 15°C, dans le cas d'une température extérieure de +30°C, l'air neuf, sera introduit dans le bâtiment à +24°C permettant un rafraîchissement de l'air ambiant sans avoir recours à un système de climatisation et de renoncer à une climatisation classique en raison des avantages obtenus qui permettent d'obtenir des conditions de vie acceptables, un logement sain et agréable [6]



Figure (I.7) : Description d'un puits canadien en été [6]

En périodes intermédiaires, l'amenée d'air neuf passé soit par le collecteur enterré soit par la prise d'air directe en fonction de la température extérieure. la commande est automatique par thermostat ou manuelle par la régulation de débit, dont la vitesse de l'air dans le conduit ne dépassera pas 3 m/s et le dimensionnement du conduit tiendra compte de la nature du sol, et comprendra une pente d'environ 2% et une évacuation des condensats produits en été cette pente permet à l'eau éventuelle de couler vers le point d'évacuation.

I.10. Recommandations à prendre durant la réalisation d'un puits canadien :

1. Evitez coudes et angles lors de la conception d'un système de rafraîchissement de l'air par puits canadien.
2. Durant la pose du réseau de conduites, il est conseillé de le faire avec une pente de 2% au minimum dans le sens de l'aspiration pour l'évacuation des condensats.
3. En cas de présence d'une forte concentration de Radon dans le sol, seule une solution étanche sera envisageable.
4. Gardez une distance suffisante entre les différents conduits du réseau constituant l'échangeur enterré.
5. Eviter la mise en place de sable dans la zone d'enrobage et le lit de pose afin d'obtenir un transfert thermique optimal [7].
6. Choisir le bon matériau de fabrication, généralement en PVC haute pression (polypropylène) ayant une très bonne conductivité thermique ($\lambda = 0.17\text{W/m K}^\circ$) permettant d'optimiser le bon fonctionnement du puits canadien, d'autre part, il devrait tenir aux chocs élevés pendant les travaux de pose, de manutention sur chantier et d'éventuels mouvement du terrain.
7. Une rigidité élevée garantissant la rectitude des tubes enterrés et ne nécessitant pas de pose sur un lit de sable qui inflige une diminution l'échanges thermiques avec le sol avoisinant.
8. Etat de surface intérieure lisse facilitant l'écoulement des condensats et les opérations d'entretien.
9. Etanchéité vis à vis des agressions externes, humidité, nappes phréatiques et racines des arbres ...etc.

Dans cette étude on s'intéresse au dimensionnement d'un échangeur enterré, où nous allons prendre en considération de nombreux paramètres qui interviennent simultanément afin d'évaluer rigoureusement les performances thermique d'un tel dispositif, les paramètres que allons considérer sont, la longueur de l'échangeur, le diamètre de la conduite qui constitue le réseau, le débit d'air soufflé, la profondeur d'enfouissement et le type de sol, la distance entre les tubes, la température du bâtiment,

I.11.Principaux travaux de recherche réalisés sur le procédé du rafraichissement par géothermie :

En 2002 *Pierre Hollmuller* [7] dans une étude théorique et expérimentale a utilisé l'échangeur air/sol pour le chauffage et le rafraichissement de l'HABITAT. Cette étude est basée sur une campagne de mesures récoltées et une simulation effectuée par le biais d'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. Pour réaliser son travail, l'auteur a suivie les étapes suivantes :

Une brève présentation des projets pilotes à partir des fondements théoriques nécessaires à la compréhension et la quantification des flux de chaleur échangés entre le sol et les parois des tubes acheminant l'air, ainsi, après un rappel des paramètres physiques du base, la présentation du modèle numérique, le potentiel du stockage diurne, le fonctionnement d'un stockage en sol de type diffusif avec un stockage en cuve de type capacitif, dont l'exemple des résultats obtenu est représenté sur la figure (I.8) ci-dessous.

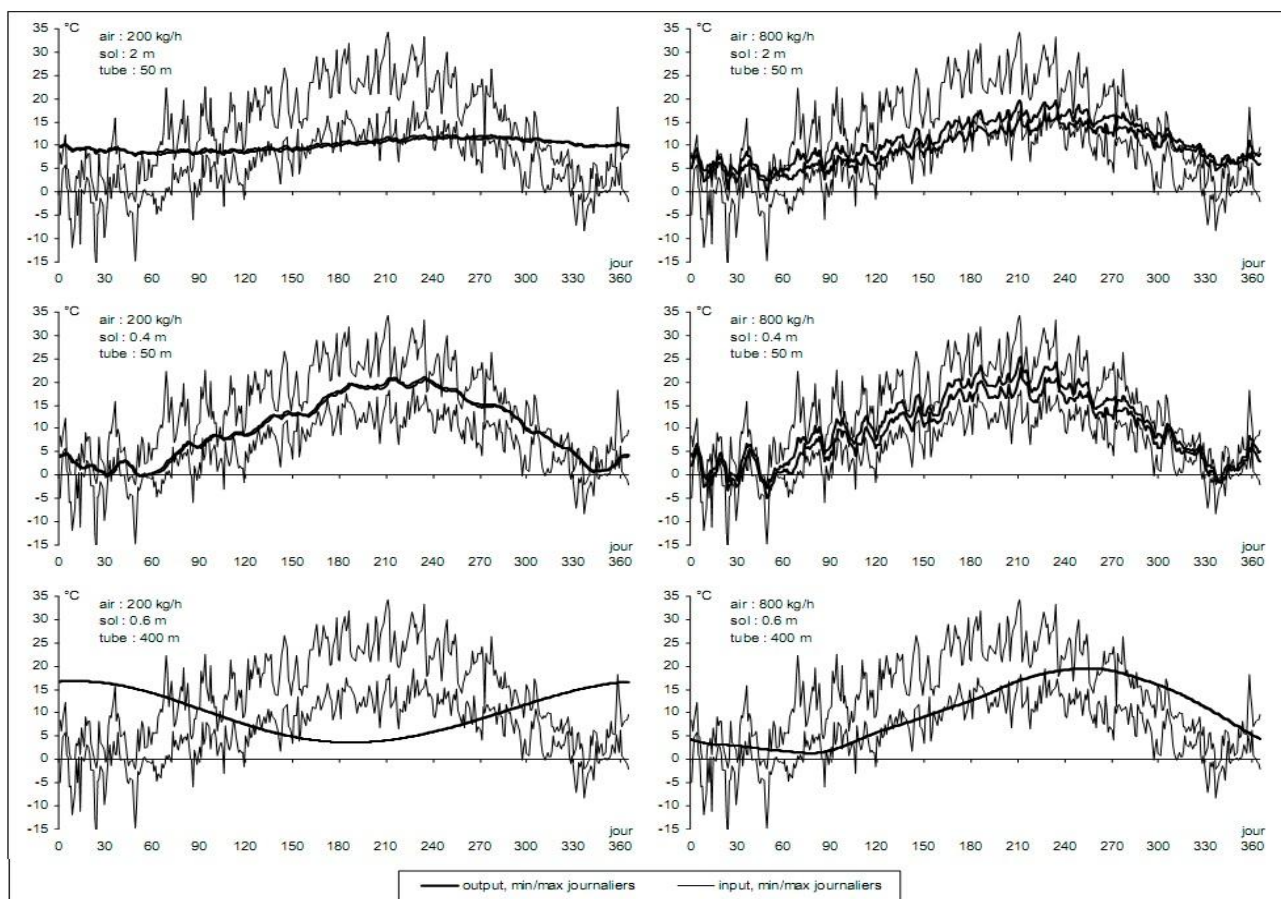


Figure (I.8) : Modélisation analytique par transformée de Fourier d'un échangeur air/sol à condition au bord adiabatique, étude paramétrique.[7]

L'auteur conclut l'importance de couplage diffusif entre l'échangeur et le bâtiment (stockage solaire qui participe fortement à la réduction de la demande de chauffage) température à la sortie de l'échangeur qui se situe au dessous ou en dessous du seuil de confort. Dans le cas de puits canadiens, l'amortissement hivernal de l'oscillation annuelle, à des températures situées en dessous du seuil de confort inférieur de 20°C, n'induit rien d'autre qu'une économie sur le préchauffage du renouvellement d'air auquel elle est liée par minimisation du débit faible complémentaire du puits canadiens avec le récupérateur sur air vicié. D'autre par l'amortissement estival de l'oscillation diurne est suffisant pour produire une température de ventilation en dessous du seuil de confort supérieur à 26°C, qui peut être accrue par augmentation du débit.

En 2005 *David BARTOLOMEU [8]*, a entamé une étude expérimentale sur le rafraîchissement de l'air par procédés géothermie dans la région de Romillé en France, il a obtenu des résultats permettant monter l'efficacité cette technique. Dans ce travail il a créé une station de mesure à Romillé, les expérimentations ont débuté depuis l'été 2003, ce qui permet d'obtenir un total de 70 000 relevés au cours de 112 jours d'enregistrement. Le principe de la station expérimentale est basé sur les échanges de températures entre le sol et l'air circulant dans le réseau de tubes enterrés. Un bon dimensionnement de ce système est nécessaire pour optimiser ses performances qui sont analysées tout au long de l'année en distinguant les saisons hivernale et estivale.

L'échangeur thermique de Romillé est constitué d'un réseau de 36 tubes de 16 cm de diamètre, d'une longueur de 25 m, situé à 3 niveau de profondeurs respectivement de 2 m, 2,5 m et 3 m.

Les tubes sont disposés en quinconce et espacés les uns des autres d'une distance entre axe de 50cm. Les tubes sont scellés sur des murets transversaux en béton espacés 2 m les uns des autres. D'autre part un caniveau est prévu en sortie de l'échangeur avec une pente de 2% permettent de recueillir les eaux de condensation et de les évacuer en cas de besoin à l'aide d'une pompe.

Deux fosses de réception en béton sont construites à l'entrée et en sortie d'échangeur, et un ventilateur est ajouté à l'entrée du bâtiment afin de compenser les pertes de charge générées par le système.

Le sol est constitué d'un sable fin compacté qui entoure l'ensemble des 36 tuyaux. Au dessus le couvert végétal est présent sur environ 50 cm

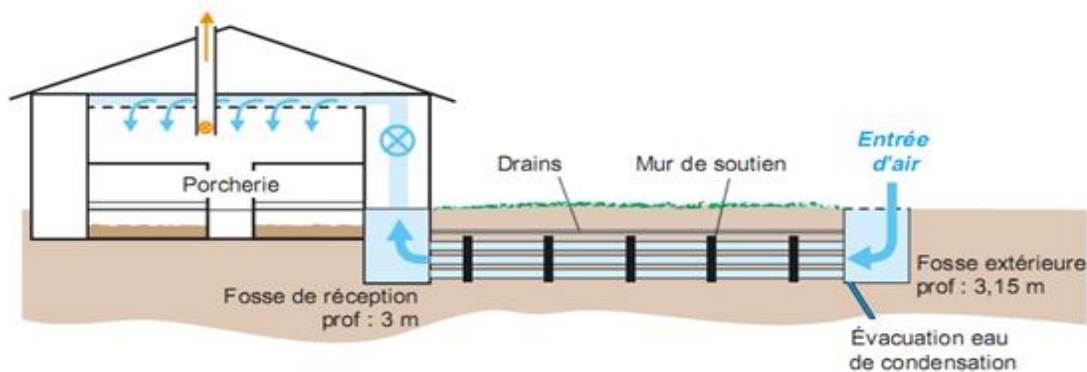


Figure (I.9) : schéma de principe de l'échangeur thermique de Romillé [8]

L'installation de cet échangeur permet de conditionner l'air destiné à deux salles d'engraissement de 48 places, plusieurs sondes thermiques ont été placées à l'entrée, au milieu et en sortie des tuyaux, ainsi que dans le sol à 2m, 2,5 et 3 m de profondeur. Les débits d'air soufflé évoluent d'un minimum de 8 m³/h à un maximum de 70 m³/h. Les résultats obtenus montrent un réchauffement proche de 10°C lorsque la température hivernale est de -2°C et un refroidissement en été maximal de 13,4°C lorsque la température extérieure avoisine les 32°C.

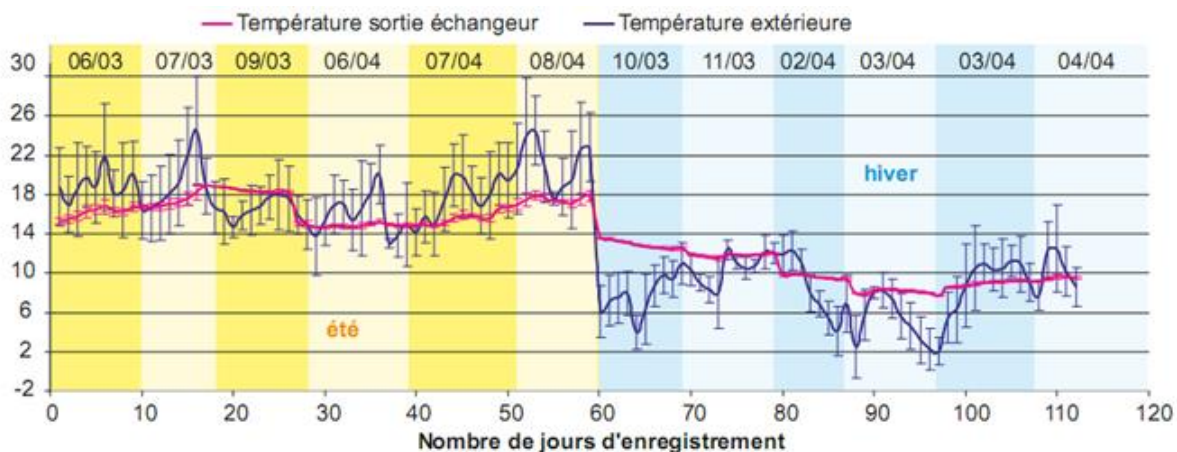


Figure (I.10) : Evolution de la température au cours des campagnes d'enregistrement [8]

En période hivernale, la température du sol est supérieure à celle de l'air extérieur, l'échangeur permet de réchauffer l'air de 10 °C dans les conditions extrêmes, par contre en période d'été, la température du sol est inférieure à celle de l'air extérieur, l'échangeur permet le rafraîchissement l'air dans les conditions extrêmes, dont la variation dépend des conditions climatiques du site environnantes.

	Nombre de jours d'enregistrement	Température extérieure moyenne (en °C ±Ecart Type)	Température sortie échangeur (en °C ±Ecart Type)	Température du sol à -3m (en °C ±Ecart Type)	Débit de ventilation (m³/h/porc ±ET)
Saison estivale	59	18,0 ±4,4	16,2 ±1,3	15,1 ±1,3	42,0 ±11,3
	12	22,0 ±4,5	17,2 ±1,0	15,3 ±0,6	53,0 ±9,1
	Le jour le plus chaud	24,0 ±5,9 T.max = 32,0	17,4 ±0,7 T.max = 18,6	15,3 ±0,0 T.max = 15,3	55,6 ±8,8 D.max = 68,6
Saison hivernale	43	8,4 ±3,7	10,2 ±1,8	11,5 ±2,6	24,0 ±5,7
	7	3,2 ±2,5	8,9 ±1,7	10,3 ±2,3	20,0 ±2,8
	Le jour le plus froid	2,5 ±3,1 T.min = -1,8	7,9 ±0,0 T.min = 7,8	9,5 ±0,0 T.min = 9,4	20,3 ±2,8 D.min = 20,3

Tableau (I.2) : Gains thermique de l'échangeur testé [8]

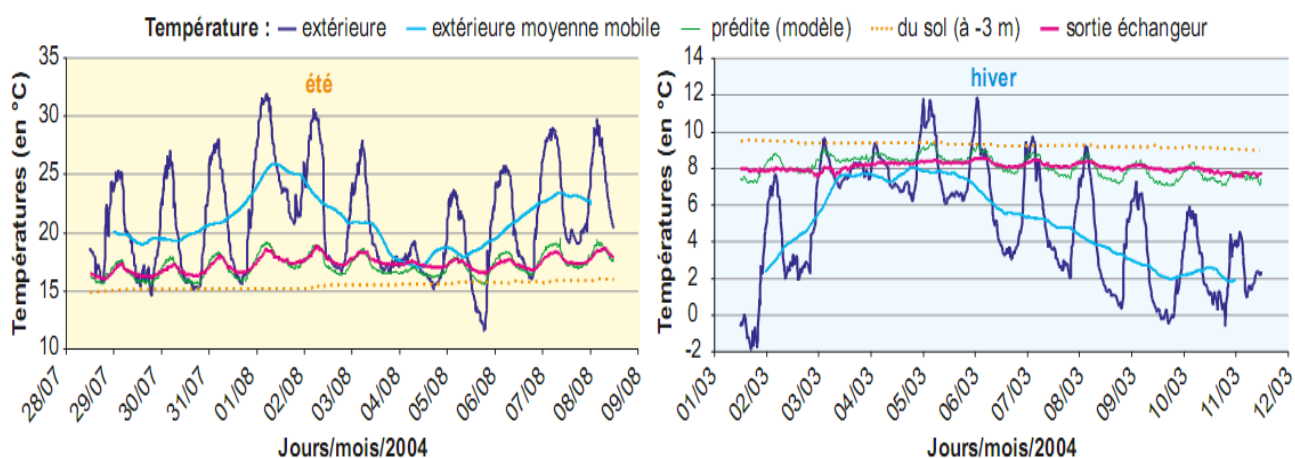


Figure (I.11) : Evolution des températures les plus chaudes d'été et les plus froides d'hiver [8]

Le décalage dans le temps est indispensable pour le bon fonctionnement du dispositif échangeur enterré, il se manifeste d'autant plus que le sol est profond et de nature plus inerte. Le rendement thermique de L'échangeur augmente avec la longueur des tuyaux. Sur l'ensemble de l'année, il est d'environ 55% à 12.5 m et de 80% à la sortie de l'échangeur à 25 m.

Saison	ETE	HIVER
Débit (m³/h)	42,0 ±11,3	24,0 ±5,7
Nombre d'observation	1557	1146
Rendement η (x=25m)	79 %	77 %
Rendement η (x=12.5m)	50 %	59 %

Tableau (I.3) : Rendement de l'échangeur à 25 m et à mi-longueur en fonction de la saison [8]

Le rendement η de l'échangeur thermique peut se calculer à différentes longueurs parcourues(x) depuis l'entrée de l'air dans le conduit échangeur enterré, à différentes profondeurs (p) et à différentes débits

(Qv), il caractérise l'efficacité du système est défini, comme étant le pourcentage d'utilisation de la différence de température entre l'air et celle du sol à une profondeur donnée :

$$\eta(x, p, Q_v) = \frac{T_{(x,p)} - T_{ext}}{T_{sol(p)} - T_{ext}} \cdot 100 \tag{I.1}$$

L'efficacité d'un échangeur géothermique repose en partie sur la qualité des échanges entre le sol et l'air transitant dans le réseau souterrain, un sol plus inerte est beaucoup plus performant en termes d'échange thermique. La capacité d'accumulation de chaleur et la conductivité thermique étant plus élevées dans les sols humides. Les tubes doivent être choisis avec un diamètre de 14 à 20 cm. Lorsque le diamètre d'un tuyau est doublé on aura une perte de rendement de l'échange, les tubes doivent être: rigides, longue de 25m et positionnés à une seule profondeur. la vitesse de l'air dans les tuyaux ne devrait pas dépasser 3m/s pour favoriser une durée suffisante d'échange avec le sol.

L'étude présentée par **David AMITRANO** [9] à l'Université de Joseph .Fourier à Grenoble en 2006 a été basé sur des simulations numériques d'échange thermique par convection forcée dans un tube enterré. Ceci permet de mettre en évidence l'effet du diamètre, de la longueur, du débit volumétrique de la différence de température entre le sol et l'air entrant sur le flux thermique fourni par le puits canadien.

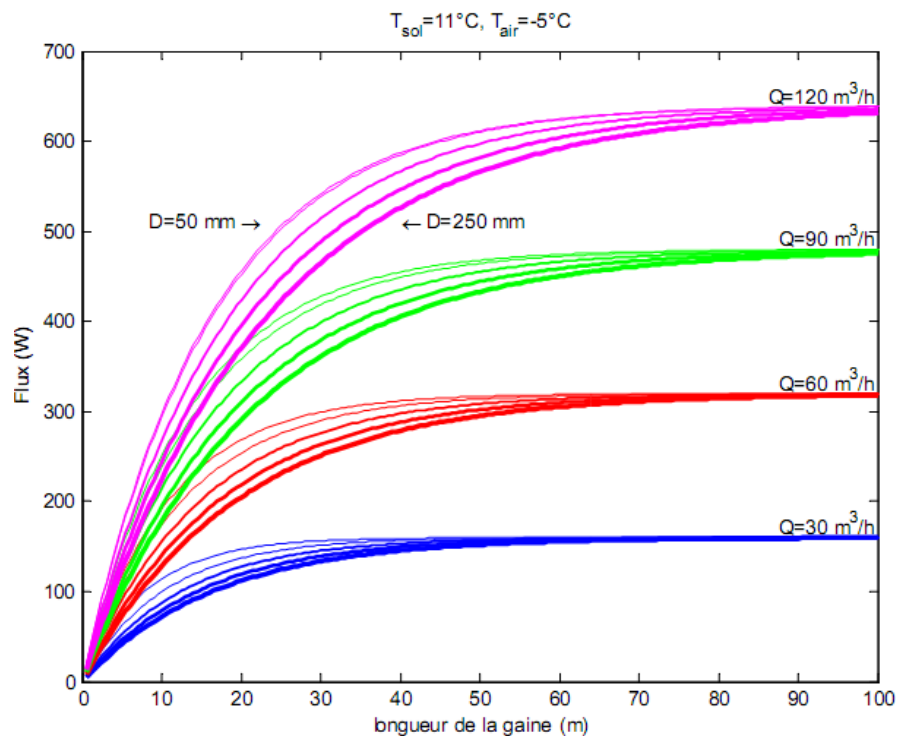


Figure (I.12) : Flux thermique d'un échangeur air/sol en fonction de la longueur de l'échangeur, du débit volumique et du diamètre du conduit [9]

Dans un second temps, il présente des simulations de flux annuel en fonction de la profondeur d'enfouissement de la gaine. Ceci permet de mettre en évidence les périodes d'apport de chaleur et/ou de fraîcheur au cours de l'année et la nécessité de coupure aux intersaisons.

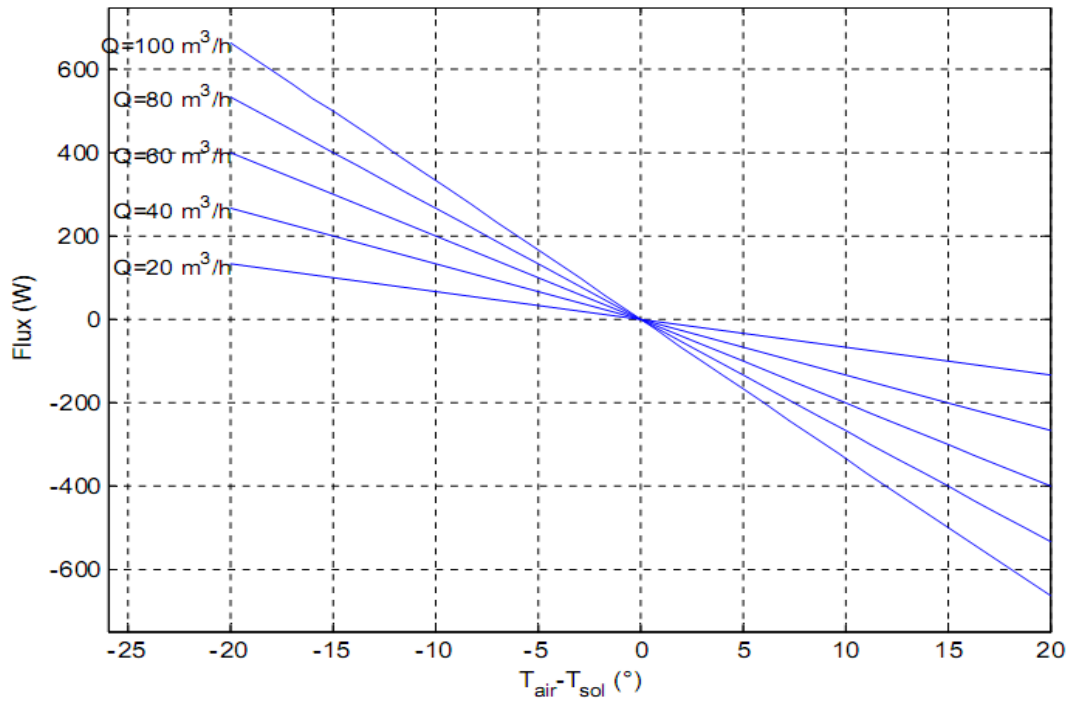


Figure (I.13) : Flux thermique récupérable en fonction de la différence de température air/sol et du débit volumique. [9]

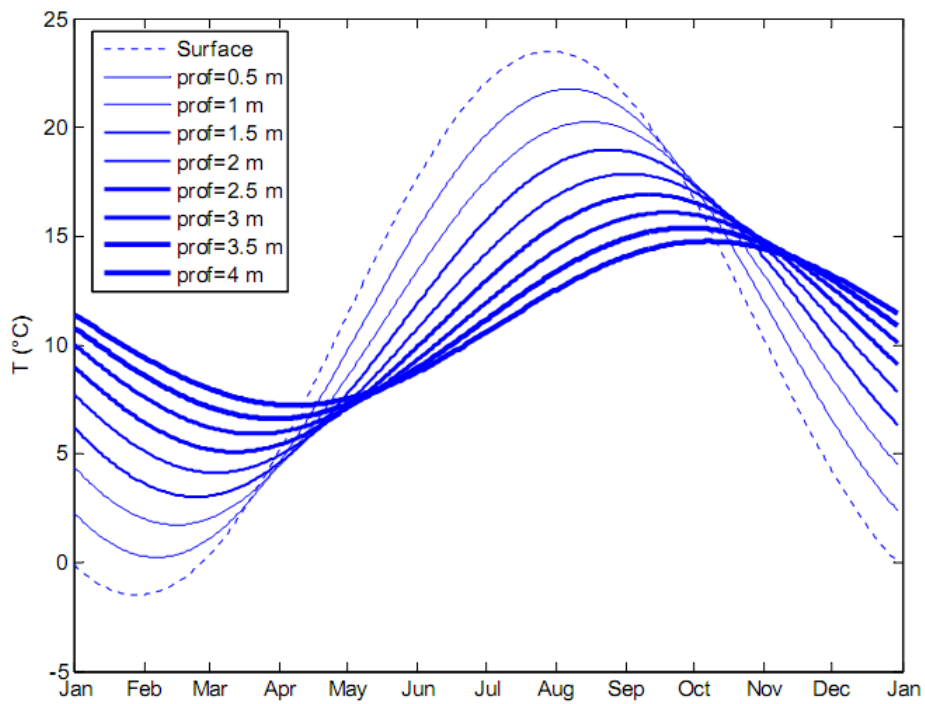


Figure (I.14) : Evolution annuelle de la température en surface et en profondeur, pour un cycle de moyenne de 11°C et d'amplitude crête de 25°C. [9]

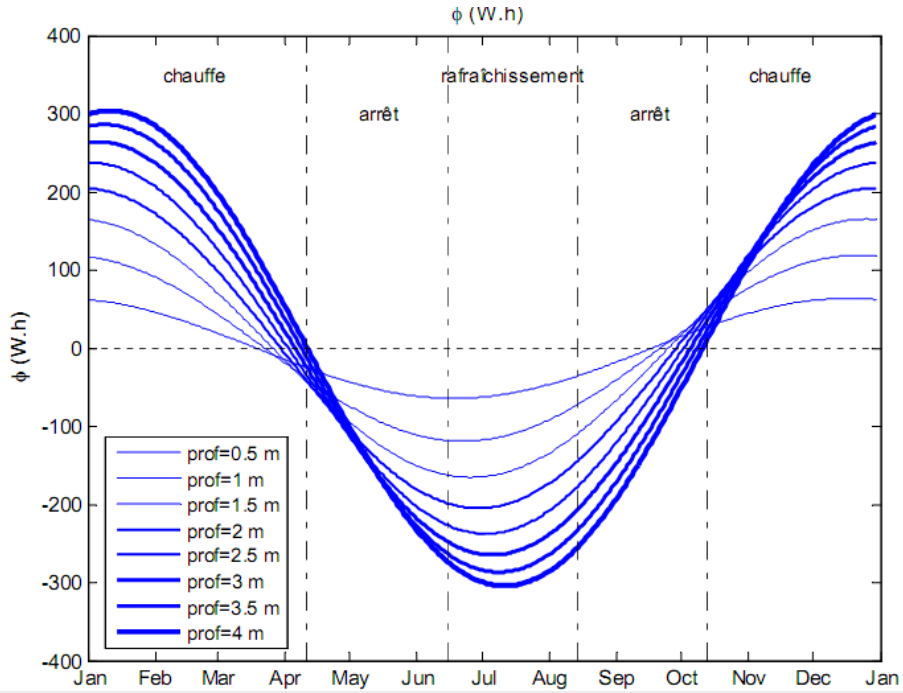


Figure (I.15) : Evolution annuelle de la différence de température entre la surface et la profondeur pour un cycle annuel. [9]

La période de chauffe considérée est du 15 octobre au 15 avril, par contre la période de rafraîchissement est du 15 juin au 15 août. La période d'arrêt correspond aux périodes pour lesquelles le rafraîchissement du bâtiment n'est pas souhaitable

Q=120 m3/h			Q=90 m3/h			Q=60 m3/h			Q=30 m3/h			L=25 m	Prof=1.5 m
d=0.1	d=0.15	d=0.2	d=0.1	d=0.15	d=0.2	d=0.1	d=0.15	d=0.2	d=0.1	d=0.15	d=0.2		
552	523	493	433	408	384	303	285	269	161	152	144	L=50 m	Prof=2 m
623	600	574	481	463	443	331	318	306	171	166	160	L=50 m	
674	660	643	513	503	491	347	341	334	175	173	171	L=50 m	
683	647	610	535	505	475	353	333	375	199	188	178	L=25 m	Prof=2.5 m
771	742	711	595	572	549	409	394	379	211	205	198	L=35 m	
816	795	834	635	622	607	429	422	413	217	215	211	L=50 m	
793	750	707	621	586	552	435	410	386	231	218	207	L=25 m	Prof=3 m
894	861	825	691	664	636	475	457	439	245	238	230	L=35 m	
967	947	923	736	721	704	498	489	479	252	249	245	L=50 m	
883	836	788	692	653	614	485	456	430	257	243	230	L=25 m	Prof=3 m
996	959	919	769	740	709	529	509	489	273	265	256	L=35 m	
1077	1055	1028	820	804	784	554	545	533	281	277	273	L=50 m	

Tableau (I.4) : Apport thermique annuel en période de chauffe, pour différentes configurations de longueur, profondeur diamètre de gaine, et de débit de ventilation. [9]

L'auteur conclut que les calculs exposés s'agissent d'une simple application de calcul d'échange thermique par convection forcée avec un échangeur à une gaine enterrée. Ils fournissent cependant des critères objectifs utiles pour le dimensionnement d'un échangeur air/sol dit (puits canadien).

Le flux thermique est fonction du débit volumique de l'air soufflé dans l'échangeur enterré et de la différence de température, de la longueur nécessaire pour atteindre le flux thermique maximal qui augmente avec le débit d'air et diminue avec le diamètre du conduit. L'optimisation sur le seul critère thermique pourra conduire à des pertes de charge pour un système de ventilation usuel. Le choix du diamètre, de la longueur et du nombre de gaines devra se faire en prenant en compte les pertes de charges admissibles. Le sol voit ses variations annuelles de température diminuer de manière exponentielle avec la profondeur. Ainsi le gain en réchauffement/rafraîchissement sera d'autant plus grand que la profondeur est importante, dont le gain augmente de manière importante pour une profondeur de 2 ou 3 m d'enfouissement.

En 2010 *N.Moummi* et al [10], ont menés une analyse théorique et expérimentale sur la technique du rafraîchissement de l'air par la géothermie dans le site de Biskra. L'étude concernant le rafraîchissement par la géothermie, constitue un projet de démonstration d'une technique qui n'est pas exploitée convenablement en Algérie. Ce procédé a pour support technique un échangeur air/sol enterré dans le site de l'université de Biskra, qui a pour objectif d'étudier les paramètres qui influent principalement sur l'efficacité de l'échangeur et sur la température de l'air à la sortie.

L'auteur vérifie expérimentalement en premier lieu les modèles mathématiques qui ont été établis jusqu'à présent, qui donnent la meilleure évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction des différents paramètres structurels (diamètre, longueur, débit, température de sol, profondeur), en deuxième étape, une étude de synthèse et de comparaison a été entamée entre les résultats théoriques développés avec ceux obtenus expérimentalement. Les résultats expérimentaux issus des mesures effectuées sont montrés sur les figures suivantes.

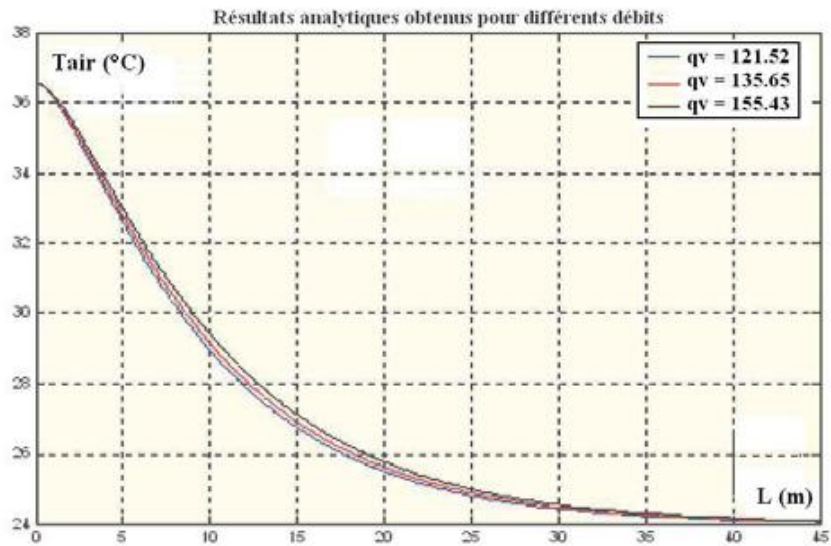


Figure (I.16) : Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour différents débits d'air [10]

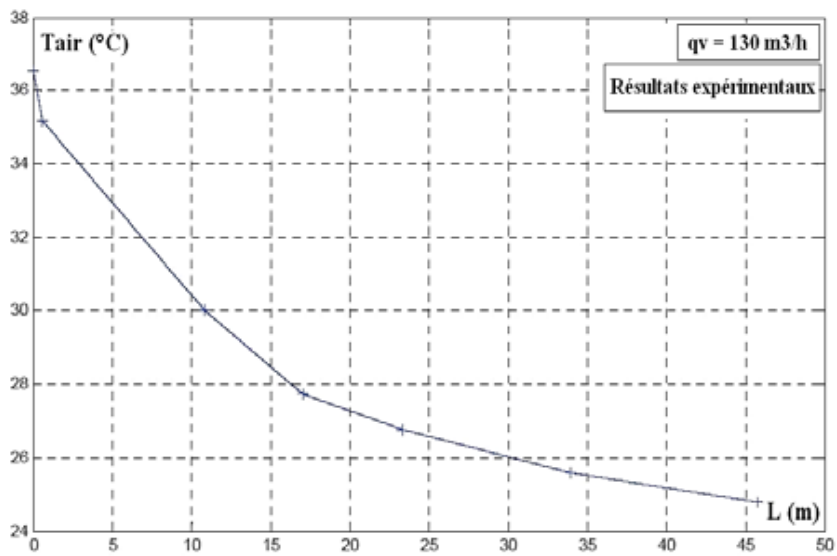


Figure (I.17) : Variation de la température de l'air pour un débit de 130 m³/h en fonction de la longueur de l'échangeur [10]

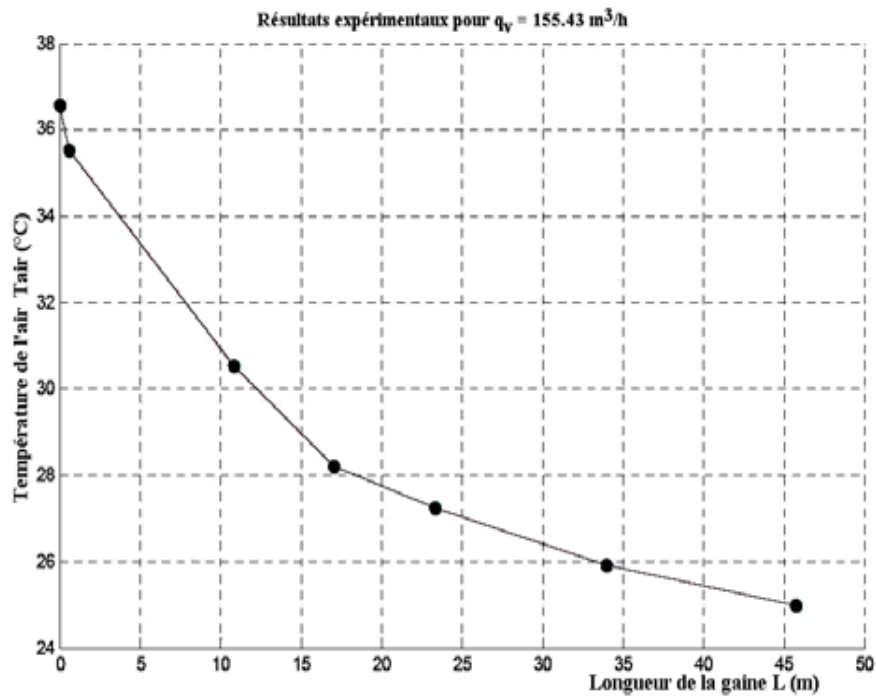


Figure (I.18) : Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur [10]

Cependant les résultats expérimentaux par comparaison à ceux analytiques ont permis de conclure que le modèle présenté pourra être amélioré. En effet, expérimentalement la température de l'air continue à chuter avec la longueur de l'échangeur alors que le régime thermique est loin d'être établi.

M. Benhammou et al [11] 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.

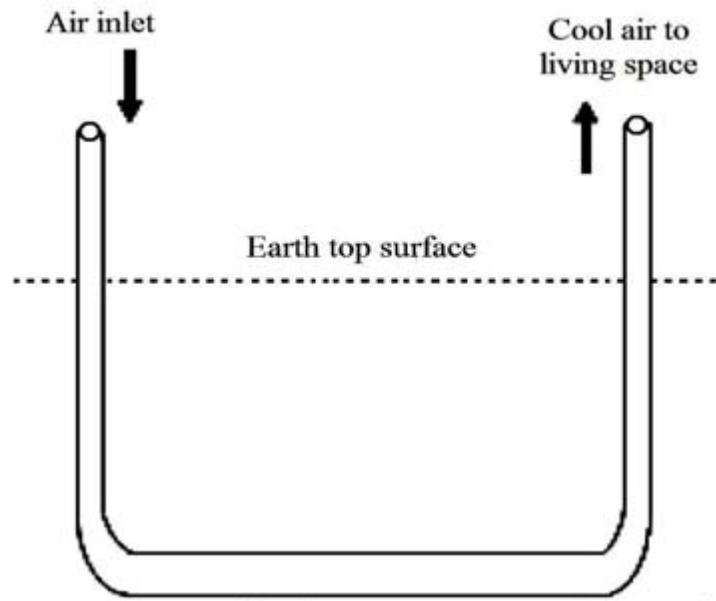


Figure (I-5) :Représentation de l'échangeur géothermique à air [11]

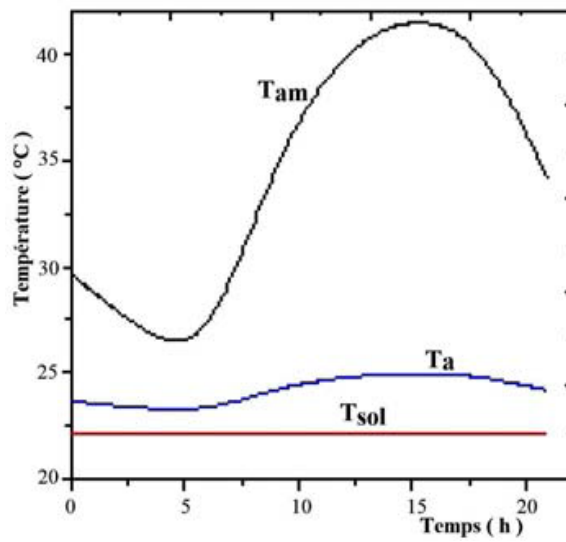


Figure (I-6):Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juin

[11]

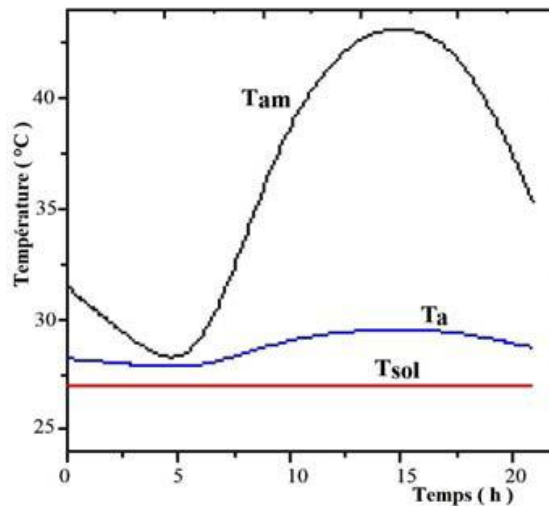


Figure (I-7):Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juillet [11]

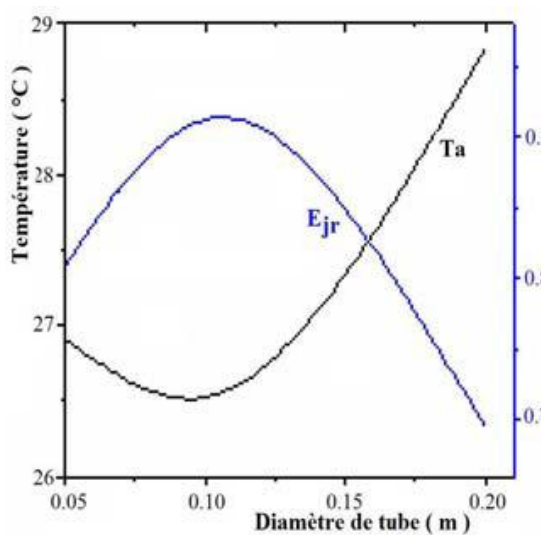


Figure (I-8): Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction du diamètre du tube [11]

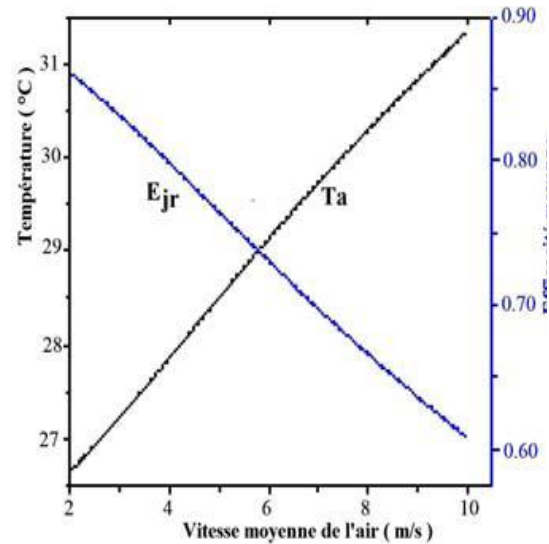


Figure (I-9): Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction de la vitesse moyenne de l'air dans le tube [11]

Dans ce travail, ils ont présentés une étude sur un échangeur géothermique à air destiné à 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.

L'étude présentée par **B. Mebarki et al** [12] en 2011 a été réalisée sur un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar .Dans le contexte énergétique actuel, les systèmes géothermiques sont fortement développés dans le secteur du bâtiment. Parmi ces systèmes intéressants sur le plan énergétique, on trouve notamment les échangeurs air-sol appelé communément 'puits canadien', technologie adaptée d'un système déjà employé par nos ancêtres.

Dans le présent travail, une étude des performances d'un échangeur air-sol a été entreprise par voie de modélisation analytique. Ils ont préliminairement validé le modèle de la température du 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.

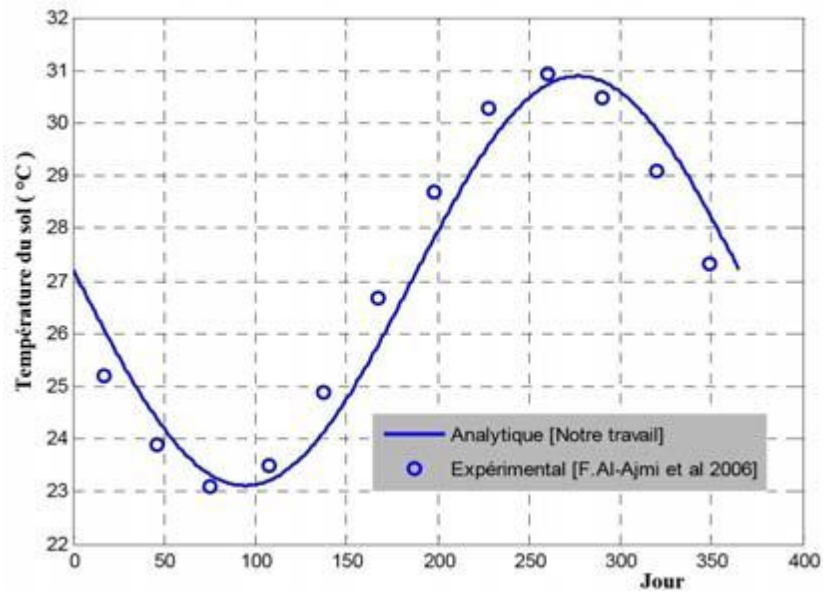


Figure (I-10) : Variation de la température du sol durant toute l'année [12]

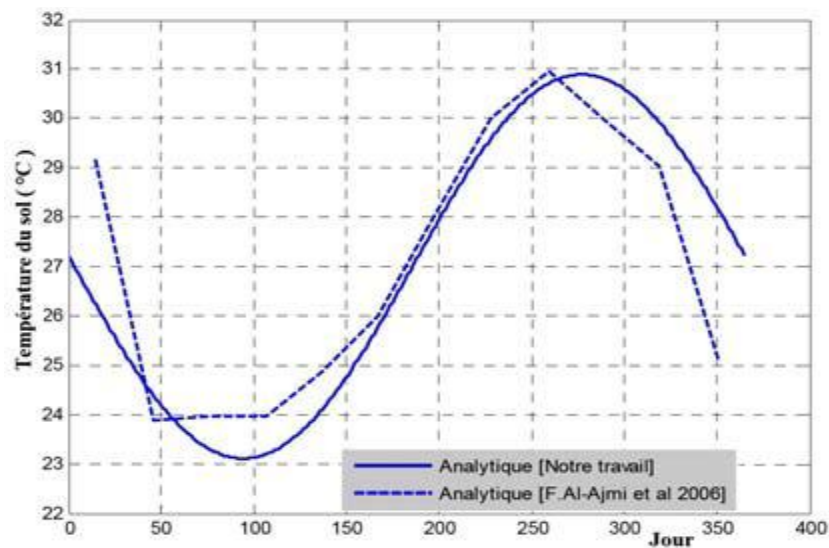


Figure (I-11) : Variation de la température du sol durant toute l'année [12]

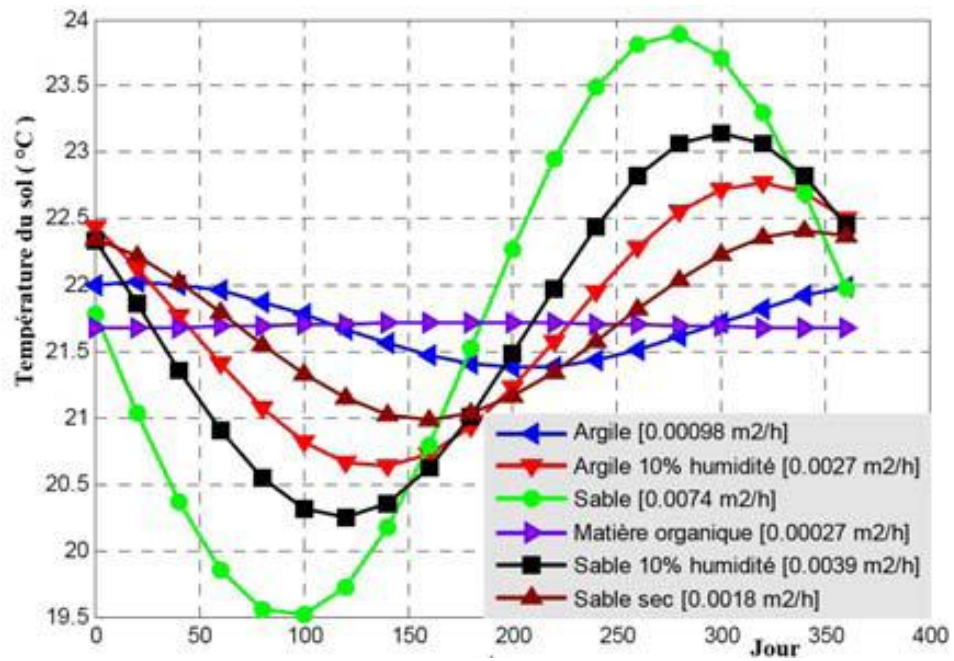


Figure (I-12) : Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes diffusivité thermique [12]

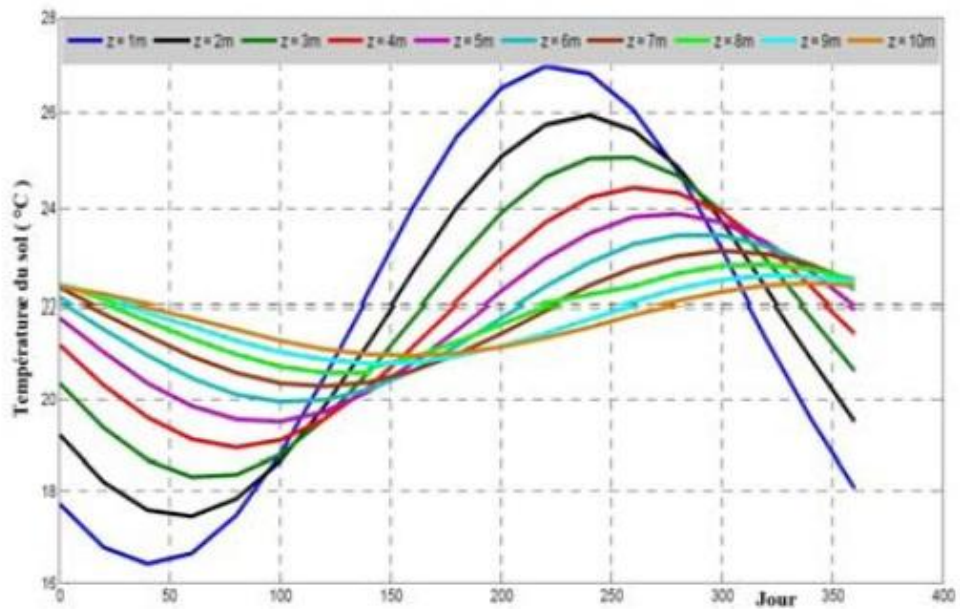


Figure (I-13) : Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes profondeurs dans le sol [12]

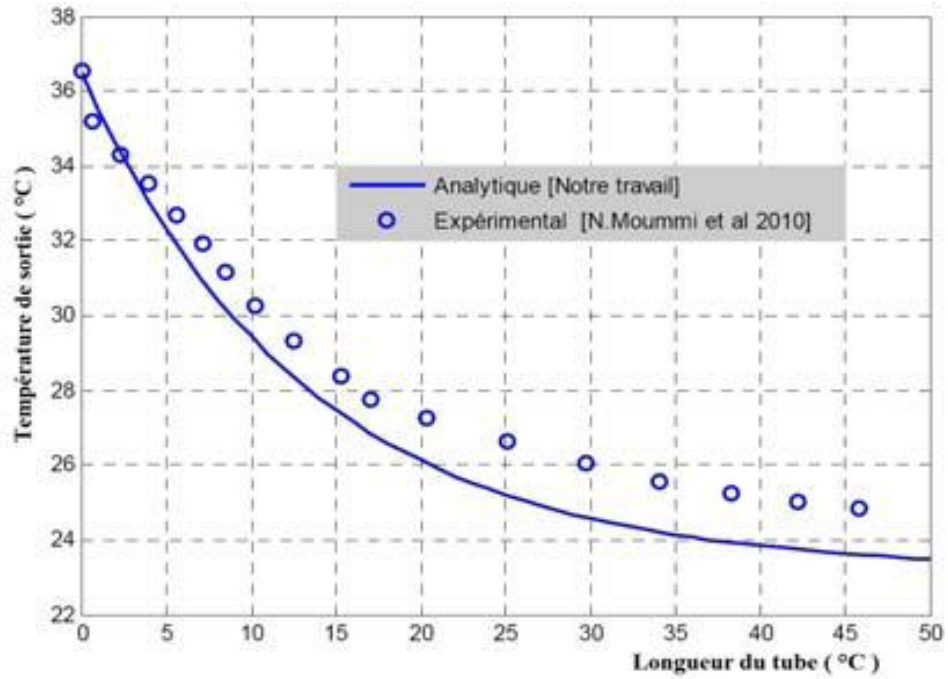


Figure (I-14) : Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour un débit volumique $q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$ [12]

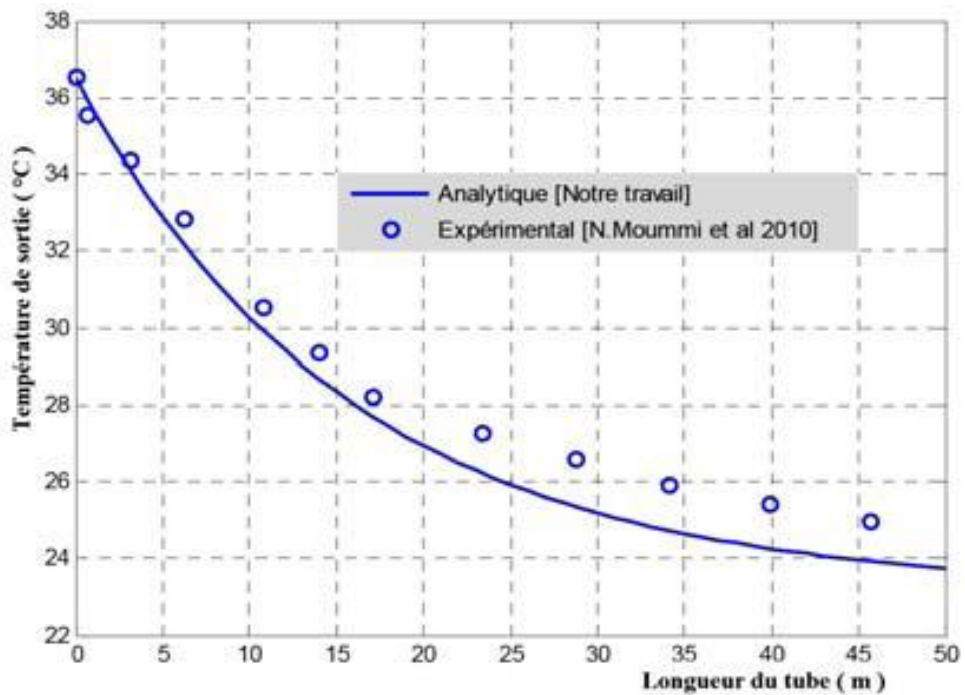


Figure (I-15) : Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour un débit volumique $q = 155.43 \text{ m}^3/\text{h}$ [12]

L'intérêt de l'échangeur thermique air-sol est majeur, puisqu'il améliore durant toute l'année, les conditions thermiques recherchées, qu'il soit utilisé en mode de réchauffement en hiver ou pour le refroidissement en été, il intervient de manière efficace sur l'amortissement des amplitudes thermiques. Ce système favorise un confort d'ambiance pour les individus en limitant les contraintes thermiques. La rentabilité de l'échangeur peut être atteinte, s'il permet d'avoir une ambiance plus homogène en termes de température permettant effectivement de gagner en croissance et en indice de consommation.

Dans son étude *Mohamed Saadeddine* [13] en 2012 a réalisé une étude de description et définition détaillée des échangeurs enterrés ainsi que leurs composants, il analysé les paramètres physique qui influent sur les performances thermiques d'un tel dispositif, puis il s'est intéressé à la stabilité saisonnière de la température du sol qui peut être exploiter dans le rafraîchissement de l'air en période d'été et le chauffage en hiver par l'utilisation d'échangeur air/sol qui enterré a cette profondeur, ensuite l'auteur a proposé un modèle mathématique pour suivre l'évolution de la température du sol à n'importe quelle profondeur et à n'importe quelle journée de l'année, une étude de modalisation numérique est entamée qui a pour objectif de calculer la température de sortie à chaque jour durant la période estivale dans la région de Biskra. Les courbes montrent l'évolution la température de l'air dans l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie pour trois débit différents.

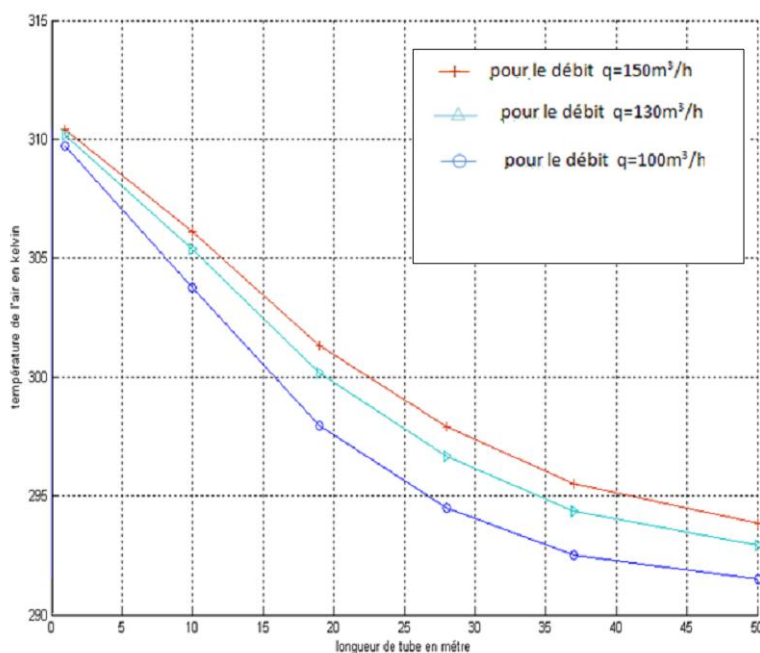


Figure (I.16) : Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour la 200^{ème} journée de l'année [13]

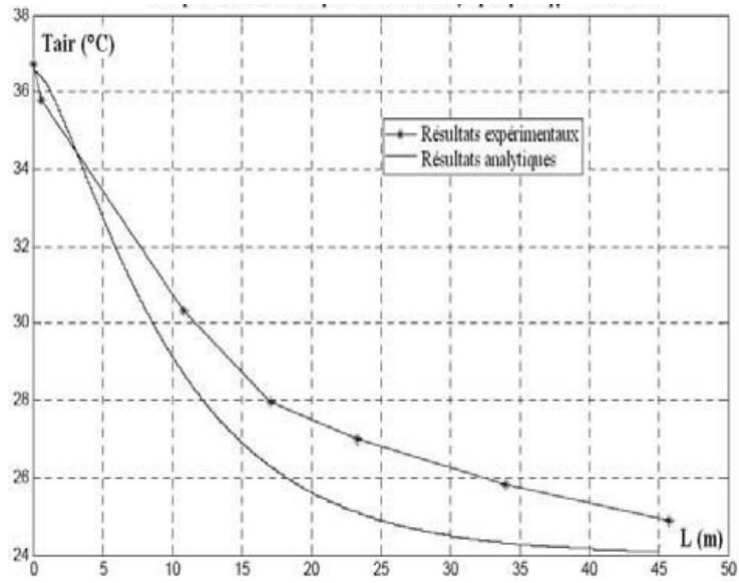


Figure (I.17) : Comparaison résultats expérimentaux et analytique pour $q_v=121.52 \text{ m}^3/\text{h}$ [13]

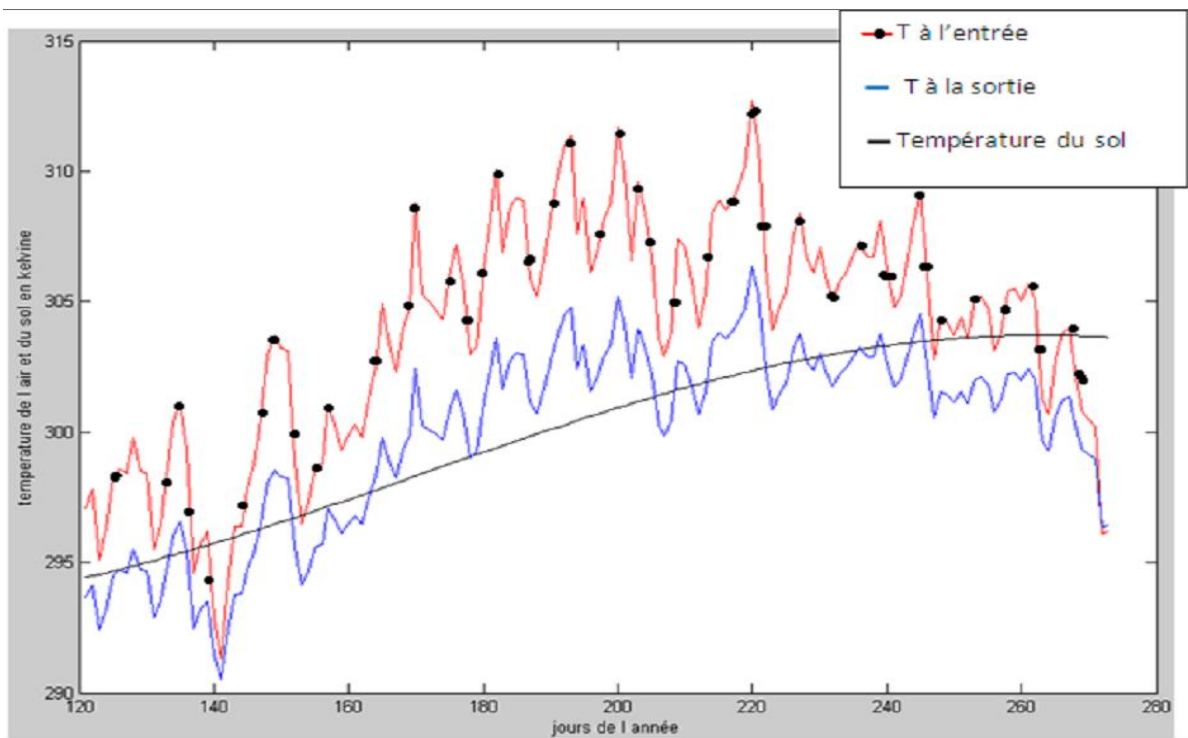


Figure (I.18) : Evolution annuelle de la température à la sortie de l'échangeur [13]

Chapitre II

Modélisation de la température du sol et de l'air à la sortie de l'échangeur (air/sol) enterré

II.1- INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but d'établir un modèle mathématique permettant de déterminer la température du sol à différentes profondeurs et la température de l'air à la sortie de l'échangeur en considérant les principaux facteurs intrinsèques et extrinsèques par rapport au système étudié.

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. Donc 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.

II.2- Description de l'échangeur enterré :

L'échangeur air-sol est un système de rafraîchissement dans le bâtiment très peu consommateur d'énergie qui exploite l'inertie thermique du sol.

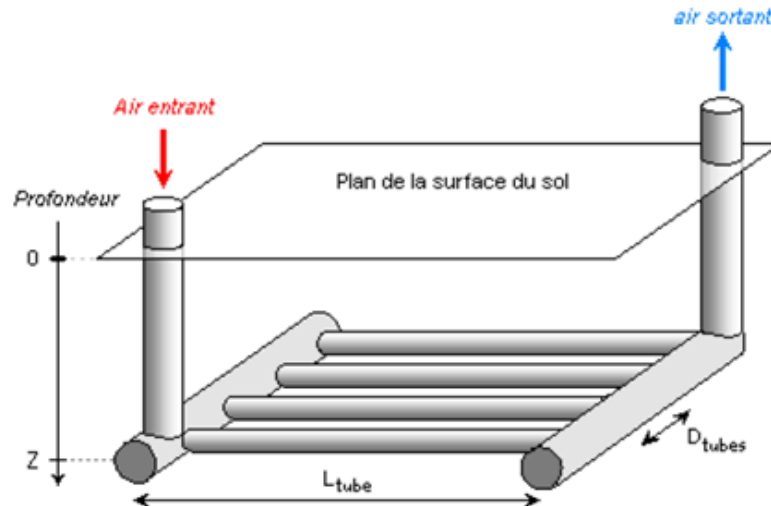


Figure (II-1) : schéma de la géométrie du puits canadien [14]

Généralement l'échangeur (air/sol) enterré est constitué d'un réseau de tube de diamètre intérieur égale à 11 cm, d'une longueur de 50 m, situé à une profondeur de 03 m. Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 40 cm.

Un caniveau est aménagé à la sortie de l'échangeur et une pente de 2% permette de recueillir les eaux de condensation et de les évacuer à l'aide d'une pompe.

Deux fosses de réception en béton sont construites à l'entrée et la sortie de l'échangeur. Le pompage de l'air depuis l'entrée de l'échangeur jusqu'à la sortie est assuré par un extracteur d'air de débit variable. Pour mesurer la température de l'air à différentes position de l'échangeur enterré, des sondes thermiques (thermocouples) sont placées à l'entrée, au milieu et à la sortie du conduit échangeur, ainsi que dans le sol à 02 et à 03 m de profondeur.[13].

II.3- établissement des modèles mathématiques :

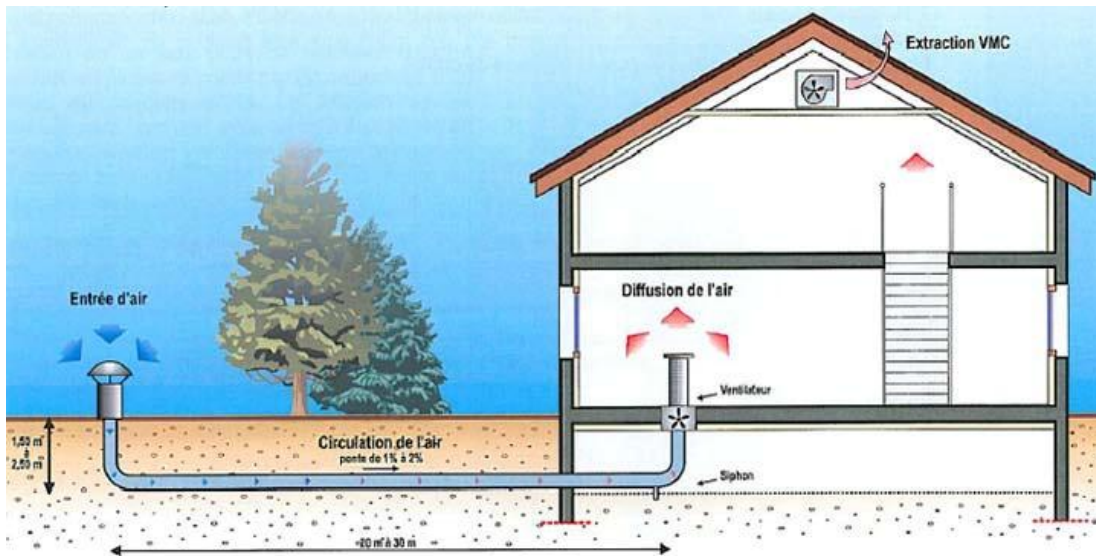


Figure (II.-2) : Schéma de principe d'une installation d'un échangeur enterré [14]

II.3.1- Analyse des paramètres à modéliser :

L'analyse approfondie de la littérature consultée nous amène clairement à identifier les paramètres influant sur le comportement thermique de l'échangeur air/sol enterré et à distinguer les plus prépondérants d'entre eux.

II.3.1.1- Débit d'air :

Le débit d'air dans les canalisations intervient simultanément sur l'échange convectif entre l'air et la canalisation et sur la puissance thermique apportée au bâtiment.

Un optimum est à déterminer, le débit global devant surtout correspondre au moins en partie aux besoins de renouvellement d'air des pièces ou de la zone à ventiler.

II.3.1.2- Longueur du conduit échangeur :

La longueur optimale de l'échangeur dépend essentiellement du débit dans les canalisations. En effet, d'après la bibliographie, on remarque que pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échangeur ne tempère plus l'air, il a atteint sa limite d'efficacité. Par contre, plus le débit augmente et plus cette longueur limite croît.

II.3.1.3- Diamètre du conduit échangeur :

L'augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais n'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement de l'air, le coefficient d'échange convectif chute. Ceci est dû

au fait que l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite, où va être échangée la chaleur. L'air circulant au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol.

Cet optimum est indépendant de la longueur de la canalisation. On obtiendra donc une relation directe entre débit d'air et diamètre optimal. En général, pour les débits utilisés, cet optimum se situe autour des 20 cm de diamètre.

II.3.1.4- Distance entre les canalisations :

La fonction de stockage et d'amortisseur thermique de l'échangeur est assurée par la couche de sol se trouvant en contact ou à proximité de chaque canalisation, l'épaisseur de sol concernée dépend de la période des phénomènes mis en jeux (Hollmuller, 2002).

Le rôle de la distance entre les canalisations n'a pas été réellement abordé dans les documents consultés. Cependant, il semble important d'assurer une distance suffisante pour maintenir une interaction mineure entre deux canalisations adjacentes. Une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour les variations journalières. Un stockage thermique saisonnier nécessiterait un espacement de l'ordre de plusieurs mètres qui n'est généralement pas envisageable en pratique.

II.3.1.5- La profondeur d'enfouissement des canalisations :

Le sol joue le rôle de tampon thermique entre l'extérieur et la canalisation enterrée. C'est lui qui isole cette dernière de l'influence des conditions atmosphériques. La profondeur d'enfouissement est donc un paramètre important qui va jouer sur la qualité de cette isolation, une profondeur plus grande améliore l'isolation de la canalisation et le déphasage.

Hollmuller (2002) [7] montre clairement que les variations de température de l'air extérieur sont amorties et déphasées par le sol, ceci est d'autant plus marqué que la profondeur est grande. Au delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne varie plus sous l'effet de l'évolution de la température extérieure. Seule la température moyenne évolue en fonction de la profondeur sous l'effet de la puissance géothermique provenant du manteau terrestre.

Il existe alors plusieurs manières d'aborder la question de la profondeur en fonction de l'usage attendu de l'échangeur air/sol enterré [15].

Dans cette étude on essaiera de trouver des expressions de température du sol en fonction de la profondeur et le temps (z , t) et les expressions de la température de l'air à la sortie de l'échangeur.

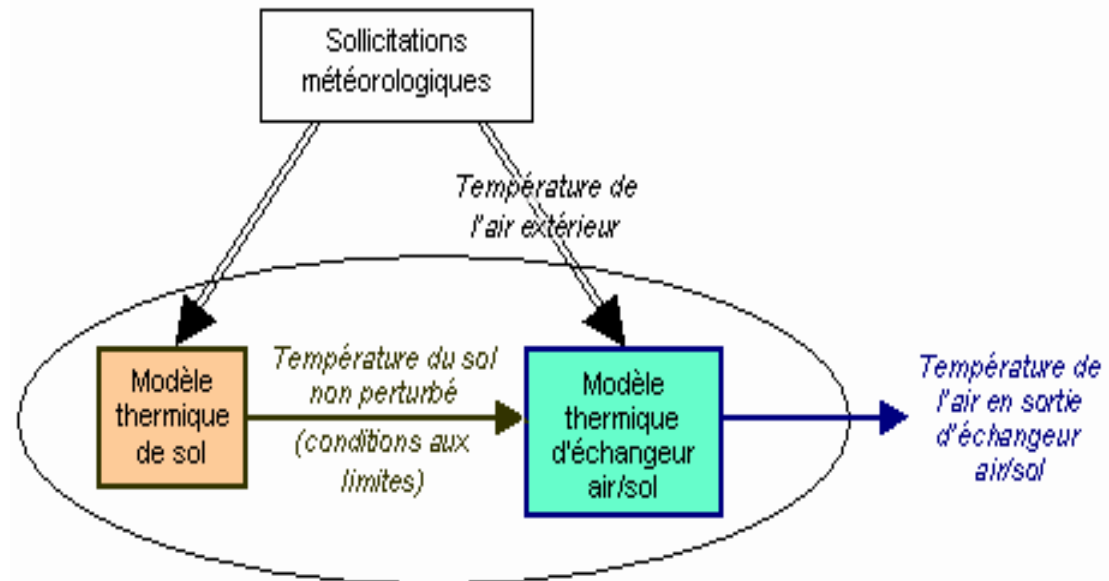


Figure (II-3) : Structure du modèle d'échangeur air/sol enterré [16]

II.4- Hypothèses considérées :

Dans ce qui suit on va considérer les hypothèses suivantes :

- la température extérieure du tube est constante, ce qui revient à considérer que. (l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangées)
- Le sol est considéré comme étant homogène, par conséquent, les propriétés thermophysiques du sol sont considérées constantes (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique,...etc.).
- Les changements de la diffusivité thermique du sol principalement en fonction la nature du terrain, due par exemple à la teneur en eau, ne sont non plus pris en compte d'éventuels mouvements d'eau entraînant des échanges convectifs à l'intérieur du terrain.
- La vitesse de l'air est considérée constante tout le long de l'échangeur (air/sol) enterré.
- Au niveau d'une section, la lame d'air en écoulement est considérée homogène, le coefficient d'échange convectif est supposé constant tout le long du conduit, c'est-à-dire ne dépendant pas de l'évolution longitudinale de la température de l'air mais tout au plus dépendant de la vitesse du flux.
- Les propriétés thermophysiques de l'air sont considérées constantes (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique,...etc.).

II-5. Calcul de la température du sol en fonction du temps et de la profondeur

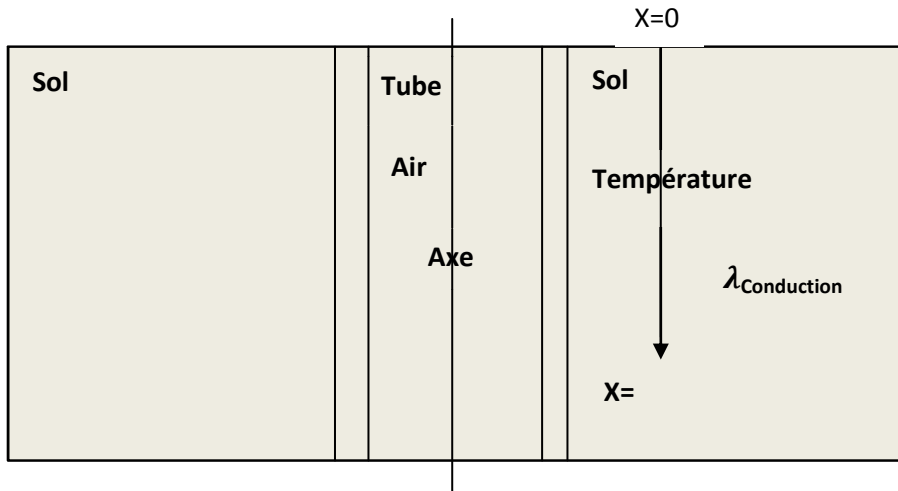


Figure (II -4) : Schématisation du Problème Physique [16]

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

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

Pour un transfert unidimensionnel suivant l'axe des x, on aura :

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

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{II.2})$$

Sachant que la diffusivité thermique est aussi donnée par :

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

Avec,

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

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

ρ : Masse volumique du sol [kg /m³]

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

t : Temps [s]

α : Diffusivité thermique [m²/s]

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{II.3})$$

Autrement on a : $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$

L'équation différentielle aux dérivées partielles prendra la forme :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

En considérant les conductions aux limites suivantes :

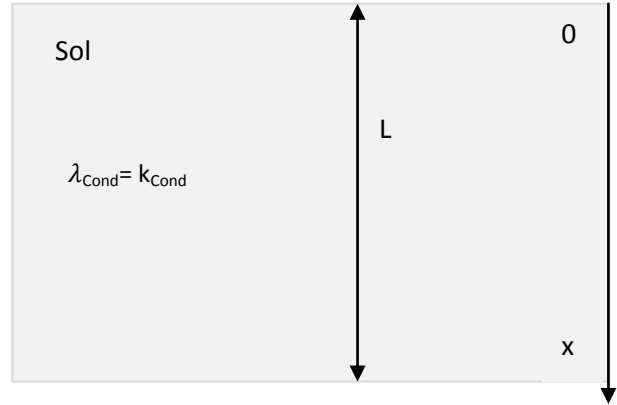


Figure (II-5) : Domaine d'étude à l'intérieur du sol [16]

$$T(0,t) = T_i + T_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad ,$$

$$T(\infty,t) = T_i$$

Avec ;

T_i : Amplitude de la variation de température (pour la ville de Biskra égale 12°C).

T_{moy} : Température moyenne du jour (°C)

Introduisons la variable θ suivante telle que :

$$\theta = T - T_i$$

Avec, $\theta(0,t) = T_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$

Quand la profondeur $x \rightarrow \infty$ la température du sol tend vers une valeur finie

La solution serait alors de la forme $\theta = X(x) \cdot Y(t)$

En remplaçant l'expression de θ dans l'équation de la chaleur on aura :

$$X''(x) \cdot Y(t) = \frac{1}{\alpha} Y'(t) \cdot X(x)$$

$$\frac{X''(x)}{X(x)} = \frac{1}{\alpha} \frac{Y'(t)}{Y(t)} \Rightarrow \begin{cases} \frac{X''(x)}{X(x)} = \delta \\ \frac{Y'(t)}{\alpha Y(t)} = \delta \end{cases}$$

Où :

$$\begin{cases} \frac{\alpha X''(x)}{X(x)} = \beta \\ \frac{Y'(t)}{Y(t)} = \beta \end{cases}$$

Le choix des constantes δ et β se fait à partir des considérations physiques :

1. Pour les processus thermiques tendant vers une distribution de température constante à l'équilibre, on choisit δ , qui doit être nécessairement négative.

En effet l'intégration relative par rapport au temps fournit :

$$Y(t) = R \cdot \exp(\alpha \cdot \delta t), \text{ où } R = \text{cst. Si } \delta \text{ était positive,}$$

Pour les temps croissants, la température tendrait vers une valeur infinie, ce qui est

Physiquement absurde.

Pour une valeur de δ négative, tel que $\delta = -k^2$ on aura :

$$Y(t) = R \cdot \exp(-\alpha \cdot k^2 \cdot t)$$

2. Si le phénomène est de nature périodique en fonction du temps, on prend alors β , un nombre imaginaire :

En posant $\beta = i(\omega t + \varphi)$, on obtient la solution de la forme :

$$Y(t) = R \cdot \exp(i(\omega t + \varphi)) = R (\cos(\omega t + \varphi) + i \sin(\omega t + \varphi)) \quad (\text{II.4})$$

On peut résoudre alors le problème dans le plan complexe et on ne retiendra que la partie réelle de la solution obtenue.

L'excitation étant de nature périodique, on doit chercher une solution de même fréquence que l'excitation en posant : $c = i(\omega t + \varphi) = \beta$

$$\text{On obtient : } Y' - CY = 0 \Rightarrow \frac{dY}{dt} - CY = 0$$

Dont la solution est :

$$\frac{dY}{Y} = C dt \Rightarrow \ln Y = Ct + \alpha$$

Donc :

$$Y = e^\alpha \cdot e^{-ct} = A \cdot e^{-i(\omega t + \varphi)}$$

Avec : $A = \exp \alpha$, où $\alpha = \text{cost}$

Cherchons la solution de $X(x)$:

$$\alpha X'' - CX=0 \Rightarrow X'' - \frac{C}{\alpha} X = 0 \Rightarrow X(x) = A' \exp \sqrt{\frac{C}{\alpha}} x + B. \exp - \sqrt{\frac{C}{\alpha}} x \quad (\text{II.5})$$

Comme $X(x)$ doit tendre vers une limite finie quand $(x \rightarrow \infty \Rightarrow A' \rightarrow 0)$

On aura par conséquent :

$$X(x) = B. \exp - \left(\sqrt{\frac{C}{\alpha}} \right) x \quad (\text{II.6})$$

Comme $\sqrt{C} = \sqrt{(\omega t + \varphi)}$

On aura alors :

$$\text{Réelle}[X(x).Y(t)] = \text{Réelle} \left[A. B. e^{-i(\omega t - \varphi)} . e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}(i+1)x} \right] \quad (\text{II.7})$$

Or la condition à la limite relative à l'excitation est de la forme :

$\theta(0, t) = T_0 \cos(\omega t)$ qui doit satisfaire l'équation $T(x, t)$ au point d'origine des abscisses $x=0$,

Par conséquent :

$$\begin{aligned} \theta(0, t) &= T_0 \sin(\omega t - \varphi) = \text{Réelle}[A. B. e^{-i(\omega t - \varphi)} . 1] \\ &= \text{Réelle}[A. B. (\cos(\omega t - \varphi) + i \sin(\omega t - \varphi))] \\ &\Rightarrow AB = T_0 \end{aligned}$$

Développons l'expression $T_0 e^{i(\omega t - \varphi)} . e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}(i+1)x}$

$$\Rightarrow T_0 . e^{i(\omega t + \varphi)} e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}(ix + x)}$$

$$\Rightarrow T_0 . e^{i(\omega t + \varphi)} e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}ix} . e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x}$$

On aura :

$$\begin{aligned} &T_0 . e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[e^{i(\omega t - \varphi)} . e^{-i\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \right] \\ \Rightarrow \theta(x, t) &= T_0 . e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[e^{i(\omega t - \varphi)} . e^{-i\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \right] \quad (\text{II.8}) \end{aligned}$$

$$e^{-i(\omega t + \varphi)} = \cos(\omega t + \varphi) + i \sin(\omega t + \varphi)$$

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

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

Comme la fonction cosinus est paire et la fonction sinus est impaire, on obtient alors :

$$\begin{aligned} \theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} & \left[\left(\cos(\omega t - \varphi) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) - i \cos(\omega t - \varphi) \sin\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right) \right. \\ & \left. + i \sin(\omega t - \varphi) \cos\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) - i^2 \sin(\omega t - \varphi) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right] \end{aligned}$$

Cependant :

$$\begin{aligned} \theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} & \left[\left(\cos(\omega t - \varphi) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) + \sin(\omega t - \varphi) \sin\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right) \right. \\ & \left. + i \sin(\omega t - \varphi) \cos\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) - \cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right] \end{aligned}$$

Finalement l'expression sera de la forme :

Telle que $\sin(a - b) = \sin a \cos b - \cos a \sin b$

$$\theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[\sin\left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right] \quad (\text{II.9})$$

$$\theta = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[\sin\left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right]$$

Si l'excitation est donnée par la relation de la forme :

$$T - T_i = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[\sin\left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right]$$

Finalement on aura l'équation suivante :

$$T = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x} \left[\sin\left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega + \varphi)}{2\alpha}}x\right) \right] + T_i \quad (\text{II.10})$$

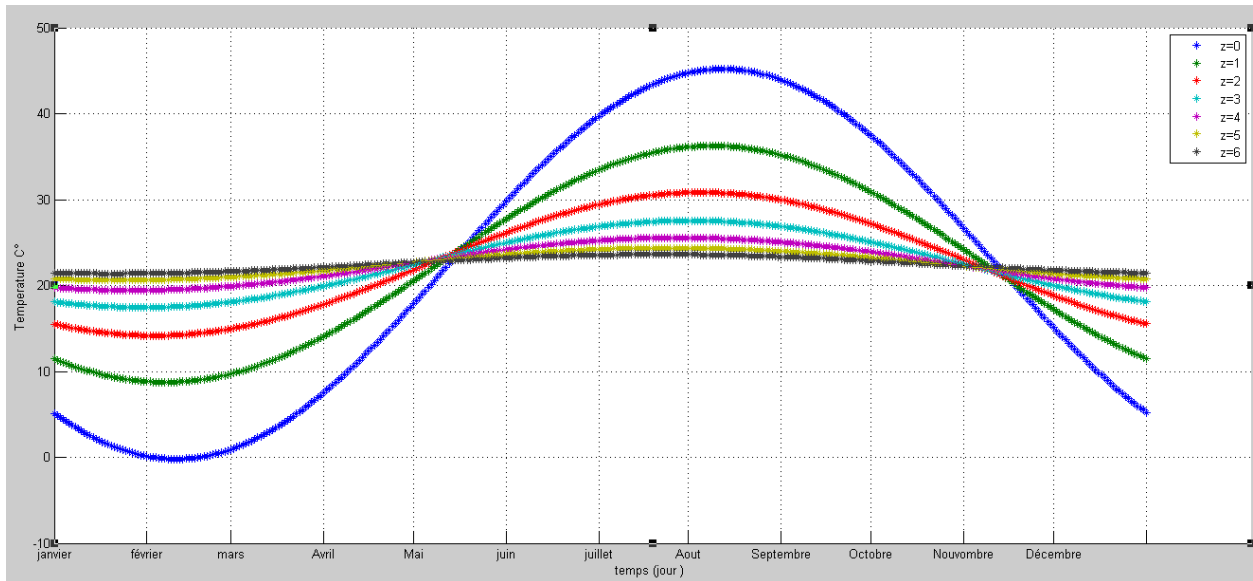


Figure (II-6) : Evolution de la température du sol théorique en fonction du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol argileux

La figure (II-6) montre l'évolution de la température du sol théorique décrite par l'équation (II-10) pour une année sous différentes profondeurs, qui dans le site de Biskra l'amplitude $A=12\text{ C}^\circ$ et la température moyenne du jour $T_{\text{moy}} = 22.5\text{ C}^\circ$, l'atténuation commence à se sentir à partir de 03 m de profondeur qui est la plus fréquemment considérée dans les applications pratiques du rafraîchissement de l'air par échangeur enterré.

II.6- Calcul de la température de l'air à la sortie de l'échangeur enterré :

Le bilan thermique élémentaire à travers un tronçon de longueur dx du tube échangeur figure (II-7) s'écrit :

$$\dot{m} \cdot c_{\text{pair}} \cdot (T_x + dT_x - T_x) = \frac{dx}{R_{\text{sol}} + R_{\text{gainie}} + R_{\text{conv}}} \cdot (T_{\text{sol}} - T_{\text{a}(x)}) \quad (\text{II.11})$$

Avec,

\dot{m} : Débit d'air [kg]

c_{pair} : Chaleur massique de l'air $\left[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ K} \right]$

R_{sol} : Résistance thermique entre le tube et le sol $\left[\frac{m \cdot ^\circ K}{W} \right]$

$$R_{\text{sol}} = \frac{1}{\lambda_{\text{sol}} \cdot 2\pi} \ln \left(\frac{R_{\text{sol}}}{R} \right)$$

R_{tube} : Résistance thermique du tube enterré $\left[\frac{m \cdot ^\circ K}{W} \right]$

$$R_{\text{tube}} = \frac{1}{\lambda_{\text{tube}} \cdot 2\pi} \ln \left(\frac{R}{r} \right)$$

R_{conv} : Résistance thermique convective entre l'air et le tube $\left[\frac{^\circ K}{W} \right]$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} \cdot 2\pi \cdot r}$$

T_{sol} : Température du sol [$^{\circ}K$]

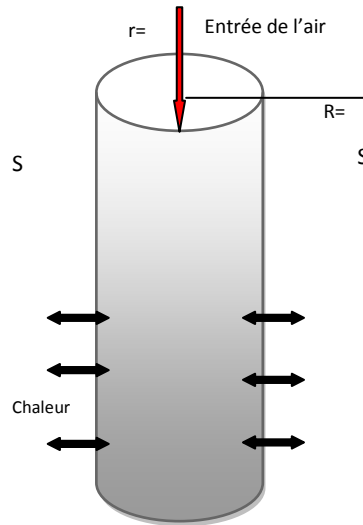


Figure (II -7) : Echangeur de chaleur entre air et sol [17]

Où :

r : Rayon intérieur du tube enterré [m]

R : Rayon extérieur du tube enterré [m]

R_{sol} : Rayon de la couche adiabatique du sol [m]

λ_{gaine} : Conductivité thermique du tube enterré [$\frac{W}{m^{\circ}K}$]

λ_{sol} : Conductivité thermique du sol [$\frac{W}{m^{\circ}K}$]

h_{conv} : Coefficient de convection de l'air [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]

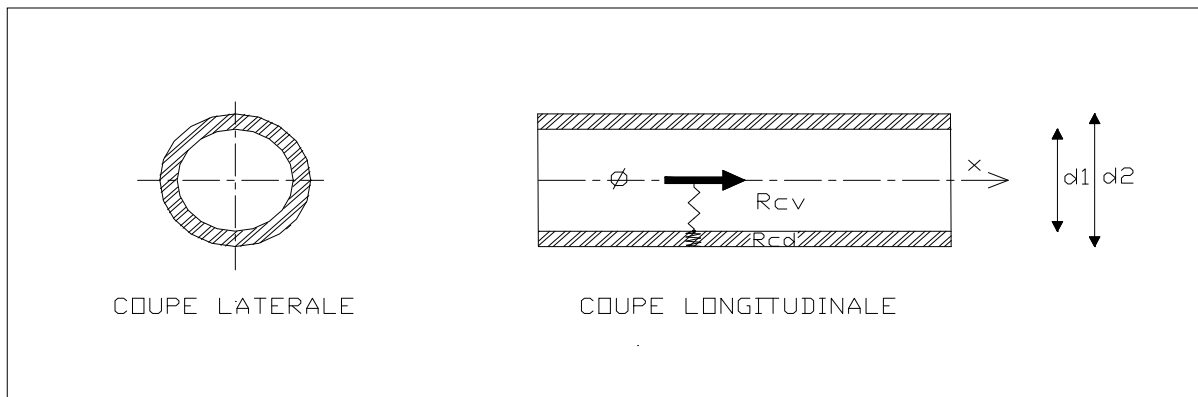


Figure (II-8) : Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré [14]

Soit U la résistance thermique global entre l'air et le sol non perturbé défini par :

$$U = \frac{1}{R_{sol} + R_{tube} + R_{conv}}$$

L'équation (II.11) devient :

$$\frac{dT_x}{T_{sol} - T_{a(x)}} = \frac{U}{\dot{m}.c_{pair}} . dx \quad (II.12)$$

L'intégration de l'équation (II-12) donne

$$\text{Tell que } \int \frac{db}{(a-b)} = \ln(a-b)$$

$$\ln(T_{sol} - T_{a(x)}) = \frac{U}{\dot{m}.c_{pair}} . x + c \quad (II.13)$$

Pour trouver la valeur de la constante c , il suffit de revenir à condition au limite suivante :

$$\text{Pour } x=0, T_0 = T_{air-entrée}$$

$$\Rightarrow c = \ln(T_{sol} - T_{air-entrée})$$

En remplaçant C par sa valeur dans (II.13) on obtient :

$$\ln\left(\frac{(T_{sol} - T_{a(x)})}{\ln(T_{sol} - T_{air-entrée})}\right) = \frac{U}{\dot{m}.c_{pair}} . x$$

$$\text{Avec : } \ln(a) - \ln(b) = \ln\left(\frac{a}{b}\right)$$

Par conséquent la température de l'air théorique à une certaine distance parcourue est décrite par le modèle mathématique suivant :

$$T_{a(x)} = T_{sol} + (T_{air-entrée} - T_{sol}). e^{\frac{-U}{\dot{m}.c_{pair}}.x} \quad (II.14)$$

Qui pour une distance $x=l$, aurait comme valeur :

$$T_{air(x=L)} = T_{sol} + (T_{air-entrée} - T_{sol}). e^{\frac{-U}{\dot{m}.c_{pair}}.l} \quad (II.15)$$

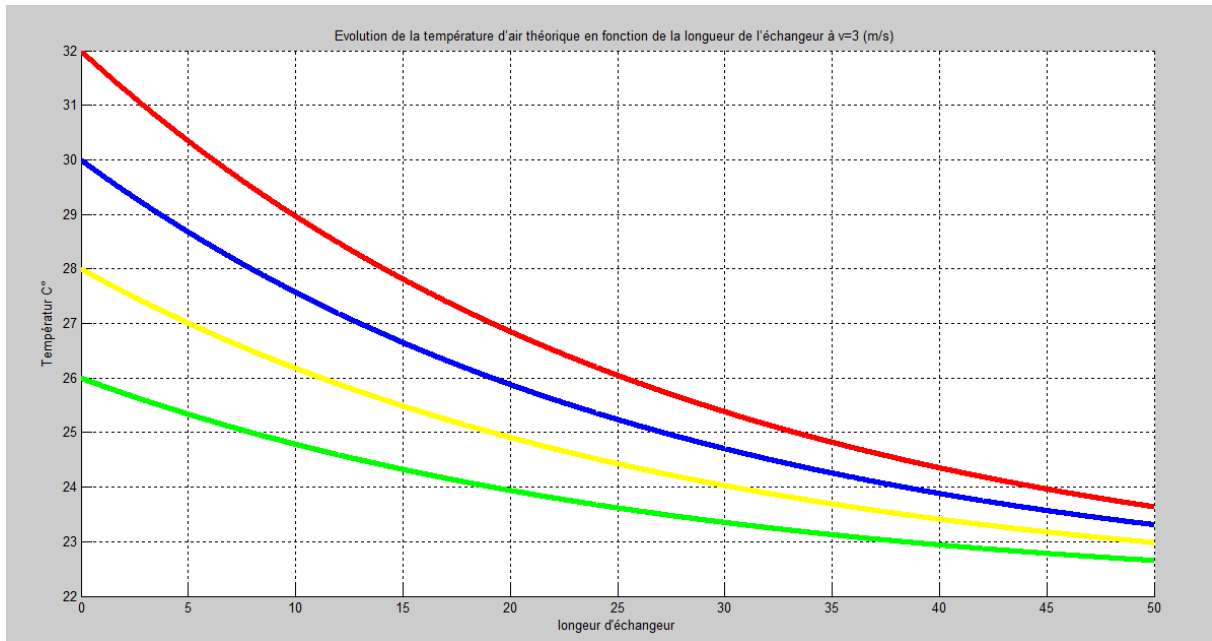


Figure (II-9) : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur de l'échangeur pour un débit d'air $Q_{air} = 407$ kg/h ($V_{air} = 3$ m/s)

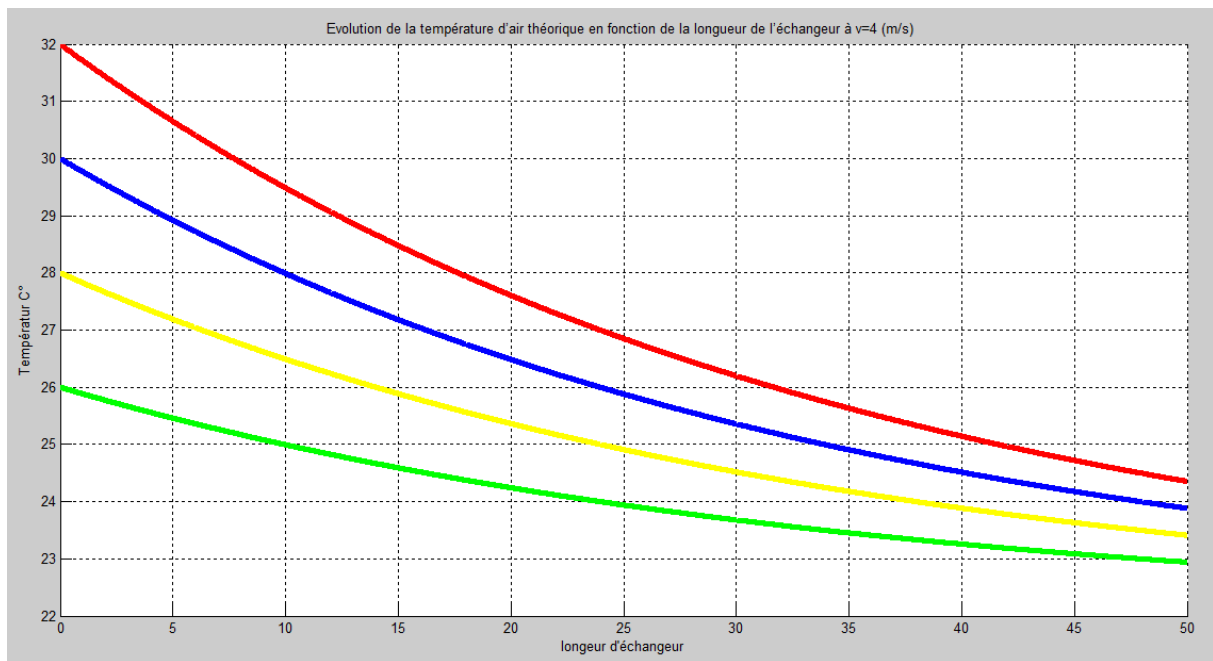


Figure (II-10) : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur de l'échangeur pour un débit d'air $Q_{air} = 542.59$ kg/h ($V_{air} = 4$ m/s)

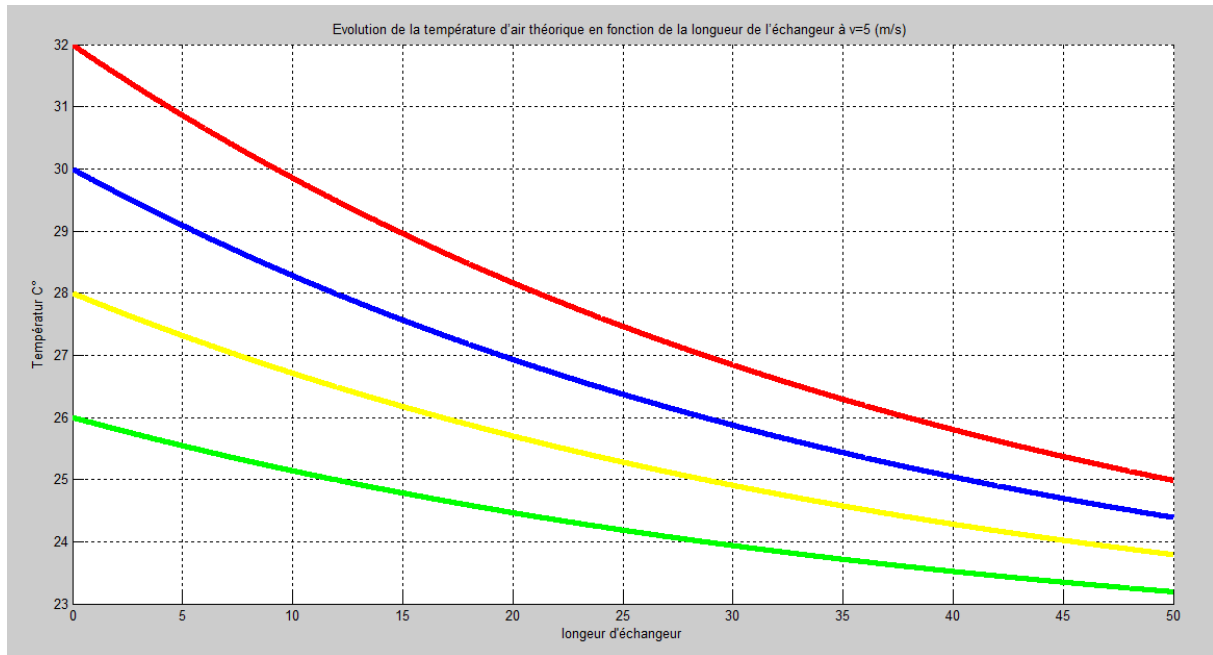


Figure (II-11) : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur de l'échangeur pour un débit d'air $Q_{\text{air}} = 678.24 \text{ Kg/h}$ ($V_{\text{air}} = 5 \text{ m/s}$)

Les Figures (II-9), (II-10) et (II-11) représentent l'évolution d'après le modèle mathématique eq.(II.14) de la température de l'air théorique en fonction de la longueur de l'échangeur (air/sol) enterré respectivement pour différents débits d'air injecté (3, 4 et 5 m/s) et différentes températures extérieures de l'air à l'entrée (26, 28, 30 et 32 °C).

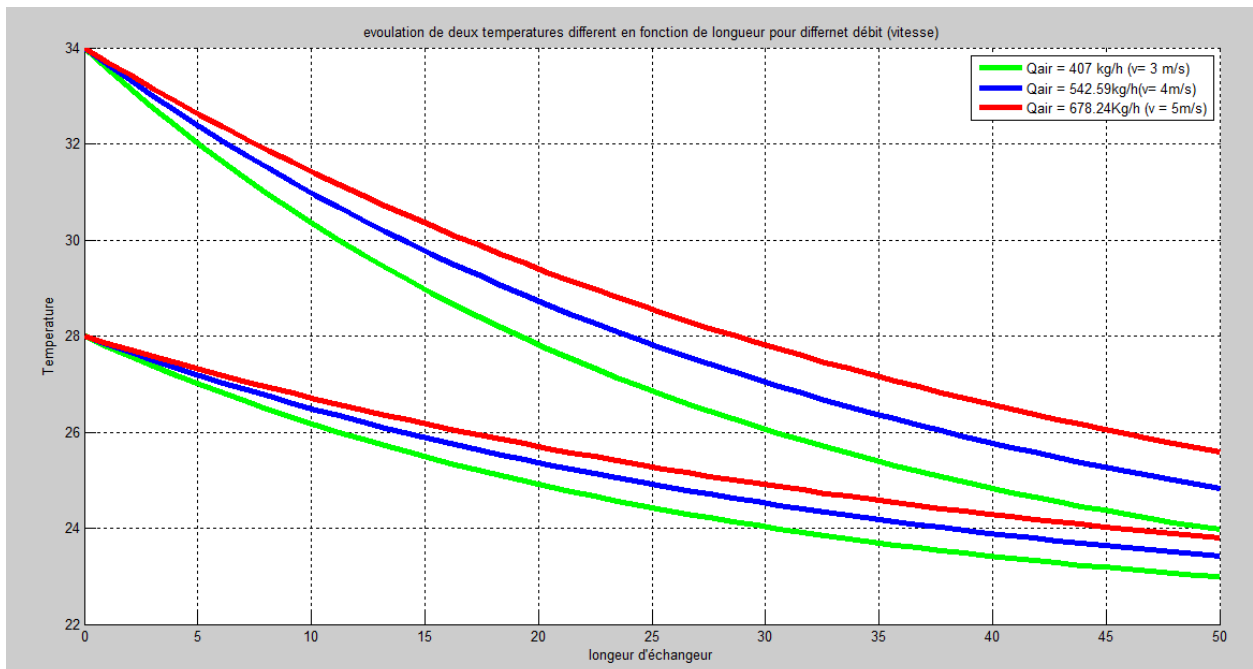


Figure (II-12) : Évolution de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur (air/sol) enterré et du débit d'air injecté respectivement pour deux températures de l'air à l'entrée 28 et 34 °C

La maille tube : correspond au cylindre droit à section annulaire qui représente exactement le volume occupé par le tube. Cette maille est nécessaire à la prise en compte fine des caractéristiques du tube (en particulier sa composition, son diamètre et son épaisseur). Elle permet de connaître la température du tube. La faible épaisseur des tubes ne lui fait pas jouer un rôle très important pour le comportement thermique de l'ensemble. Cependant, cette maille est utile pour comparer les performances d'échangeurs (air-sol) par les propriétés des tubes, du rayon extérieur r_{ext} correspond au rayon extérieur des tubes.

La maille sol₁ : est un cylindre droit de section annulaire qui a pour rôle la prise en compte de la conduction et du stockage thermique dans le volume de sol situé au voisinage immédiat des tubes. Ce voisinage immédiat est défini par son épaisseur, qui constitue un paramètre du maillage. Cette épaisseur est limitée car les mailles ne doivent pas s'interpénétrer. En pratique, elle a peu d'influence sur les résultats de simulation et peut donc être fixée par optimisation selon les contraintes géométriques de l'échangeur modélisé. La valeur retenue pour ce modèle est égale à 0,8 fois la profondeur de pénétration pour un signal thermique de période un jour [16]. Cette valeur a été retenue pour permettre de modéliser un échangeur dont les tubes sont distants au minimum de 40 cm environ, le rayon extérieur de cette maille est r_{12} Figure (II-12).

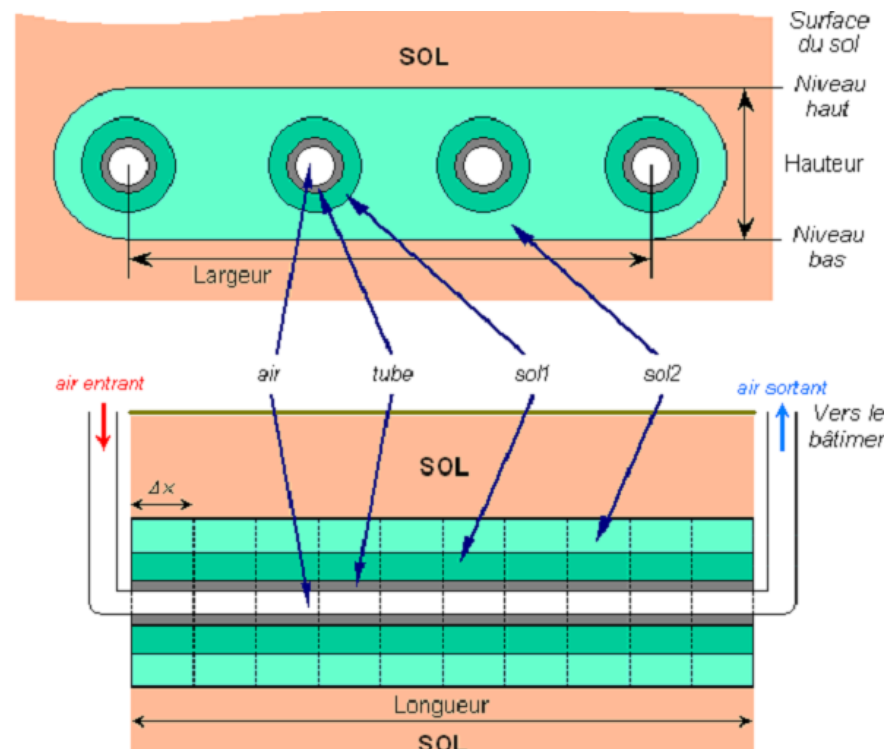


Figure (II-14) : Représentation schématique du maillage proposé vue de face (*haut*) et vue latérale (*bas*) [16].

La maille sol₂ : Le rôle de cette maille est la prise en compte des interactions entre deux tubes proches, cette interaction ne se fait ressentir que lorsque deux tubes consécutifs se trouvent

suffisamment proches. Au-delà d'une certaine distance, cette interaction peut être négligée. Afin de garantir un comportement réaliste du modèle, la structure de la maille sol_2 dépend donc de la distance entre les tubes de l'échangeur. La distance limite est fixée par les contraintes structurelles du maillage : deux éléments du maillage ne peuvent s'interpénétrer.

Pour les tubes proches (*Distance entre 02 tubes $< 2 \cdot r$*), la maille sol_2 se compose de deux parties distinctes connexes, comme indiqué sur la Figure (II-13). D'une part, ses extrémités sont formées de deux demi-cylindres de sections annulaires de mêmes dimensions, leurs rayons intérieurs coïncidents avec le rayon extérieur de la maille sol_1 , avec laquelle la maille est en contact. Le rayon extérieur de ces deux demi-cylindres est noté r_{2sol} . D'autre part, la partie centrale de cette maille est un volume parallélépipédique rectangulaire, de largeur égale à $(N_{tubes} - 1) \cdot D_{tubes}$, dont ont été ôtés les volumes des mailles sol_1 , tube et air qu'il inclut. Sa surface externe se trouve dans la continuité de celle des deux extrémités. Sa hauteur H_{sol2} vaut donc $H_{sol2} = 2 \cdot r_{2sol}$. Cette maille englobe alors l'ensemble de la nappe des tubes, ce qui explique son étirement dans la direction de la largeur de l'échangeur air-sol. Elle prend ainsi en compte l'interaction des tubes les uns sur les autres.

Pour des tubes éloignés (*Distance entre 02 tubes $> 2 \cdot r_{2sol}$*), l'interaction entre les tubes peut être considérée comme négligeable. Les résultats fournis par le modèle sont alors indépendants de la distance entre les tubes et la maille sol_2 se ramène à un ensemble de mailles cylindriques disjointes à section annulaire tout à fait analogues à la maille sol_1

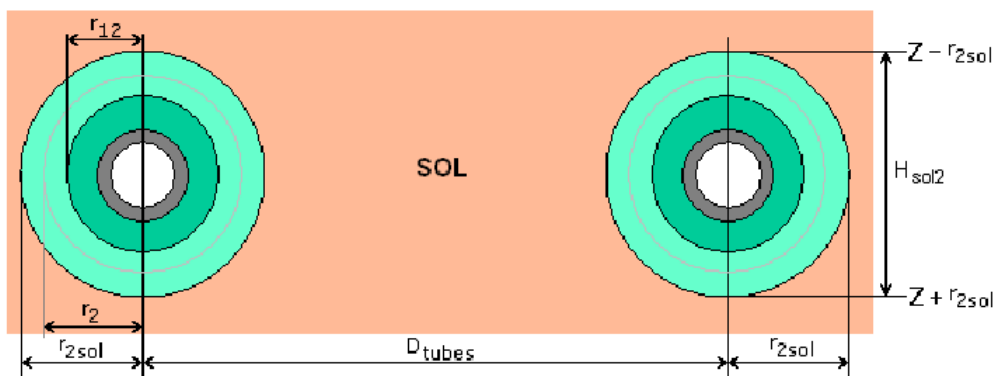


Figure (II -15) : Apparence du maillage pour $D_{tubes} > 2 \cdot R_{2sol}$ [16].

La dimension retenue pour r_{2sol} est $r_{2sol} = r_{ext} + 1,3 \cdot \delta_{ij}$ [16].

Lorsque les tubes de l'échangeur sont très espacés les uns des autres ($D_{tubes} > 2 \cdot R_{2sol}$), la maille sol_2 présente une structure non connexe, l'interaction entre les tubes n'est pas prise en compte et l'échange avec le sol est calculé pour des couronnes cylindriques, de manière analogue à l'échange avec la maille sol_1 . La valeur 1,3 retenue dans la formule ci-dessus permet la prise

en compte de l'interaction entre les tubes jusqu'à une distance d'environ 1 m et la simulation de tubes situés au minimum à 50 cm de profondeur environ.

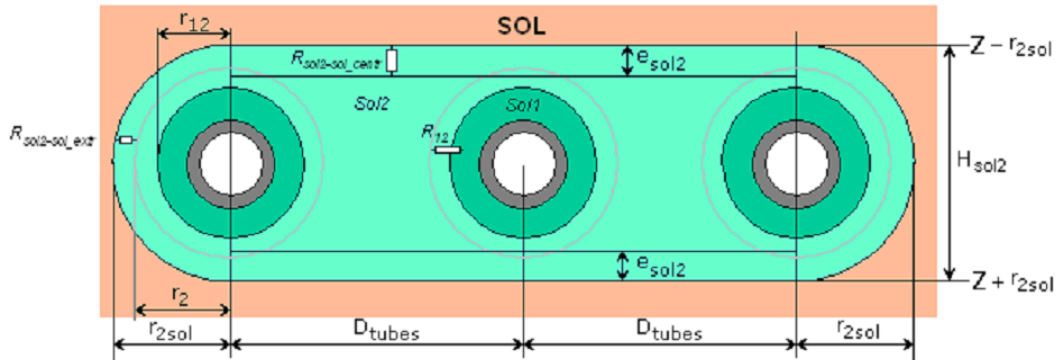


Figure (II-16) : Structure de la maille sol2 pour un échangeur à trois tubes [16].

Les paramètres géométriques du maillage sont les suivants :

r_{int} : Rayon intérieur du tube et de la maille *tube* et rayon extérieur de la maille *air*.

r_i : Rayon interne de la zone *tube*.

r_{ext} : Rayon extérieur du tube et de la maille *tube* et rayon intérieur de la maille *sol1*.

r_1 : Rayon interne de la maille *sol1*.

r_{12} : Rayon extérieur de la maille *sol1* et rayon intérieur de la maille *sol2*

r_2 : Rayon interne des deux extrémités cylindriques de la maille *sol2*.

R_{2sol} : Rayon extérieur des deux extrémités cylindriques de la maille *sol2*.

H_{sol2} : Hauteur de la maille *sol2*.

e_{sol2} : Épaisseur de la partie centrale de la maille *sol2* en contact avec le reste du sol

En adoptant la méthode des différences finies, la simulation sous l'environnement Fluent nous a permis de suivre l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur (air/sol) enterré notamment à l'entrée figure (II-17) et à la sortie Figure (II-18).

A l'entrée de l'échangeur

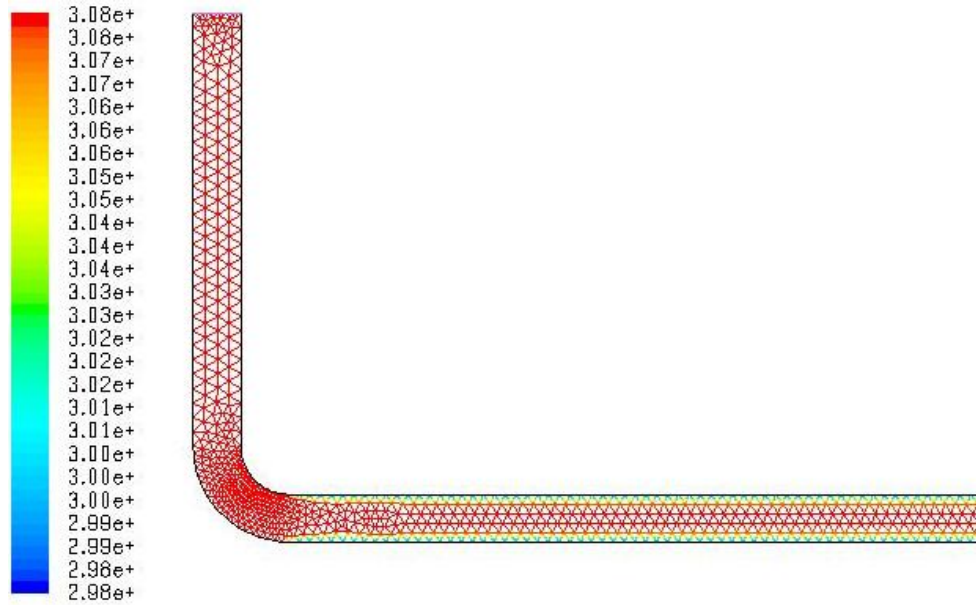


Figure (II.17) : Evolution de la température d'air théorique à l'intérieur de l'échangeur air /sol

($T_{sol} = 24 \text{ °C}$, $T_{amb} = 34 \text{ °C}$, $V_{air} = 3 \text{ m/s}$, tube en PVC)

A la sortie de l'échangeur

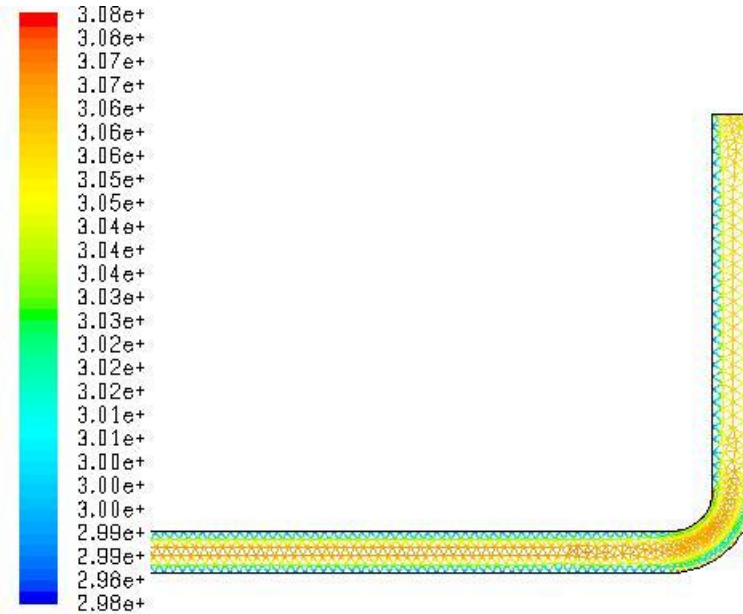


Figure (II-18) : Evolution de la température d'air théorique à la sortie de l'échangeur (air/sol)

($T_{sol} = 24 \text{ °C}$, $T_{amb} = 34 \text{ °C}$, $V_{air} = 3 \text{ m/s}$, tube en PVC)

II.7- Efficacité de l'échangeur enterré :

L'efficacité décrit le rendement de l'échangeur enterré d'une longueur bien définie, dépend de la température de l'air à l'entrée de l'échangeur à une certaine distance parcourue depuis son introduction et de la température du sol, son expression est désignée par le rapport suivant :

$$\varepsilon = \frac{T_{air-sortie} - T_{air-entrée}}{T_{sol} - T_{air-entrée}} \quad (\text{II-16})$$

Chapitre III

Analyse des paramètres intervenant dans le dimensionnement d'un échangeur (air/sol) enterré

III-1. INTRODUCTION

Partant du principe de fonctionnement d'un échangeur air sol enterré et des éléments constituants, on a pu mettre en évidence plusieurs paramètres qui interviennent directement ou indirectement dans les performances d'un tel système pour le rafraîchissement de l'air dans le domaine du bâtiment. Les principaux paramètres intervenant dans le dimensionnement d'un échangeur (air/sol enterré) :

- Les paramètres thermo-physiques du sol (conductivité thermique, capacité calorifique et la masse volumique)
- Les paramètres géométriques de l'échangeur (épaisseur, diamètre du tube échangeur et la longueur totale de l'échangeur enterré)
- Les paramètres thermo-physiques des matériaux utilisés dans la construction des échangeurs (air/sol) enterré (conductivité thermique).
- Le régime d'écoulement laminaire ou turbulent ? autrement il s'agit de contrôler le débit massique de l'air injecté dans l'échangeur.

D'après l'étude et la synthèse bibliographique entamée dans le premier et le second chapitre, deux modèles mathématiques qui décrivent le comportement de la température du sol et de l'air injecté dans l'échangeur enterré.

Les deux modèles analytiques en question regroupent les principaux paramètres de performances qui interviennent dans le fonctionnement et le dimensionnement de ces dispositifs thermiques.

- Le premier modèle qui décrit l'évolution de la température du sol à n'importe qu'elle profondeur et à n'importe qu'elle période de l'année éq.(II-10).

$$T_{sol(x=L)} = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{(\omega+\varphi)}{2\alpha}}x} \left[\sin \left(\omega t - \varphi - \sqrt{\frac{(\omega+\varphi)}{2\alpha}}x \right) \right] + T_i$$

- Le deuxième modèle qui caractérise la variation de la température de l'air circulant dans l'échangeur enterré depuis l'entrée jusqu'à la sortie éq.(II.15).

$$T_{air(x=L)} = T_{sol} + (T_{air\ entrée} - T_{sol}) \cdot e^{\frac{-U}{m \cdot c_{pair}} \cdot l}$$

III-2. Effet de la nature et de type du sol :

Un sol est caractérisé par trois principaux paramètres qui influent directement sur le comportement thermique de l'échangeur air/sol enterré principalement l'évolution de la température de l'air injecté, qui sont la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique. Dans cette étude de simulation et de dimensionnement on a considéré trois types de sol qui les plus répandus en Algérie, ce qui a permis de suivre la variation de la température du sol en fonction du temps (365 jours) Figure (III.1) (III-2) et (III-3) respectivement pour 07 valeurs de profondeurs 0 , 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 mètres.

1. Sol Argileux ($\rho=1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=1.5 \text{ W/m.K}$ $C_p=1340 \text{ J/kg.K}$)

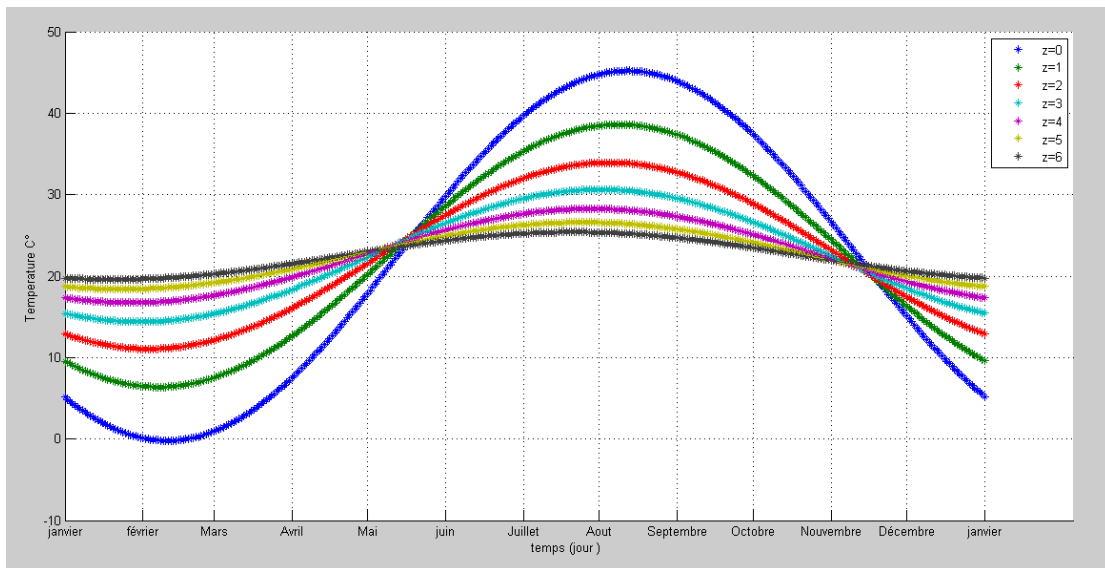


Figure (III-1) : Evolution de la température théorique du sol en fonction

du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol argileux
($\rho=1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=1.5 \text{ W/m.K}$, $C_p=1340 \text{ J/kg.K}$)

2. **Sol gypseux** ($\rho=2400 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0.51 \text{ W/m.K}$, $C_p=1090 \text{ J/kg.K}$)

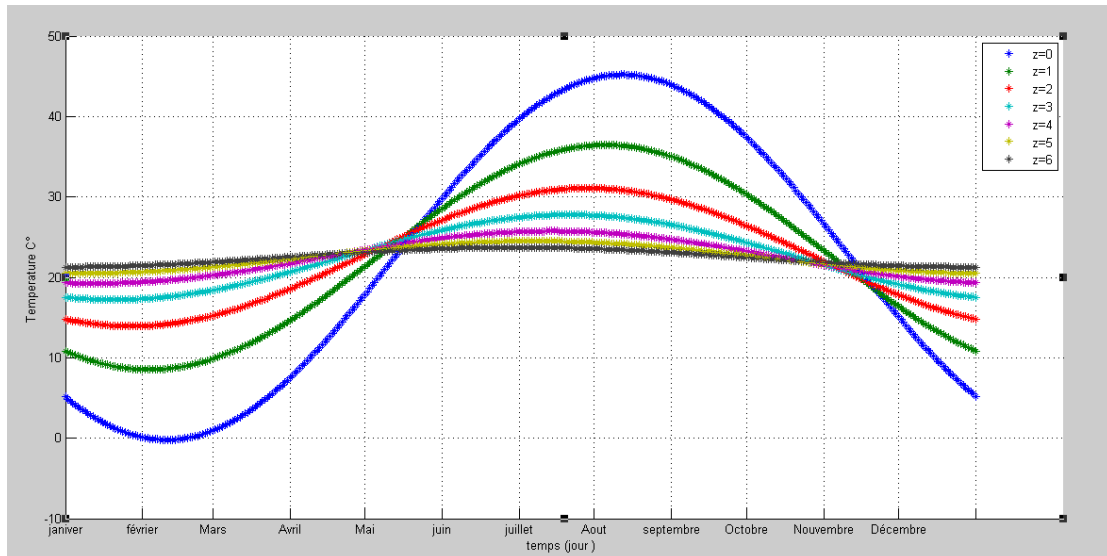


Figure (III-2) : Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol gypseux
($\rho=2400 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0.51 \text{ W/m.K}$, $C_p=1090 \text{ J/kg.K}$)

3. **Sol Sableux sec** ($\rho=1650 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0.27 \text{ W/m.K}$, $C_p=805 \text{ J/kg.K}$).

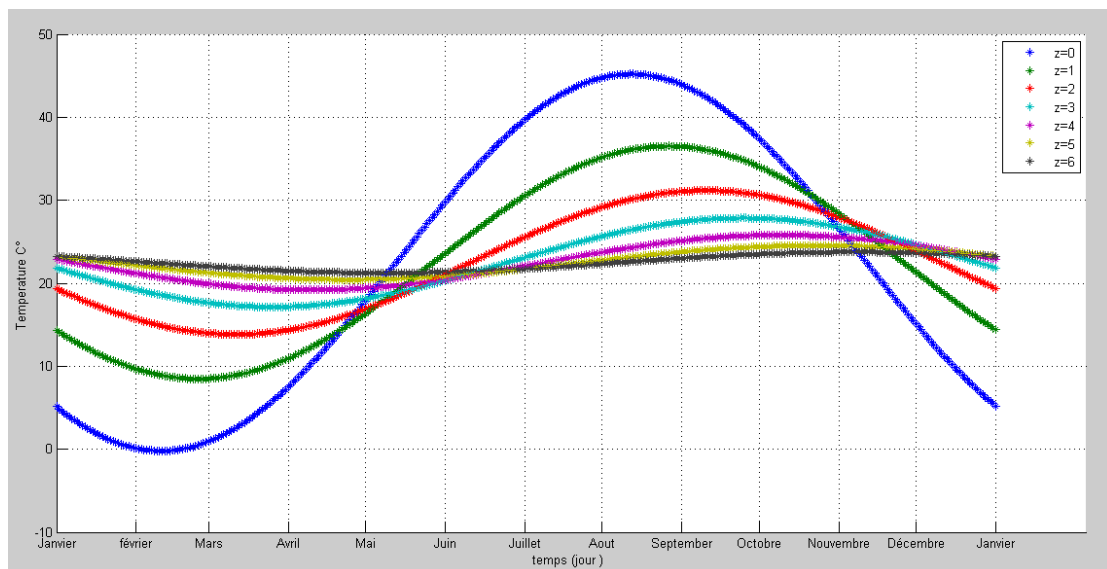


Figure (III-3) : Evolution de la température théorique du sol en fonction du temps et de la profondeur z dans le cas d'un sol sableux
($\rho=1650 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0.27 \text{ W/m.K}$, $C_p=805 \text{ J/kg.K}$)

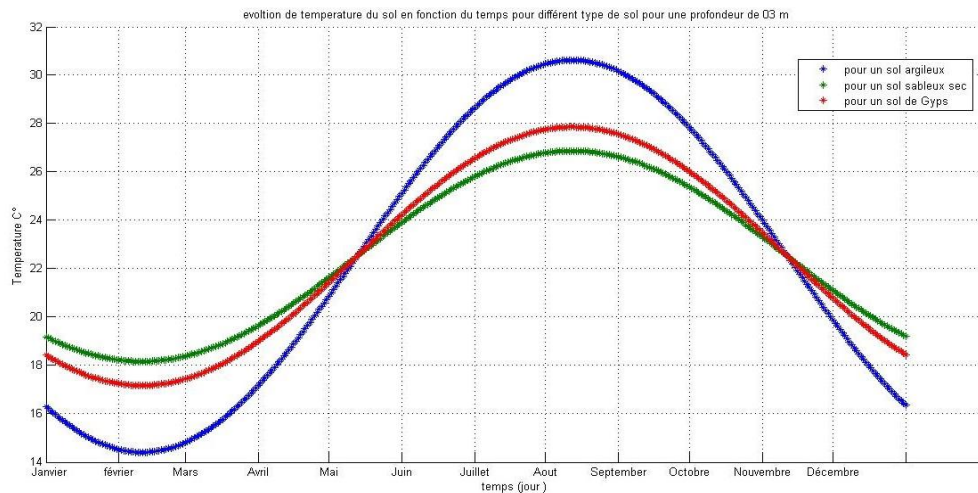


Figure (III-4) : Evolution de la température du sol en fonction du temps pour trois types de sol pour une profondeur de 03 m

La comparaison entre l'évolution de la température en fonction du temps pour trois différents types de sol Figure (III-4) à une profondeur de 03 mètres, respectivement l'argile de diffusivité thermique $\alpha = 6,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, le Gypse $\alpha = 0,203 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ et le sable $\alpha = 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, on constate que le sable par rapport à la surface du sol montre un déphasage de température maximal en période d'hiver, par contre ce déphasage devient minimal en période d'été qui peut justifier par sa diffusivité thermique basse.

III.3- Effet de la matière de construction du tube échangeur enterré :

Pour voir l'effet de la matière de construction les plus fréquemment utilisés dans le rafraîchissement par échangeur enterré géothermique, on a essayé de voir le comportement thermique de trois types de matériaux, le PVC haute pression, le PHD (polyéthylène haute densité) et l'aluminium. La figure (III-4) montre l'évolution de la température de l'air en fonction de la longueur, dans le cas d'un sol argileux, en présence d'un échangeur d'une longueur de 50 m, enterré à une profondeur de 03 m, avec une distance entre axes des tubes égale à 0,4 m, dont le débit d'air injecté à l'entrée de l'échangeur est égale à 407 kg/h qui correspond à une vitesse moyenne de 03 m/s.

L'analyse des courbes figure (III-4) montre que la conductivité thermique du matériau est le paramètre dominant qui affecte la qualité du transfert thermique entre le sol et la paroi du tube échangeur enterré. Dans notre cas, parmi les trois matières testées, un échangeur en aluminium ($\lambda = 237 \text{ W/m.K}$) représente de bonnes performances thermiques comparativement à un échangeur en PVC ($\lambda = 0,17 \text{ W/m.K}$).

Cependant, dans les applications pratiques, les constructeurs préfèrent le PVC haute

pression en raison de ces nombreux avantages, en particulier son faible coût de réalisation et sa résistance à la corrosion en présence des sols humides. D'autre part, malgré sa faible conductivité thermique, l'écart de température en fonction de la longueur de l'échangeur pour atteindre la température du sol n'est pas très important par rapport aux matériaux métalliques qui sont de bons conducteurs, mais qui présentent un handicap vis-à-vis de la résistance à la corrosion.

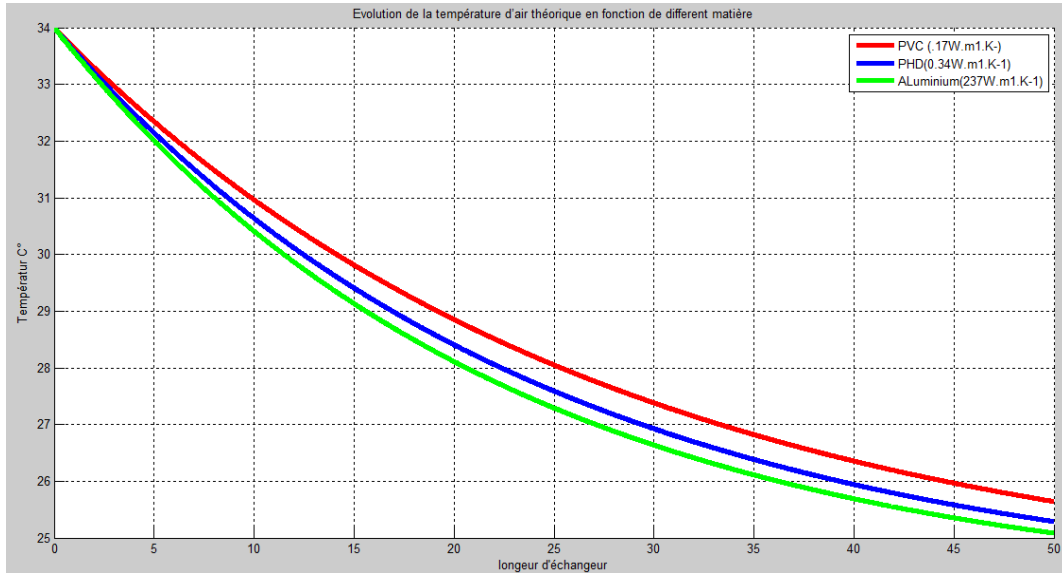


Figure (III-5) : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents matières de construction du tube échangeur, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, dont le débit d'air injecté = 407 Kg/h (V=3 m/s).

Pour voir l'effet de la matière de construction sur les performances thermiques notamment l'efficacité de l'échangeur, on a essayé d'évaluer ce paramètre par l'équation (II-15), et de suivre par la suite l'évolution de son profile en fonction de la longueur pour trois matières de conception Tableau (III-1) et figure (III-6), où c'est le matériau le plus conducteur thermique qui l'emporte et qui assure un bon échange thermique entre le sol et l'air qui circule à l'intérieur des tubes (l'aluminium dans notre cas), seulement l'écart par rapport au PVC pour toutes les longueurs d'échanges considérées ne dépasse la valeur de 07 % d'efficacité.

Longueur de l'échangeur (m)	Efficacité		
	échangeur en PVC	échangeur en PHD	échangeur en Aluminium
1	0.0362	0.0399	0.0443
4	0.1371	0.1501	0.1658
8	0.2555	0.2777	0.3042
12	0.3576	0.3862	0.4195
16	0.4457	0.4783	0.5158
20	0.5217	0.5566	0.5961
25	0.6022	0.6382	0.6780
30	0.6692	0.7048	0.7433
35	0.7249	0.7591	0.7954
40	0.7712	0.8034	0.8369
45	0.8097	0.8396	0.8699
50	0.8358	0.8637	0.8915

Tableau III-1 : Efficacité de l'échangeur pour différentes matières de constructions utilisées dans les échangeurs air/sol géothermiques.

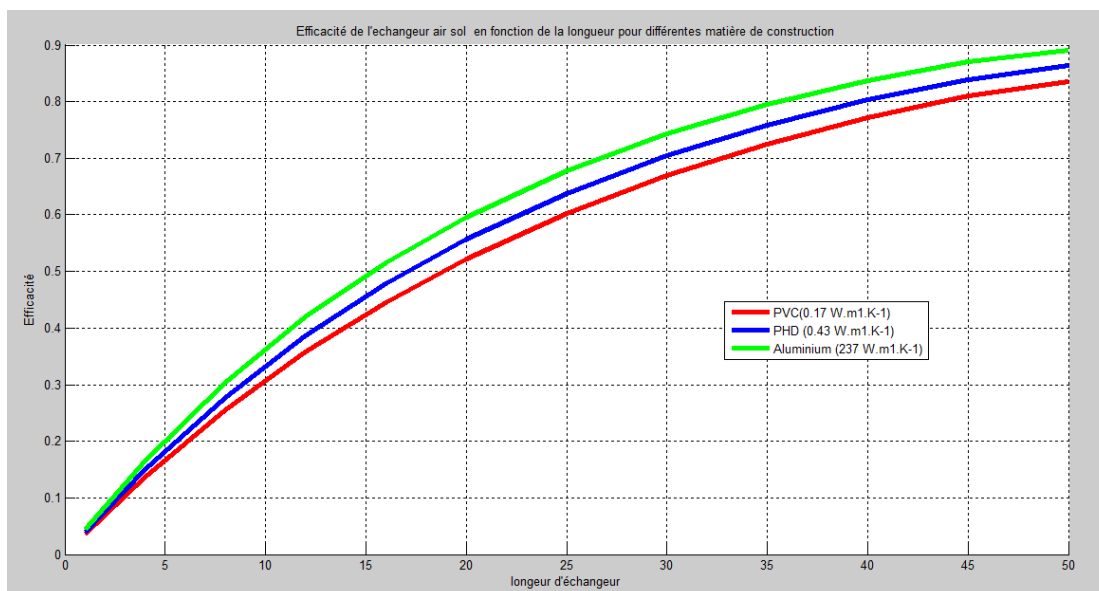


Figure (III-6): Evolution de l'efficacité théorique de l'échangeur air/sol géothermique en fonction de la longueur pour différentes matières de constructions utilisées.

III.4- Effet de la longueur d'échange :

Concernant l'effet de la longueur d'échange mise en jeu du réseau de tube enterré, la simulation a été entamée en présence d'un échangeur en PVC, de diamètre intérieur égale à 110 mm et d'une épaisseur de 05 mm Figure (III-7), dans le cas d'un sol argileux et dont la profondeur d'enfouissement est de 03 mètres, à savoir que la distance entre axe est égale à 0,4 m et dont le débit d'air injecté est égale à 407 Kg/h (V=3 m/s).

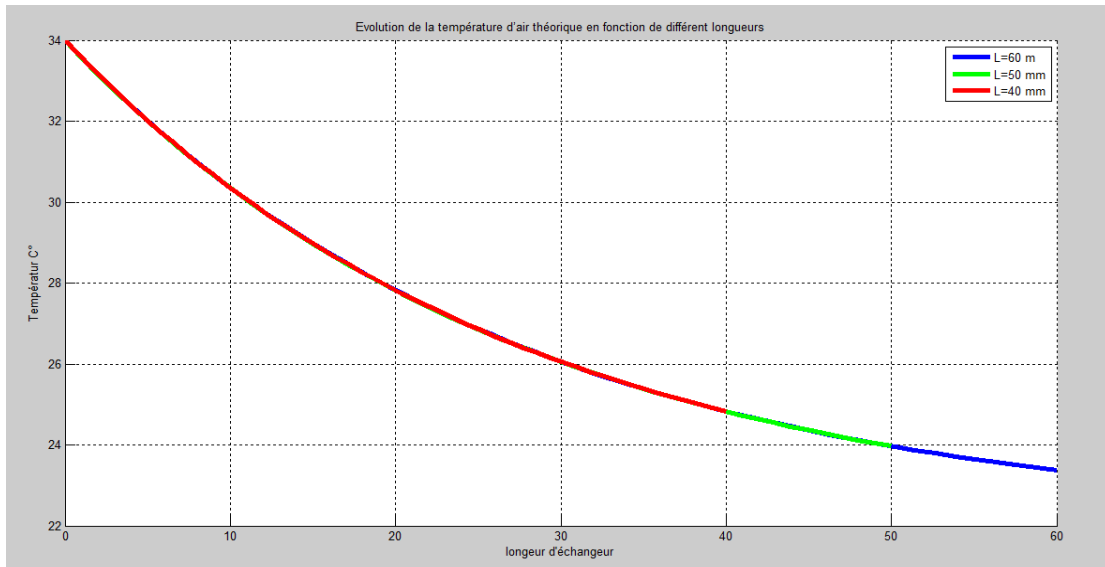


Figure (III-7) : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur d'échangeur, tube échangeur en PVC, enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, dont le débit d'air injecté = 407 Kg/h ($V=3$ m/s).

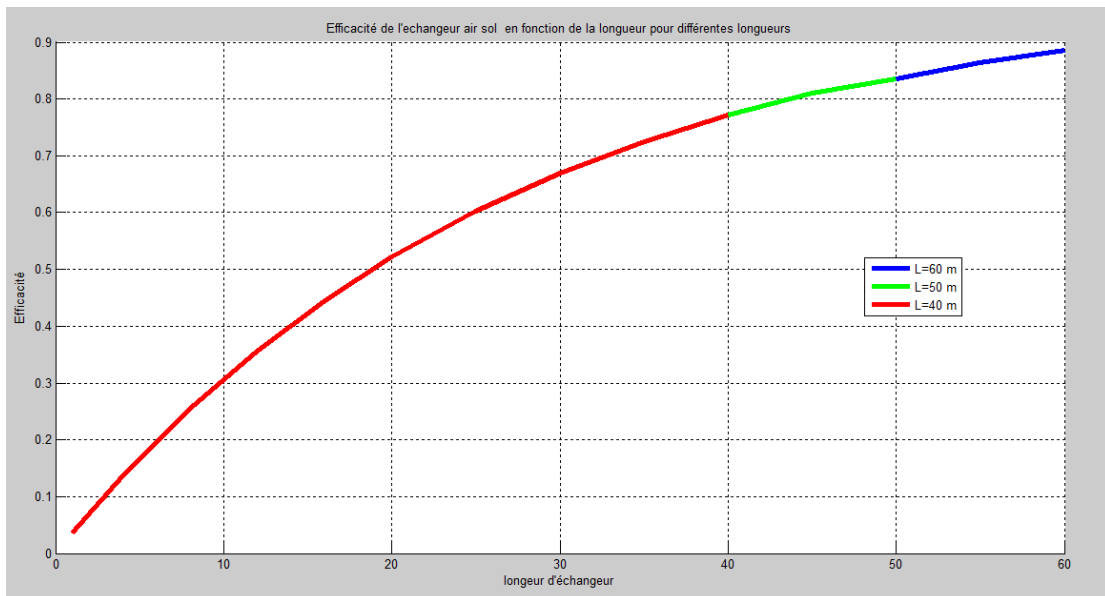


Figure (III-8) : Efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur tube échangeur en PVC, $\varnothing_{\text{tube}} = 110$ mm enterré dans un sol argileux à une profondeur de 03 m, dont le débit d'air injecté = 407 Kg/h ($V=3$ m/s).

A partir de la figure (III-7) et (III-8), qui montre l'évolution de la température de l'air et de l'efficacité en fonction de la longueur du conduit (air/sol) enterré, il est évident de remarquer que l'allure des courbes commence à se stabiliser entre 40 et 50 m de longueur totale d'échangeur, qui correspond à la longueur optimale de l'échangeur enterré. Cependant, on constate qu'au-delà de 50 m, l'écart de température devient insignifiant pour atteindre la température du sol, d'autre part toute augmentation de la longueur en vue d'atteindre de meilleures performances est pénalisée par une perte de charge supplémentaire et un coût de

réalisation élevé par rapport à l'écart de température réalisé entre l'air acheminé et le sol.

III.5- Effet du débit d'air injecté dans l'échangeur

Le débit d'air soufflé est un paramètre essentiel qui permet de basculer du régime laminaire au régime turbulent. Car il est important dans les applications pratiques d'obtenir un écoulement agité au sein de la veine d'air dynamique du conduit échangeur (air/sol), afin d'optimiser la qualité de transfert thermique entre l'air acheminé et les parois du tube échangeur enterré en contact avec le sol.

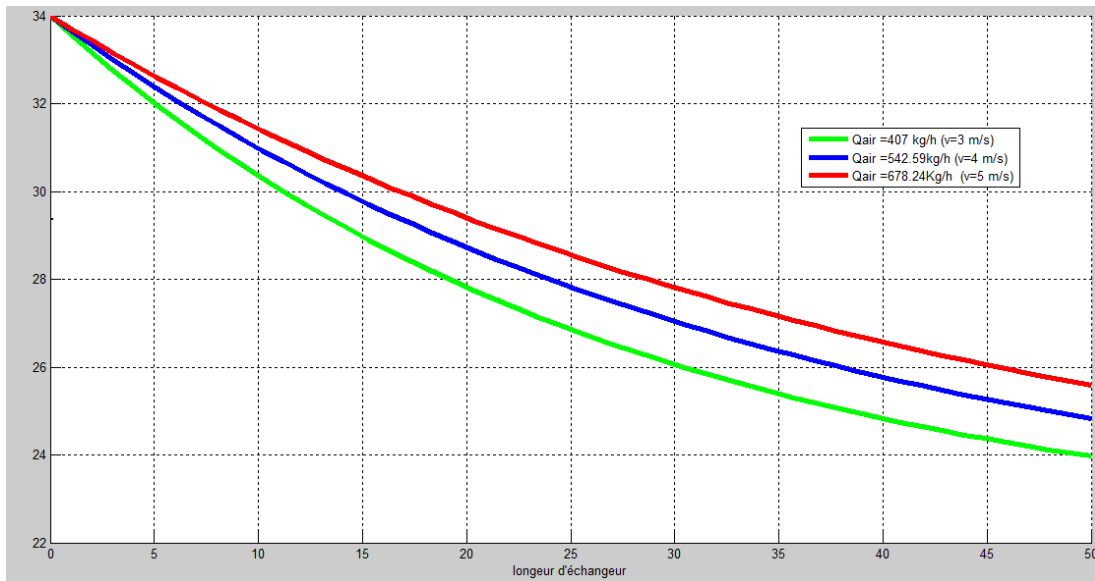


Figure (III-9) : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différents débits d'air injectés dans l'échangeur (PVC , $\varnothing_{\text{tube}} = 110 \text{ mm}$) enterré à une profondeur de 03 m, sol argileux, température à l'extérieur $T_{\text{entrée}} = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$

A partir de l'équation (II-15) qui décrit l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur, on a pu voir l'influence du débit sur le comportement thermique de l'échangeur géothermique enterré. En effet pour de bonnes performances, le dimensionnement prévoit des débits d'air moyen tout en assurant une convection forcée. La figure (III-5) montre que c'est pour un débit d'air au voisinage de 407 Kg/h ($V_{\text{air}} = 03 \text{ m/s}$) que la température de l'air se rapproche de celle du sol pour une longueur d'échange comprise entre 45 et 50 m.

De même sorte, le calcul de l'efficacité de l'échangeur Tableau (III-3) pour trois valeurs de débits d'air soufflé, montre que c'est au voisinage de 407 Kg/h qui correspond à une vitesse de 03 m/s que l'efficacité de l'échangeur dépasse la valeur de 80 % pour une longueur de 50 m, par contre elle, n'est que de 76 % pour une vitesse de 4 m/s et 70 % à 5 m/s.

Longueur de l'échangeur (m)	Efficacité de l'échangeur enterré		
	Débit d'air 407 Kg/h v= 3 m/s	Débit d'air 542 Kg/h v=4 m/s	Débit d'air 678 Kg/h v=5 m/s
1	0.0362	0.0291	0.0244
4	0.1371	0.1113	0.0939
8	0.2555	0.2103	0.1790
12	0.3566	0.2982	0.2561
16	0.4457	0.3763	0.3259
20	0.5217	0.4458	0.3892
25	0.6022	0.5218	0.4601
30	0.6692	0.5874	0.5227
35	0.7249	0.6440	0.5780
40	0.7712	0.6928	0.6270
45	0.8097	0.7350	0.6702
50	0.8358	0.7645	0.7012

Tableau (III-3) : Efficacité de l'échangeur pour différents débits (échangeur en PVC , $\varnothing_{\text{tube}} = 110 \text{ mm}$) profondeur = 03 m, sol argileux, température à l'extérieur $T_{\text{en}}=34 \text{ }^\circ\text{C}$

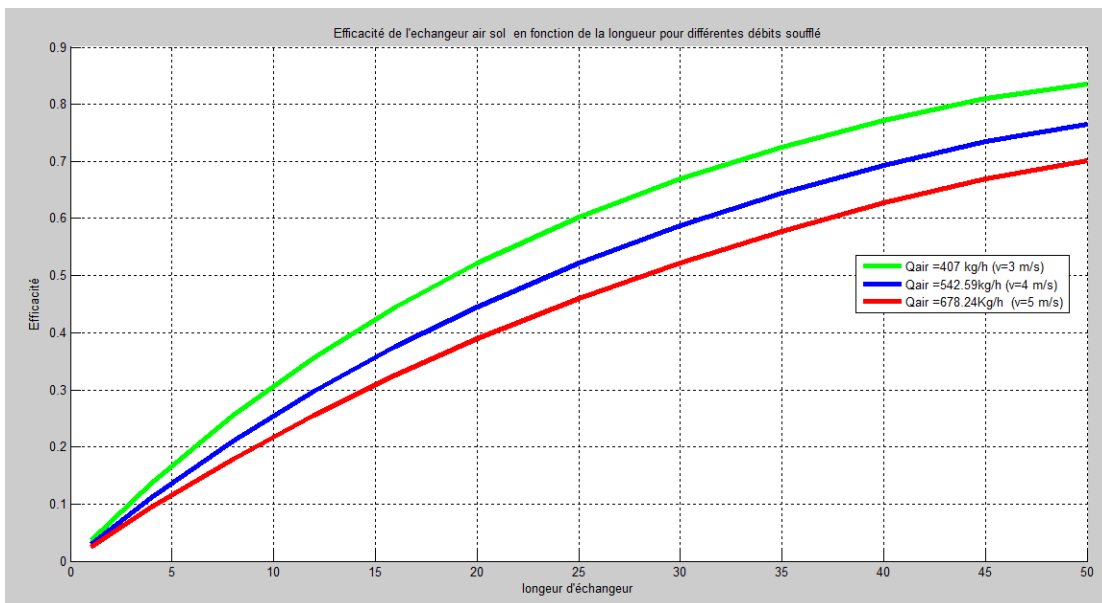


Figure (III-10) : Evolution Efficacité de l'échangeur pour différents débits, Echangeur en PVC , $\varnothing_{\text{tube}} = 110 \text{ mm}$, profondeur de 03 m, température à l'extérieur $T_{\text{en}} = 34 \text{ }^\circ\text{C}$

III.6- Effet du diamètre intérieur du tube échangeur

Pour le dimensionnement du diamètre hydraulique du conduit échangeur, on a réalisé une simulation sous les conditions d'un sol argileux, ou l'échangeur en PVC avec une paroi d'épaisseur de 05 mm se trouve enterré à une profondeur de 03 mètres, dont la distance entre axes des tubes est de 0,4 m et le débit d'air $Q_{\text{air}} = 407 \text{ Kg/h}$.

D'après les figures (III-11) et (III-12) qui montrent l'évolution de la température d'air et

l'efficacité en fonction de la longueur du conduit enterré, respectivement pour trois valeurs de diamètres égale à 110, 160 et 200 mm. On constate que c'est le plus grand diamètre du tube (200 mm) qui assure de bonnes performances, en effet il permet d'augmenter la surface d'échange totale et par conséquent un meilleur transfert de chaleur entre la paroi externe du tube et le sol avoisinant.

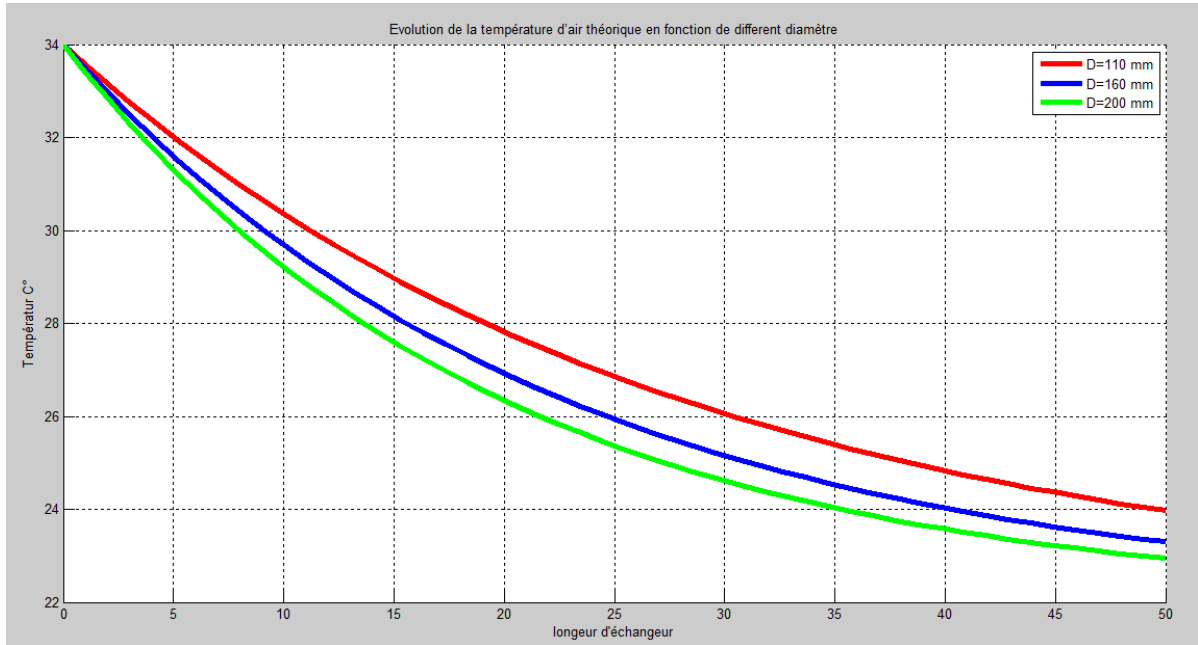


Figure (III-11) : Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur pour différent diamètres de tube échangeur en PVC, longueur =50 m, épaisseur = 05 mm, enterré à une profondeur de 03 mètres, distance entre axes = 0,4 m , $Q_{air} = 407 \text{ Kg/h}$.

Longueur de l'échangeur (m)	Efficacité de l'échangeur		
	Ø= 110 mm	Ø= 160 mm	Ø= 200 mm
1	0.0362	0.0444	0.0505
4	0.1371	0.1661	0.1872
8	0.2555	0.3046	0.3394
12	0.3566	0.4201	0.4631
16	0.4457	0.5164	0.5637
20	0.5217	0.5967	0.6454
25	0.6022	0.6786	0.7263
30	0.6692	0.7439	0.7888
35	0.7249	0.7959	0.8370
40	0.7712	0.8373	0.8742
45	0.8097	0.8704	0.9029
50	0.8358	0.8919	0.9211

Tableau (III-4) : Efficacité de l'échangeur pour différent diamètres de tube échangeur en PVC, longueur =50 m, épaisseur = 05 mm, enterré à une profondeur de 03 mètres, distance entre axes = 0,4 m , $Q_{air} = 407 \text{ Kg/h}$.

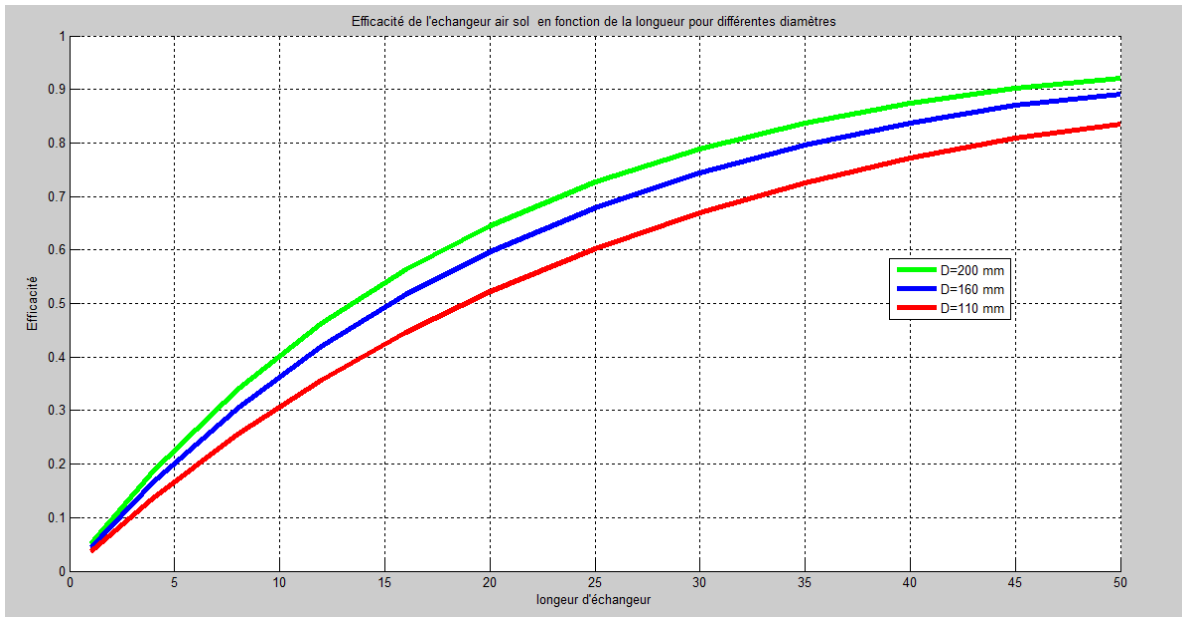


Figure (III-12) : Evolution de l'efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur pour différent diamètres de tube échangeur en PVC, longueur =50 m, épaisseur = 05 mm, enterré à une profondeur de 03 mètres, distance entre axes = 0,4 m , $Q_{air} = 407 \text{ Kg/h}$.

III.7- Effet de l'épaisseur du tube échangeur enterré

Pour vérifier l'effet de l'épaisseur du conduit échangeur, la simulation a été réalisée avec 03 épaisseurs différentes de la paroi du tube enterré, 05, 10 et 15 mm, où on imposé les conditions de fonctionnement suivantes ; sol argileux, profondeur égale à 3m, échangeur en PVC, débit d'air injecté $Q_{air} = 507 \text{ Kg/h}$, diamètre du tube $\varnothing = 110 \text{ mm}$, longueur totale de l'échangeur =50 m, distance entre axes des tubes = 0.4 m.

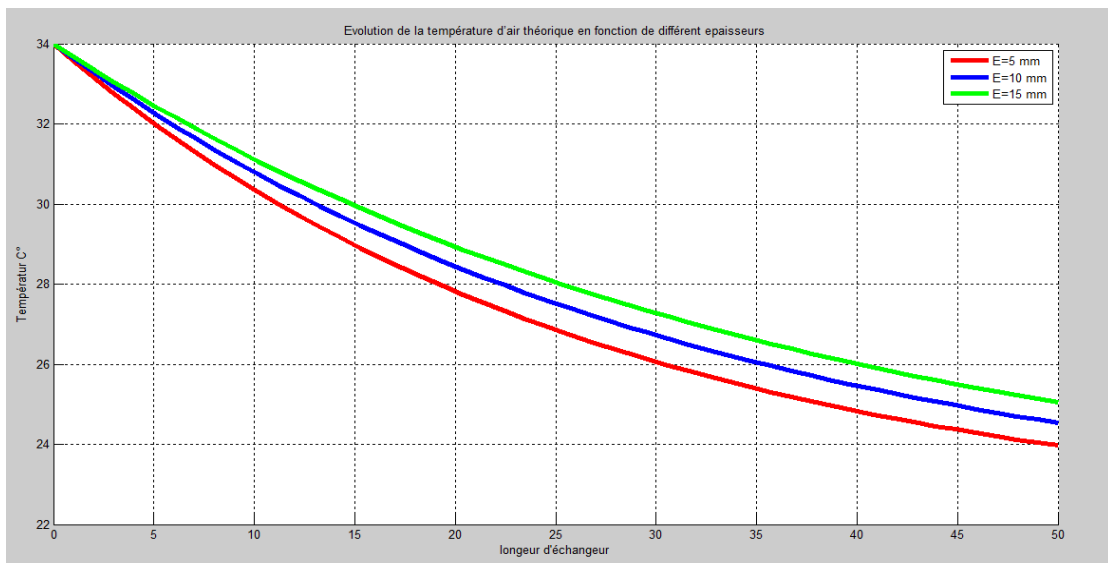


Figure (III-13) : Evolution de la température d'air en fonction de la longueur pour différentes épaisseurs du tube échangeur en PVC, $\varnothing=110 \text{ mm}$, sol argileux, profondeur 03m, $Q_{air} = 507 \text{ kg/h}$.

Longueur de l'échangeur (m)	Efficacité de l'échangeur		
	épaisseur= 5 mm	épaisseur= 10 mm	épaisseur= 15 mm
1	0.0362	0.0312	0.0276
4	0.1371	0.1191	0.1058
8	0.2555	0.2241	0.2005
12	0.3566	0.3165	0.2851
16	0.4457	0.3979	0.3607
20	0.5217	0.4696	0.4284
25	0.6022	0.5474	0.5030
30	0.6692	0.6137	0.5679
35	0.7249	0.6704	0.6242
40	0.7712	0.7187	0.6733
45	0.8097	0.7599	0.7159
50	0.8358	0.7885	0.7460

Tableau (III-5) : Efficacité de l'échangeur pour différent épaisseurs de tube échangeur en PVC, $\varnothing=110$ mm, sol argileux, profondeur 03 m, $Q_{air} = 507$ kg/h.

En analysant les résultats affichés par les figure (III-13) et (III-14), Il est évident de conclure que pour obtenir de meilleures performances, il est important d'utiliser un échangeur avec une épaisseur la plus minimale possible, en outre qui permet d'assurer une résistance thermique minimale entre le sol et l'air acheminé à travers l'échangeur (air/sol), tout en conservant la rigidité du réseau des tubes à une profondeur de 03 mètre dans le sol.

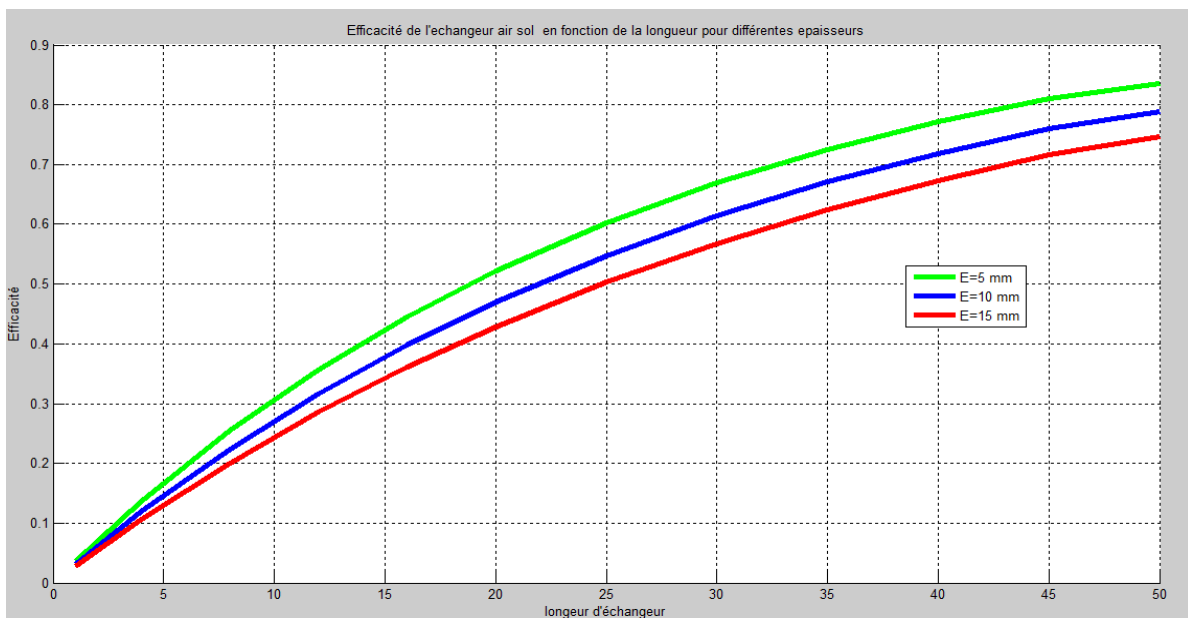


Figure (III-14) : Efficacité théorique de l'échangeur en fonction de la longueur pour différent épaisseur de tube échangeur en PVC, $\varnothing=110$ mm, sol argileux, profondeur 03 m, $Q_{air} = 507$ kg/h.

III-8. Validation :

Pour vérifier la fiabilité du code de calcul réalisé afin d'entamer l'étude de dimensionnement réalisée, on a voulu comparer nos résultats par rapport à d'autres rencontrés dans la littérature, principalement avec les résultats expérimentaux effectués par BENABDI [18], où on a constaté le bon accord avec le modèle théorique qui décrit l'évolution de la température de l'air en fonction de longueur de l'échangeur enterré Fig.(III-15). A savoir que les conditions d'expérimentation effectuées le 14 Avril 2013 dans le site de Biskra, ont été respectés et injectés dans le code de calcul principal qui nous a servi de base durant cette la simulation.

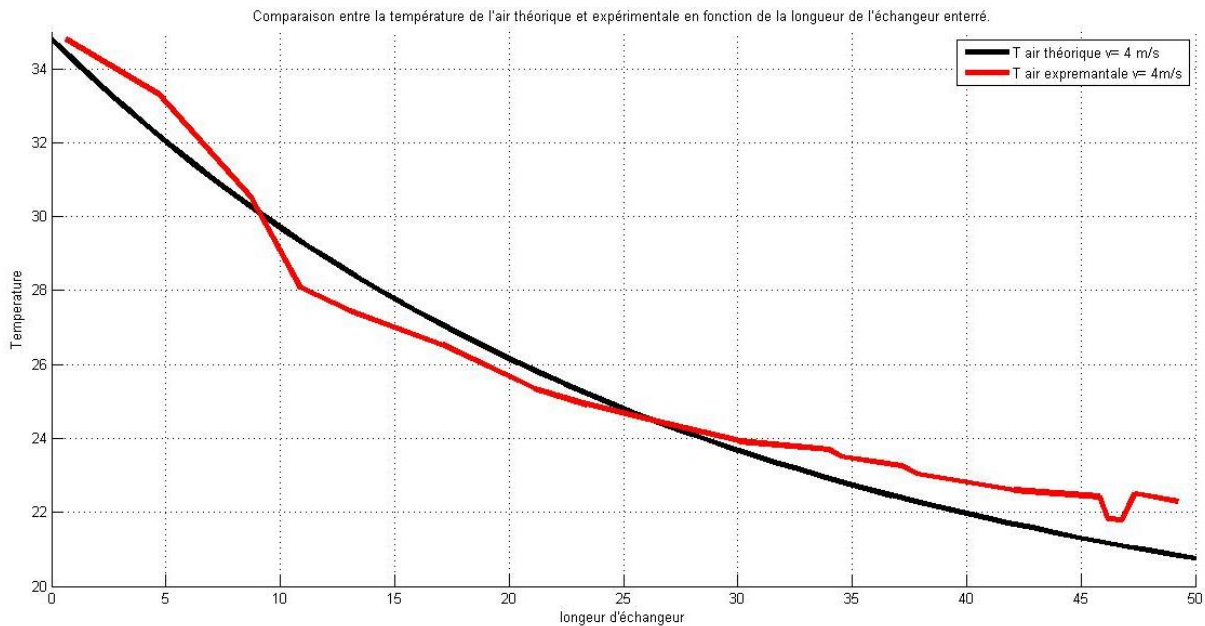


Figure (III-15) : comparaison entre le profil de température théorique (dimensionnement) et expérimentale (expérience effectuée le 21/04/2013 à BISKRA[18], sous les conditions de fonctionnement suivantes : ($T_{sol} 18\text{ C}^\circ$ $T_{en} 34.8\text{ }^\circ\text{C}$, $L_{tu-ec}= 50\text{ m}$, en PVC, $\varnothing_{tube} = 110\text{ mm}$, épaisseur = 05 mm, profondeur = 3 m, sol argileux, $Q_{air} = 542.52\text{ kg/h}$ ($V = 4\text{ m/s}$))

De plus, et parallèlement au code de calcul réalisé sous Matlab pour la simulation des paramètres de dimensionnement considérés dans ce troisième chapitre, une étude de simulation a été réalisé sous l'environnement FLUENT tout en respectant les conditions durant l'étude de dimensionnement considérés auparavant, ce qui nous a permis de suivre en détail la température de l'air sous forme de contour de température à différents endroits de l'échangeur enterré Fig.(III-16).

Le code FLUENT est basé sur la méthode des volumes finis pour la modélisation numérique.

- **FLUENT** : Solveur, prépare les conditions initiales et aux limites, résout les équations à l'aide des modèles existant à son niveau et visualise les différents résultats à l'écran.
- **GAMBIT** : Préprocesseur pour la préparation de la configuration géométrique et la génération du maillage en 2D et 3D de types structurés, non structurés
- **Étapes de résolution du problème**

La mise en œuvre de la simulation numérique impose de suivre un certain nombre d'étapes détaillées ci-dessous :

GAMBIT :

1. Créer la configuration géométrique et génère le maillage,

FLUENT :

2. Lancer le solveur approprié pour la modélisation en deux ou trois dimensions,
3. Importer et dimensionner le maillage,
4. Sélectionner les modèles physiques,
5. Définir les propriétés des matériaux,
6. Définir les conditions de calcul,
7. Définir les conditions aux limites,
8. Fournir une solution initiale,
9. Régler les paramètres du solveur,
10. Régler les moniteurs de convergence,
11. Calculer et surveiller la solution,
12. Post-Processing :

La figure (III-16) représente une coupe longitudinale d'un échangeur enterré, nous montre clairement la variation de température le long de l'échangeur et au voisinage de la paroi en PVC du conduit enterré, ce qui nous a donné la possibilité de valider les résultats obtenus par la simulation sous Matlab

La confrontation entre les deux Figure (III-16) et Figure (III-5) qui montre l'évolution de la température en fonction de la longueur de 50 m, sous les mêmes conditions géométriques, physiques et thermo-physiques, pour la même température de sol, les valeurs obtenus à la sortie de l'échangeur sont presque identiques de même sorte qu'au voisinage de la paroi du conduit.

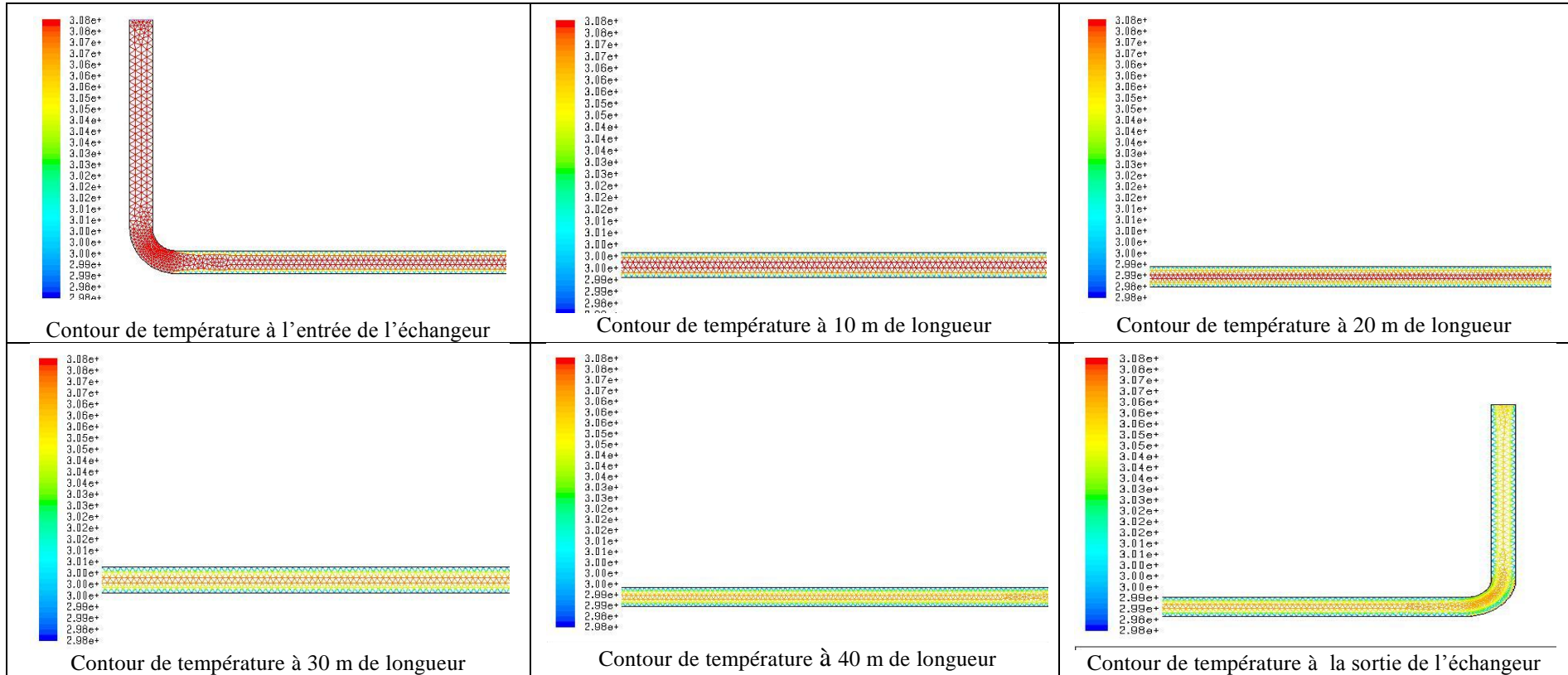


Figure (III-16) : Simulation du contour de la température à différents endroits de l'entrée jusqu'à la sortie de l'échangeur enterré

$T_{sol} = 297 \text{ K}$, $T_{air_entré} = 308 \text{ K}$, sol argileux, $L_{tube} = 50 \text{ m}$, $\varnothing = 110 \text{ mm}$, épaisseur = 5 mm, $Q_{air} = 407 \text{ Kg/h}$.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les échangeurs enterrés air/sol sont de nos jours considérés comme une des solutions très encourageantes, destinés pour le rafraîchissement de l'air en été et le réchauffement en hiver. Les études réalisées montre que ce système est à basse consommation d'énergie en comparaison avec les autres techniques conventionnelles qui sont par contre très « **gourmands** » d'électricité souvent l'origine est l'énergie fossile

Dans de nombreuses applications, l'échangeur air/sol thermique n'a cessé de démontrer son efficacité dans le rafraîchissement et l'amélioration des conditions de vie et de confort climatique tout au long de l'année. D'autre part, comparativement aux autres techniques, ce système préserve la santé de l'homme grâce à la température sortie de l'échangeur qui est favorable au corps humain, et qui fonctionne d'une manière propre loin des autres sources de la pollution

Notre présente étude a pour objective de dimensionner un échangeur de chaleur (air/sol) enterré. Pour cela on a essayé de comprendre les lois physiques régissent le fonctionnement de ce dispositif, ce qui nous a permis d'établir deux modèles mathématiques, le premier donne la température du sol, pour toute profondeur et à n'importe quelle journée de l'année. Ce modèle est basé sur les caractéristiques du sol du site et sur la base de données météorologique. Les résultats théoriques obtenus montrent l'amortissement de l'amplitude des sollicitations du signal de température du sol quelque soit la saison, ce qui explique sa grande inertie thermique.

Le second modèle analytique décrit le comportement de la température de l'air le long de l'échangeur supposé implanté dans un site, qui possède les données météorologiques et les caractéristiques du sol similaires à celles de la région de Biskra,

Les résultats graphiques qui sont obtenus à partir de la simulations des paramètres de dimensionnement fixés préalablement, montrent l'évolution des températures de l'air acheminé à travers l'échangeur à une profondeur d'enfouissement de 03 mètres, pour différents débits injectés, l'efficacité en fonction de la longueur d'échange qui augmente en fonction du débit d'air soufflé et atteint son maximum pour une longueur d'échange équivalente à 50 m. D'autre part on a pu observer l'influence de la matière de conception de cet échangeur, de son diamètre et l'épaisseur optimaux.

Pour la simulation des paramètres déterminants le fonctionnement, on a écrit un programme informatique sous MATLAB, qui comporte deux sous programmes, le

Conclusion Générale

premier est basé sur le modèle mathématique d'évaluation de température du sol, afin d'estimer la variation de la température du sol à plusieurs niveaux de profondeur en fonction du temps.

Le deuxième programme est basé sur le calcul de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur tout en variant les paramètres de dimensionnement thermiques.

Pour valider la fiabilité des modèles analytiques, on a fait une comparaison avec quelques résultats expérimentaux, puis par le calculateur FLEUNT

A partir de notre étude de dimensionnement et en vue d'obtenir de meilleures performances thermiques d'un échangeur (air/sol) enterré, on propose aux constructeurs de respecter certaines recommandations durant la réalisation pratique d'un tel dispositif et de satisfaire les conditions de conception suivantes :

- 1- Une profondeur d'enfouissement idéal de trois mètres
- 2- Une matière de construction en PVC à haute pression en raison de ces nombreuses avantages, moins chère que les matériaux métalliques, rigides et ont une bonne résistance à la corrosion en présence des terrains et sols humides.
- 3- Une longueur totale aux environs de 50 m, avec une disposition en forme serpentin pour n'occuper que peu d'espace et dont la distance entre axes des tubes devrait être supérieure à 40 cm.
- 4- Pour que la température de l'air injecté dans le conduit échangeur se rapproche de celle du sol, le débit d'air recommandé doit être au voisinage de 407 kg/h qui correspond à une vitesse de 3 m/s.
- 5- L'augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais n'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement de l'air, le coefficient d'échange convectif chute. Ceci est dû au fait que l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite, la valeur de 110 mm correspond au diamètre optimal.
- 6- Pour assurer un bon transfert de chaleur entre le fluide acheminé à travers l'échangeur enterré et le sol avoisinant, L'épaisseur optimale à respecter ne devrait dépasser 5 mm, tout en restant dans la limite des consignes de fonctionnement.

Annexes

Propriétés thermophysiques de quelques métaux

	masse volumique (ρ) en $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	chaleur spécifique (C_p) en $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	conductivité- thermique (λ) en $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	diffusivité- thermique (a) en $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Aluminium	2,7	0,888	237	98,8
Plomb	11,34	0,129	35	23,9
Bronze	8,8	0,377	62	18,7
Chrome	6,92	0,44	91	29,9
Cr-Ni-Acier (X12CrNi18,8)	7,8	0,5	15	3,8
Fer	7,86	0,452	81	22,8
Or	19,26	0,129	316	127,2
fonte	7,8	0,54	42...50	10...12
Acier (< 0,4 % C)	7,85	0,465	45...55	12...15
Cuivre	8,93	0,382	399	117
Magnésium	1,74	1,02	156	87,9
Manganèse	7,42	0,473	21	6
Molybdène	10,2	0,251	138	53,9
Sodium	0,97	1,22	133	112
Nickel	8,85	0,448	91	23
Platine	21,37	0,133	71	25
Argent	10,5	0,235	427	173
Titane	4,5	0,522	22	9,4
Tungstène	19	0,134	173	67,9
Zinc	7,1	0,387	121	44
Étain, blanc	7,29	0,225	67	40,8
Silicium	2,33	0,700	148	87

Annexes

Diffusivité de non-métaux à 20 °C:

	masse volumique (ρ) en $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	chaleur spécifique (C_p) en $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	conductivité- thermique (λ) en $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	diffusivité- thermique (a) en $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Acrylique (Plexiglas)	1,18	1,44	0,184	0,108
Asphalte	2,12	0,92	0,70	0,36
Béton	2,4	0,88	2,1	0,54
Glace (0 °C)	0,917	2,04	2,25	1,203
Humus (grossier)	2,04	1,84	0,52	0,14
Sol sableux (sec)	1,65	0,80	0,27	0,20
Sol sableux (humide)	1,75	1,00	0,58	0,33
Argile	1,45	0,88	1,28	1,00
Verre à vitre	2,48	0,70	0,87	0,50
verre à miroir	2,70	0,80	0,76	0,35
Verre de quartz	2,21	0,73	1,40	0,87
Laine de verre	0,12	0,66	0,046	0,58
Gypse	2,2 bis 2,4	1,09	0,51	0,203
Granit	2,75	0,89	2,9	1,18
Graphite (Graphite)	2,25	0,709	119... 165	74... 103
Liège (matériau)	0,19	1,88	0,041	0,115
Marbre	2,6	0,80	2,8	1,35
Mortier	1,9	0,80	0,93	0,61
Papier	0,7	1,20	0,12	0,14
Polyéthylène	0,92	2,30	0,35	0,17
Polytétrafluoroéthylène	2,20	1,04	0,23	0,10
Polychlorure de vinyle	1,38	0,96	0,15	0,11
Porcelaine (95 °C)	2,40	1,08	1,03	0,40
Soufre	1,96	0,71	0,269	0,193
Charbon	1,35	1,26	0,26	0,15
Sapin (radial)	0,415	2,72	0,14	0,12
Crépi	1,69	0,80	0,79	0,58
Brique	1,6... 1,8	0,84	0,38... 0,52	0,28... 0,34
Air	0,0013	1,01	0,026	20

Annexes

Références bibliographiques

- [1] Site de Web ADEME-BRGM : consulté le 10/02/2014
<http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/02-chaleur-ressource.html>
- [2] Site Web consulté le 10/02/2014
<http://www.crit.archi.fr/produits%20innovants/FICHES/geothermieJCB/technique.html>
- [3] fiche PDF étude comparative des différents systèmes de chauffages :
http://ateliers-bergerette.org/IMG/pdf/fiche_prix_energie.pdf
- [4] Site Web l'exploitation de la géothermie consulté le 12/02/2014
<http://www.dtim-diag.com/les-energies-renouvelables.php>
- [5] Site Web les puits Canadian : consulté le 15/02/2014
http://fr.ekopedia.org/Puits_canadien
- [6] Le puits canadien: solution environnementale, Site Web : consulté le 13/02/2014
http://conseils.xpair.com/consulter_parole_expert/puits_canadien_solution_environnementale.htm
- [7] 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 présentée à la faculté des sciences de l'université de Genève 2002.
- [8] David Bartolomeu, Performance d'un échangeur thermique de type air-sol. ITP à Romillé 2005.4p.
- [9] David Amirtano, Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien», Article présenté à l' Université J. Fourier, Grenoble en 2006.
- [10] 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 (2010) pp.399-406.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [13] Mohamed Saad-Eddine, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, Mémoire de Magister en génie Mécanique, Université de Biskra (2012)
- [14] BENFATEH HOCINE, Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat, Mémoire de Magister en génie Mécanique, Université de Biskra (2009)
- [15] Dimensionnement du « puits climatique » Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits « canadiens » ou « provençaux » Rapport final PREBAT ADEME 04 04C 000 1Région Languedoc-Roussillon SOLARTE :Yves JAUTARD solarte@free.fr Alain TROMBE, INSA de Toulouse
- [16] Stéphane THIERS, Bruno, PEUPORTIER modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraichissement de bâtiments Journée thématique SFT-IBPSA Froid solaire et confort d'été 25 avril 2007, Aix-les-Bains Article présenté au Centre Énergétique et Procédés, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France (2007)
- [17] SALHI Toufik et ROUAHNA Salah, Etude d'un échangeur air/sol cylindrique à input périodique, Mémoire d'ingénieur d'état, Université du Biskra (2010).
- [18] BENABDI. Med. Larbi, Étude des performances thermiques d'un échangeur de chaleur enterré, Mémoire de Master, Université du Biskra (2010).
- [19] Rohit Misra & Vikas Bansal & Ghanshyam Das Agrawal & Jyotirmay Mathur & Tarun K. Aseri, CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger, Applied Energy, Vol N° 103 (2013) pp.266–277
- [20] Alexandre de Jesus Freire, José Luis Coelho Alexandre, Valter Bruno SilvaNuno Dinis Couto, Abel Rouboa, Compact buried pipes system analysis for indoor air conditioning, Applied Thermal Engineering VOL N° 51 (2013) 1124e1134
- [21] Vikas Bansal, Rohit Misra, Ghanshyam Das Agarwal, Jyotirmay Mathur, 'Derating Factor' new concept for evaluating thermal performance of earth air tunnel heat exchanger: A transient CFD analysis, Applied Energy VOL N° 102 (2013) 418–426

- [22] Onder Ozgener, Leyla Ozgener, Determining the optimal design of a closed loop earth to air heat exchanger for greenhouse heating by using exergoeconomics, *Energy and Buildings* VOL N° 43 (2011) 960–965
- [23] Joaquim Vaz, Miguel A. Sattler, Elizaldo D. dos Santos, Liércio A. Isoldi, Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger, *Energy and Buildings* VOL N°43 (2011)2476–2482
- [24] JoaquimVaz, MiguelA.Sattler, ElizaldoD.dosSantos,LiércioA.Isoldi, Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger, *Energy and Buildings* VOL N° 43 (2011) 2476–2482
- [25] Vikas Bansal , Rohit Misra, Ghanshyam Das Agrawal, Jyotirmay Mathur, Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling, *Energy and Buildings* VOL N° 42 (2010) 645–648
- [26] Vikas Bansal , Rohit Misra, Ghanshyam Das Agrawal, Jyotirmay Mathur, Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for winter heating, *Energy and Buildings* VOL N° 41 (2009) 1151–1154
- [27] VikasBansal,RohitMisra,GhanshyamDasAgrawal,JyotirmayMathur, Performance evaluation and economic analysis of integrated earth–air–tunnel heatexchanger–evaporative cooling system, *Energy and Buildings* VOL N° 55 (2012) 102–108
- [28] Vikas Bansal, Rohit Misra, Ghanshyam Das Agarwal, Jyotirmay Mathur, Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy* VOL N° 103 (2013) 1–11

ملخص

مهما كانت درجة حرارة الهواء في سطح الأرض فإن عطالة التربة تسمح لها بالمحافظة على درجة حرارة ثابتة في أعماق معينة ، هذه الخاصية نستطيع استغلالها في التكييف و التدفئة باستعمال مبادل حراري (هوائي- ارضي) مدفون في أعماق مخصصة ، و بتمرير تيار هوائي داخل المبادل الحراري يتم استغلاله من بعد في مجال التكييف

في دراستنا هذه بدأنا بتعريفات مفصلة لكل العناصر الحرارية للمبادل الحراري و من أجل حساب درجة الحرارة في أي عمق و أي يوم من السنة طرحنا نموذج رياضي للظاهرة.

بعد هذا، طرحنا نموذج تحليلي لمحاكاة درجة الحرارة على طول المبادل الحراري، من أجل معرفة درجة حرارة الخروج من المبادل الحراري، ثم قمنا بتحليل التأثيرات لبعض العناصر مثل العمق ، القطر ، السمك، تدفق الهواء الداخل ، و المادة المستعملة في الصنع و طول أنبوب على درجة حرارة الهواء داخل المبادل

الكلمات المفتاحية : مبادل حراري الهواء / الأرض، التبريد، تحديد الأبعاد، المحاكاة

Résumé

Quelque que soit la température de l'air à la surface, L'inertie thermique du sol assure une température stable à certaines profondeurs. Cette propriété peut être utilisée dans la climatisation ou le chauffage en utilisant un échangeur de chaleur (air-sol) enfouis à des profondeurs appropriées, où un courant d'air passe à travers pour une utilisation ultérieure.

Dans cette étude nous avons commencé par une définition détaillée de comportement thermique de ces échangeurs, et pour calculer la température du sol à n'importe quelle profondeur et pour n'importe quel jour de l'année, nous avons réalisé un modèle mathématique.

Ensuite nous avons fait une modélisation analytique pour simuler la température de l'air à la sortie de l'échangeur. Puis nous avons analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir: la profondeur, le diamètre, l'épaisseur, le débit d'air injecté, la matière de conception et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur enterré.

Mots clés : échangeur enterré air/sol, rafraîchissement, dimensionnement, simulation

Abstract

At any temperature of the air at the surface, the thermal inertia of the earth ensures a stable temperature at depth. This property can be used in the air conditioning or heating using a heat exchanger (air-earth) buried at appropriate depths, where a stream of air passes through it for later use

In this Work we started with a detailed definition of the thermal behavior of these exchangers, and to calculate the temperature for the earth to any depth and any day of the year, we made a mathematical model.

Then we made an analytical model to simulate the air temperature at the outlet of the heat exchanger for all the length, then we analyzed the influence of some parameters, namely depth, diameter, thickness, the flow of air injected, the design and the length of the in tube at the temperature of air into exchanger temperature.

Keywords : earth heat exchanger air / ground, cooling, dimensioning, simulation.