

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*

*Étude des performances thermiques d'un échangeur de chaleur enterré*

**Présenté par:**

**BENABDI Mohamed Larbi**

**Proposé et dirigé par:**

**Pr. Abdelhafid MOUMMI**

**Promotion : Juin 2013**

## *Remerciement*

*Louange à Dieu qui nous à donner la force et le courage  
d'élaborer et de concevoir ce modeste travail.*

*A l'occasion de ce mémoire, je remercie tous ceux qui ont de  
près ou de loin m'aidé à réaliser ce travail. Particulièrement mon  
encadreur le professeur MOUMMI ABDELHAFID, d'abord  
pour avoir accepté de diriger ce travail, ensuite pour les précieux  
conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de la  
réalisation de ce travail.*

*Je tiens à remercier mes enseignants, amis et collègues du  
département de génie mécanique et de l'université de Biskra.*

*Enfin Je remercie les membres du Jury pour l'intérêt qu'ils ont  
bien voulu porter à ce modeste travail.*

## *Dédicace*

*A ceux qui n'ont jamais oublié à solliciter le tout puissant pour que je réussisse dans ma vie et mes études, ceux qui m'ont toujours poussé à affranchir les obstacles et m'ont remonté le moral, à l'esprit de ma mère défunte à mon adorable père et ma belle-mère « Ouamane Salima » que Dieu les garde pour moi.*

*A mes frères et ma sœur, surtout mon grand frère « Hamza »*

*A Mes grands-mères*

*ET*

*A mes oncles*

*ET*

*A Toute ma famille.*

*Sans que j'oublie mes amis intimes pour leurs soutiens :*

*Mon frère Zaki, Walid Gh, Iliessa ,Chérif, Alla O, Walid Ben, Yacine, Ramzy,*

*Salah H, Amine GHE, Amar M, Omer S, Kamel Ben, Houria D*

*ET à tous mes collègues de la promotion de Master I et II*

*« LMD » surtout Hichem Ben.*

*Tous les enseignants et les administrateurs qu'ils m'ont aidé, surtout le professeur « Laznek aicha »*

*et mes chers élèves au CEM: Gatt Abdelkader-sidi khaled-*

# ***NOMENCLATURE***

## *Nomenclature*

### Symboles :

Symboles	Désignation	unité
T	Température	°C
T <sub>sol</sub>	Température du sol	°C
T <sub>ambiante</sub>	Température ambiante journalière	°C
T <sub>moy</sub>	Température moyenne journalière	°C
T <sub>i</sub>	Température du sol à une profondeur z <sub>i</sub>	°C
T <sub>air</sub>	Température de l'air	°C
A	Amplitude de la variation de température	°C
t	Temps	s
t <sub>0</sub>	Jour de l'année où la température est maximale	Jour
Z	Profondeur en dessous de la surface du sol	m
D	Diamètre intérieur du tube	m
L	Longueur du tube	m
R <sub>int</sub>	Rayon intérieur du tube	m
R <sub>ext</sub>	Rayon extérieur du tube enterré	m
R' <sub>sol</sub>	Rayon de la couche adiabatique du sol	m
V <sub>air</sub>	Vitesse de l'air	m/s
u	La vitesse de l'air suivant (ox)	m/s
v	La vitesse de l'air suivant (oy)	m/s
w	La vitesse de l'air suivant (oz)	m/s
a	Diffusivité thermique du sol	m <sup>2</sup> /s
<i>m</i>	Débit massique d'air dans la conduite	Kg/s
<i>R<sub>conv</sub></i>	Résistance thermique entre l'air et le tube	m <sup>2</sup> .°k/w
<i>R<sub>pipe</sub></i>	Résistance thermique du tube enterré	m <sup>2</sup> .°k/w
<i>R<sub>sol</sub></i>	Résistance thermique entre le tube et le sol	m <sup>2</sup> .°k/w
U	Résistance thermique totale entre l'air et le sol	m <sup>2</sup> .°k/w
Cp <sub>air</sub>	Capacité calorifique massique de l'air	J/(kg.°k)

$C_{sol}$	Capacité calorifique massique du sol	J/(kg.°k)
P	Pression de l'air	Pa
$h_{conv}$	Coefficient d'échange convectif	w/m <sup>2</sup> .°k
g	Pesanteur	m/s <sup>2</sup>
$\Delta p$	pertes de charge	Pa
Re	Nombre de Reynolds	[-]
Pr	Nombre de Prandlt	[-]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]

### Lettres grecques

Lettre grecque	Désignation	unité
$\omega$	Fréquence angulaire	Rad/jour
$\lambda$	Conductivité thermique de l'air	w/(m.°k)
$\lambda_{sol}$	Conductivité thermique du sol	w/(m.°c)
$\lambda_{pipe}$	Conductivité thermique du tube enterré	w/(m.°k)
$\nu$	Viscosité cinématique de l'air	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Masse volumique de l'air	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{sol}$	Masse volumique du sol	Kg/m <sup>3</sup>
$\xi$	Coefficient de perte de charge singulière	[-]
$\varepsilon$	Efficacité du tube enterré	[-]
k	Constante	[-]
c	Constante	[-]

# ***TABLE DES MATIERES***

# ***TABLE DES MATIERES***

Remerciement	
Dédicace	
Nomenclature	
Introduction Général	2
<b><i>Chapitre I : Etude Bibliographie</i></b>	
I-1 : Introduction	5
I-2 : Principe du rafraichissement par la géothermie (échangeur enterré)	5
I-3 : Travaux expérimentaux réalisés	6
<b><i>Chapitre II : Etude Théorique</i></b>	
II-1 : Introduction	27
II.2- Calcul de la température du sol en fonction du temps et la Profondeur	27
II.3- Température de l'air à la sortie de l'échangeur enterré Horizontalement	34
II.3.1-Calcul de la température de l'air dans le tube enterré	35
II.4- Calcul de l'efficacité du tube enterré	38
II.5. Pertes de charge occasionnées le long de l'échangeur enterré	39
II.6. Coefficient d'échange convectif	43
<b><i>Chapitre III : Etude Expérimentale</i></b>	
III-1.Introduction	46
III-2. Description le site expérimentale	46
III.2.1. Instruments de mesures utilisées	47
III-3. Résultats expérimentaux obtenus	51
III-4. Efficacité de l'échangeur enterré	65
III-5. Perte de charge	70
III-6. Coefficient d'échange	71
Conclusion générale	75
Références bibliographiques	

# *Introduction Générale*

## *Introduction générale*

Un échangeur air-sol également connu sous les noms de puits canadien ou puits provençal, ou encore plus récemment, puits climatique, est un échangeur géothermie à très basse énergie utilisé pour rafraîchir ou réchauffer l'air ventilé dans un bâtiment.

L'échangeur air-sol consiste à alimenter un bâtiment en air en le faisant circuler auparavant dans un conduit enterré, qui selon les conditions climatiques le refroidit ou le préchauffe en utilisant l'inertie thermique du sol. L'air sert de fluide caloporteur tandis que le tube sert d'échangeur thermique tout en canalisant l'air jusqu'au bâtiment.

Le puits provençal, bien que principalement utilisé comme système de rafraîchissement naturel, peut être également utilisé l'hiver pour préchauffer l'air entrant ou pour maintenir hors gel une habitation. Il en est de même du puits canadien. Ce système est basé sur le simple constat que la température sous terre :

- Est différente de celle de l'air en surface.
- Sa variation peut se modéliser comme la somme de deux oscillations l'une annuelle (été/hiver) et l'autre journalière (jour/nuit).
- Sa variation subit une plus faible amplitude par rapport à sa moyenne annuelle d'autant plus que la profondeur augmente.
- Sa variation journalière, à faible profondeur, est déphasée dans le temps par rapport à celle de l'air en surface du fait de l'inertie thermique de la terre.
- Ces constats sont à mettre en parallèle avec les données suivantes :
- La profondeur du sol à partir de laquelle la température est considérée comme hors portée de gel, à une profondeur d'environ 60 cm.

- La température moyenne saisonnière du sous-sol à 2,5 ou 3 mètres de profondeur se rapproche davantage de la température de confort (18 - 26°C) l'été que l'hiver.

Dans ce travail théorique et expérimental, on s'intéresse à l'étude des performances thermiques d'un échangeur air/sol enterré, qui est basé sur la validation et la vérification par voie d'expériences les modèles théoriques développés qui décrivent de façon générale les paramètres de performances, à savoir l'évolution de la température du sol, la température de l'air injectée dans l'échangeur, l'efficacité ainsi que les pertes de charge occasionnées depuis l'entrée jusqu'à la sortie.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres suivants :

- ✓ Une étude bibliographique, qui comporte les fondements de base sur le principe d'exploitation de la fraîcheur contenue en profondeur par échangeur enterré, ainsi qu'un certain nombre de travaux scientifiques réalisés.
- ✓ Une étude théorique concernant les modèles mathématiques existants qui ont été développés ultérieurement et qui ont fait objet de plusieurs travaux de simulation.
- ✓ Etude expérimentale, sur la base de plusieurs manipulations effectuées sur site, on a pu relever un nombre importants de valeurs expérimentales ce qui nous a permis de suivre l'évolution des paramètres de performances dans le temps et suivant la longueur de l'échangeur et de vérifier la fiabilité des approches et des modèles mathématiques existants.

# *Chapitre I*

## *Etude*

### *Bibliographique*

### **I-1.Introduction**

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'étude du rafraîchissement de l'air par la géothermie en particulier. A travers la modélisation et l'expérimentation, nous essayons d'évaluer les performances d'un échangeur air/sol, il s'agit de voir l'influence des propriétés du sol, du site et de la nature du conduit sur l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur enterré puis celle obtenue à la sortie qui pourra être exploitée.

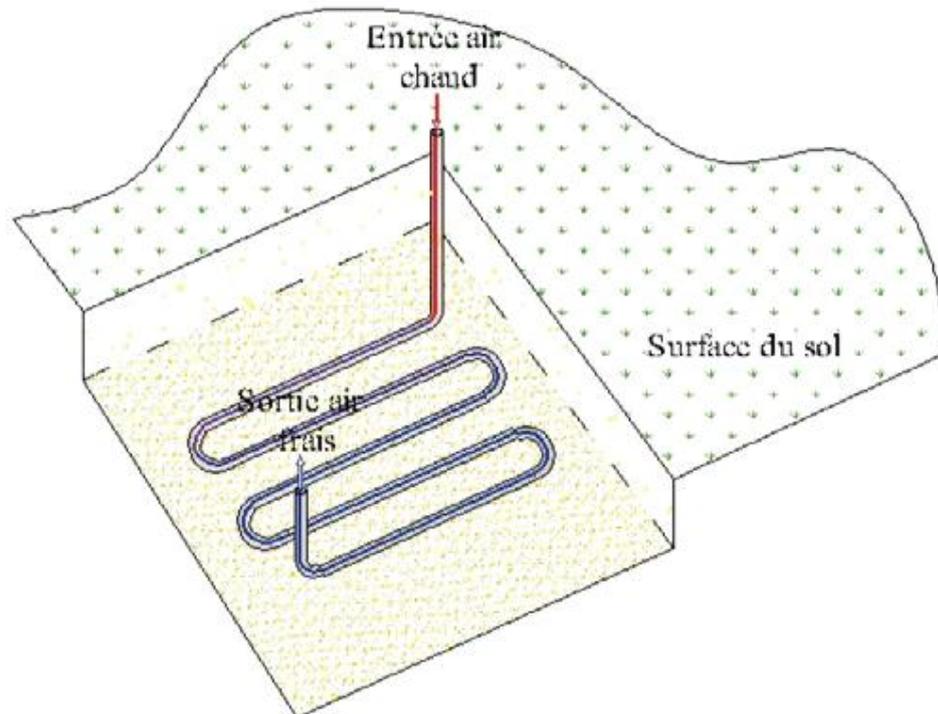
L'écart avec la température extérieure détermine les possibilités offertes à la technique du rafraîchissement par la géothermie pour être utilisée dans les sites de climats variés en Algérie. Dans ce travail, on va mener en premier lieu, une étude théorique pour l'établissement d'un modèle analytique qui traduit l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction des différents paramètres structurels, conceptuels et d'utilisation. En deuxième étape, les résultats théoriques obtenus sont comparés avec ceux obtenus expérimentalement.

### **I-2.Principe du rafraichissement par la géothermie (échangeur enterré) :**

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

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

L'échangeur est placé horizontalement avec une certaine pente de 2% pour permettre l'évacuation de l'eau produite suite à la condensation.



**Figure (I-1):** Disposition de l'échangeur enterré air/sol[1]

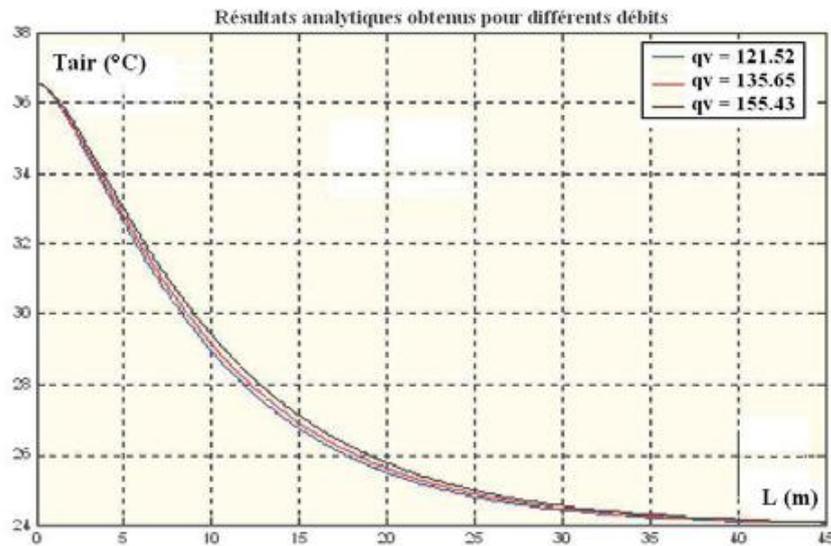
### **I-3.Travaux expérimentaux réalisés :**

En 2010 **N.Moummi et al** [1], ont menés une étude théorique et expérimentale sur le procédé du rafraîchissement de l'air par la géothermie dans le site de Biskra. L'étude entreprise, concernant le rafraîchissement par la géothermie, constitue un projet pilote de démonstration d'une technique qui est jusqu'à présent non exploitée dans notre pays. Cette technique a pour support technique un échangeur air/sol enterré dit 'puits canadien'. La température du sol influe principalement sur les performances d'un tel échangeur du fait que le sol, à une certaine profondeur devient le facteur essentiel pour les échanges thermiques entre l'air qui circule à l'intérieur de l'échangeur et le milieu qui l'entoure.

Dans ce travail, on va examiner et vérifier expérimentalement en premier lieu les modèles théoriques qui ont été établis jusqu'à présent, qui traduisent le mieux l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction

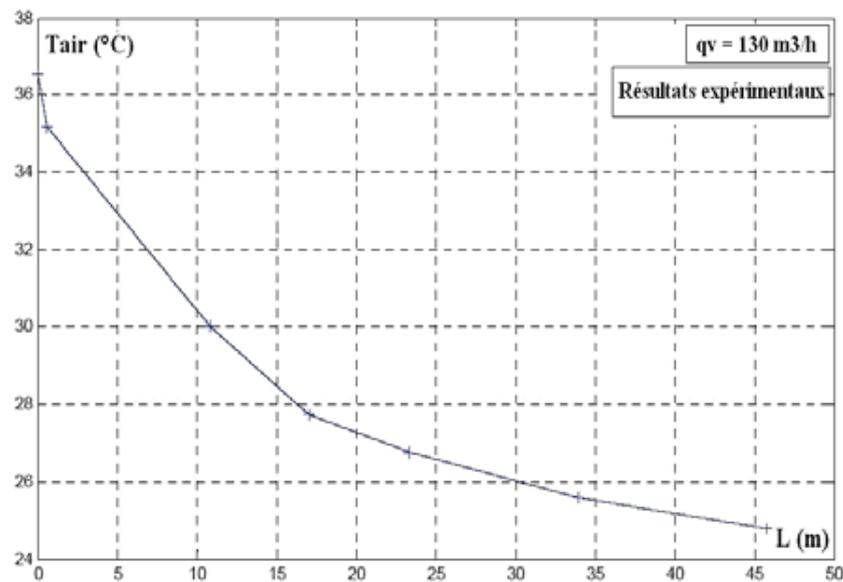
## Chapitre I : Etude Bibliographique

des différents paramètres structurels conceptuels et d'utilisation qui ont été prises en considération, en deuxième étape, une étude de synthèse et de comparaison sera entamée entre les résultats théoriques développés avec ceux obtenus expérimentalement.

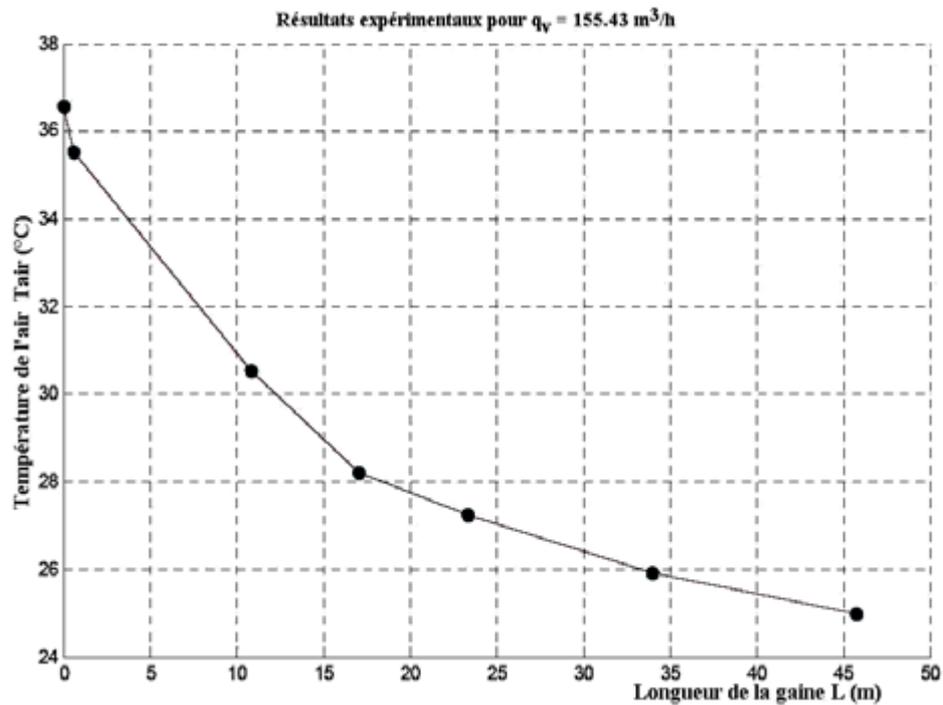


**Figure (I-2):** Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour différents débits d'air[1]

Les résultats expérimentaux issus des mesures effectués sont montrés sur les figures ci-dessous.



**Figure (I-3):** Variation de la température de l'air pour un débit de  $130 \text{ m}^3/\text{h}$  en fonction de la longueur de l'échangeur[1]



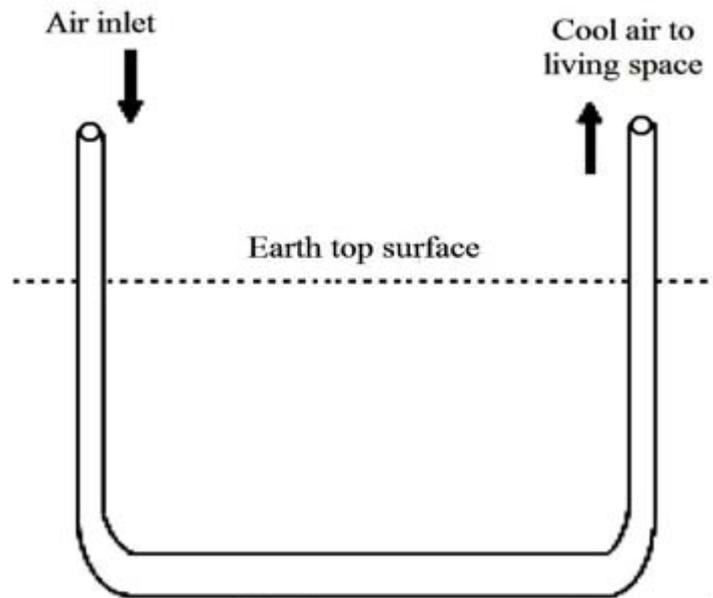
**Figure (I-4):** Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur [1]

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

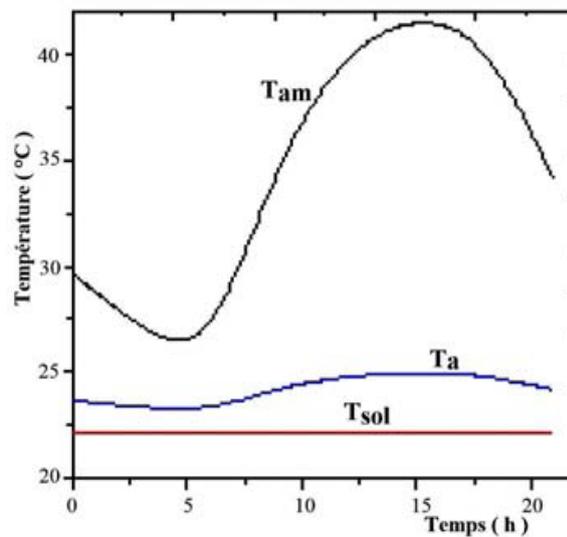
**M. Benhammou et al** [2] en 2011, dans leur étude ont montrés que la climatisation électrique est très énergivore et l'offre ne peut plus satisfaire à la demande accrue surtout dans les saisons chaudes. L'utilisation des systèmes de rafraîchissement par géothermie constitue une bonne alternative notamment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

## Chapitre I : Etude Bibliographique

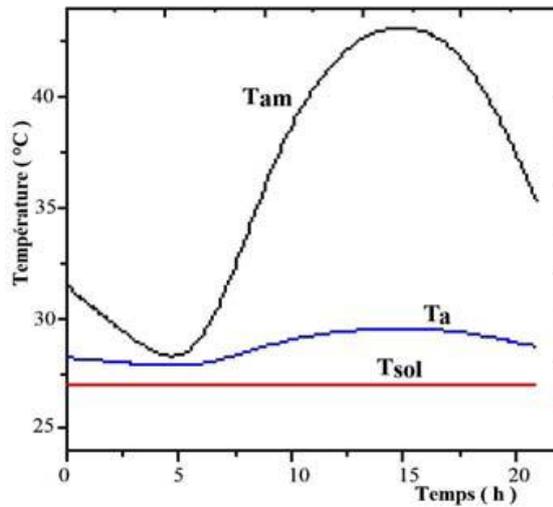
quotidienne et sur la température de l'air refroidi à la sortie de l'échangeur enterré.



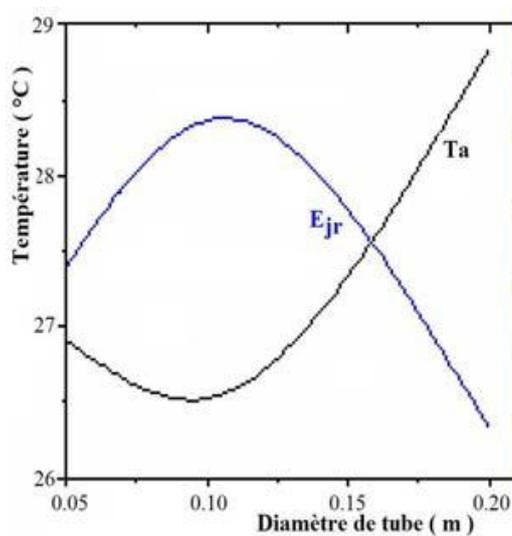
**Figure (I-5) :**Représentation de l'échangeur géothermique à air[2]



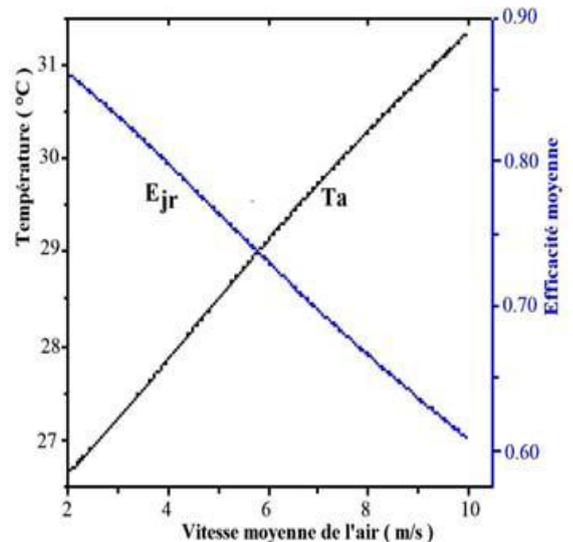
**Figure (I-6):**Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juin[2]



**Figure (I-7):** Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juillet [2]



**Figure (I-8):** Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction du diamètre du tube[2]



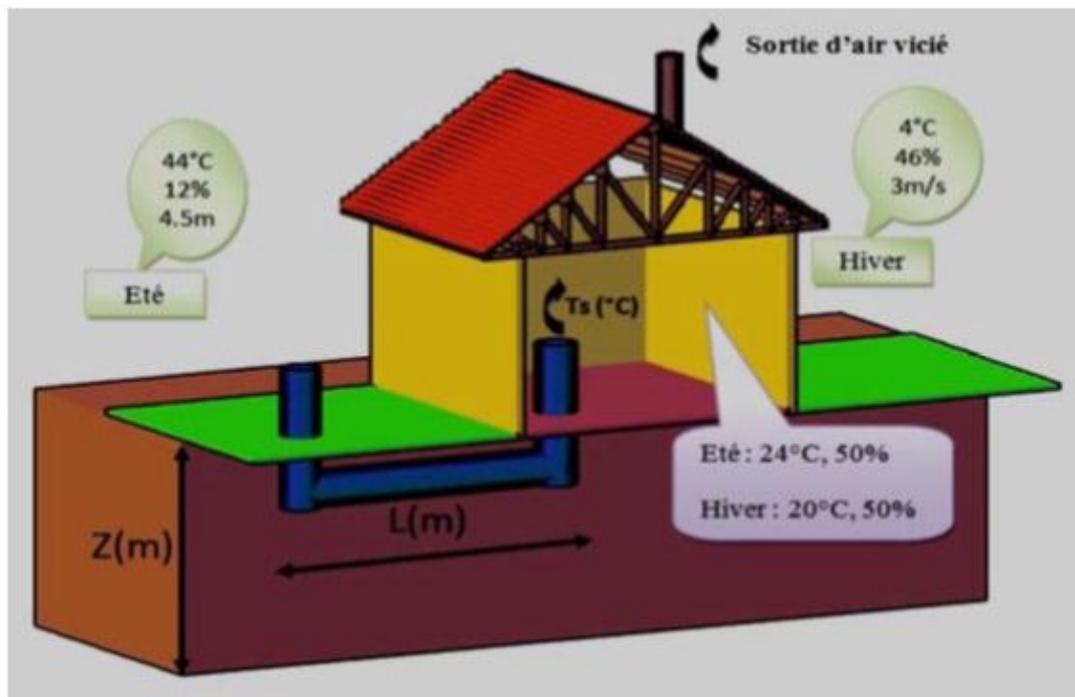
**Figure (I-9):** Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction de la vitesse moyenne de l'air dans le tube[2]

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.

## Chapitre I : Etude Bibliographique

L'étude présentée par **B. Mebarki et al** [3] 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) :** Géométrie de l'échangeur Air-Sol étudié[3]

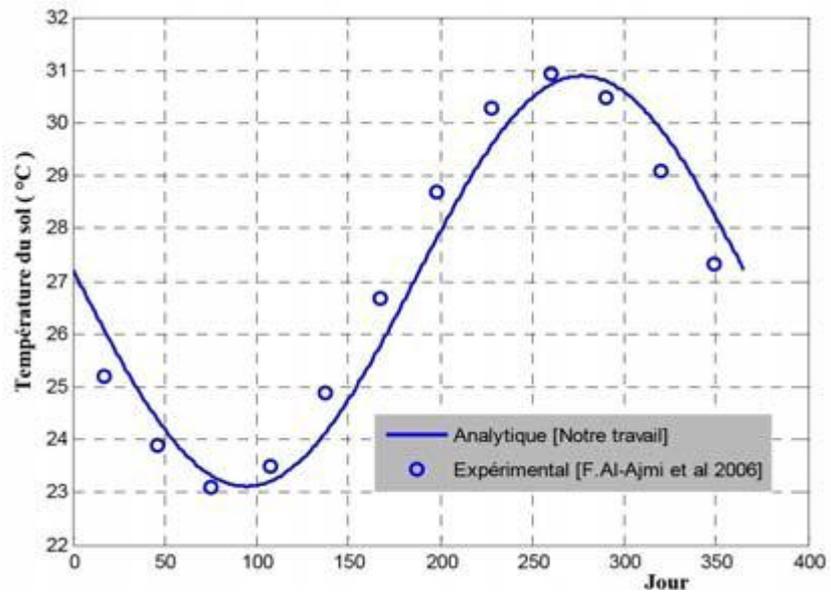


Figure (I-11) : Variation de la température du sol durant toute l'année[3]

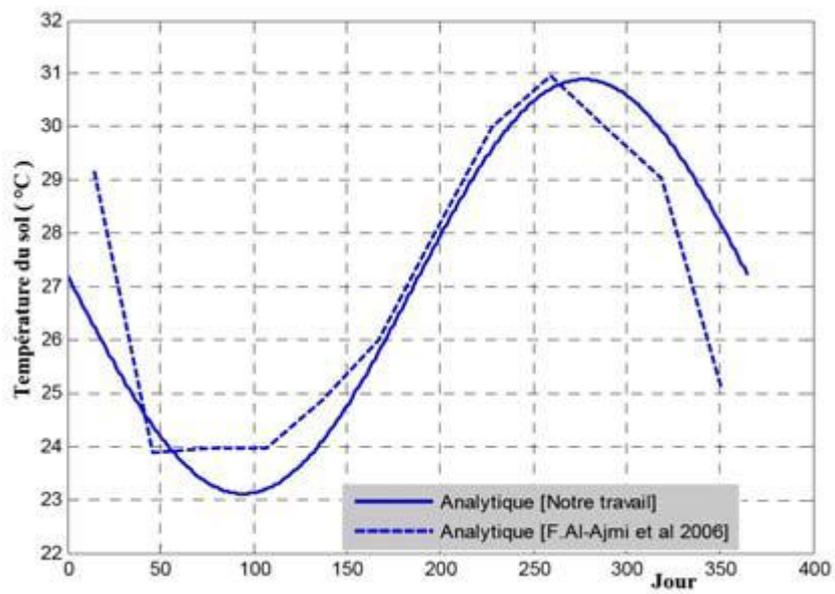
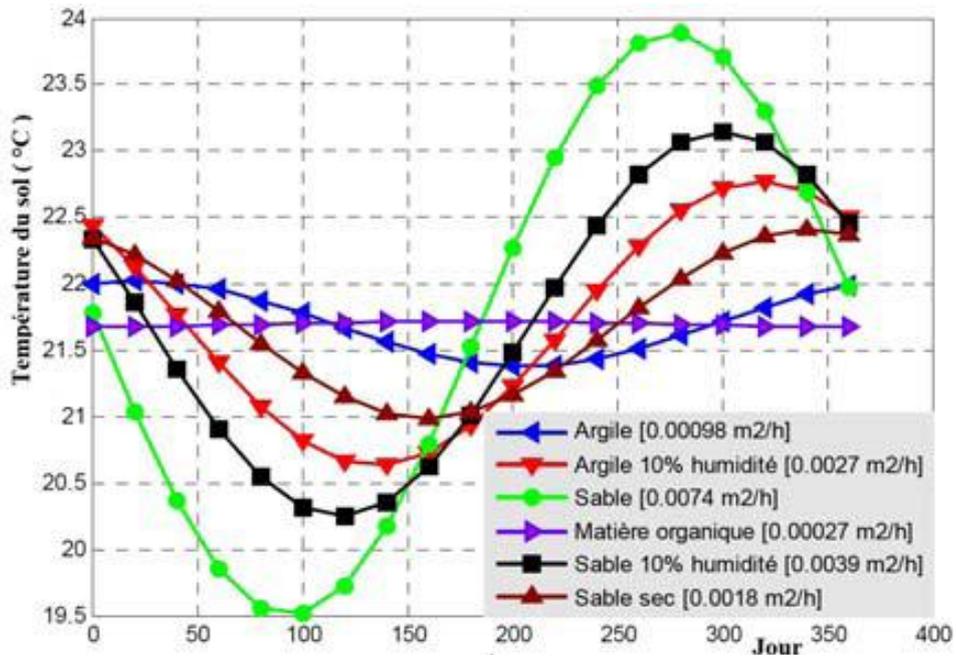
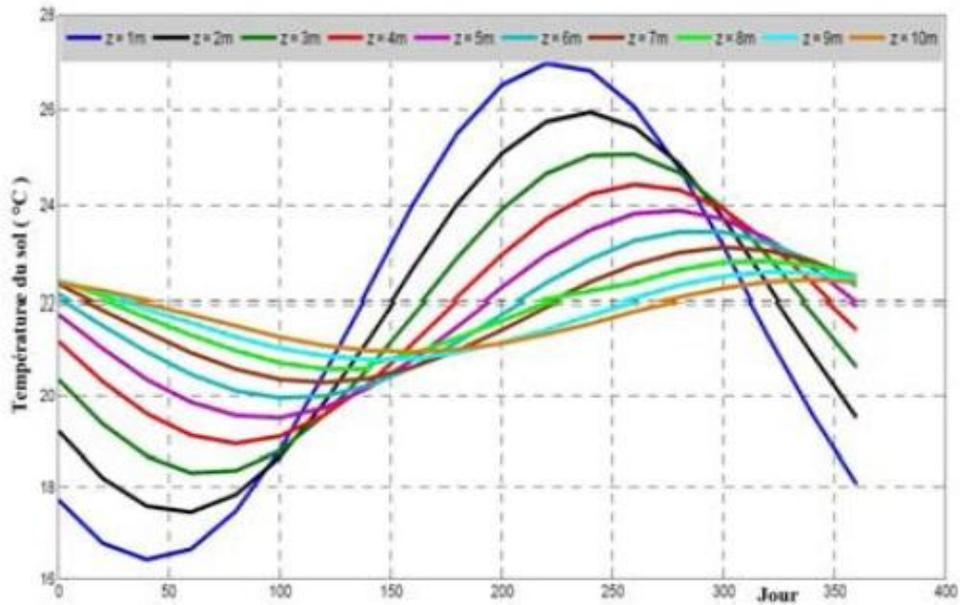


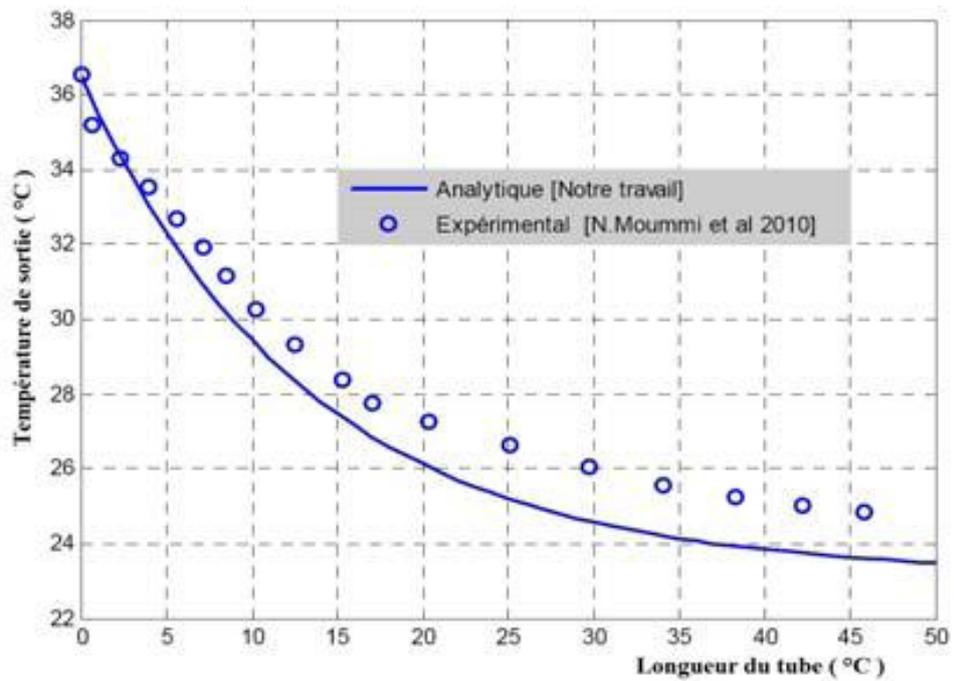
Figure (I-12) : Variation de la température du sol durant toute l'année[3]



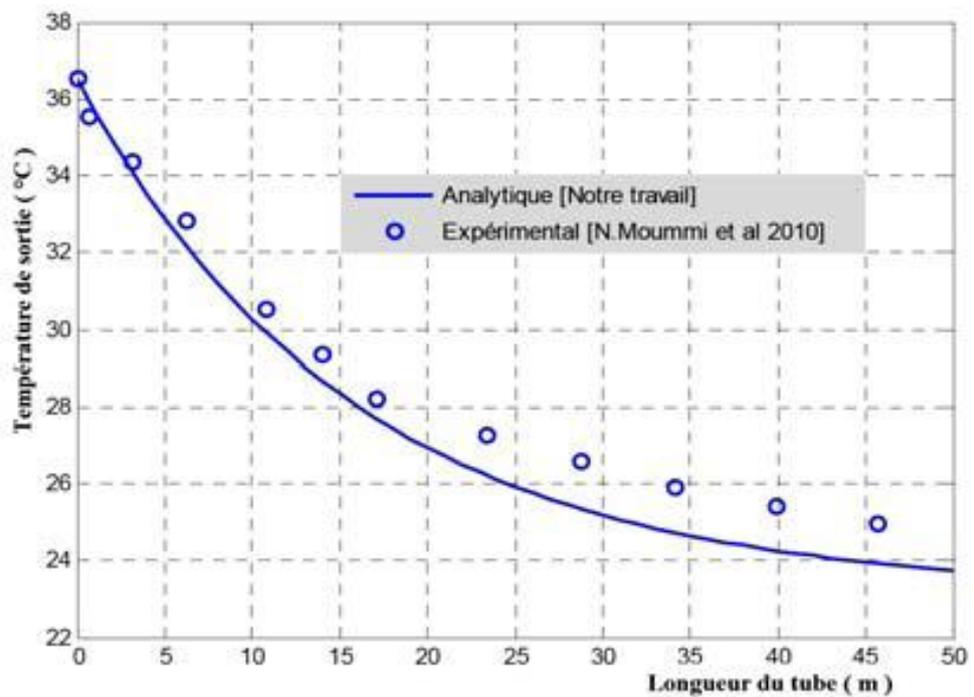
**Figure (I-13) :** Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes diffusivité thermique[3]



**Figure (I-14) :** Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes profondeurs dans le sol[3]



**Figure (I-15) :** Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour un débit volumique  $q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$ [3]



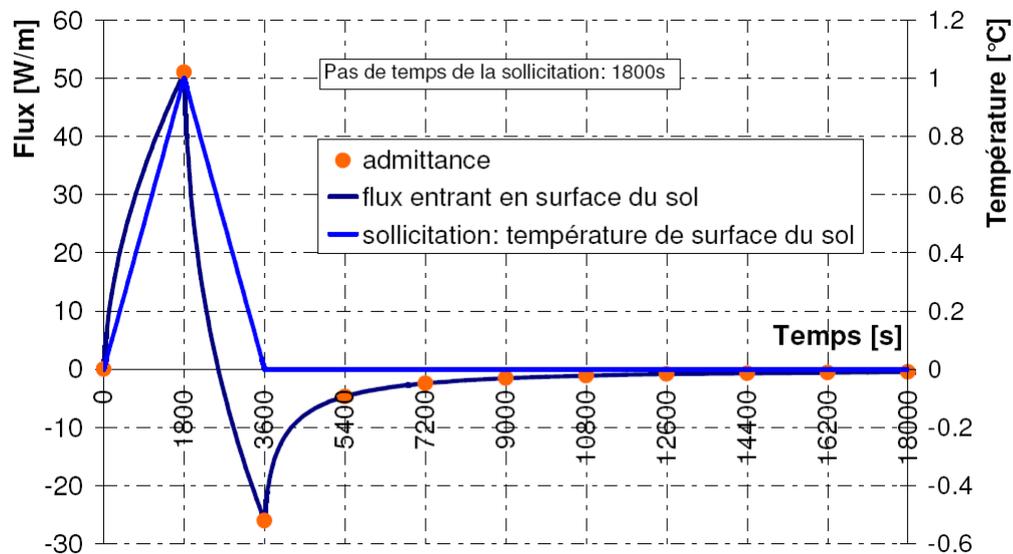
**Figure (I-16) :** Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour un débit volumique  $q = 155.43 \text{ m}^3/\text{h}$ [3]

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

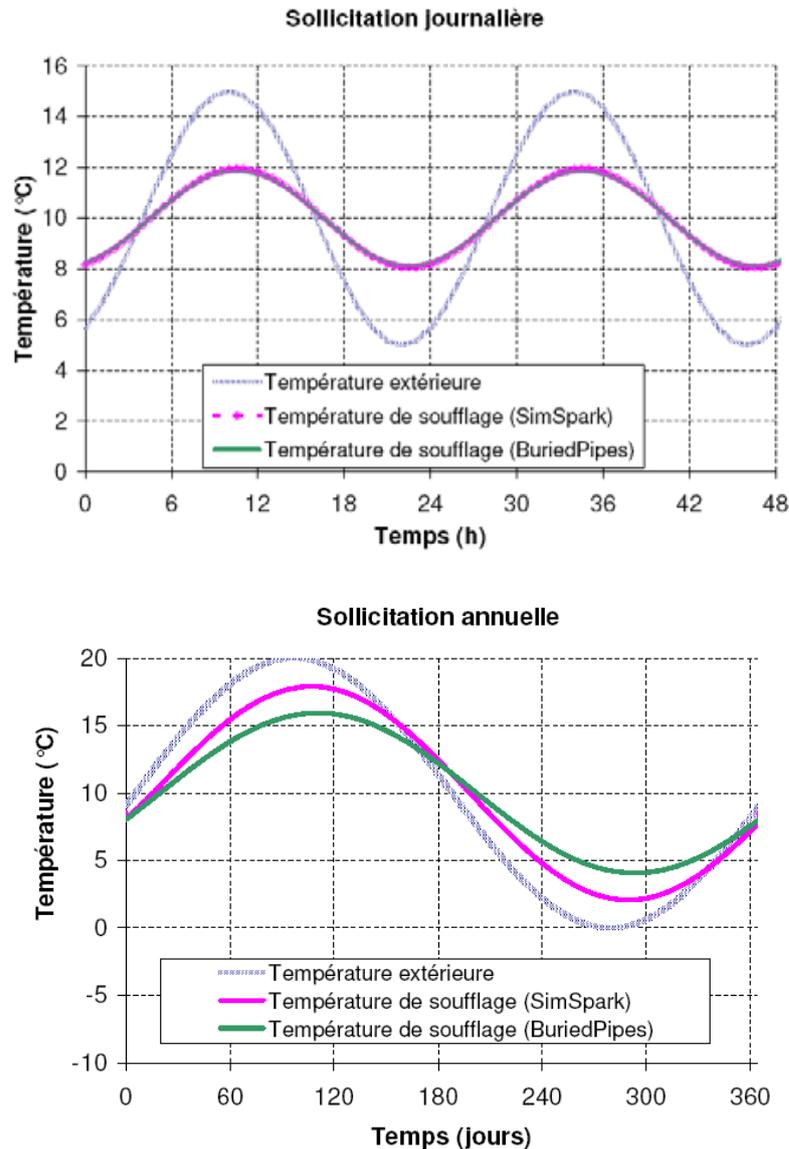
de manière efficace sur l'amortissement des amplitudes thermiques. Ce système favorise un confort d'ambiance pour les individus en limitant les contraintes thermiques. La rentabilité de l'échangeur peut être atteinte, s'il permet d'avoir une ambiance plus homogène en termes de température permettant effectivement de gagner en croissance et en indice de consommation.

L'étude réalisée par **Pierre Tittlein [4]** en 2007 sur des échangeurs air-sol par la méthode convolutive des facteurs de réponse. Dans ce travail l'auteur propose un modèle numérique d'échangeur air-sol (puits canadien) basé sur un découpage du problème en tranches perpendiculaires aux tubes de l'échangeur. Dans chaque tranche, le problème conductif est résolu par la méthode des facteurs de réponse pour réduire le temps de calcul. Les facteurs de réponse sont calculés à partir d'un logiciel qui résout le problème 2D par élément fini. Il a déduit ainsi dans chaque tranche le flux qui arrive au niveau du tube en fonction de la température d'air intérieur et des sollicitations extérieures.

Un bilan le long du tube est alors réalisé pour connaître la température de sortie de l'air. Le modèle est ensuite comparé à un modèle analytique.



**Figure (I-17)** : Exemple de facteurs de réponse (admittance X) calculés avec COMSOL[4]



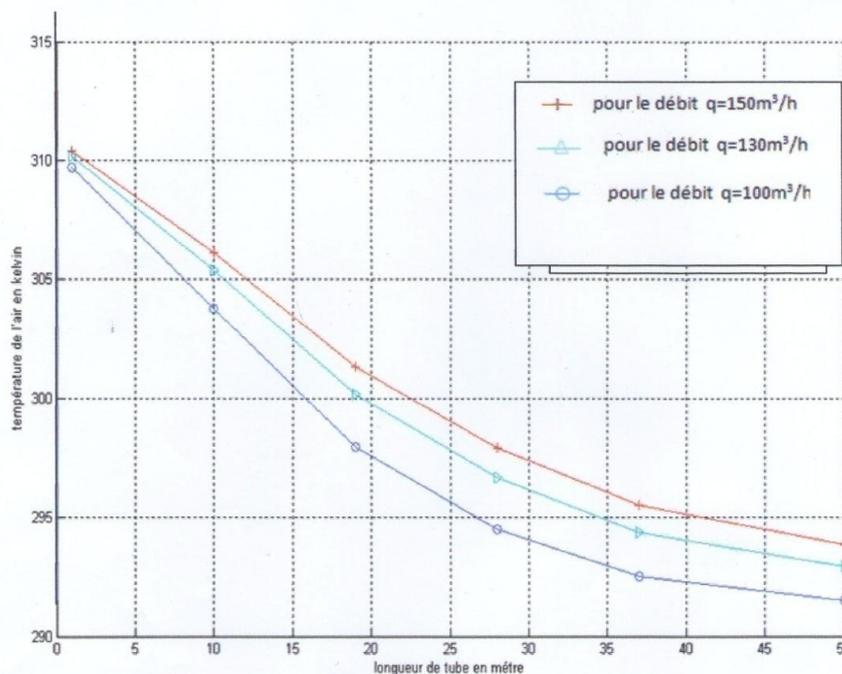
**Figure (I-18) :** Comparaison des températures de sorties du tube avec un modèle analytique[4]

Dans ce travail, l'auteur a présenté un modèle d'échangeur air-sol permettant de prendre en compte n'importe quelle géométrie et n'importe quel paramètre thermo-physique de sol. Ce modèle est réduit par la méthode des facteurs de réponses ce qui permet d'obtenir des temps de calculs assez faibles. Une comparaison entre ce modèle et un modèle analytique a été réalisée qui montre une bonne cohérence des résultats dans la limite de validité du modèle théorique analytique.

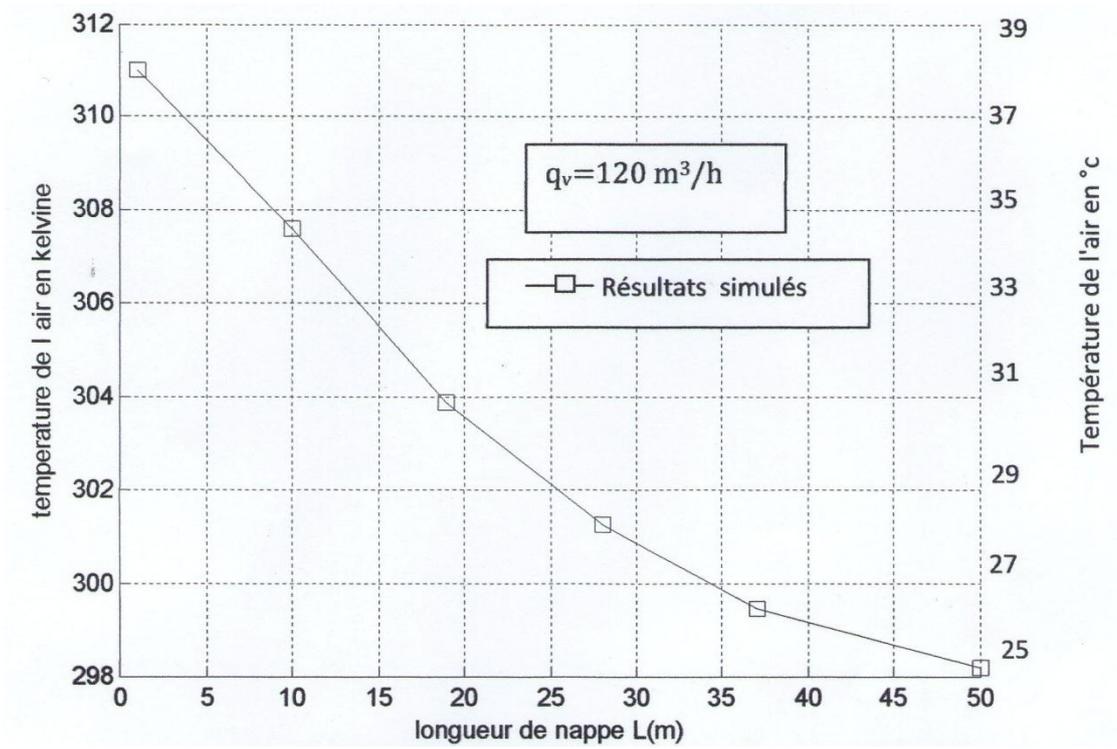
## Chapitre I : Etude Bibliographique

Dans son travail de recherche **Mohamed Saad-eddine [5]** en 2012, intitulé identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, l'auteur s'est intéressé à l'inertie thermique du sol, du fait qu'il maintient une température stable à certaines profondeurs quelle que soit la température de l'air à la surface. Cette propriété nous laisse penser à l'exploiter en utilisant un échangeur de chaleur (air-sol) enfouis à des profondeurs appropriées. Où un courant d'air passe à travers l'échangeur pour une utilisation ultérieure dans le rafraîchissement de l'air ou le chauffage.

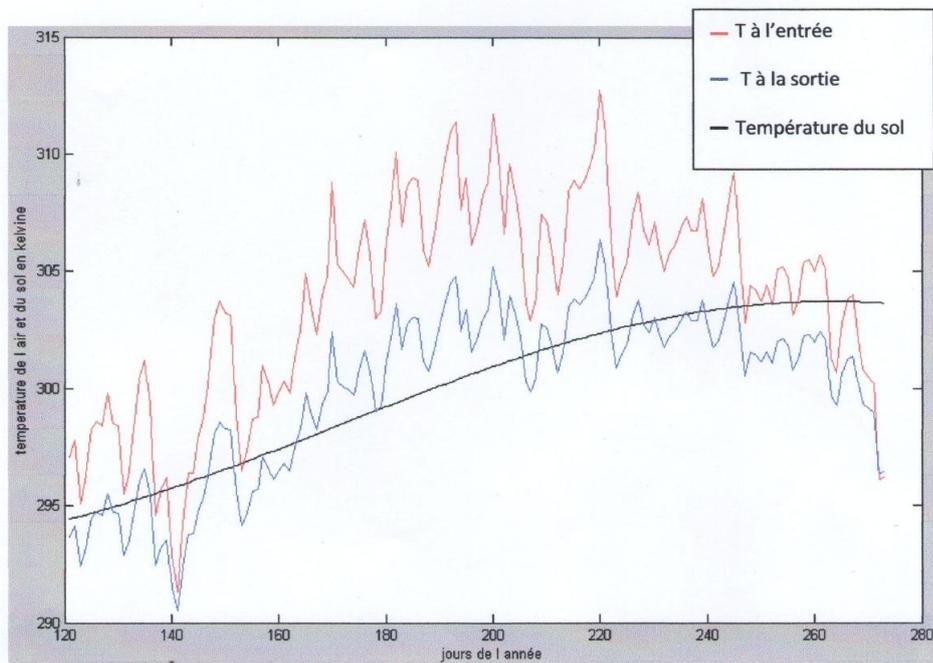
Ce travail vise à étudier les facteurs qui contrôlent le comportement thermique de ces échangeurs. L'auteur a commencé par donner une définition détaillée de celui-ci, puis il a réalisé un modèle mathématique, dont l'objectif est de calculer l'évolution de la température du sol à n'importe quelle profondeur et pour n'importe quelle journée de l'année. Ensuite il a fait une modélisation numérique pour simuler la température de l'air à la sortie de l'échangeur pour chaque jour particulièrement durant la période estivale dans la région de Biskra.



**Figure (I-19) :** Variation de la température de l'air le long du tube pour la 200<sup>ième</sup> journée de l'année[5]



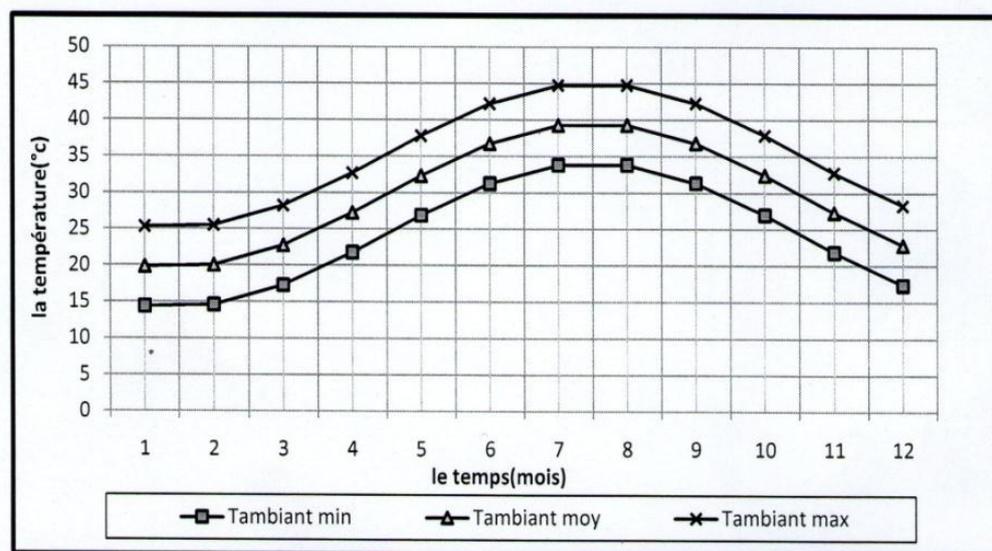
**Figure (I-20) :** Comparaison résultats expérimentaux et analytique pour  $q_v = 121.52 \text{ m}^3/\text{h}$  [5]



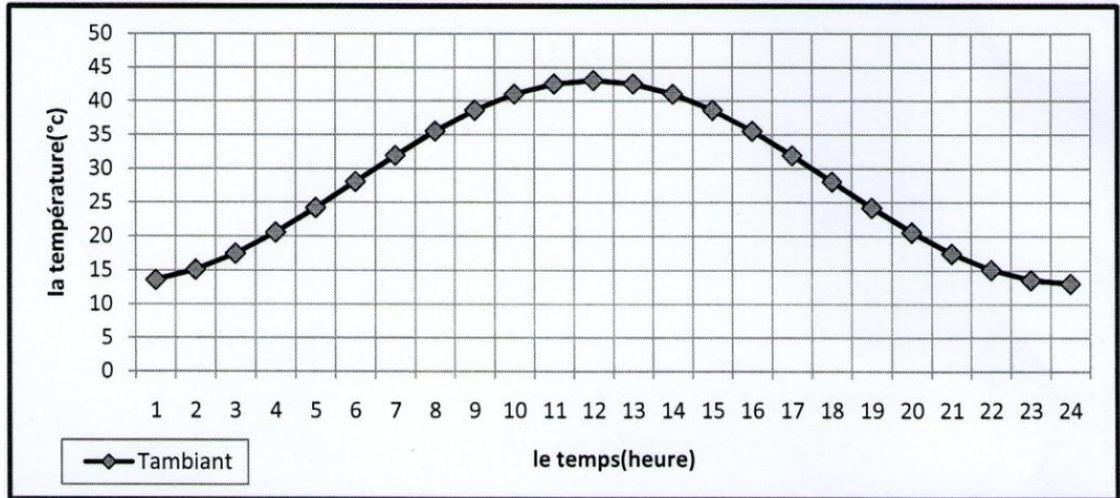
**Figure (I-21) :** Evolution Annuelle de la température à la sortie de l'échangeur air-sol[5]

## Chapitre I : Etude Bibliographique

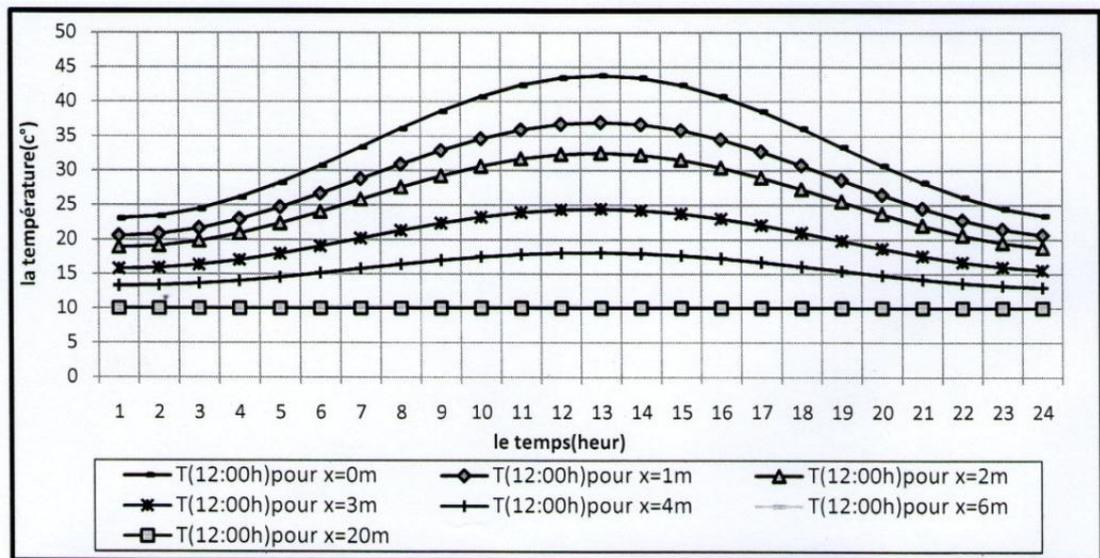
L'étude théorique et expérimentale présentée par **Nebbar hamza** [6] en 2012 concernant un échangeur air/sol destiné au rafraîchissement des locaux par la géothermie. L'auteur s'est intéressé aux systèmes climatiques caractérisés par leur aspects non polluants. Il s'agit d'un échangeur air-sol dit puit canadien, utilisé pour le rafraîchissement des bâtiments, puis il a évalué le potentiel de l'utilisation de la géothermie, dite de surface, par la technologie appropriée pour son exploitation par la détermination des variations de la température du sol à différentes profondeurs, ainsi que la modélisation de la température de l'air à la sortie de l'échangeur, en considérant dans cette étude l'écoulement permanent d'un fluide Newtonien incompressible à viscosité constante dans un tube de section circulaire, et en supposant que le régime dynamique est établi. A partir du modèle obtenu il a pu mettre en relation une expression qui montre la variation de la température de l'air en fonction des paramètres du site, des caractéristiques du milieu, de la géométrie de passage et des paramètres d'entrée et de sortie. La résolution des équations gouvernantes a été faite par une méthode numérique appropriée. Des outils mathématiques et numériques ont été manipulés. L'étude menée a permis d'identifier les paramètres susceptibles d'affecter le fonctionnement de ces systèmes et fournissent un ensemble important d'informations sur la technique du rafraîchissement par la géothermie.



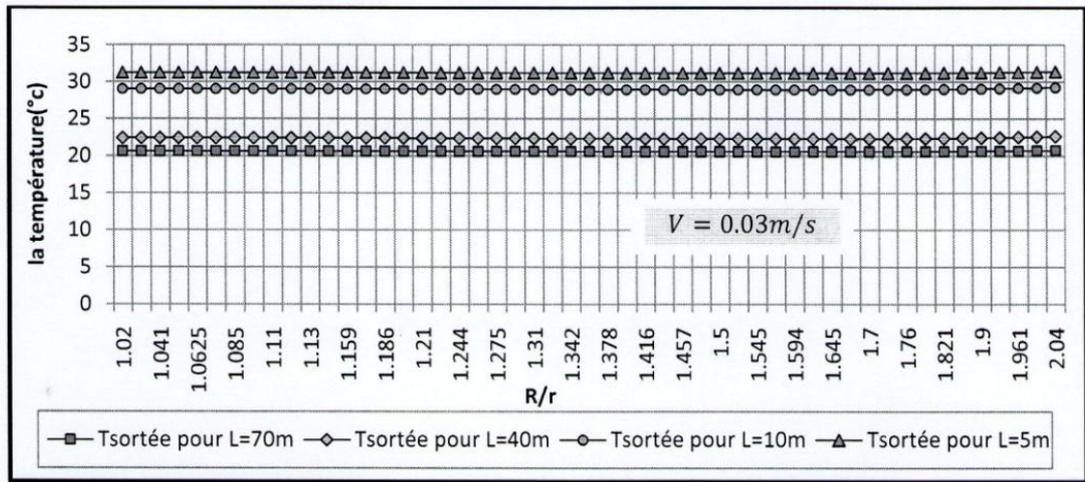
**Figure (I-22) :** Variation de la température ambiante annuelle [6]



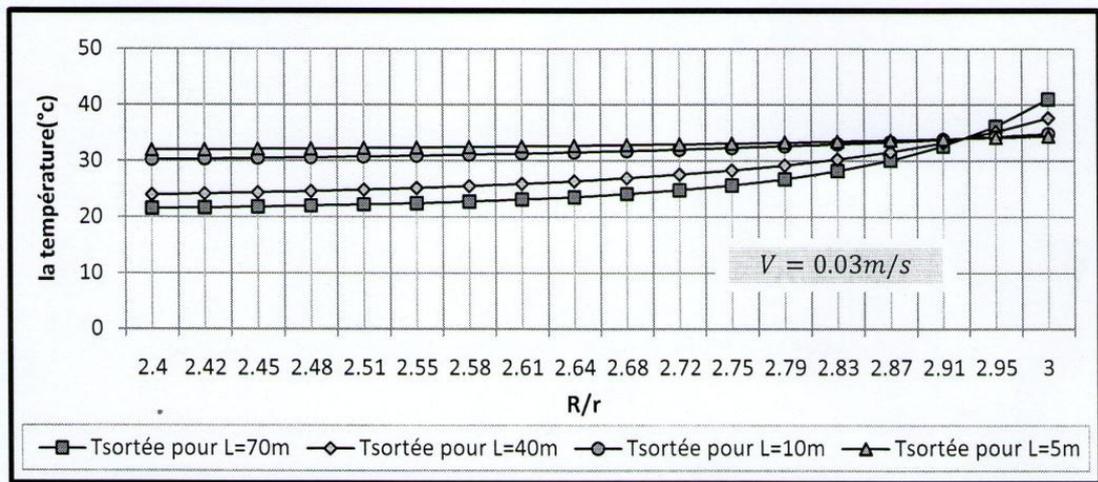
**Figure (I-23) :** Variation de la température ambiante journalière [6]



**Figure (I-24) :** Variation de la température de sol en fonction du temps [6]



**Figure (I-25) :** Variation de la température de l'air à la sortie du tube enterée horizontalement en fonction du rapport (R/r)[6]

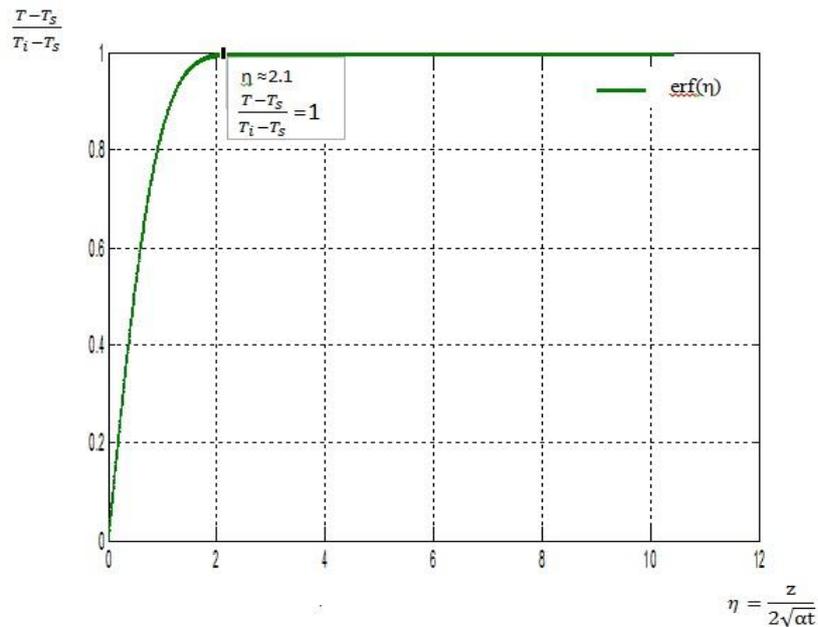


**Figure (I-26) :** Variation de la température de l'air à la sortie du tube enterée horizontalement en fonction du rapport (R/r)[6]

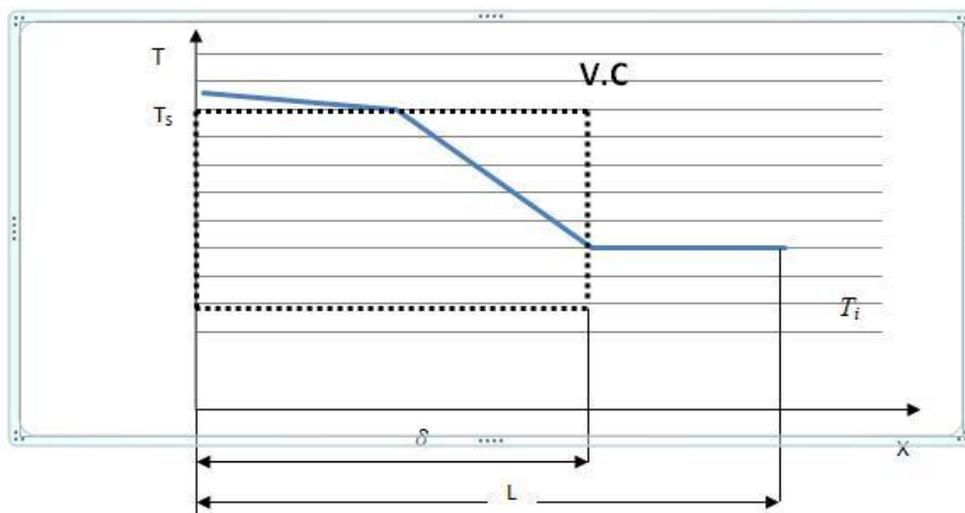
Dans une étude demodélisation d'un échangeur air/sol destiné pour le rafraichissement des locaux en 2012 **Belloufi yousef** [7],a montré que le sol est considéré comme un milieu homogène et invariant, caractérisé par une conductivité thermique  $\lambda_{sol}$ , une masse volumique  $\rho_{sol}$  et une capacité calorifique massique  $C_{sol}$ . La variation temporelle du taux d'humidité du sol due à l'infiltration d'eau est négligeable, et aucune nappe phréatique n'est prise en compte sous la zone d'implantation de l'échangeur. Le sol s'apparente donc à un massif semi-infini.

## Chapitre I : Etude Bibliographique

Pour extarire la fraicheur maximale contenue dans les premiers mètres du sous-sol à un coût financier faible, on devrait étudier la profondeur de pénétration dans le sol pour l'emplacement de l'échangeur air-sol et cela signifie que là où la température reste invariante en fonction du temps et de la profondeur.



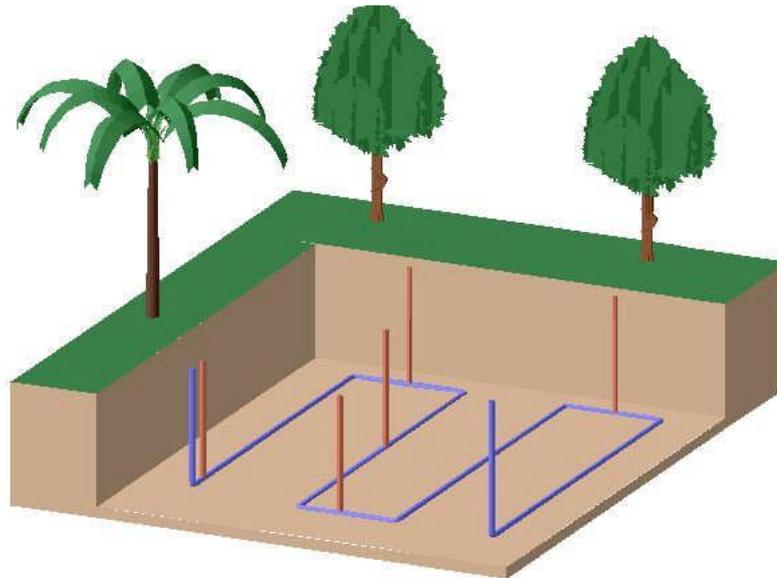
**Figure (I-27) :**Solution exacte de la variation de température dans le sol[7]



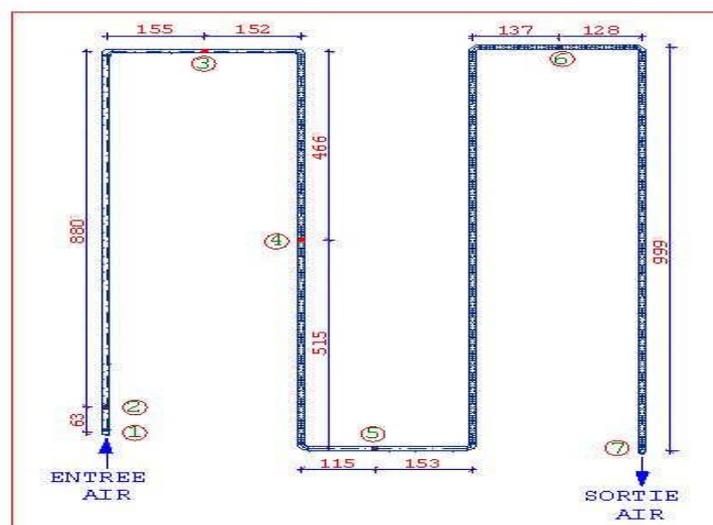
**Figure (I-28) :**variation de la température à l'intérieur du sol avec une température de la surface prise constante [7]

## Chapitre I : Etude Bibliographique

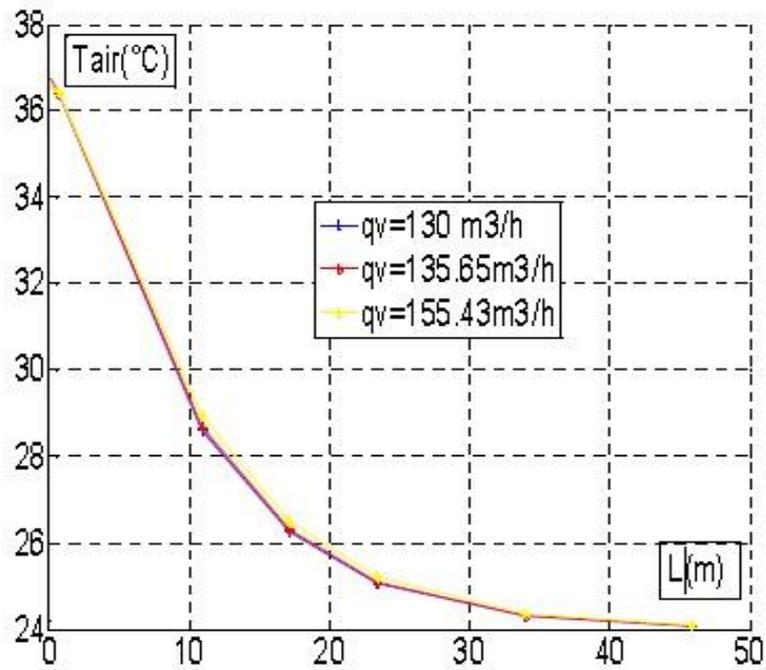
En 2010 **Hocine BENFATAH [8]** dans une étude théorique et expérimentale du rafraîchissement de l'air par la géothermie, application à l'HABITAT, où il s'est intéressé à une analyse théorique du phénomène à travers la modélisation et la simulation des performances de ces systèmes. Il s'agit de connaître l'évolution de la température de l'air frais à la sortie de l'échangeur qu'on pourra avoir selon divers contextes structurels, conceptuels et d'environnement. Les résultats théoriques sont comparés aux résultats expérimentaux.



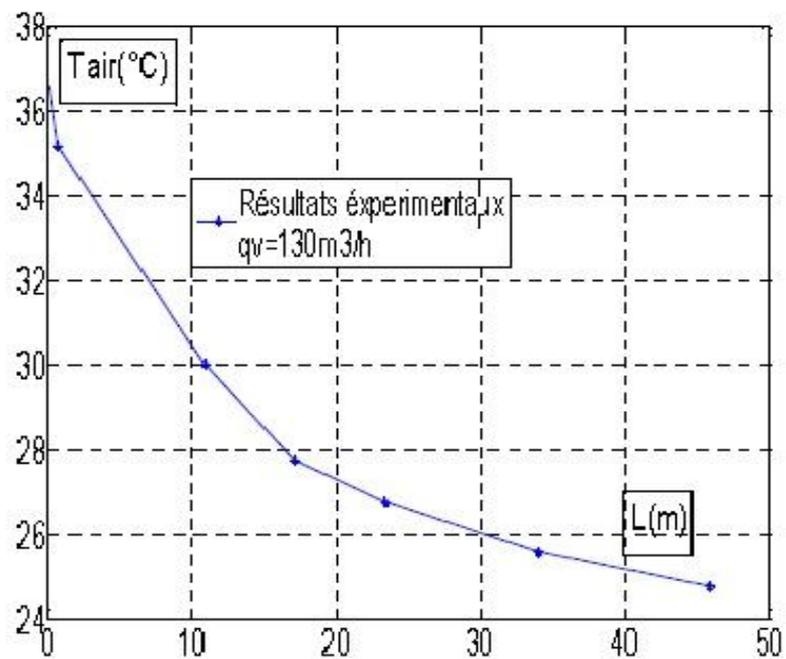
**Figure (I-29) :** Disposition de l'échangeur air/sol [8]



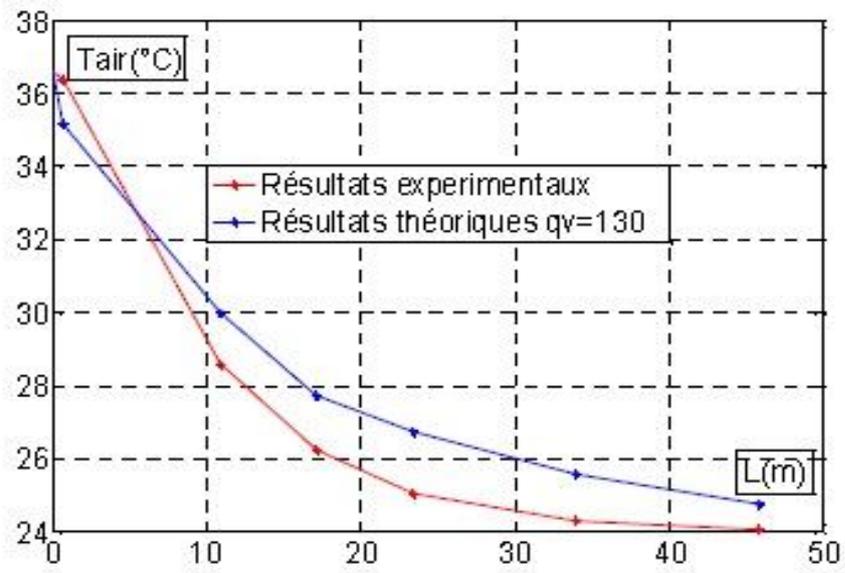
**Figure (I-30) :** Vue en plan de l'installation expérimentale [8]



**Figure (I-31) :** Variation de température le long de l'échangeur pour différents débits d'air[8]



**Figure (I-32) :** Variation de température le long de l'échangeur pour débit d'air  $q_v = 130 \text{ m}^3/\text{h}$ [8]



**Figure (I-33)** : Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques pour ( $q_v=130m^3/h$ )

[8]

# *Chapitre II*

*Etude*

*Théorique*

### II.1 Introduction

L'être humain se sent bien entre 18 et 27°C. Il dépense énormément d'énergie pour maintenir la température dans cette marge. L'utilisation d'un échangeur air/sol, système dit «Puits canadien » pour rafraîchir l'habitation, connaît un développement important depuis quelques années. Il consiste à utiliser comme entrée pour la ventilation de la maison, de l'air qui a préalablement circulé dans un tube enterré à une certaine profondeur. La température du sous-sol étant moins variable que celle de l'air extérieur, cela permet d'avoir une entrée d'air plus tempérée.

Dans ce travail on s'intéressera aux modèles mathématiques qui ont été développés ultérieurement et qui ont été utilisés par la suite afin d'entamer des simulations numériques, pour suivre notamment l'évolution des profils des températures du sol et de l'air à la sortie d'un d'échangeur air/sol. Ces modèles mathématiques ont permis de mettre en évidence l'effet du diamètre du tube et la longueur de échangeur enterré, du débit volumique, des pertes de charge occasionnées ainsi que la différence de température entre le sol et l'air entrant par rapport au flux thermique fournit par le puits canadien [6].

### II.2- Calcul de la température du sol en fonction du temps et la profondeur

L'évaluation du potentiel de l'utilisation de la géothermie de surface et de la technologie appropriée pour son exploitation, passe par la détermination des variations, le long de l'année, de la température du sol à différentes profondeurs. Ces variations sont obtenues à l'aide d'une modélisation simple utilisant les propriétés du sol et les températures ambiantes. L'évolutions de la température ambiante en fonction du temps (jour) est généralement représentée par une fonction cosinus de la forme [6] :

$$T = T_i + T_{\text{moy}} \cdot \cos[w(t - t_0)] \quad (\text{II. 1})$$

Ou :

$T_i$  : Température ambiante journalière

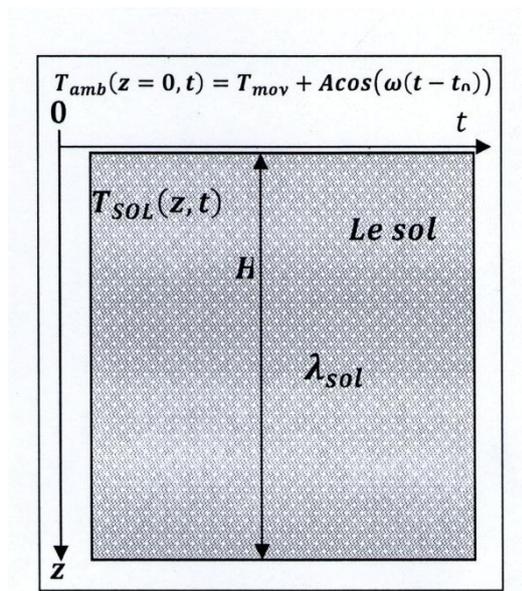
$T_{moy}$  : Température moyenne du jour(°C).

$w$  : Fréquence angulaire[ $w = 2\pi/24$ ](rad/heure).

$t_0$  : Heure de la journée où la température est maximale au midi solaire

( $t_0 = 12,5 h$ )

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



**Figure (II -1):**schématisation du transfert de chaleur dans le sol [6]

Dans cette étude le transfert de chaleur dans le sol est supposé unidimensionnel s'effectuant par conduction dominante, tout en considérant qu'il s'agit d'un milieu homogène, l'équation instationnaire de la chaleur dans ce cas s'écrit [6] :

$$\nabla^2 T = \frac{\rho_{sol} c_{sol}}{\lambda_{sol}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II-2})$$

Qui peut être réécrite sous la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T \quad (\text{II-2)(a)}$$

## Chapitre II : Etude Théorique

Avec,

$\lambda_{sol}$  : Conductivité du sol [w/m.°C]

$c_{sol}$  : Capacité calorifique massique du sol [J/kg.°C]

$\rho_{sol}$  : Masse volumique du sol [kg /m<sup>3</sup>]

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

t : Temps [s]

z : Profondeur en dessous de la surface du sol [m]

a : Diffusivité thermique [m<sup>2</sup>/s]

Sachant que la diffusivité thermique est aussi donnée par :

$$a = \lambda / (\rho \cdot c)$$

Pour résoudre l'équation différentielle (II-3), il est important de définir les conditions aux limites.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II-3})$$

Dont les conditions aux limites sont :

- $T_{amb}(z = 0, t) = T_{amb} + A \cos[\omega(t - t_0)]$
- $T(\infty, t) = T_i$

Introduisons la variable  $\theta$  qui est défini par :

$$\theta = T - T_i \quad (*)$$

Où,  $T_i$  : est la température du sol à une profondeur  $z_i$ , telle que  $T(z) = T_i (\forall z > z_i)$

L'équation différentielle aux dérivées partielle prendra alors la forme :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

(II-4)

En posant :

$$\bar{T} = T_{moy} - T_i \quad (**)$$

## Chapitre II : Etude Théorique

Avec :

- $\theta_{amb}(z = 0, t) = \bar{T} + A \cos[\omega(t - t_0)]$
- $\theta(\infty, t) = 0$

En utilisant la méthode de séparation des variables telle que :

$$\theta = x(z).y(t) \quad (\text{II-5})$$

Remplaçons dans l'équation différentielle aux dérivées partielles :

$$x''(z).y(t) = \frac{1}{a} x(z).y'(t) \quad (\text{II-6})$$

Divisons les deux membres de l'équation par  $x$  et  $y$  :

$$a \frac{x''(z)}{x(z)} = \frac{y'(t)}{y(t)} = \beta \quad (\text{II-7})$$

Avec,  $\beta$  constant

La température sinusoïdale imposée en surface, en régime périodique où le problème considéré étant linéaire, on cherche une solution de même fréquence que l'excitation, en supposant que  $\beta = i\omega$  ou  $i^2 = -1$ , l'équation différentielle (II-7) devient [6]:

$$y'(t) - \beta y(t) = 0 \quad (\text{II-8})$$

$$\Rightarrow \frac{dy}{dt} - \beta.y = 0$$

$$\Rightarrow \frac{dy}{dt} = \beta.y$$

$$\Rightarrow \frac{dy}{y} = \beta.d t$$

$$\Rightarrow \ln y = \beta.t + c$$

$$\Rightarrow y = e^{\beta.t+c}$$

$$\Rightarrow y = K.e^{i\omega.t}$$

Avec,  $K$  et  $c$  étant constants.

## Chapitre II : Etude Théorique

Cherchons alors la valeur de  $x$ , telle que :

$$a. \frac{x''(z)}{x} = \beta \quad (\text{II-9})$$

$$\Rightarrow x''(z) - \frac{\beta}{a} x(z) = 0$$

C'est une équation différentielle de 2<sup>ème</sup> ordre homogène qui admet comme solution :

$$x(z) = A. \exp\left(-\sqrt{\frac{\beta}{a}} z\right) + B. \exp\left(\sqrt{\frac{\beta}{a}} z\right) \quad (\text{II-10})$$

Où,  $\lim_{z \rightarrow \infty} x(z)$  tend vers une limite finie  $\Rightarrow A \rightarrow 0$ ,

$$\text{Telle que : } x(z) = B. \exp - \sqrt{\frac{\beta}{a}} z$$

Si on considère la partie réelle soit la partie imaginaire de la solution, selon que la température varie comme une fonction périodique de la forme  $\cos(\omega t)$  ou  $\sin(\omega t)$ , On aura par conséquent :

$$x(z) = B. \exp - \sqrt{\frac{\beta}{a}} z \text{ comme } \sqrt{\beta} = \sqrt{i\omega}$$

D'autre par la partie réelle est :

$$[x(z).y(z)] = \text{Réelle} \left[ K. B. e^{-i\omega t} . e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}(i+1)}z} \right] \quad (\text{II-11})$$

Qui doit satisfaire l'équation  $T(z, t)$  au point d'origine des abscisses  $z=0$ , telle que :

$$\theta_{amb}(z = 0, t) = \bar{T} + A \cos[w(t - t_0)]$$

$$= \text{Réelle} [K. B. e^{-i\omega t} . 1]$$

$$= \text{Réelle} [K. B. (\cos \omega t + i \sin \omega t)]$$

$$\Rightarrow KB = \frac{\bar{T} + A \cos[w(t - t_0)]}{\cos \omega t}$$

A partir de l'équation (II-9) on obtient :

$$\theta(z, t) = \frac{\bar{T} + A \cos[w(t-t_0)]}{\cos \omega t} \cdot e^{-i\omega t} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}(i+1)z} \quad (\text{II-12})$$

$$\Rightarrow \theta(z, t) = \frac{\bar{T} + A \cos[w(t-t_0)]}{\cos(\omega t)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \cdot \left[ (\cos \omega t \cdot i \sin \omega t) \cdot \left( \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) + i \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \right) \right]$$

$$\theta(z, t) = \frac{\bar{T} + A \cos[w(t-t_0)]}{\cos(\omega t)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \cdot \left[ \left( \cos \omega t \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) + i \cos \omega t \cdot \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) + i \sin \omega t \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) + i^2 \sin \omega t \cdot \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \right) \right]$$

Alors :

$$\theta(z, t) = \frac{\bar{T} + A \cos[w(t-t_0)]}{\cos(\omega t)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \cdot \left[ \cos \omega t \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) - \sin \omega t \cdot \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) + i \left( \cos \omega t \cdot \sin\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) + \sin \omega t \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \right) \right] \quad (\text{II-12})'$$

La partie réelle dans l'équation :

$$\frac{\bar{T} + A \cos[w(t-t_0)]}{\cos(\omega t)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right)$$

Donc la solution de l'équation(II.4) :

$$\theta(z, t) = \frac{\bar{T} + A \cos[w(t-t_0)]}{\cos(\omega t)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right)$$

En remplaçons l'équation (\*\*) dans l'équation (II.12)', on obtient :

$$\theta(z, t) = \frac{\bar{T} + A \cos[w(t-t_0)]}{\cos(\omega t)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} z\right) - \frac{T_i}{\cos \omega t} \quad (\text{II.12})''$$

## Chapitre II : Etude Théorique

En remplaçons l'équation (\*) dans (II.12) on aura :

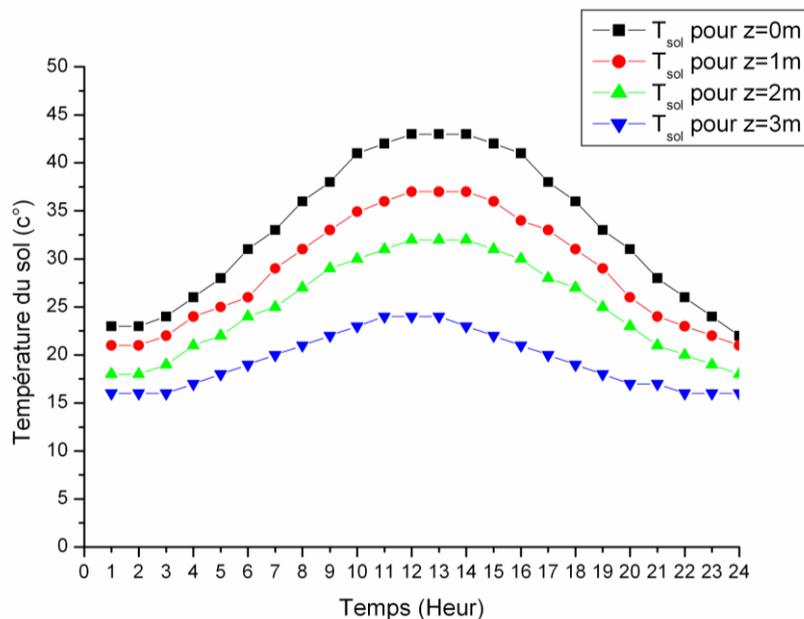
$$T_{sol}(z, t) = T_{moy} + A \cos[\omega(t - t_0)] \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z\right) \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z\right) \quad (II-13)$$

Finalement la température du sol en fonction du temps et de la profondeur prend l'expression suivante [6] :

$$T_{sol}(z, t) = \left[ \left( T_{moy} + A \cos[\omega(t - t_0)] \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z\right) \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z\right) + T_i \right) \frac{1}{\cos\omega t} \right] + T_i$$

Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité calorifique $cp_{sol}$ (j kg/k)	Conductivité thermique $\lambda_{sol}$ (w.m/k)	Diffusivité thermique (m <sup>2</sup> /s)	Profondeur de pénétration z(m)
1800	1340	1.5	$6.22 \cdot 10^{-7}$	3

**Tableau (II-1) :** Propriétés thermophysiques du sol de la région de Biskra [5]



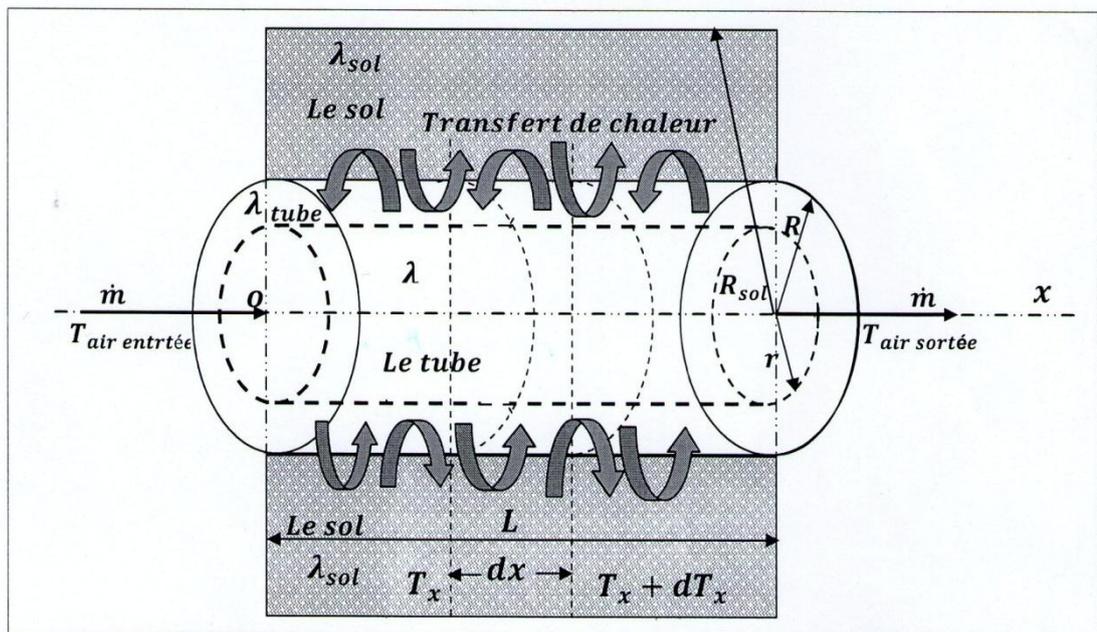
**Figure (II-2) :** Evolution de la température du sol théorique en fonction de temps et de la profondeur z

La figure (II-2) montre l'évolution de la température du sol théorique décrit par le modèle de l'équation (II-13) pour une durée de 24 heures sous

différentes profondeurs, qui dans le site de Biskra l'amplitude  $A=12\text{ C}^\circ$  et la température moyenne du jour  $T_{\text{moy}} = 27\text{ C}^\circ$ , 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.3-Température de l'air à la sortie de l'échangeur enterré horizontalement

L'échangeur enterré est représenté par un tube rectiligne d'une longueur  $L$ , on suppose que la température du sol n'est plus perturbée par le débit d'air. Prenons un élément de tube, entre  $x$  et  $x+dx$ .



**Figure (II -3):** Schématisation du transfert de chaleur entre le tube horizontal enterré et le sol [6]

Le transfert de chaleur à l'intérieur d'un tube enterré où circule l'air se fait par convection forcée. Le flux thermique  $\phi$  échangé à travers la paroi du tube est proportionnel à la différence entre la température du sol ( $T_{\text{sol}}$ ) et la température de l'air dans le tube ( $T_{\text{air}}$ ), et à l'inverse de la résistance thermique séparant les deux domaines tel que :

$$q = \frac{(T_{\text{sol}} - T_{\text{air}}(x))}{R_{\text{totale}}}$$

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

$$R_{totale} = R_{sol} + R_{tube} + R_{conv}$$

### II.3.1-Calcul de la température de l'air dans le tube enterré :

Le bilan thermique élémentaire à travers un trançon de longueur  $dx$  pour ce tubes'écrit :

$$\dot{m} \cdot c_{pair} \cdot (T_x + dT_x - T_x) = \frac{dx}{R_{sol} + R_{gaine} + R_{conv}} \cdot (T_{sol} - T_{a(x)}) \quad (II-14)$$

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  $\left[ \frac{m \cdot ^\circ K}{W} \right]$

$$R_{sol} = \frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi} \ln \left( \frac{R_{sol}}{R} \right) \quad (II-15)$$

$R_{conv}$ : Résistancethermiqueconvectiveentrel'airetle tube  $\left[ \frac{m \cdot ^\circ K}{W} \right]$

$$R_{tube} = \frac{1}{\lambda_{tube} \cdot 2\pi} \ln \left( \frac{R}{r} \right) \quad (II-16)$$

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

$$R_{conv} = \frac{1}{\lambda_{conv} \cdot 2\pi \cdot r} \quad (II-17)$$

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

Où :

$r$  : Rayon intérieur du tube enterré [ $m$ ]

$R$  : Rayon extérieur du tube enterré [ $m$ ]

$R'_{sol}$ : Rayon de la couche adiabatique du sol [ $m$ ]

$\lambda_{gaine}$  : Conductivité thermique du tube enterré  $\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$

$\lambda_{sol}$  : Conductivité thermique du sol  $\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$

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

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

$$U = \frac{1}{R_{sol} + R_{tube} + R_{conv}} \quad (II-18)$$

L'équation (II.14) devient :

$$\frac{dT_x}{T_{sol} - T_a(x)} = \frac{U}{\dot{m} \cdot c_{p\text{air}}} \cdot dx \quad (II-19)$$

L'intégration de l'équation (II-19) donne :

$$\ln(T_{sol} - T_a(x)) = \frac{U}{\dot{m} \cdot c_{p\text{air}}} \cdot x + C \quad (II-20)$$

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

$$\Rightarrow C = \ln(T_{sol} - T_{air\text{ entrée}}) \quad (II-21)$$

En remplaçant C par sa valeur dans (II.21) on obtient :

$$\ln\left(\frac{T_{sol} - T_a(x)}{\ln(T_{sol} - T_{air\text{ entrée}})}\right) = \frac{U}{\dot{m} \cdot c_{p\text{air}}} \cdot x \quad (II-22)$$

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

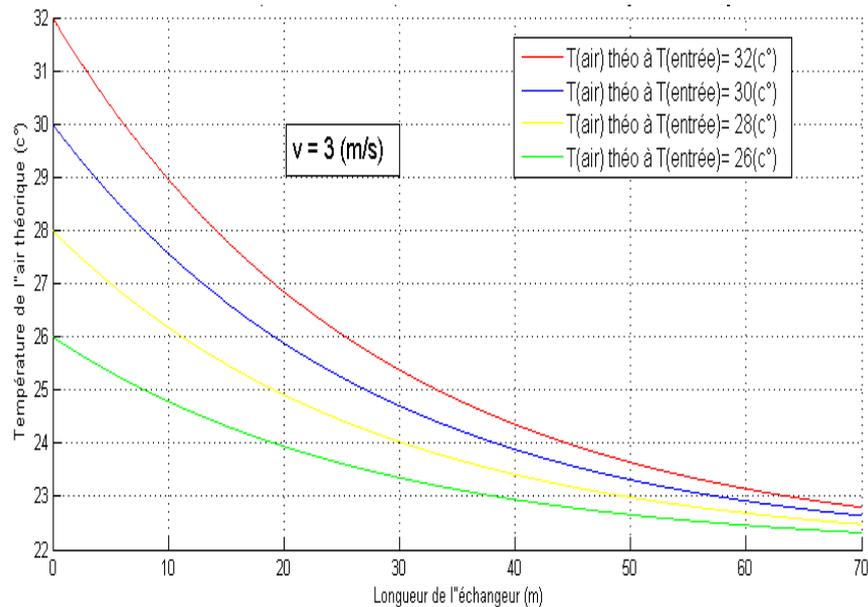
$$T_a(x) = T_{sol} + (T_{air\text{ entrée}} - T_{sol}) \cdot e^{\frac{-U}{\dot{m} \cdot c_{p\text{air}}} \cdot x} \quad (II-23)$$

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

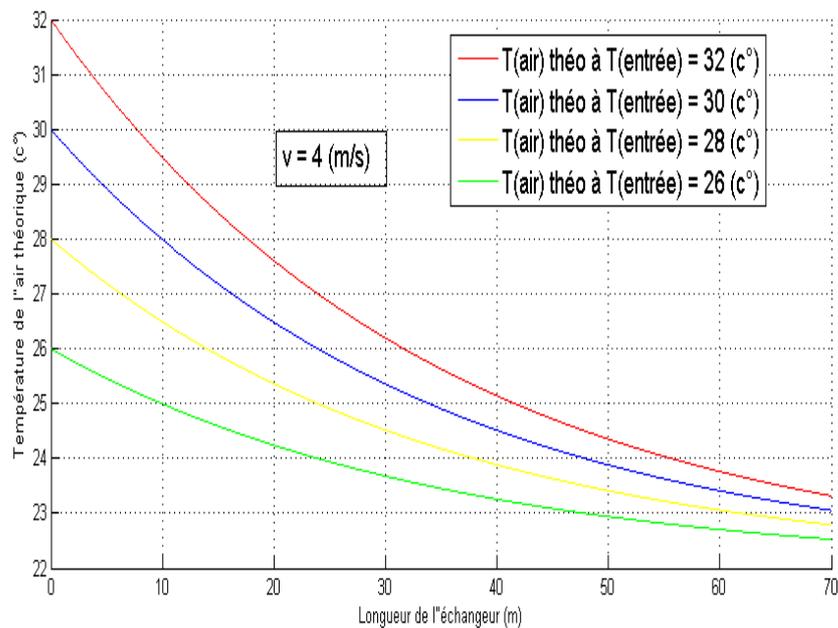
$$T_a(x) = T_{sol} + (T_{air\text{ entrée}} - T_{sol}) \cdot e^{\frac{-U}{\dot{m} \cdot c_{p\text{air}}} \cdot l} \quad (II-24)$$

## Chapitre II : Etude Théorique

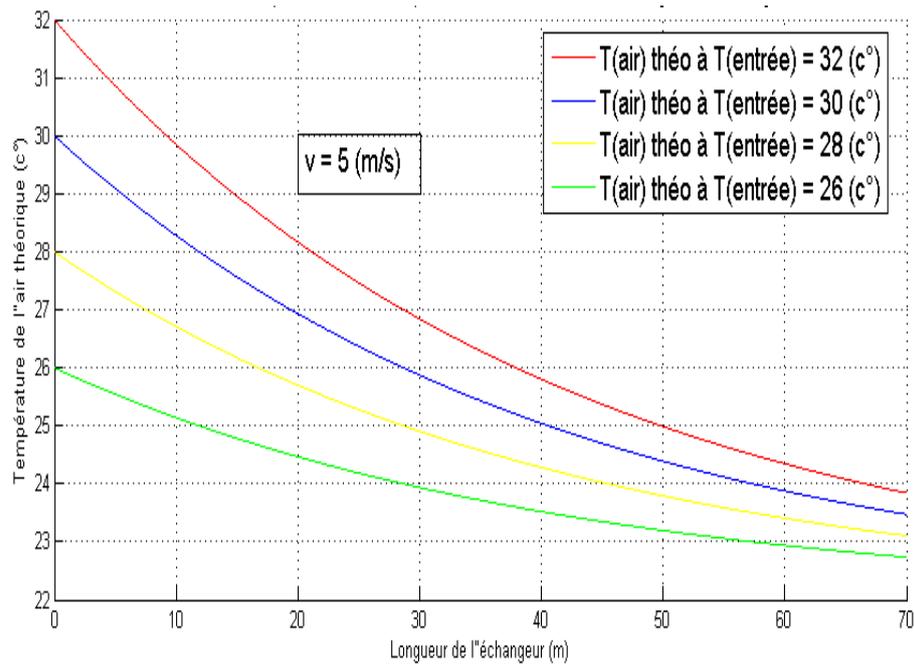
La simulation du modèle théorique eq.(II-24) en fonction de la longueur de l'échangeur enterré, pour différents débits d'air injecté et à différentes températures d'entrée, montre que la température de l'air acheminé à travers le tube échangeur commence à se stabiliser pour atteindre la température du sol au delà de 40 m de longueur d'échange Figures (II-4) (II-5) et (II-6).



**Figure (II-4) :** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur de l'échangeur à v=3 (m/s)



**Figure (II-5) :** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur de l'échangeur à v=4 (m/s)



**Figure (II-6) :** Evolution de la température d'air théorique en fonction de la longueur de l'échangeur à  $v=5$  (m/s)

#### II.4- Calcul de l'efficacité du tube enterré :

L'efficacité de l'échangeur enterré désignée par  $\varepsilon$  exprimée par la relation (II-25), est décrite par le rapport suivant :

$$\varepsilon = \frac{T_{air\ sortie} - T_{air\ entrée}}{T_{sol} - T_{air\ entrée}} \quad (II-25)$$

Qui peut être aussi calculée en fonction des paramètres de fonctionnement par la relation :

$$\varepsilon = 1 - e^{\frac{-U}{\dot{m}.c_{pair}}.l} \quad (II-26)$$

A partir des deux dernières équations (II-25) et (II-26), la température de l'air à la sortie de l'échangeur peut être déterminée en fonction de l'efficacité de l'échangeur, telle que :

$$T_{air-sortie} = T_{air\ entrée} + (T_{sol} - T_{air\ entrée}) \cdot \left(1 - e^{\frac{-U}{\dot{m}.c_{pair}}.l}\right) \quad (II-27)$$

$$T_{air-sortie} = T_{air\ entrée} + (T_{sol} - T_{air-entrée}) \cdot \varepsilon \quad (II-27)(a)$$

### II.5. Pertes de charge occasionnées le long de l'échangeur enterré :

La différence de pression engendrée lors de l'écoulement de l'air à travers le tube échangeur enterré est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v_{\text{air}}^2}{2} \quad (\text{II-28})$$

Où :

$\Delta p$ : Pertes de charge. [Pa]

$L$ : Longueur du tube échangeur. [m]

$D$ : Diamètre intérieur du tube échangeur. [m]

$\rho$ : Masse volumique de l'air. [Kg/m<sup>3</sup>]

$V_{\text{air}}$ : Vitesse de l'air. [m/s]

$\lambda$ : Coefficient des pertes de charge total. [—]

Si l'écoulement est laminaire ( $Re < 2000$ ) donc :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (\text{II-29})$$

Avec :

$Re$  : nombre de Reynolds

$\lambda$ : Coefficient des pertes de charge total.

L'échangeur (air/sol) enterré expérimental qui à fait l'objet de notre étude a été réalisé est expérimenté en 2008 à l'Université Mohamed Khider de Biskra Fig.(II-3), comporte plusieurs traçons de tubes cylindrique en PVC haute pression de diamètre interne égale à 105 mm. L'ensemble est placé à une profondeur de 3 m sous une pente de 2 % reliées entre eux pour réaliser un circuit en forme de serpent Fig.(II-7)



Figure (II-7) : échangeur ail/sol tubulaire enterré.

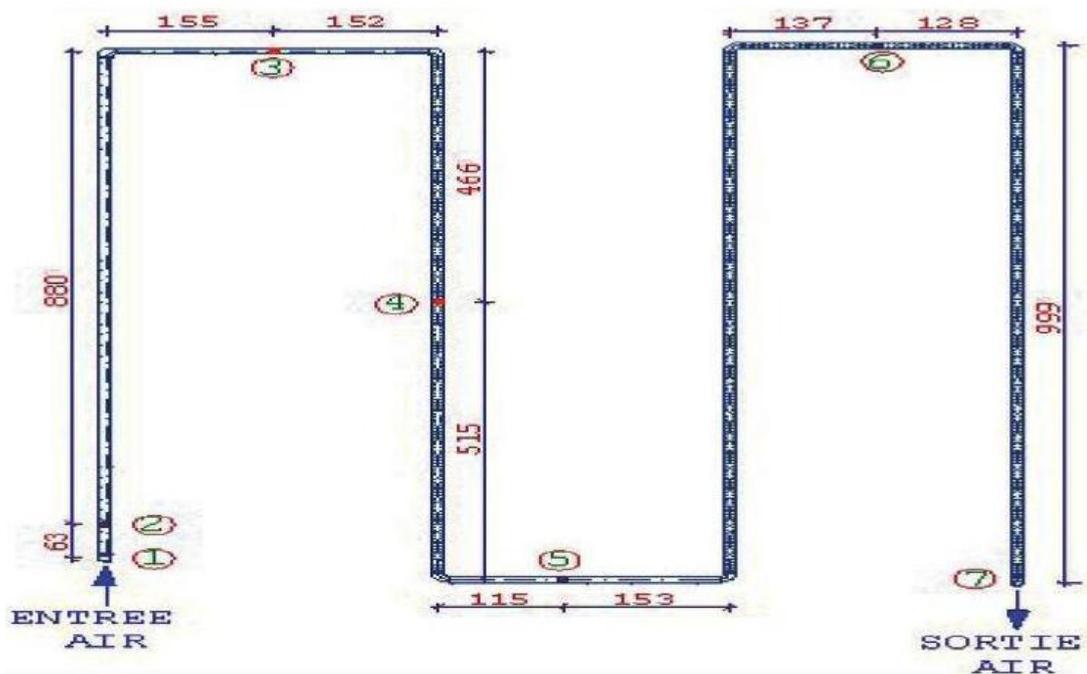


Figure (II-8) : dimension de l'échangeur tubulaire enterré en forme de serpentin [9].

L'échangeur air/sol enterré comporte 10 coudes en PVC de même matière que celle des tubes, dont l'angle du coude est de  $90^\circ$  Fig.(II-7)et (II-8), qui induisent par conséquent des pertes de charge singulières locales désignées par  $\xi$ , s'exprime toujours par la formule générale :

$$\xi = k' \frac{U^2}{2g} \quad (\text{II-30})$$

**Weisbach** [9] a donné la formule suivante pour  $k'$  en fonction de l'angle de déviation  $\alpha$ , telle que :

$$k' = 0,9457 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2,047 \sin^4 \frac{\alpha}{2} \approx 1 - 2 \cos \alpha \quad (\text{II-31})$$

Les travaux effectués par **Kirchbach** et **Schubart** [9], ont permis d'estimer la valeur du coefficient  $K'$  en fonction de l'angle du coude respectivement dans les conduites à surfaces lisses et rugueuses Tableau (II-1).

$\alpha =$	10°	15°	22°	30°	45°	60°	90°
$K' = \text{parois lisses}$	0.034	0.04 2	0.066	0.11 ÷ 0.13	0.236	0.471	1.129
$K' = \text{parois rugueuses}$	0.044	0.06 2	0.11 ÷ 0.15 4	0.165	0.320	0.684	1.265

**Tableau (II-2) :** pertes de charge singulières en fonction de l'angle du coude.

Où  $U$  est la vitesse moyenne du fluide en écoulement [m/s].

Si l'écoulement est turbulent ( $Re > 2000$ ), on adopte la formule de Prandtl-Von Karman [2] donnée par :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,03 \log R_e \sqrt{\lambda} - 0,90 \quad (\text{II-32})$$

Qui peut s'écrire également sous la forme :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{R_e \sqrt{\lambda}} \right) \quad (\text{II-32)(a)}$$

Un arrangement permis également d'écrire la relation (II-32)(a) sous une forme plus explicite :  $\lambda = \frac{A}{R_e^n}$ , cette relation a été proposée par l'allemand **Blasius** en 1913 [9] :

$$\lambda = \frac{0,316}{R_e^{0,25}} \quad (\text{II-33})$$

## Chapitre II : Etude Théorique

La courbe de **Blasius** est pratiquement confondue avec la courbe de **Von-Karman** pour des nombre de Reynolds  $R_e \leq 10^5$ .

D'autre part on retient également la formule de **Nkuradse** (1932) [9] :

$$\lambda = 0,00372 + \frac{0,221}{R_e^{0,257}} \quad (\text{II-34})$$

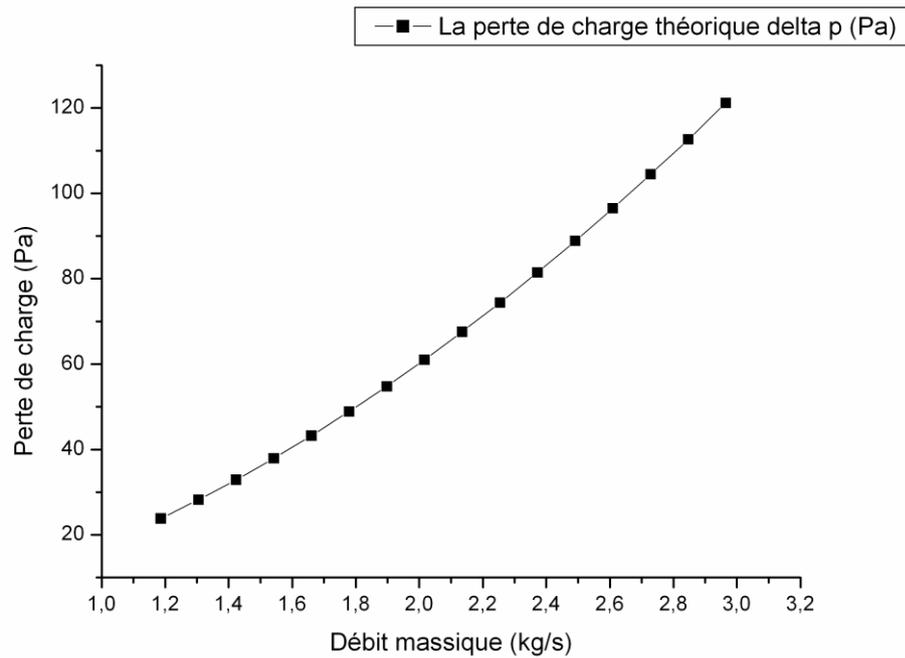
Cette formule se confond sensiblement avec celle de **Prandtl-Von Karman** pour les valeurs de Reynolds allant jusqu'à  $3 \cdot 10^6$

Dans les conditions de notre travail expérimental, on considère en particulier les relations qui s'adaptent au régime d'écoulement turbulent, vue que notre extracteur d'air muni du potentiomètre, n'offre que des vitesses comprise entre 2 à 5 m/s.

La perte de charge totale occasionée par l'écoulement du fluide dans le réseau tubulaire est exprimée par la somme de la perte de charge linéaire et singulière qui sont décrites par les relations de (II-28) et (II-30). Le tableau (II-3) donne les pertes de charge totales estimées théoriquement.

$R_e$	$\lambda$	L (m)	D (m)	$\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	V (m/s)	$\Delta p_{\text{sing}}$	$\Delta p_{\text{linéa}}$	$\Delta p \text{ (Pa)}$
134615,385	0,016	53	<b>0,105</b>	1,293	2	2,258	21,534	23,792188
148076,923	0,016				2,2	2,73218	25,443	28,1750265
161538,462	0,0157				2,4	3,25152	29,628	32,8790659
175000	0,0154				2,6	3,81602	34,082	37,898357
188461,538	0,0151				2,8	4,42568	38,802	43,2275416
201923,077	0,0149				3	5,0805	43,781	48,8617546
215384,615	0,0146				3,2	5,78048	49,016	54,7965479
228846,154	0,0144				3,4	6,52562	54,502	61,0278299
242307,692	0,0142				3,6	7,31592	60,236	67,5518172
255769,231	0,0140				3,8	8,15138	66,214	74,3649953
269230,769	0,0138				4	9,032	72,432	81,4640859
282692,308	0,0137				4,2	9,95778	78,888	88,8460197
296153,846	0,0135				4,4	10,92872	85,579	96,5079138
309615,385	0,0133				4,6	11,94482	92,502	104,447052
323076,923	0,0132				4,8	13,00608	99,655	112,660869
336538,462	0,0131				5	14,1125	107,034	121,146933

**Tableau (II-3) : Pertes de charge totales dans l'échangeur enterré.**



**Figure (II-9) :** Evolution de la perte de charge théorique en fonction du débit massique

### II.6. Coefficient d'échange convectif :

Le coefficient d'échange convectif est défini par [10] :

$$h_{conv} = \frac{Nu * \lambda_{air}}{D} \quad (II-35)$$

Avec Nu étant le nombre de **Nusselt** calculé par la relation de **Colburn** [10] :

$$Nu = 0.0243 * (Re^{0.8}) * Pr^{0.3} \quad (II-36)$$

Ou :

$$Re : \text{nombre de Reynolds} = \frac{V * D}{\nu}$$

$$Pr : \text{nombre de Prandtl} = \frac{\nu * \rho * c_p}{\lambda_{air}}$$

La quantité de chaleur utile échangée entre le fluide en écoulement et les parois de l'échangeur, si on admit que la température de la paroi interne est très peu différente à celle du sol, est définit comme suit :

$$Q = h_{conv} * S * (T_{sol} - T_{s-air}) \quad (II-37)$$

## Chapitre II : Etude Théorique

Où,  $S$  : étant la surface d'échange thermique entre le fluide et l'échangeur, égale au périmètre thermique fois la longueur d'échange  $= \pi \cdot D_{int} \cdot L$ . Dans c

D'autre part cette quantité de chaleur est égale aussi égale à la quantité d'énergie échangée exprimée par :

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_{s-air} - T_{e-air})$$

Par conséquent le coefficient d'échange local à une distance parcourue dans l'échangeur enterré est exprimé par :

$$h_{local} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{s-air(x)} - T_{e-air})}{S(x) \cdot (T_{sol} - T_{s-air(x)})} \quad (II-38)$$

Ou :

$S_{(x)}$  : La surface thermique d'échange à une longueur (x) parcourue (m<sup>2</sup>)

$m$  : Le débit massique (kg/s)

$T_{s-air(x)}$  : Température de l'air à une certaine distance parcourue (°C)

$T_{(e)}$  : Température de l'air ambiante à l'entrée de l'échangeur (°C)

$T_{sol}$  : Température du sol (°C)

# *Chapitre III*

*Etude*

*Expérimentale*

### III-1.Introduction

Dans cette étude expérimentale, nous allons vérifier par voie de l'expérience les modèles théoriques qui ont été développés jusqu'à présent, qui décrivent de façon générale les performances thermiques d'un échangeur air/sol enterré, et principalement les modèles mathématiques qui ont été simulés par les étudiants chercheurs du laboratoire et du département de génie mécanique de l'université Mohamed Khider de Biskra.

### III-2. Description du site et du protocole expérimental.

Le banc d'essai expérimental est monté depuis 2008 Fig.(III.1) et (III.2) sur le site de l'université Mohamed Khider de Biskra. Il s'agit d'un réseau de quatre tançons d'une longueur totale d'environ 47 m Fig.(III.3), reliés entre elle pour former un échangeur en serpentin, le diamètre interne du tube est de 110 mm. L'ensemble est placé à une profondeur de 3 m sous une pente de 2 %.

Pour le site de Biskra, cette profondeur 03 m a été déterminée préalablement grâce à une étude effectuée en fonction des données locales du site. Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 02 m.

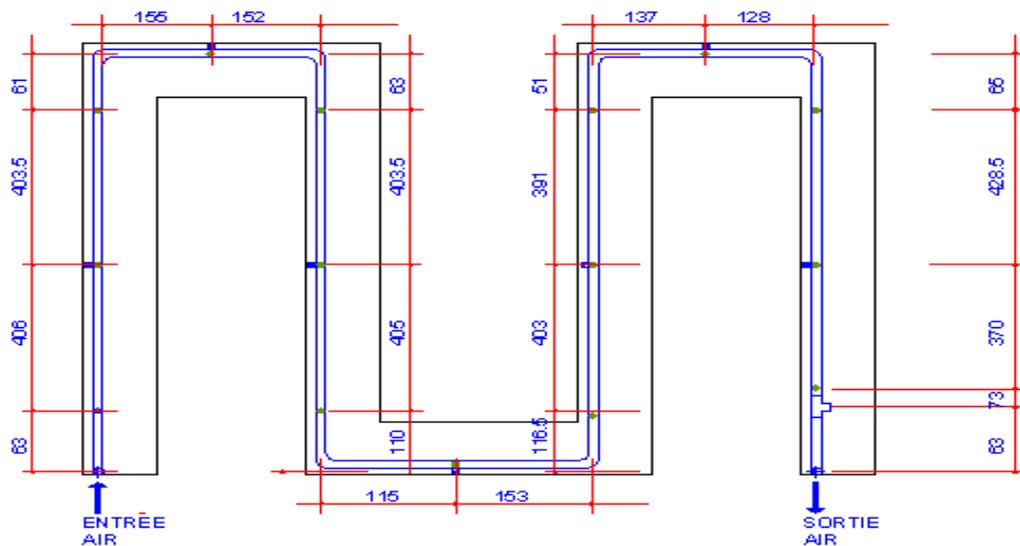


**Figure (III-1) :** tranchées pour installation de l'échangeur enterré air/sol



**Figure (III-2) :** pose de l'échangeur air/sol enterré avec conduites pour installation des thermocouples de mesure de la température.

Une fosse de réception en béton est construite à la sortie de l'échangeur. Un extracteur d'air de débit variable est placé à l'entrée de l'échangeur. Une série de sondes thermiques a été placées le long de l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie. Les sondes sont reliées à une centrale d'acquisition.



**Figure (III-3) :** Emplacement des sondes de mesure des températures le long de l'échangeur et dans le sol.

### III.2.1. Instruments de mesure utilisés :

L'acquisition des paramètres climatiques (température, humidité relative et vitesse de l'air) est effectuée par le biais d'instruments de mesures à affichage digitale de type KIMO, il s'agit d'un anémomètre à hélice KIMO LV 110 pour mesurer la vitesse de l'air (0,25 à 35 m/s) juste à la sortie de l'échangeur enterré Fig.(III.9) et d'un hygro-thermomètre de type KIMO HD 100, dont la plage de mesure pour l'humidité relative est compris entre 5 à 95 % et la température entre -20 à +70°C, ceci est pour mesurer l'humidité relative et la température de l'air avant et après le soufflage dans l'échangeur.



**Figure (III-4) :** Extracteur d'air utilisé pour le pompage de l'air



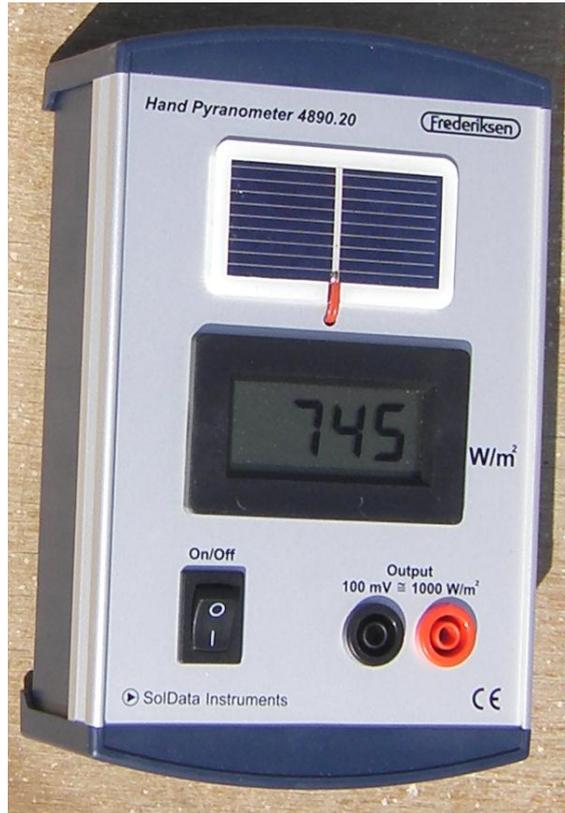
**Figure (III-5) :** sondes de mesure de la température de l'air en circulation à travers l'échangeur et dans le sol



**Figure (III-6) :** Hygromètre de type Kim pour mesurer l'humidité relative et la température de l'air



**Figure (III-7) :** Anémomètre à hélice de type Kimo pour mesurer la vitesse de et la température de l'air



**Figure (III-8) :** Solarimètre pour mesurer le rayonnement solaire global



**Figure (III-9) :** mesure de la vitesse de l'air à la sortie de l'échangeur par anémomètre à hélice de type KIMO LV 110.



**III-5.Résultats expérimentaux obtenus**

**Le 21/04/2013 :**

Temps(h)	T ambiante	T01 (c°)	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
13:00	33	32,572896	29,990402	27,568849	26,958446	26,048776	24,880909	24,460995	24,094844	23,537357	23,38218	23,220092	23,103361	23,056613	22,861459	22,535254	22,594944
13:15	33	32,34463	29,884007	27,695195	27,002859	26,113625	24,979653	24,569504	24,197657	23,646127	23,469039	23,300493	23,180445	23,116186	22,912393	22,554166	22,550659
13:30	32,9	32,45253	29,980314	27,798858	27,106019	26,204985	25,069408	24,651046	24,276977	23,708712	23,52248	23,348262	23,225687	23,150543	22,942985	22,576545	22,514727
13:45	32,9	32,362139	29,909226	27,773178	27,089325	26,223447	25,088022	24,676913	24,304258	23,727787	23,54455	23,368599	23,245235	23,164255	22,9515	22,586789	22,485257
14:00	32,8	32,33059	29,867615	27,737888	27,092632	26,241277	25,121938	24,717133	24,352514	23,781071	23,590268	23,407382	23,282438	23,19483	22,979727	22,58868	22,4602
14:15	32,8	31,549849	29,429624	27,651871	26,943327	26,163644	25,103008	24,71729	24,365761	23,808187	23,613915	23,434815	23,311129	23,220047	23,003539	22,594826	22,441289
14:30	34,8	33,30403	30,509187	28,074419	27,462146	26,532261	25,347997	24,912562	24,526146	23,917282	23,697312	23,508915	23,377971	23,265753	23,037602	22,602076	22,425372
14:45	33	31,785785	29,743256	28,013601	27,232022	26,406017	25,314868	24,916978	24,543967	23,954173	23,731208	23,542024	23,407924	23,292705	23,060941	22,639428	22,412293
15:00	33	32,501433	30,206354	28,193064	27,478528	26,595227	25,443758	25,025345	24,629604	24,012192	23,781657	23,586643	23,450805	23,322651	23,082073	22,661177	22,398425
15:15	33	31,360449	29,441759	27,883462	27,120194	26,361202	25,311871	24,928178	24,575982	23,998791	23,775509	23,583174	23,449702	23,328798	23,097527	22,676149	22,387236
15:30	33	32,001078	29,71268	27,852424	27,196111	26,406017	25,324491	24,93291	24,575509	23,994534	23,777874	23,584908	23,452855	23,332108	23,100366	22,680089	22,379041

T17	T18	T19	T20	T sorté	Rey (w/m2)	HR % amb	HR % sorté	V (m/s)
21,88955	21,812106	22,493307	22,286603	26,5	640	24,9	30,5	5,9
21,876316	21,809742	22,497562	22,287076	25,3	570	24,5	30,5	5,9
21,864184	21,805016	22,499769	22,287233	25	530	24,5	31	5,3
21,85221	21,798714	22,501975	22,285185	25	750	24,5	31,2	4,2
21,843545	21,796508	22,504181	22,284555	24,9	499	25	30,4	4
21,835983	21,795248	22,505915	22,285185	24,9	445	26,5	30,9	4,6
21,830784	21,79509	22,509698	22,285815	24,9	950	25	31	4
21,825742	21,792255	22,511589	22,287864	24,9	500	25,5	31,3	5
21,819283	21,789576	22,514426	22,286918	24,5	500	24,5	32,9	3,8
21,815659	21,787843	22,515686	22,288021	24,5	385	26,5	32,8	5,5
21,811405	21,786583	22,517263	22,287864	24,3	650	27,6	33	5,5

**Tableau (III-1) :** les mesures de température de l'air, sol et le rayonnement solaire et la vitesse de l'air le 21/04/2013

Chapitre III : Etude Expérimentale

Résultats obtenus le 22/04/2013 :

heure (h)	temps (s)	T ambiante	T01 (c°)	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15
09:45	0	23,5	22,920867	22,752763	22,841331	22,608848	22,715797	22,4469	22,371355	22,399229	22,323638	22,488349	22,43243	22,418989	22,600397	22,536481	22,228901
10:00	900	23,5	22,565608	22,522698	22,765042	22,519046	22,657952	22,422786	22,363002	22,39655	22,322377	22,48173	22,425653	22,410636	22,589209	22,532066	22,098584
10:15	1800	23,5	23,108499	22,828564	22,866813	22,651941	22,745586	22,477635	22,405084	22,428386	22,34428	22,492447	22,430539	22,410163	22,587003	22,533958	21,974102
10:30	2700	23,5	23,325713	22,965387	22,965598	22,734355	22,810525	22,526338	22,450161	22,466526	22,372644	22,51057	22,443463	22,420565	22,591257	22,537111	21,872945
10:45	3600	24,5	24,198968	23,503146	23,232712	22,988216	22,989272	22,643449	22,543626	22,538394	22,413142	22,538621	22,468365	22,440265	22,601815	22,544995	21,800151
11:00	4500	24	24,350959	23,721799	23,421655	23,144412	23,108442	22,736133	22,625116	22,603487	22,457895	22,573135	22,498783	22,465323	22,619463	22,555401	21,757295
11:15	5400	24,8	24,956006	24,037693	23,529898	23,29511	23,221312	22,813056	22,688165	22,657706	22,498709	22,600084	22,518958	22,483605	22,630494	22,564231	21,73634
11:30	6300	24,9	25,39889	24,45542	23,854491	23,543038	23,40891	22,949252	22,808435	22,752433	22,566628	22,649097	22,562301	22,520957	22,655706	22,582363	21,724996
11:45	7200	27	25,337348	24,418602	23,874474	23,554523	23,434292	22,981726	22,84138	22,784745	22,598461	22,672107	22,582949	22,5405	22,66784	22,592928	21,731298
12:00	8100	23,5	24,882513	24,234828	23,940089	23,55295	23,450215	23,013569	22,879054	22,820998	22,625724	22,695117	22,604857	22,55831	22,678398	22,602388	21,740437
12:15	9000	25,5	25,726765	24,680119	24,038594	23,723491	23,557578	23,076784	22,925714	22,857567	22,647156	22,708355	22,614945	22,567294	22,686277	22,604753	21,743745
12:30	9900	25	26,941916	25,409086	24,341994	24,077031	23,804954	23,236797	23,052929	22,954034	22,717758	22,758001	22,654507	22,601652	22,705817	22,620836	21,744376
12:45	10800	27	26,223915	25,07165	24,338689	23,984984	23,773893	23,24263	23,071058	22,977836	22,74187	22,781484	22,675943	22,624033	22,72252	22,632346	21,759028
13:00	11700	30	26,525267	25,343768	24,560435	24,155706	23,903815	23,343056	23,15729	23,049559	22,796871	22,820728	22,713929	22,655555	22,743636	22,650637	21,779196
13:15	12600	30,5	26,799562	25,478969	24,578534	24,229347	23,956636	23,376007	23,188663	23,075726	22,804436	22,830973	22,722283	22,664381	22,749309	22,647326	21,802515
13:30	13500	30	26,757991	25,451897	24,605761	24,238159	23,976031	23,393822	23,207108	23,090071	22,832961	22,850359	22,738045	22,677305	22,758922	22,662621	21,811653
13:45	14400	30	27,899348	26,128775	24,847673	24,552729	24,195528	23,53572	23,319042	23,179136	22,885916	22,888658	22,771777	22,706779	22,779723	22,674131	21,81638
14:00	15300	30	27,197192	25,932938	25,019242	24,577279	24,250247	23,607301	23,396452	23,246922	22,940447	22,934681	22,812917	22,744922	22,806355	22,693999	21,835918
14:15	16200	29	27,896828	26,2659	25,083307	24,727731	24,356218	23,678569	23,451476	23,294531	22,970865	22,9599	22,834354	22,764309	22,818962	22,702513	21,863806
14:30	17100	30	27,040654	25,783707	24,938336	24,543602	24,239208	23,61345	23,408276	23,265524	22,964718	22,95659	22,833409	22,764309	22,821799	22,707875	21,879247
14:45	18000	30	27,725606	26,232681	25,199792	24,791156	24,418036	23,740851	23,51328	23,351915	23,028707	23,001038	22,87187	22,798669	22,844019	22,72585	21,881453
15:00	18900	30	28,275062	26,524895	25,285113	24,899753	24,500042	23,796197	23,560895	23,388805	23,05818	23,025626	22,893938	22,819633	22,858832	22,737203	21,891695
15:15	19800	30	28,045533	26,505214	25,417506	24,980337	24,579369	23,863054	23,622071	23,439884	23,094116	23,056204	22,921839	22,841857	22,875694	22,747926	21,90887
15:30	20700	30	28,373211	26,720455	25,545182	25,095708	24,660275	23,91982	23,670162	23,480244	23,113345	23,072282	22,93776	22,856673	22,885622	22,753129	21,920214
15:45	21600	30	28,13123	26,524738	25,44663	24,992928	24,59719	23,888914	23,649349	23,472676	23,13021	23,082212	22,945326	22,864082	22,893817	22,765586	21,932977
16:00	22500	30	28,431504	26,786746	25,630511	25,155678	24,722415	23,980215	23,725663	23,534162	23,155428	23,109796	22,97039	22,887883	22,909419	22,771105	21,940068

T16	T17	T18	T19	T20	T sorté	Rey (w/m2)	HR % ambi	HR % sorté	V (m/s)
22,342797	21,737988	21,771301	22,521518	22,301258	23,8	450	38	33,8	5
22,342481	21,741612	21,775712	22,525143	22,303936	23,3	360	39	34,8	5
22,345791	21,746023	21,780596	22,526561	22,305827	23,3	400	41	35	5
22,345948	21,748386	21,782014	22,528295	22,309294	23,5	1020	41	35	5
22,347209	21,749804	21,785638	22,529871	22,311658	23,5	1050	38,5	35,9	5
22,347367	21,754531	21,788158	22,53192	22,313549	23,6	949	37	34,9	5
22,350203	21,757209	21,789576	22,533023	22,315124	24,5	1070	34,7	34,7	5
22,350991	21,759887	21,793042	22,534126	22,317488	24,5	1060	34,7	34,7	5
22,349888	21,76225	21,793515	22,535387	22,318749	23,4	400	34,9	33,8	5
22,350833	21,764456	21,79509	22,53649	22,319852	23	1200	34,2	34,2	5
22,349258	21,765401	21,79446	22,535545	22,317961	23,2	1120	31,8	34	5
22,349888	21,76808	21,796193	22,537751	22,319852	24	1020	31,9	31,4	5
22,351306	21,771703	21,798399	22,539012	22,321427	23,7	1040	25	31,5	5
22,352094	21,772648	21,797611	22,540115	22,323003	23,7	1028	25	30,7	5

Chapitre III : Etude Expérimentale

22,353355	21,773751	21,799187	22,541218	22,322846	24	945	29,4	28,8	5
22,35367	21,77643	21,799659	22,542794	22,323161	24,3	930	23,5	28,4	5
22,352567	21,77706	21,801708	22,542794	22,324421	24	950	23	28,3	5
22,352724	21,778793	21,802338	22,543898	22,325682	24,4	950	25,5	21,5	5
22,35367	21,781471	21,803125	22,544686	22,326312	24,5	900	20	22,1	5
22,35367	21,783677	21,805016	22,544528	22,328676	24	840	21,4	23,8	5
22,354616	21,786197	21,807222	22,547207	22,328361	24	980	19,5	23,1	5
22,354931	21,78793	21,806749	22,54768	22,328991	22,7	810	20,1	22,7	5
22,355719	21,788876	21,808167	22,548783	22,329306	23,7	780	19,5	22,5	5
22,358082	21,790609	21,809742	22,550044	22,330567	23,5	500	19	21,7	5
22,357452	21,791554	21,809742	22,551463	22,331197	23,7	670	20	23,6	5
22,359028	21,794705	21,810215	22,550832	22,331828	23,7	600	19	23	5

Tableau (III-2) : les mesures de température de l'air, sol et le rayonnement solaire et la vitesse de l'air le 22/04/2013

Résultats obtenus le 23/04/2013 :

heure (h)	temps (s)	T ambiante	T01 (c°)	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15
09:00	0	26	23,511167	23,182273	23,070364	22,847914	22,884923	22,539736	22,437867	22,446195	22,35799	22,540513	22,498941	22,491801	22,662955	22,576372	22,262151
09:15	900	26	24,675262	23,865426	23,356208	23,12066	23,066827	22,667881	22,543784	22,530671	22,423385	22,573292	22,51943	22,503936	22,673513	22,591824	22,216452
09:30	1800	25	24,985435	24,074822	23,5321	23,260503	23,167556	22,745275	22,615028	22,588987	22,461046	22,595671	22,536137	22,516387	22,675876	22,598131	22,160354
09:45	2700	25	24,693831	23,98263	23,617848	23,281582	23,202079	22,784367	22,660265	22,628074	22,483423	22,611116	22,549062	22,526316	22,680604	22,598762	22,121275
10:00	3600	25	25,060505	24,186212	23,668196	23,369675	23,264978	22,831341	22,698253	22,658021	22,500442	22,623408	22,555051	22,530729	22,680131	22,59955	22,090233
10:15	4500	25	25,35655	24,363689	23,827427	23,462491	23,335761	22,883518	22,740654	22,697109	22,555912	22,650673	22,576329	22,544598	22,691004	22,617052	22,061712
10:30	5400	25	25,35718	24,391066	23,851344	23,505439	23,368237	22,910789	22,768397	22,716181	22,549924	22,652722	22,577747	22,546489	22,689113	22,61106	22,037918
10:45	6300	24,7	24,766218	24,037221	23,713038	23,362596	23,279955	22,863813	22,737975	22,700262	22,538262	22,645157	22,571758	22,541131	22,684543	22,606172	22,020113
11:00	7200	26,5	24,758979	23,996474	23,639088	23,323269	23,258042	22,852149	22,729778	22,696006	22,542832	22,644527	22,569867	22,540028	22,682495	22,60901	21,997895
11:15	8100	25,7	25,51568	24,493813	23,903898	23,568367	23,423887	22,957607	22,816474	22,760787	22,582859	22,674628	22,593982	22,560359	22,696519	22,617525	21,979932
11:30	9000	28	26,48921	25,09384	24,234038	23,857539	23,623638	23,085927	22,919881	22,837391	22,635021	22,708986	22,624402	22,582897	22,712593	22,62872	21,973472
11:45	9900	26,2	26,199355	24,995953	24,24584	23,845581	23,634832	23,10847	22,942266	22,859616	22,654878	22,724588	22,638114	22,596924	22,721102	22,6355	21,985132
12:00	10800	27,7	27,575657	25,741205	24,485993	24,129271	23,81536	23,214095	23,022819	22,918883	22,695537	22,751539	22,65955	22,614261	22,733709	22,644961	21,99821
12:15	11700	30,1	27,039394	25,521625	24,527227	24,115267	23,827028	23,244049	23,053087	22,950881	22,717127	22,769191	22,675627	22,630022	22,741273	22,649849	22,010658
12:30	12600	29,5	27,233729	25,709881	24,702398	24,249017	23,925416	23,311209	23,11441	22,99754	22,750695	22,793462	22,69596	22,647517	22,752776	22,658836	22,023737
12:45	13500	30	26,996088	25,555466	24,619139	24,173329	23,891043	23,303327	23,112361	23,003688	22,759205	22,801185	22,702738	22,653191	22,756086	22,661517	22,041385
13:00	14400	30	27,407917	25,864933	24,858376	24,368138	24,03248	23,395083	23,188032	23,062642	22,795768	22,828924	22,726381	22,67305	22,76822	22,670189	22,055251
13:15	15300	30	27,173254	25,745928	24,82548	24,329742	24,01482	23,400917	23,197806	23,076357	22,813577	22,843109	22,739306	22,684713	22,777044	22,67965	22,075578
13:30	16200	28,4	27,632202	26,005037	24,894421	24,416449	24,076474	23,438756	23,230755	23,098425	22,828864	22,855402	22,74971	22,694327	22,782717	22,682488	22,092123
13:45	17100	31,8	26,683984	25,473618	24,732617	24,242408	23,967831	23,384363	23,193077	23,075726	22,817359	22,84894	22,743405	22,69086	22,779408	22,679492	22,104257
14:00	18000	29,5	27,750966	26,038254	24,907013	24,455161	24,104069	23,463351	23,251881	23,119864	22,844309	22,869114	22,76027	22,704099	22,789178	22,687376	22,110402
14:15	18900	33	28,207792	26,346667	25,06489	24,606551	24,208458	23,536981	23,311001	23,163845	22,874411	22,889604	22,778397	22,719703	22,799737	22,694629	22,119857
14:30	19800	32	27,918724	26,266687	25,160596	24,644793	24,256239	23,574506	23,349154	23,19758	22,896317	22,90836	22,796682	22,734677	22,809034	22,700148	22,14176
14:45	20700	28	28,154387	26,385082	25,198376	24,705698	24,301024	23,606355	23,382262	23,224379	22,921849	22,925855	22,811971	22,748232	22,81975	22,710397	22,166342
15:00	21600	30	27,553763	26,068795	25,132577	24,61017	24,254977	23,59248	23,375168	23,224537	22,927838	22,931214	22,816542	22,75296	22,822272	22,713709	22,183203
15:15	22500	29	28,526193	26,559849	25,288261	24,790055	24,3794	23,664063	23,430349	23,266155	22,9633	22,955329	22,834197	22,769983	22,834248	22,725062	22,193445
15:30	23400	28,5	28,403303	26,614958	25,421914	24,877718	24,438695	23,719092	23,47954	23,310453	22,981109	22,972824	22,852324	22,784011	22,844334	22,726639	22,206997
15:45	24300	29	28,871255	26,853826	25,499841	24,979393	24,524329	23,777117	23,522109	23,341825	23,009794	22,992999	22,868402	22,799457	22,854892	22,735469	22,228744
16:00	25200	27,3	28,653026	26,804382	25,574779	24,990882	24,530322	23,78579	23,535353	23,355541	23,017832	23,00025	22,876126	22,807023	22,859147	22,739411	22,249387

Chapitre III : Etude Expérimentale

T16	T17	T18	T19	T20	T sorté (c°)	Rey (w/m2)	HR % ambi	HR % sorté	V (m/s)
22,40851	21,808412	21,835581	22,561865	22,352628	25,2	800	31	26	4
22,414972	21,817234	21,846294	22,57006	22,359404	23,2	760	29,7	27,3	4
22,418281	21,821488	21,850233	22,572267	22,361767	23,4	850	27	26	4
22,420172	21,824639	21,851651	22,574631	22,366022	23,2	330	28	26,2	4
22,419857	21,82779	21,853069	22,575734	22,364761	23	420	27,7	25	4
22,419699	21,831571	21,855747	22,576522	22,366652	23,3	580	30,5	28	4
22,419699	21,835668	21,85811	22,577783	22,367913	24,6	475	30,3	27,5	4
22,420014	21,834565	21,857953	22,578256	22,367598	23,3	500	30,7	26,8	4
22,420172	21,835037	21,859056	22,579359	22,367755	23,2	1050	28	26,8	4
22,421748	21,841024	21,862994	22,581565	22,369961	23,3	700	27,2	26	4
22,423481	21,841812	21,866145	22,582196	22,373113	23,2	1010	26	26,1	4
22,426318	21,845436	21,869769	22,583772	22,374846	23,2	1000	25,6	25,2	4
22,428209	21,848114	21,872132	22,584875	22,376737	23,2	1000	24,5	25,4	4
22,427736	21,850793	21,872132	22,587397	22,377998	23,3	1006	22	24	4
22,427736	21,851108	21,874023	22,587397	22,378156	23,3	1004	24	24,9	4
22,429943	21,853156	21,87229	22,588658	22,378944	24,5	998	22	24,7	4
22,429312	21,852683	21,873708	22,588027	22,378786	23,4	980	22,5	24,6	4
22,431361	21,856149	21,876859	22,590391	22,381465	23,7	970	23,9	23	4
22,431991	21,857252	21,877174	22,591022	22,380677	23,7	940	22,8	23,4	4
22,430415	21,858355	21,876386	22,590864	22,38115	24,2	950	22	22,4	4
22,432622	21,858355	21,877489	22,592125	22,381622	23,2	930	20	22,1	4
22,434513	21,862609	21,879537	22,593228	22,383041	24,2	900	20,1	21,5	4
22,433725	21,863869	21,879852	22,594174	22,383513	24,5	890	19,8	22,5	4
22,437349	21,86513	21,881585	22,595277	22,386035	24	850	19,5	21	4
22,436877	21,866705	21,881428	22,595277	22,385089	24	820	20,4	20,8	4
22,437349	21,867966	21,882373	22,594962	22,386665	24	800	21,2	18,6	4
22,440659	21,869226	21,884579	22,596538	22,387453	23,8	780	20	20	4
22,441919	21,871117	21,885997	22,597484	22,388083	23,8	835	17,5	20,2	4
22,441604	21,87285	21,886942	22,598429	22,387295	24	320	19,7	20,1	4

**Tableau (III-3)** : les mesures de température de l'air, sol et le rayonnement solaire et la vitesse de l'air le 23/04/2013

Chapitre III : Etude Expérimentale

Résultats obtenus le 27/04/2013 :

heure (h)	temps (s)	T ambiante	T01 (c°)	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15
13:00	0	29,3	27,572821	25,814087	24,707749	24,153818	23,830812	23,226707	23,038584	22,937956	22,748016	22,828924	22,754753	22,72916	22,851898	22,764325	22,523119
13:15	900	31,4	27,466664	25,776466	24,737968	24,151615	23,837592	23,232855	23,048042	22,944103	22,738087	22,822147	22,754753	22,727584	22,850322	22,754548	22,545025
13:30	1800	33,5	27,819328	25,947735	24,79101	24,237373	23,900188	23,272269	23,082251	22,973107	22,764248	22,840902	22,76626	22,737041	22,855365	22,761486	22,563464
13:45	2700	29	27,682448	25,930576	24,795417	24,227459	23,890885	23,27148	23,083985	22,974526	22,763776	22,841848	22,76626	22,737987	22,857414	22,760067	22,575127
14:00	3600	29	27,944873	26,01401	24,807065	24,25893	23,918163	23,289138	23,093917	22,984929	22,769764	22,845473	22,770831	22,739248	22,857886	22,759279	22,576387
14:15	4500	29	27,823739	25,988823	24,878366	24,290559	23,941972	23,307426	23,11173	22,997698	22,777014	22,84894	22,776663	22,742715	22,859305	22,762275	22,597663
14:30	5400	29	28,331304	26,309353	25,065834	24,43848	24,048564	23,377426	23,17006	23,043096	22,816571	22,877153	22,794317	22,759738	22,869548	22,774574	22,618309
14:45	6300	29	29,086031	26,76108	25,27677	24,629528	24,17424	23,451999	23,230598	23,084869	22,827761	22,885348	22,804248	22,766673	22,870966	22,768267	22,642107

T16	T17	T18	T19	T20	T sorté (c°)	Rey (w/m2)	HR % ambi	HR % sorté	V (m/s)
22,707471	22,149523	22,187409	22,823816	22,622571	22,9	1013	35	42	3
22,708259	22,151098	22,186464	22,823185	22,623989	23,6	1000	34,5	39,5	3
22,707786	22,151886	22,186148	22,823973	22,624777	24,7	980	35,2	39,6	3
22,708574	22,151886	22,188197	22,823501	22,624147	24,8	960	34	36,4	3
22,707628	22,152831	22,187094	22,824289	22,624777	23,7	950	34	33	3
22,708889	22,154722	22,187567	22,824289	22,624305	23,5	930	34,4	33,1	3
22,71015	22,15425	22,187251	22,825234	22,625093	23,4	905	34,5	30,4	3
22,71078	22,15614	22,188039	22,825077	22,623359	23	870	36	40,7	3

Tableau (III-4) : les mesures de température de l'air , sol et le rayonnement solaire et la vitesse de l'air le 27/04/2013

Résultats obtenus le 28/04/2013 :

heure (h)	temps (s)	T ambiante	T01 (c°)	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15
14:15	0	31,8	30,748962	27,618893	25,588161	24,824522	24,245516	23,444904	23,193392	23,032219	22,812789	22,889919	22,821271	22,794413	22,913831	22,808319	22,924858
14:30	900	31,5	31,022682	27,921318	25,857229	25,018899	24,40889	23,567253	23,297127	23,12144	22,872677	22,927431	22,84728	22,815219	22,923444	22,817464	22,950234
14:45	1800	31,5	31,246279	28,15682	26,084121	25,179288	24,539311	23,663433	23,391407	23,193797	22,9198	22,960215	22,874077	22,834606	22,935264	22,824245	22,99153
15:00	2700	31,6	31,317714	28,241101	26,151043	25,256259	24,601448	23,716569	23,430349	23,231789	22,950218	22,979444	22,889052	22,848635	22,942198	22,830395	23,035979
15:15	3600	31,5	31,318029	28,295924	26,283315	25,32363	24,662325	23,771914	23,482378	23,270254	22,987886	23,005293	22,910489	22,864397	22,952441	22,84159	23,076488
15:30	4500	32,8	31,255741	28,286787	26,304731	25,348343	24,688348	23,792885	23,501297	23,295635	22,993876	23,010337	22,915691	22,870229	22,955278	22,83891	23,112427
15:45	5400	33,3	31,376535	28,367133	26,365358	25,411781	24,737398	23,832148	23,542133	23,32338	23,013261	23,02405	22,927671	22,879529	22,960951	22,842694	23,145528
16:00	6300	32,7	31,322129	28,376743	26,395121	25,449246	24,773673	23,864473	23,568306	23,347816	23,029968	23,03729	22,938233	22,889774	22,96631	22,845848	23,177527

T16	T17	T18	T19	T20	T sorté (c°)	Rey (w/m2)	HR % ambi	HR % sorté	V (m/s)
22,805659	22,233506	22,261467	22,877564	22,683087	23,7	500	26,4	33,7	3
22,806447	22,235239	22,26383	22,879456	22,684505	23,9	450	26,3	37	3
22,808654	22,238548	22,264776	22,879456	22,685766	24,3	460	26,8	37,2	3
22,810072	22,239336	22,265248	22,880874	22,686554	24,7	290	26	35	3
22,810072	22,239966	22,265563	22,881978	22,68876	23	295	28,2	39,4	3
22,812279	22,242488	22,267612	22,881347	22,687657	23,8	230	28,1	38,6	3
22,813225	22,24296	22,267454	22,883239	22,689233	24,1	220	27,7	39,8	3
22,816062	22,245324	22,269503	22,882293	22,690494	23,9	205	26,8	37,1	3

Tableau (III-5) : les mesures de température de l'air, sol et le rayonnement solaire et la vitesse de l'air le 28/04/2013

Chapitre III : Etude Expérimentale

Résultats obtenus le 29/04/2013 :

heure (h)	temps (s)	T ambiante	T01 (c°)	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15
09:45	0	28,9	28,647196	26,404448	24,519358	24,37758	24,002206	23,096597	22,986033	22,986033	22,778275	22,88125	22,815439	22,79268	22,918716	22,812261	22,671106
10:00	900	29,4	29,621226	27,347051	25,405542	25,000326	24,48853	23,435394	23,264736	23,264736	22,978588	23,013017	22,923257	22,879371	22,969934	22,85389	22,67016
10:15	1800	28,4	29,399005	27,345161	25,592569	25,15552	24,6475	23,587542	23,403782	23,403782	23,095535	23,096082	22,989779	22,936589	23,008072	22,884797	22,6886
10:30	2700	30,3	30,373583	28,001812	25,93627	25,535826	24,936759	23,768394	23,55718	23,55718	23,198773	23,1719	23,055356	22,993019	23,043217	22,907662	22,702469
10:45	3600	31,9	31,188407	28,593845	26,361736	25,878078	25,207588	23,941845	23,699865	23,699865	23,320457	23,258595	23,126136	23,057174	23,087817	22,945981	22,716496
11:00	4500	31,8	31,621448	28,939538	26,720797	26,13361	25,411081	24,094648	23,822059	23,822059	23,415664	23,329057	23,189351	23,112188	23,126903	22,976889	22,742343
11:15	5400	32,6	31,506007	28,973574	26,835769	26,238631	25,511728	24,177439	23,902946	23,902946	23,462008	23,369727	23,229709	23,14939	23,150858	22,988243	22,7808
11:30	6300	33,2	31,764494	29,177795	27,043043	26,397194	25,647559	24,283257	23,986673	23,986673	23,546342	23,432309	23,282837	23,197627	23,185058	23,021359	22,81705
11:45	7200	32,4	31,34673	28,97058	27,026032	26,345074	25,633202	24,304232	24,019156	24,019156	23,572983	23,454536	23,306484	23,217332	23,203814	23,035079	22,853616
12:00	8100	32,4	32,28863	29,532221	27,274431	26,626627	25,827887	24,421567	24,111559	24,111559	23,647861	23,507504	23,350784	23,259107	23,230922	23,056052	22,881198
12:15	9000	32,2	33,012755	30,045255	27,59311	26,933405	26,068025	24,567927	24,233296	24,233296	23,733462	23,573084	23,409117	23,310341	23,265596	23,080022	22,907835
12:30	9900	32,9	32,959741	30,109095	27,776802	27,048375	26,169167	24,655147	24,304258	24,304258	23,789899	23,616753	23,451842	23,348176	23,294754	23,101154	22,947397
12:45	10800	33,5	33,134247	30,267675	27,90867	27,15453	26,270154	24,727858	24,376327	24,376327	23,841609	23,659949	23,490626	23,383174	23,319184	23,118186	22,990584
13:00	11700	33,7	33,523687	30,555851	28,10467	27,336922	26,414065	24,82912	24,459436	24,459436	23,910188	23,713077	23,536663	23,423532	23,348184	23,140737	23,033772
13:15	12600	34,5	34,150868	30,966249	28,327313	27,571623	26,586547	24,940323	24,548856	24,548856	23,982236	23,764473	23,582228	23,466098	23,379077	23,17007	23,077592
13:30	13500	34,3	34,122458	31,017651	28,420912	27,638886	26,658036	24,999476	24,599481	24,599481	24,024804	23,800261	23,615969	23,496367	23,40398	23,183317	23,121569
13:45	14400	34,2	34,154498	31,05502	28,562578	27,718595	26,734103	25,060049	24,650895	24,650895	24,07163	23,835261	23,648763	23,526164	23,424313	23,205711	23,1594
14:00	15300	34,9	34,447458	31,31173	28,728046	27,866047	26,846156	25,137659	24,725495	24,725495	24,130281	23,884136	23,688811	23,562897	23,451265	23,228894	23,198964
14:15	16200	36,4	34,68977	31,468321	28,816929	27,959626	26,935643	25,197289	24,778646	24,778646	24,172378	23,916772	23,717823	23,590645	23,47018	23,246557	23,241998
14:30	17100	36,9	35,221502	31,795721	28,918109	28,148525	27,078796	25,283737	24,844258	24,844258	24,219994	23,954296	23,749357	23,619655	23,49398	23,253654	23,292125
14:45	18000	36	35,42503	31,998234	29,140494	28,302615	27,202068	25,369872	24,91697	24,91697	24,27644	23,995447	23,793033	23,657493	23,518727	23,271948	23,333899
15:00	18900	35,5	35,371817	32,018265	29,224818	28,382026	27,275938	25,437078	24,983059	24,983059	24,336041	24,041644	23,832768	23,694071	23,548045	23,299547	23,371732
15:15	19800	35,4	35,390449	32,060063	29,349496	28,442846	27,327238	25,492454	25,026277	25,026277	24,379875	24,079485	23,86588	23,724185	23,569009	23,319577	23,401841
15:30	20700	35	35,120453	31,928836	29,281088	28,402352	27,320767	25,505548	25,050883	25,050883	24,390598	24,095725	23,881017	23,743262	23,582565	23,326358	23,431793
15:45	21600	35,7	35,067404	31,914168	29,325222	28,42315	27,352178	25,536944	25,088582	25,088582	24,426706	24,120165	23,908927	23,766439	23,603214	23,346388	23,454493

T16	T17	T18	T19	T20	T sorté (c°)	Rey (w/m2)	HR % ambi	HR % sorté	V (m/s)
22,888405	22,299056	22,318193	22,921068	22,730051	23,9	515	27,5	37,7	4,5
22,893291	22,303468	22,321975	22,924378	22,733518	23,8	475	26,1	36,5	4,5
22,895025	22,30851	22,325441	22,9269	22,735251	23,7	490	25,5	34,5	4,5
22,896759	22,311662	22,327174	22,927688	22,735566	23,3	720	21,3	31	4,5
22,89865	22,314813	22,330011	22,92958	22,738876	24,1	750	19,8	27,8	4,5
22,900699	22,320328	22,331902	22,931156	22,739979	24,9	800	19,1	27,8	4,5
22,90196	22,323952	22,334265	22,933363	22,743446	24,5	810	18,4	27,4	4,5
22,903536	22,324583	22,335683	22,935412	22,743446	24,3	870	17,7	27,1	4,5
22,904324	22,328207	22,335999	22,938407	22,743919	23,5	650	18,1	28	4,5
22,906531	22,331201	22,340253	22,939195	22,746126	23,4	900	17	26,9	4,5
22,90858	22,334352	22,341041	22,941086	22,746126	23,3	900	15,8	25,4	4,5
22,909683	22,337189	22,341986	22,942505	22,748647	23,1	870	15,8	25	4,5
22,911101	22,339867	22,343877	22,944869	22,749908	23,7	860	15	24,9	4,5
22,91315	22,342861	22,344823	22,946918	22,750066	23	860	14	23,5	4,5
22,916933	22,346801	22,348132	22,948652	22,751326	23	830	12	22,8	4,5

Chapitre III : Etude Expérimentale

22,918194	22,349322	22,349708	22,950386	22,752587	23,1	770	12,2	21,1	4,5
22,919455	22,351213	22,350338	22,953066	22,75369	23,6	800	13,3	21,8	4,5
22,92245	22,35468	22,353174	22,954484	22,754321	23,7	770	13,1	22,6	4,5
22,926232	22,35594	22,353332	22,955272	22,755897	23,4	720	10,6	22,7	4,5
22,927966	22,359564	22,35349	22,957637	22,757315	23,6	715	8	16,4	4,5
22,931591	22,362086	22,356483	22,957637	22,759049	24,4	740	7,5	16	4,5
22,933483	22,364449	22,357902	22,960001	22,758733	24,3	700	8,2	16	4,5
22,938526	22,367286	22,359162	22,96205	22,760625	24,7	690	7,9	16,5	4,5
22,941048	22,369019	22,359635	22,965833	22,761728	23,6	650	7,5	15,9	4,5
22,946092	22,372958	22,361841	22,965833	22,76157	22,9	580	8,2	16	4,5

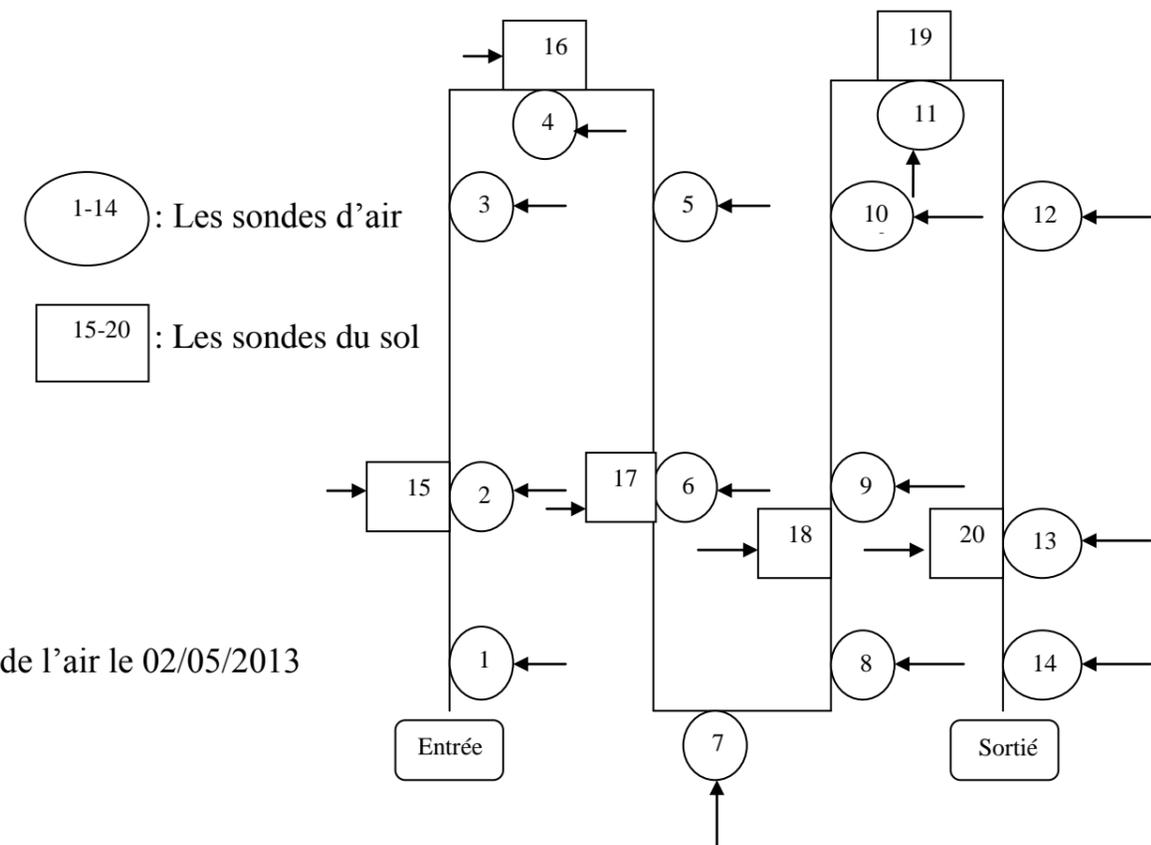
**Tableau (III-6) :** les mesures de température de l’air, sol et le rayonnement solaire et la vitesse de l’air le 29/04/2013

**Résultats obtenus le 02/05/2013 :**

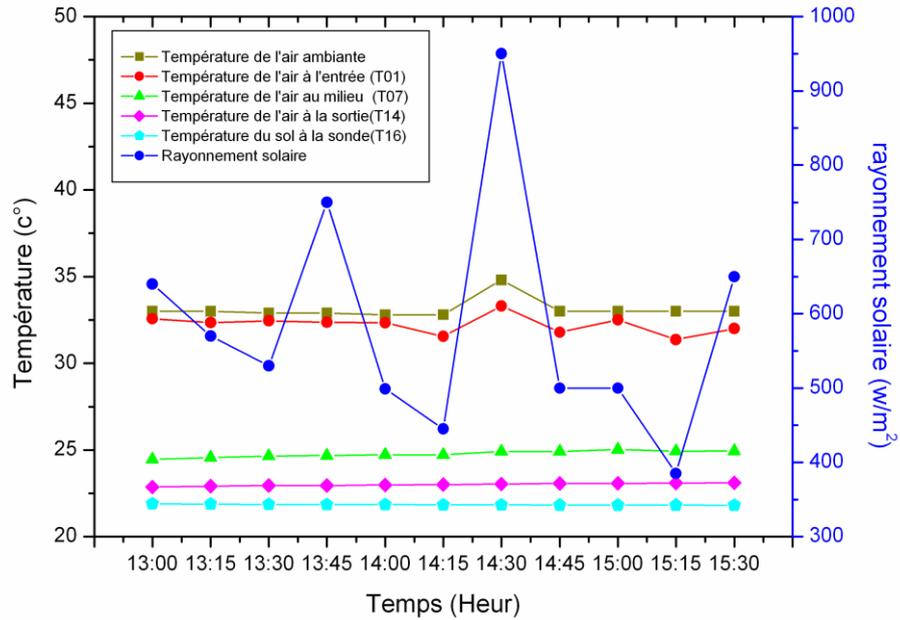
heure (h)	temps (s)	T ambiante	T01 (c°)	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15
09:45	0	30	28,33225	25,991027	24,444917	24,193785	23,891831	23,271638	23,081463	23,00952	22,86527	22,993314	22,939494	22,928865	23,052988	22,948662	22,79924
10:00	900	29,5	29,173963	26,968149	25,300225	24,797924	24,354957	23,626064	23,407015	23,26915	23,03249	23,093403	23,017208	22,983246	23,084981	22,975627	22,812164
10:15	1800	30,3	29,993205	27,587235	25,739775	25,147178	24,633464	23,83814	23,585334	23,420808	23,134781	23,163073	23,074273	23,030535	23,116974	22,997862	22,855034
10:30	2700	31,3	30,754323	28,110821	26,123172	25,461682	24,87288	24,008915	23,738593	23,541414	23,225726	23,226597	23,126767	23,076248	23,148179	23,021044	22,910515
10:45	3600	30,4	31,410755	28,620787	26,474489	25,739063	25,079505	24,165663	23,869941	23,650674	23,308005	23,285393	23,177528	23,119282	23,176548	23,045171	22,974034
11:00	4500	31,4	32,031519	29,055198	26,775762	26,002141	25,282358	24,316427	23,994198	23,751107	23,375627	23,331579	23,223088	23,157903	23,196406	23,056525	23,041496
11:15	5400	30,5	32,316866	29,307017	27,038632	26,192655	25,439003	24,427297	24,104268	23,838299	23,447506	23,382968	23,264707	23,193844	23,218629	23,075765	23,108328
11:30	6300	31,6	32,725609	29,59542	27,24466	26,384597	25,581141	24,537697	24,195102	23,916348	23,50583	23,424742	23,298917	23,224426	23,238645	23,0898	23,180522
11:45	7200	32,9	32,981199	29,830575	27,444242	26,552615	25,719973	24,644474	24,290039	24,001811	23,568884	23,472507	23,340852	23,261472	23,263547	23,108251	23,249249
12:00	8100	32,5	32,99461	29,93413	27,58413	26,639698	25,814634	24,730749	24,37315	24,068984	23,625792	23,514913	23,378374	23,293316	23,285455	23,128594	23,313564
12:15	9000	32,8	33,083283	30,024922	27,692674	26,748043	25,89005	24,794472	24,42898	24,111717	23,660946	23,541555	23,404072	23,31507	23,302477	23,139002	23,37252
12:30	9900	32,6	33,47745	30,234414	27,787357	26,85907	25,978405	24,86971	24,491592	24,169115	23,703194	23,574818	23,4304	23,340924	23,319814	23,153038	23,427536
12:45	10800	33,7	33,320282	30,215655	27,903471	26,907891	26,033787	24,913245	24,537803	24,209484	23,744497	23,604456	23,455468	23,362837	23,335102	23,168178	23,479716
13:00	11700	34,4	33,975043	30,601098	28,065753	27,087277	26,167747	25,007415	24,613193	24,271458	23,782963	23,633779	23,481639	23,386642	23,35244	23,173855	23,530951
13:15	12600	34,4	33,917594	30,670467	28,146109	27,159885	26,231968	25,055527	24,670919	24,319397	23,815596	23,659791	23,507023	23,408082	23,368201	23,18521	23,584236
13:30	13500	33,7	34,298607	30,932349	28,362767	27,309516	26,343371	25,155222	24,749151	24,382319	23,874873	23,70283	23,545492	23,441189	23,390267	23,209023	23,634211
13:45	14400	33,4	34,068478	30,856195	28,41193	27,336607	26,375562	25,186141	24,780224	24,413229	23,890796	23,716703	23,558263	23,454274	23,398779	23,210285	23,684503
14:00	15300	32,4	34,090259	30,846577	28,451482	27,367952	26,417537	25,216429	24,812085	24,443035	23,921223	23,739721	23,576394	23,471615	23,41123	23,221009	23,73716
14:15	16200	34,5	34,192222	30,918316	28,494187	27,414419	26,452096	25,246876	24,842528	24,473787	23,933993	23,753279	23,5909	23,485804	23,420215	23,228263	23,784615
14:30	17100	34	34,047487	30,921785	28,539728	27,445135	26,49202	25,277953	24,869815	24,502805	23,968205	23,775351	23,611869	23,501569	23,434085	23,238041	23,829075
14:45	18000	34	34,487395	31,160666	28,671313	27,578869	26,570135	25,337901	24,922657	24,544124	23,995953	23,795216	23,629213	23,518754	23,444645	23,244034	23,870856
15:00	18900	34,3	34,547853	31,249916	28,705825	27,640304	26,63973	25,403528	24,979443	24,592541	24,035525	23,827693	23,658854	23,54256	23,462929	23,262013	23,912322
15:15	19800	35,3	34,629466	31,338538	28,779894	27,697329	26,703329	25,450226	25,028027	24,622349	24,070053	23,851027	23,681874	23,564159	23,478849	23,274472	23,948112
15:30	20700	35	34,768545	31,424797	28,869725	27,804293	26,772295	25,509861	25,075981	24,671556	24,096383	23,877041	23,705367	23,583708	23,493507	23,281095	23,982326
15:45	21600	35	35,003462	31,608834	28,961765	27,893301	26,850417	25,570444	25,135135	24,719028	24,133119	23,903686	23,727283	23,605623	23,508954	23,289927	24,014648

T16	T17	T18	T19	T20	T sorté	Rey (w/m2)	V (m/s)
23,107337	22,524078	22,523834	23,089257	22,902309	23,8	540	3,5
23,114115	22,531642	22,53124	23,093986	22,907037	22,3	594	3,5
23,116322	22,535739	22,538174	23,097296	22,911293	23,2	625	3,5
23,119789	22,540467	22,540538	23,098715	22,912396	23,6	695	3,5
23,121208	22,543461	22,544162	23,10171	22,915075	22,5	74	3,5
23,124991	22,548504	22,544635	23,104705	22,91807	23,3	790	3,5
23,122942	22,547401	22,540853	23,104705	22,917124	22,8	830	3,5
23,122154	22,546298	22,542586	23,103916	22,915706	22,6	850	3,5
23,123099	22,548661	22,544792	23,106123	22,917124	23,6	880	3,5
23,125149	22,55071	22,543532	23,106123	22,91807	22,6	909	3,5
23,124045	22,550868	22,544635	23,106439	22,919015	22,8	930	3,5
23,125149	22,551656	22,545108	23,108803	22,919331	22,8	950	3,5
23,126252	22,553231	22,545265	23,107857	22,919488	23,3	963	3,5
23,127828	22,555438	22,546841	23,109276	22,920907	23,2	985	3,5
23,13035	22,557329	22,547786	23,110695	22,921852	24,8	960	3,5
23,131769	22,560008	22,548732	23,113374	22,922483	24,7	890	3,5
23,132872	22,561741	22,548102	23,112902	22,922325	25	885	3,5
23,133818	22,562056	22,547314	23,113847	22,922325	24,4	880	3,5
23,135079	22,563317	22,549835	23,115897	22,923744	22,8	885	3,5
23,137443	22,56442	22,550623	23,115424	22,924374	24,7	887	3,5
23,140123	22,565838	22,552041	23,117315	22,925162	24,5	875	3,5
23,141542	22,568202	22,552356	23,116685	22,924532	24,5	580	3,5
23,145955	22,569463	22,551726	23,118892	22,92532	24,4	822	3,5
23,147374	22,571039	22,55472	23,120468	22,926423	23,4	760	3,5
23,150841	22,57293	22,555193	23,121887	22,927841	23,9	763	3,5

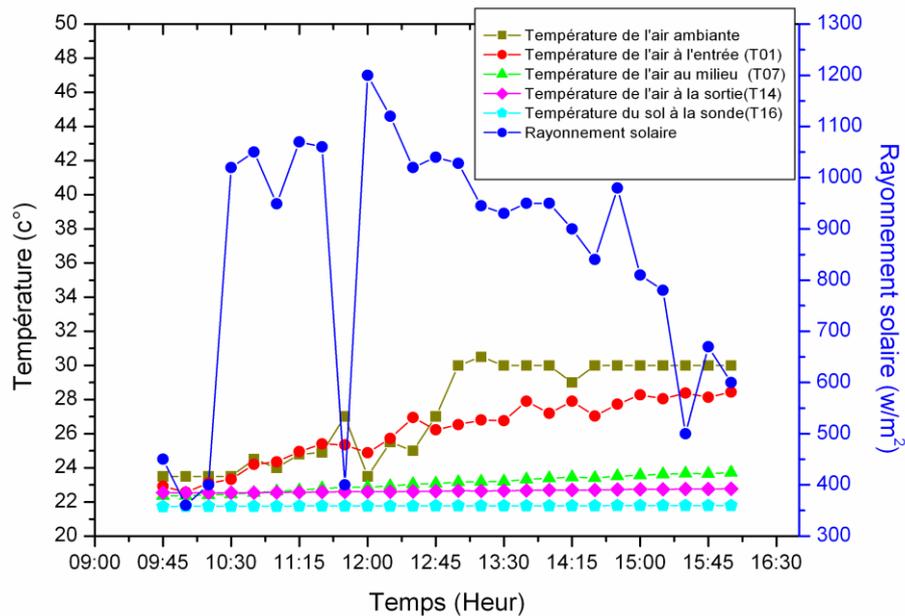
**Tableau (III-7)** : les mesures de température de l'air, sol et le rayonnement solaire et la vitesse de l'air le 02/05/2013



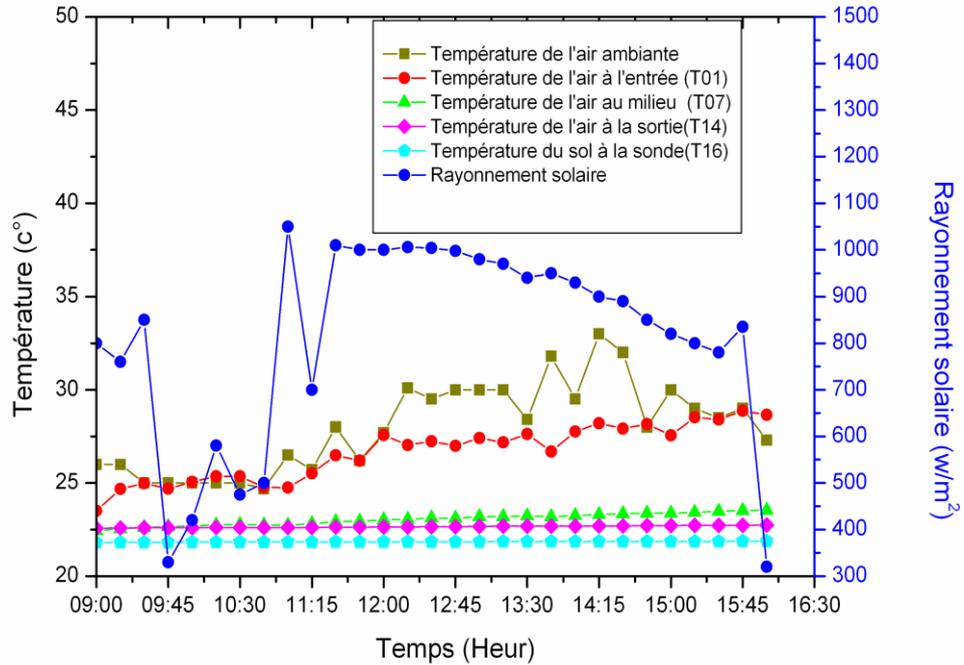
**Figure (III-10)** : présentation de la position des sondes d'air et les sondes du sol dans l'échangeur



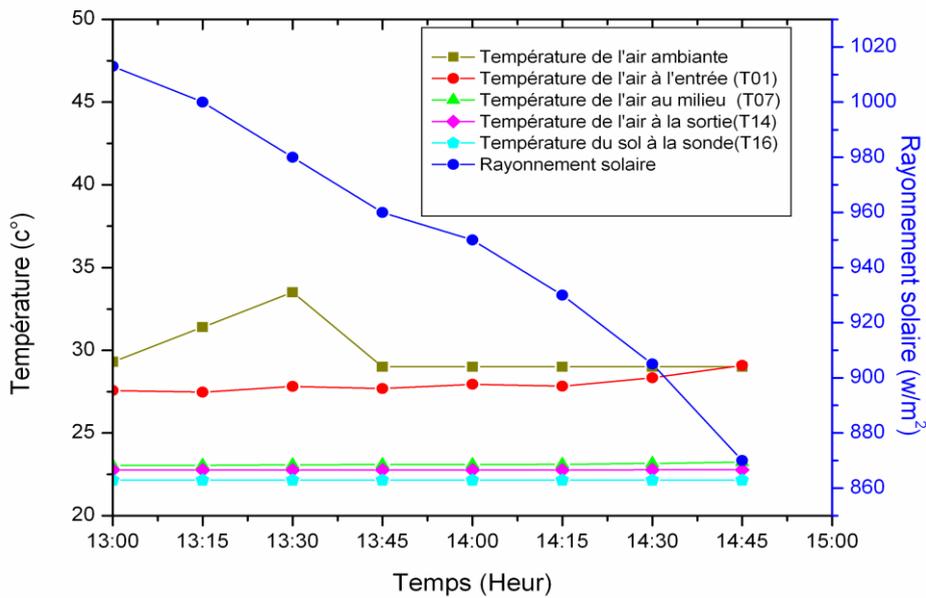
**Figure (III-11) :** Evolution de la température de l'air à l'entrée (T01), au milieu (T07) et à la sortie (T14) de l'échangeur en fonction du temps le 21/04/2013



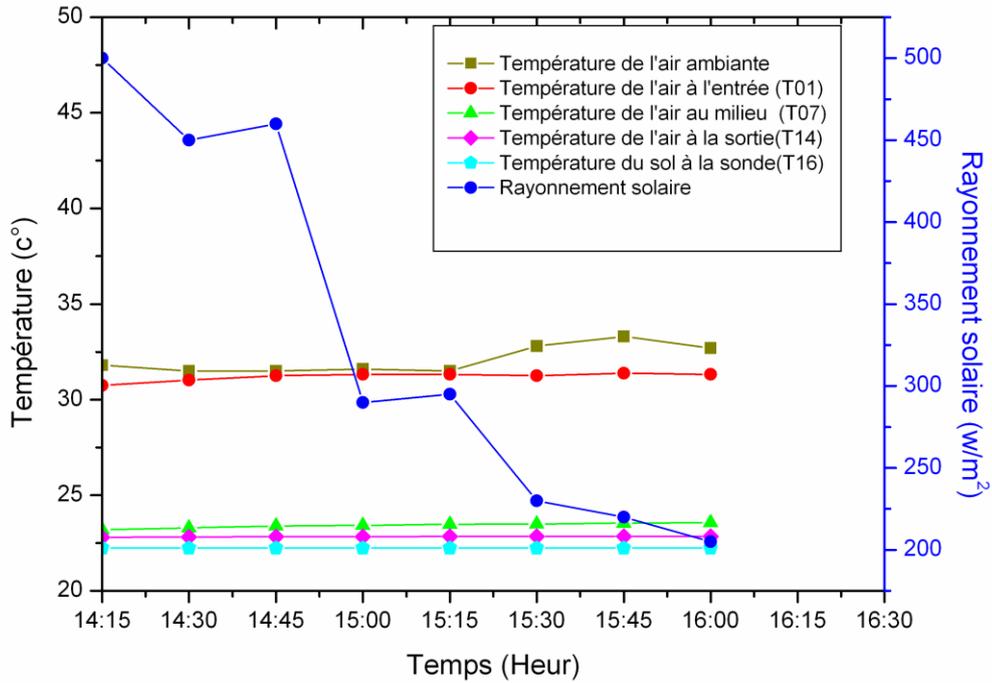
**Figure (III-12) :** Evolution de la température de l'air à l'entrée (T01), au milieu (T07) et à la sortie (T14) de l'échangeur en fonction du temps le 22/04/2013



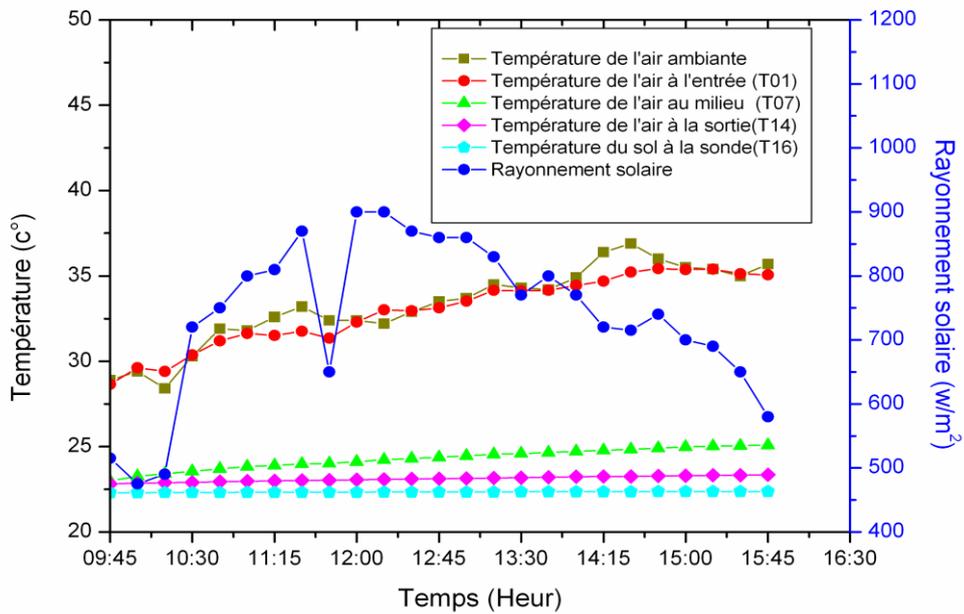
**Figure (III-13) :** Evolution de la température de l'air à l'entrée (T01), au milieu (T07) et à la sortie (T14) de l'échangeur en fonction du temps le 23/04/2013



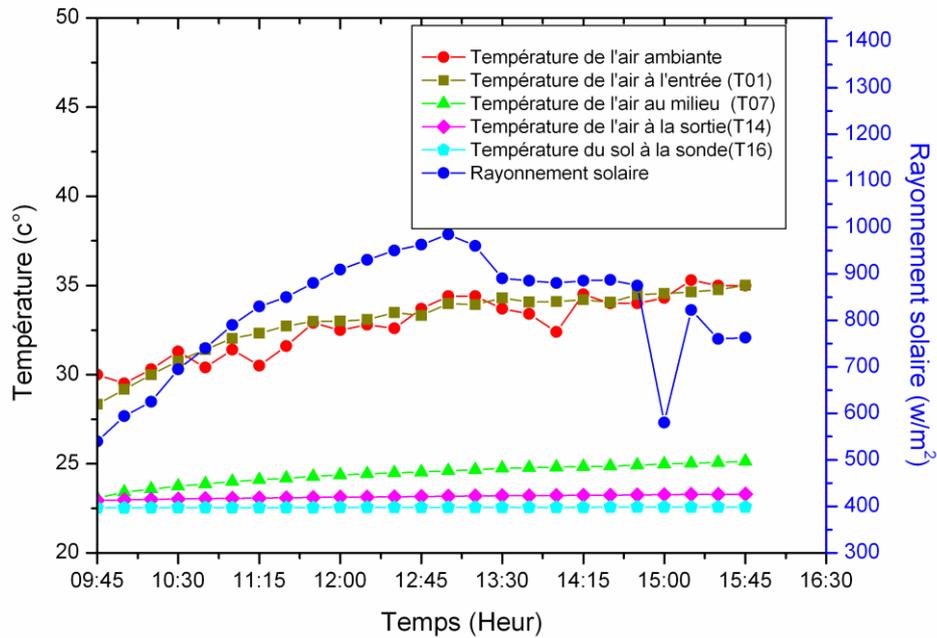
**Figure (III-14) :** Evolution de la température de l'air à l'entrée (T01), au milieu (T07) et à la sortie (T14) de l'échangeur en fonction du temps le 27/04/2013



**Figure (III-15) :** Evolution de la température de l'air à l'entrée (T01), au milieu (T07) et à la sortie (T14) de l'échangeur en fonction du temps le 28/04/2013

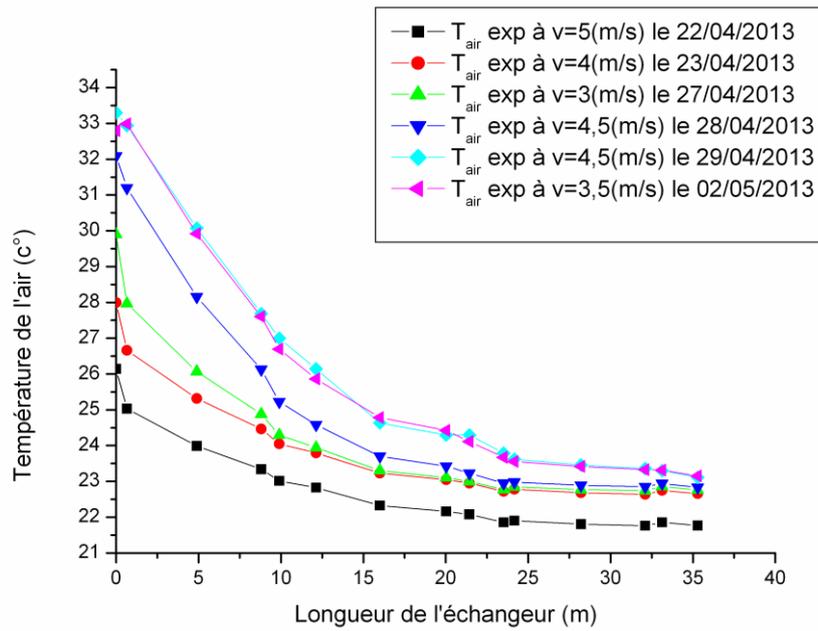


**Figure (III-16) :** Evolution de la température de l'air à l'entrée (T01), au milieu (T07) et à la sortie (T14) de l'échangeur en fonction du temps le 29/04/2013



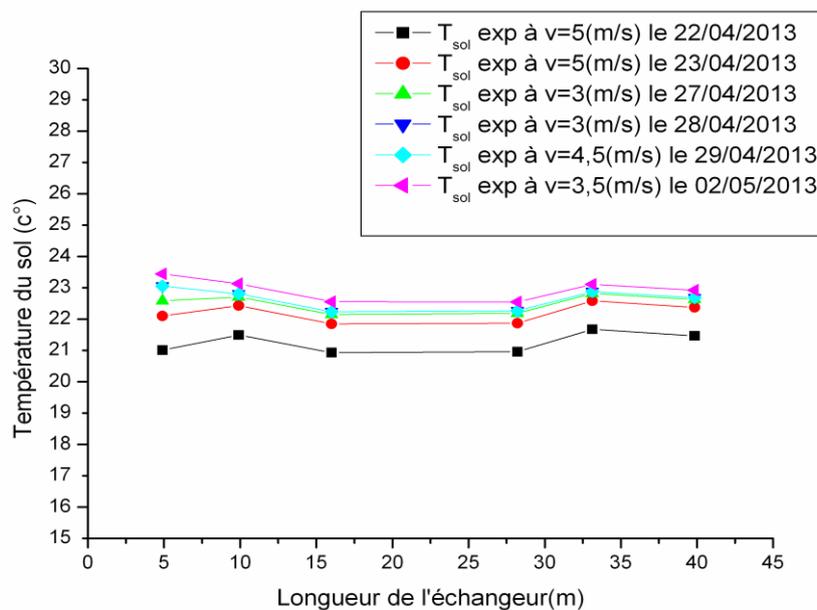
**Figure (III-17) :** Evolution de la température de l'air à l'entrée (T01), au milieu (T07) et à la sortie (T14) de l'échangeur en fonction du temps le 02/05/2013

Les relevés expérimentaux effectués du 21 avril au 02 Mai 2013 sous différentes conditions de fonctionnement, nous ont permis de suivre l'évolution en fonction du temps les profils de températures en plusieurs points Figures (III-11) à (III-17), depuis l'entrée de l'échangeur (T01) jusqu'à la sortie (T14) et également la température du sol (T16). Où on a constaté une température du sol (T16) qui était pratiquement stable entre 22 et 23 °C, et ceci durant toute la période des expérimentations malgré les variations des conditions extérieures environnantes. D'autre part, on a remarqué que l'écart de température entre la sonde (T14) et celle du sol (T16) est minimal, correspond à un échange satisfaisant entre l'air acheminé dans l'échangeur tubulaire en PVC air/sol enterré et le sol après une distance parcourue de 40 m depuis l'entrée de l'échangeur.

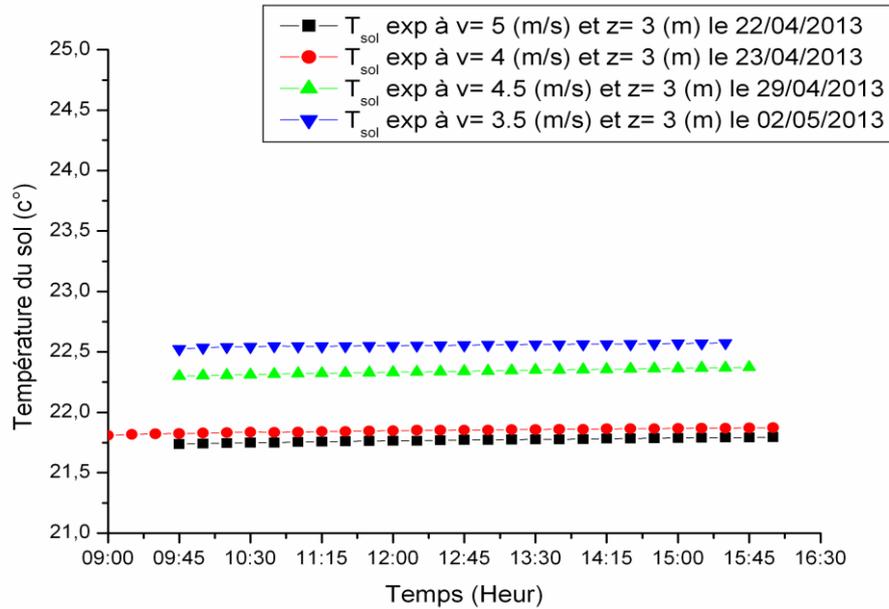


**Figure (III-18) :** Evolution de la température de l'air depuis l'entrée (T01) de jusqu'à la sortie (T14) en fonction de la longueur de l'échangeur et du débit d'air soufflé.

La figure (III-18) présenté l'évolution de la température de l'air depuis à l'entrée jusqu'à la sortie à différentes vitesse de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur, la température de l'air est démunie le plus de la longueur de l'échangeur.

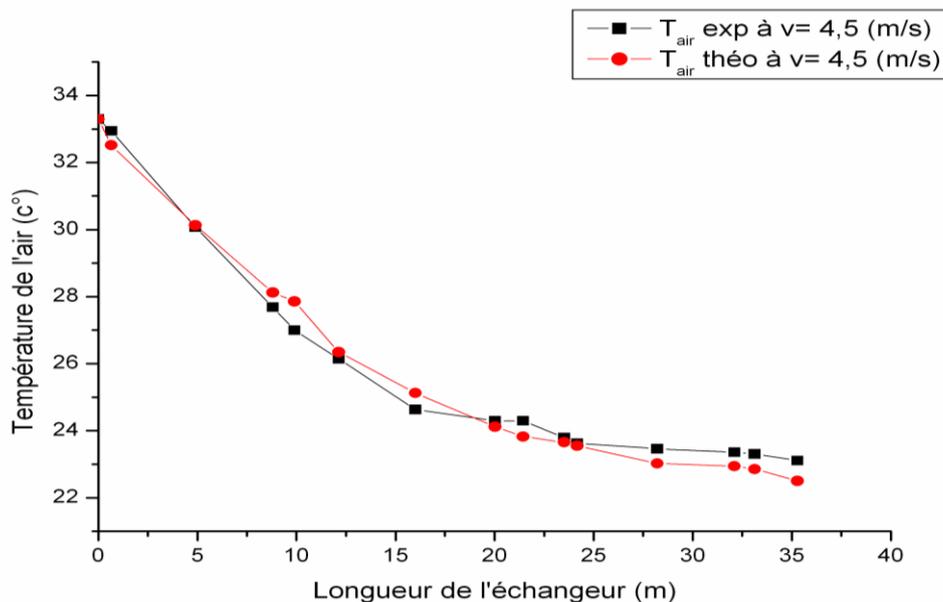


**Figure (III-19) :** Evolution de la température du sol en fonction de la longueur de l'échangeur



**Figure (III-20) :** Evolution de la température du sol en fonction du temps

Les figures (III-19) et (III-20) présentent l'évolution de la température du sol, respectivement en fonction de la longueur de l'échangeur et du temps durant le soufflage de l'air, où on a constaté que la température du sol est pratiquement stable suivant la longueur de l'échangeur enterré où l'air est acheminé, ainsi que durant toutes les périodes des expériences effectuées pour diverses valeurs de débits d'air soufflé.



**Figure (III-21) :** Comparaison entre la température de l'air théorique et expérimentale en fonction de la longueur de l'échangeur enterré.

L'évolution des profils des températures expérimentale comparativement au modèle théorique eq.(II-24) Fig.(III-21), en fonction de la longueur de l'échangeur respectivement pour un débit d'air constant équivalent à une vitesse de 4,5 m/s et une température de l'air ambiante de 33,5 °C injecté à l'entrée, montrent le bon accord avec le modèle théorique, et où la température de l'air soufflé dans l'échangeur commence à se stabiliser au-delà de 35 m de longueur d'échange.

**III.4. Efficacité de l'échangeur enterré :**

L'efficacité décrit le rendement de l'échangeur enterré d'une longueur bien défini, 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, est désigné par le rapport suivant :

$$\varepsilon = \frac{T_{air-sortie} - T_{air-entrée}}{T_{sol} - T_{air-entrée}}$$

Les tableaux (III-8) – (III-11) représentent les relevées relatives aux températures de l'air respectivement à l'entrée à la sortie de l'échangeur et du sol à une profondeur de 03 m.

$T_{e-air} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{s-air} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{sol} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\varepsilon = \frac{T_{s-air} - T_{e-air}}{T_{sol} - T_{e-air}}$
23,5	22,536481	21,737988	0,54682885
23,5	22,532066	21,741612	0,55046668
23,5	22,533958	21,746023	0,55077233
23,5	22,537111	21,748386	0,54971529
24,5	22,544995	21,749804	0,71086024
24	22,555401	21,754531	0,64333954
24,8	22,564231	21,757209	0,73477574
24,9	22,582363	21,759887	0,73807439
27	22,592928	21,76225	0,84140557
23,5	22,602388	21,764456	0,51719346
25,5	22,604753	21,765401	0,77524977
25	22,620836	21,76808	0,7361457
27	22,632346	21,771703	0,83538751
30	22,650637	21,772648	0,89328413
30,5	22,647326	21,773751	0,89989112
30	22,662621	21,77643	0,89223768
30	22,674131	21,77706	0,89090629
30	22,693999	21,778793	0,88867742

### Chapitre III : Etude Expérimentale

29	22,702513	21,781471	0,87240586
30	22,707875	21,783677	0,88751684
30	22,72585	21,786197	0,88560074
30	22,737203	21,78793	0,88440515
30	22,747926	21,788876	0,88320113
30	22,753129	21,790609	0,88275379
30	22,765586	21,791554	0,88133783
30	22,771105	21,794705	0,88100367

**Tableau (III-8) : Efficacité de l'échangeur le 22/04/2013**

$T_{e-air} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{s-air} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{sol} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\varepsilon = \frac{T_{s-air} - T_{e-air}}{T_{sol} - T_{e-air}}$
26	22,576372	21,808412	0,81678543
26	22,591824	21,817234	0,81481393
25	22,598131	21,821488	0,75565831
25	22,598762	21,824639	0,75620945
25	22,59955	21,82779	0,7567122
25	22,617052	21,831571	0,75209134
25	22,61106	21,835668	0,75495871
24,7	22,606172	21,834565	0,73071907
26,5	22,60901	21,835037	0,83408807
25,7	22,617525	21,841024	0,79878056
28	22,62872	21,841812	0,87221761
26,2	22,6355	21,845436	0,81856645
27,7	22,644961	21,848114	0,86383074
30,1	22,649849	21,850793	0,90313542
29,5	22,658836	21,851108	0,89439935
30	22,661517	21,853156	0,90077618
30	22,670189	21,852683	0,89965948
30	22,67965	21,856149	0,89888064
28,4	22,682488	21,857252	0,87387012
31,8	22,679492	21,858355	0,91740431
29,5	22,687376	21,858355	0,89151276
33	22,694629	21,862609	0,92529489
32	22,700148	21,863869	0,91749525
28	22,710397	21,86513	0,86221925
30	22,713709	21,866705	0,89585967
29	22,725062	21,867966	0,87982447
28,5	22,726639	21,869226	0,87069187
29	22,735469	21,871117	0,87875352
27,3	22,739411	21,87285	0,84032853

**Tableau (III-9) : efficacité de l'échangeur le 23/04/2013**

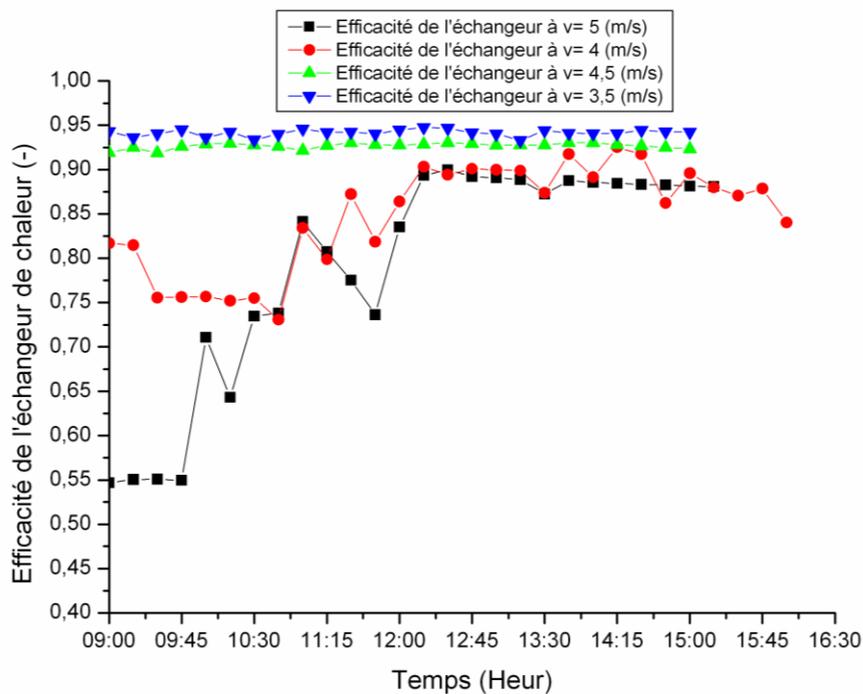
$T_{e-air} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{s-air} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{sol} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\varepsilon = \frac{T_{s-air} - T_{e-air}}{T_{sol} - T_{e-air}}$
28,9	22,812261	22,299056	0,91915663
29,4	22,85389	22,303468	0,9247827
28,4	22,884797	22,30851	0,91872401
30,3	22,907662	22,311662	0,92607221
31,9	22,945981	22,314813	0,92887121
31,8	22,976889	22,320328	0,92941054
32,6	22,988243	22,323952	0,92765334
33,2	23,021359	22,324583	0,92618829
32,4	23,035079	22,328207	0,92161998
32,4	23,056052	22,331201	0,927205
32,2	23,080022	22,334352	0,93017027
32,9	23,101154	22,337189	0,92808084
33,5	23,118186	22,339867	0,92789591
33,7	23,140737	22,342861	0,9286389
34,5	23,17007	22,346801	0,93025548
34,3	23,183317	22,349322	0,92916119
34,2	23,205711	22,351213	0,92760507
34,9	23,228894	22,35468	0,92770776
36,4	23,246557	22,35594	0,92779072
36,9	23,253654	22,359564	0,93048559
36	23,271948	22,362086	0,93034786
35,5	23,299547	22,364449	0,92811013
35,4	23,319577	22,367286	0,92687713
35	23,326358	22,369019	0,92492303
35,7	23,346388	22,372958	0,92331843

**Tableau (III-10) : Efficacité de l'échangeur le 29/04/2013**

$T_{e-air} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{s-air} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{sol} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\varepsilon = \frac{T_{s-air} - T_{e-air}}{T_{sol} - T_{e-air}}$
30	22,948662	22,524078	0,94320647
29,5	22,975627	22,531642	0,93628556
30,3	22,997862	22,535739	0,94048075
31,3	23,021044	22,540467	0,94513669
30,4	23,045171	22,543461	0,93614109
31,4	23,056525	22,548504	0,9426062
30,5	23,075765	22,547401	0,93356084
31,6	23,0898	22,546298	0,93996909
32,9	23,108251	22,548661	0,94594033
32,5	23,128594	22,55071	0,94191706
32,8	23,139002	22,550868	0,94261621
32,6	23,153038	22,551656	0,94015113

33,7	23,168178	22,553231	0,94483182
34,4	23,173855	22,555438	0,94778895
34,4	23,18521	22,557329	0,94698147
33,7	23,209023	22,560008	0,94174008
33,4	23,210285	22,561741	0,94016161
32,4	23,221009	22,562056	0,93301924
34,5	23,228263	22,563317	0,9442939
34	23,238041	22,56442	0,94109429
34	23,244034	22,565838	0,94068686
34,3	23,262013	22,568202	0,94086064
35,3	23,274472	22,569463	0,94462064
35	23,281095	22,571039	0,94287085
35	23,289927	22,57293	0,94230362

**Tableau (III-11) :** Efficacité de l'échangeur le 02/05/2013



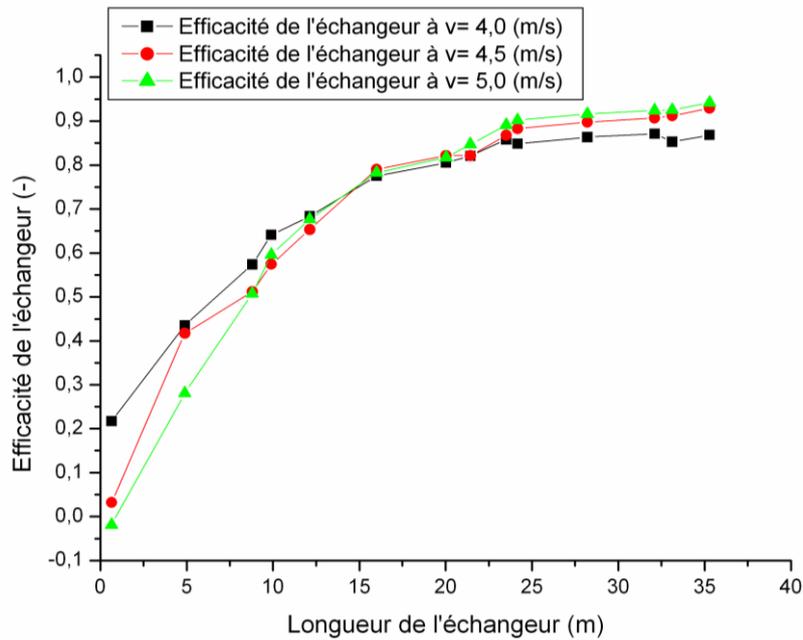
**Figure (III-22) :** Evolution de l'efficacité de l'échangeur en fonction du temps et du débit d'air soufflé

La figure (III-22) montre que l'efficacité de l'échangeur estimée à la sortie de l'échangeur, pour divers débits d'air soufflé dépend de l'écart de température existant d'une part entre l'air à la sortie et l'entrée, et entre le sol et l'air à l'entrée, est pratiquement monotone durant le fonctionnement du dispositif, atteints une valeur maximale de l'ordre de 95 % loin de l'entrée de l'échangeur au environ de 40 m de longueur d'échange.

D'autre part, la variation de l'efficacité en fonction de la longueur d'échange, montre qu'elle augmente en fonction du débit d'air soufflé, et atteint son maximum pour une longueur d'échange équivalente à 25 m depuis l'introduction de l'air soufflé dans l'échangeur géothermique Figure.(III-23).

Longueur de l'échangeur (m)	Efficacité de l'échangeur à v=4 m/s	Efficacité de l'échangeur à v=4,5 m/s	Efficacité de l'échangeur à v=5m/s
0,65	0,21	0,03	-0,01
4,9	0,43	0,41	0,28
8,81	0,57	0,51	0,50
9,9	0,64	0,57	0,59
12,14	0,68	0,65	0,67
16	0,77	0,79	0,78
20,03	0,80	0,82	0,81
21,44	0,82	0,82	0,84
23,52	0,85	0,86	0,89
24,17	0,84	0,88	0,90
28,21	0,86	0,89	0,91
32,1	0,87	0,90	0,92
33,13	0,85	0,91	0,92
35,29	0,86	0,92	0,94

**Tableau (III-12) :** Efficacité de l'échangeur en fonction de la longueur d'échange entre l'air et le sol pour différents débit d'air soufflé.



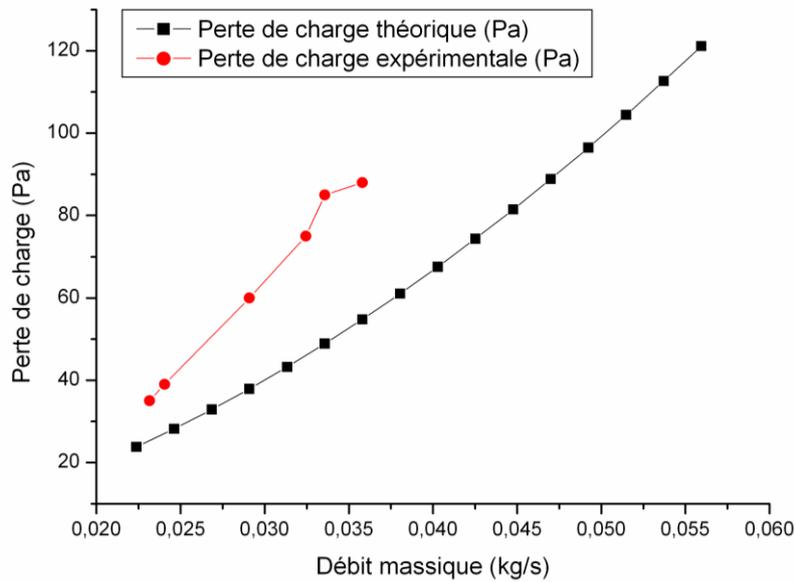
**Figure (III-23) :** Evolution de l'efficacité en fonction de la longueur de l'échangeur à différentes débits d'air soufflé.

### III-5. Perte de charge :

La mesure des pertes de charge a été réalisé par le biais d'un manomètre différentiel de type Kimo à affichage digital, dont la chute de pression mesurée entre deux points respectivement entre l'entrée de l'échangeur et la sortie a permis d'obtenir le tableau de mesure Tab.(III-13) suivant, à savoir que le manomètre différentiel ne peut afficher une dépression au-delà de 100 [Pa].

Vitesse de l'air (m/s)	Débit massique (kg/s)	Perte de charge (Pa)
2,07	0,02316419	35
2,15	0,02405942	39
2,6	0,02909512	60
2,9	0,03245225	75
3	0,03357129	85
3,2	0,03580938	88
4	0,04476172	>100

**Tableau (III-13) :** Pertes de charge expérimentales



**Figure (III-24) :** Evolution des pertes de charge théoriques et expérimentales en fonction du débit massique de l'air soufflé dans l'échangeur air/sol enterré.

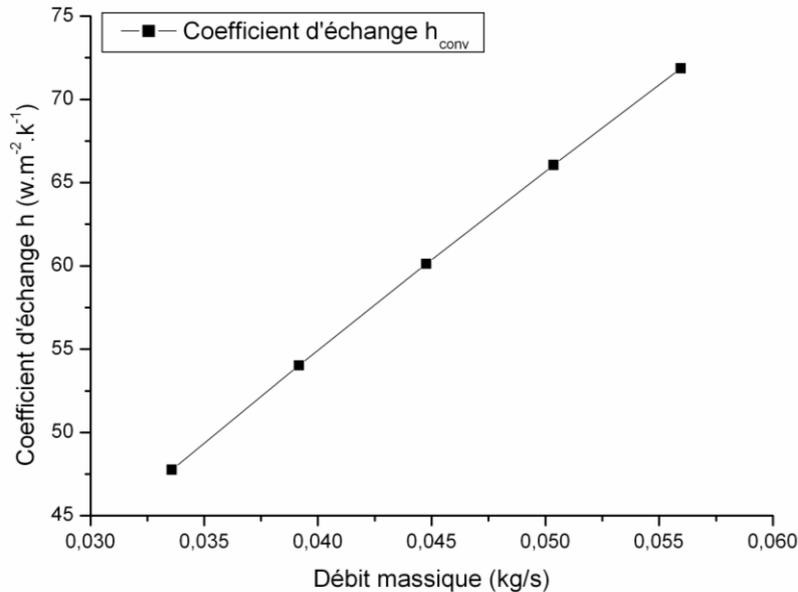
La comparaison de l'évolution des pertes de charge théoriques et expérimentales pour différents débits massiques d'air soufflé Figure (II-24), montre un écart qui devient important avec la vitesse de l'air injecté, du aux erreurs de lecture durant les prises de mesure. En effet la valeur affichée sur l'écran du manomètre était instable et bascule entre plusieurs valeurs, dont l'écart était parfois important, ceci peut être expliqué à un mauvais emplacement des endroits correspondants aux orifices de prise de mesure de la pression respectivement à l'entrée et à la sortie de l'échangeur.

### III-6. Coefficient d'échange :

Le coefficient d'échange convectif moyen est estimé en fonction du régime d'écoulement, dépend essentiellement du nombre de Reynolds, est exprimé par la relation (II-36) de Colburn [10], augmente au fur et à mesure en fonction du débit massique pour atteindre une valeur maximale au environ de  $72 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ , qui correspond à une vitesse supérieure de fonctionnement de l'extracteur utilisé pour le pompage de l'air.

V (m/s)	Pr	Nu	$\lambda_{air}$	D (m)	$h_{c-moy}$ [W/m <sup>2</sup> °K]
3	0,081	200,59	0,025	0,105	47,76
3,5		226,92			54,03
4		252,58			60,12
4,5		277,45			66,06
5		301,84			71,87

**Tableau (III-14) :** Evolution du coefficient d'échange convectif moyen en fonction du débit d'air



**Figure (III-25) :** Evolution du coefficient d'échange convectif moyen en fonction du débit massique d'air introduit dans l'échangeur.

Pour vérifier la qualité d'échange convectif locale en fonction du rapport relatif (x/L) de l'entrée jusqu' à la sortie de l'échangeur, avec x étant la distance parcourue par le fluide où est installée une sonde de mesure de la température de l'air dans l'échangeur (T01-T13), L correspond à la distance limite où se trouve installé la dernière sonde (T14).

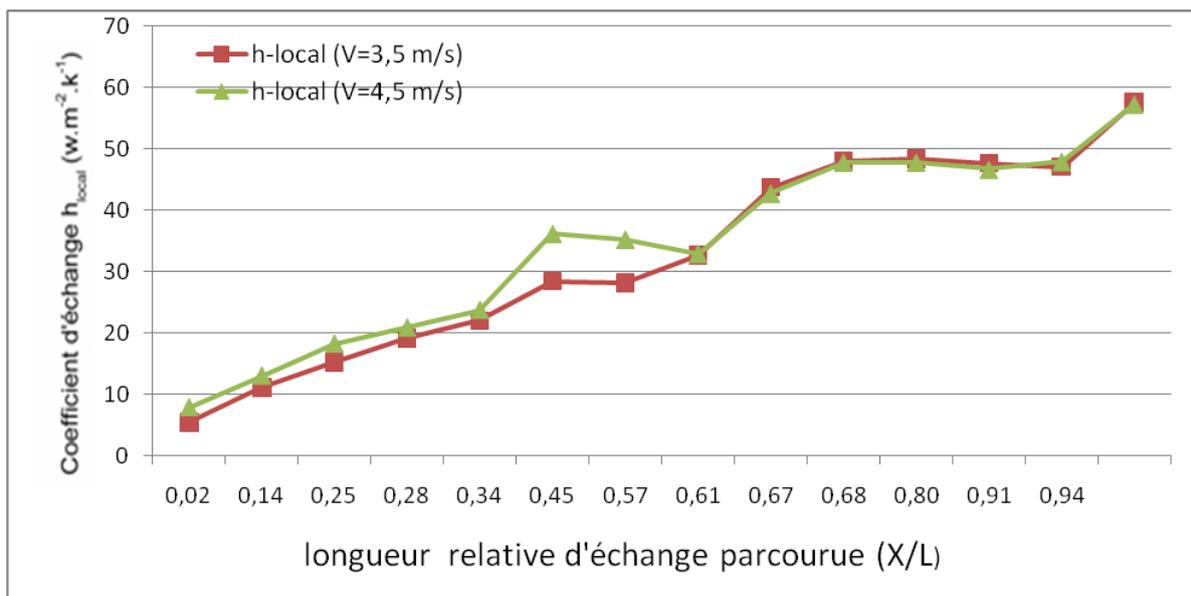
Pour estimer le coefficient d'échange convectif local, on emploie la relation (II-38) suivante, ce qui nous permis d'établir le tableau (III-15) qui exprime l'évolution du coefficient d'échange local en fonction du rapport relatif (x/L).

$$h_{local} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{s-air(x)} - T_{e-air})}{S_{(x)} \cdot (T_{sol} - T_{s-air(x)})}$$

Distance parcourue x/l	$h_{local}$ v= 3,5 (m/s)	$h_{local}$ v= 4,5 (m/s)
0,0184	5,4731	7,8775
0,1388	11,1546	13,0477
0,2496	15,2780	18,2502
0,2805	19,2075	20,9171
0,3440	22,0622	23,7602
0,4534	28,4752	36,1713
0,5676	28,2644	35,2591
0,6075	32,6755	32,9403
0,6665	43,7883	42,7761
0,6849	48,0721	47,8115
0,7994	48,4338	47,8037
0,9096	47,6995	46,6740
0,9388	47,1264	47,9292
1,0000	57,6164	57,3252

**Tableau (III-15) :** Evolution du coefficient d'échange Convectif local en fonction de la longueur d'échange parcourue

L'analyse des valeurs du coefficient d'échange local pour ( $x/L = 1$ ), qui correspond à la sortie de l'échangeur enterré, sont très proches des valeurs du coefficient d'échange moyen calculé par l'approche global de Colburn [10]. Ce qui justifier le bon accord avec la relation empirique de Nusselt.



**Figure (III-26) :** Evolution du coefficient d'échange local en fonction de la longueur d'échange relative ( $x/L$ ) parcourue par l'air.

*Conclusion  
Générale*

## *Conclusion Générale*

L'intérêt de l'échangeur thermique air-sol consiste à améliorer tout au long de l'année, les conditions du confort thermiques recherchées. Qu'il soit utilisé en mode réchauffement en hiver ou 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 avec une consommation énergétique modérée comparativement aux systèmes conventionnels classiques.

Les résultats obtenus permettent de bien comprendre le fonctionnement de l'échangeur air-sol au cours des saisons.

À l'issue de cette étude et à travers les résultats expérimentaux obtenus, on a pu vérifier le bon accord des modèles analytiques qui traduisent l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur en fonction des principaux paramètres climatiques considérés.

Cependant, les écarts enregistrés entre les résultats expérimentaux par comparaison à ceux analytiques, en particulier, celui de la température du sol, nous ont permis de conclure que les modèles théoriques présentés pourront être améliorés.

L'analyse des profils de température de l'air véhiculé à travers l'échangeur enterré à une profondeur de 03 mètres, montre qu'ils se rapprochent à celle du sol après une longueur d'échange qui avoisine 30 m, ceci a été pratiquement observé pour toute la gamme des débits considérée et pour diverses températures d'entrée d'air. D'autre part, on tient à signaler le bon

accord entre le modèle théorique qui traduit l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur, par rapport aux mesures expérimentales, relativement à un débit d'air constant de 4,5 m/s et une température à l'entrée de 33 °C.

Concernant, l'efficacité en fonction de la longueur d'échange, montre qu'elle augmente en fonction du débit d'air soufflé et atteint son maximum pour une longueur d'échange équivalente à 25 m.

La mesure des pertes de charge totale dans l'intervalle des débits d'air examinés, ne dépassent la valeur de 120 Pascals, correspond ainsi à un régime d'écoulement turbulent, se traduit par une énergie mécanique et électrique consommée très faible en comparaison avec les autres systèmes de conditionnement d'air classiques.

L'analyse des échanges convectifs moyens et locaux, montre que dans la limite des conditions de fonctionnement offertes par le système de pompage de l'air, le coefficient d'échange par convection pour une vitesse de 4,5 m/s se situe aux environs de 60 W/m<sup>2</sup>·°C.

L'écart de température enregistré entre l'ambiance et celle à la sortie de l'échangeur enterré, dépasse 10 °C dans le mauvais cas, nous laisse juger que le dispositif géothermique est un système plus efficace en raison de ses capacités de rafraîchissement en été et de réduire le besoin de chauffage en hiver.

Le rafraîchissement par le procédé géothermique est une solution peu coûteuse, apportant un gain thermique non négligeable durant toutes les périodes de l'année, nécessité des améliorations et mérite d'être approfondie et valorisée pour des applications diverses, notamment dans le bâtiment.

*Références*  
*Bibliographiques*

## *Références bibliographiques*

- [1] N. Moumami, H. Benfatah, N. Hatraf , A. Moumami 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) 399 – 406.
- [2] M. Benhammou et B. Draoui, Simulation et caractérisation d’un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l’Algérie, ‘revue des Energies renouvelables’ Vol. 15 N°2 (2012) 275 – 284.
- [3] 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) 465 – 478.
- [4] Pierre Tittlein, Gilbert Achard, Etienne Wurtz, Etude des échangeurs air-sol par la méthode convolutive des facteurs de réponse, ‘INES-RDI, LOCIE, Université de Savoie, 27 rue Marcoz, BP 1104, 73011 Chambéry, France’
- [5] 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, Station météorologique Biskra 2005.
- [6] H.Nebbar, ‘Etude théorique et expérimentale d’un échangeur air/sol destiné au rafraichissement des locaux par la géothermie’, Mémoire de magistère, université de Biskra, Algérie, 2012
- [7] Belloufi yousef, ‘Modélisation d’un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux’, Mémoire de Master II université de Biskra, Algérie, 2012.

- [8] Hocine BENFATAH, Nouradine MOUMMI, Nesrine HATRAF, Abdelhafid MOUMMI, Sabri YOUCEF ALI, Etude théorique et expérimentale du rafraichissement par la géothermie, application à L'HABITAT,' Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Énergétique, SIGCLE'2010'.
- [9] M.carlier, Hydraulique générale et appliquée. Editions EYROLLES 61,Bd Saint-Germain Paris 5' 1986.
- [10] B. Mebarki, B. Draoui, S. Abdessemed, A. Keboucha, S. Drici,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) 465 – 478'
- [11] C.Dutertre, P.Rousseau, J.Casaing, R.Coudure , J.G.Cazaux 'Conditionnement d'air par tuyaux enterrés dans le sol', '1995.Journées rech. porcine en France ,27 ;329-336,
- [12] N. Naili, S. Kooli et A. Farhat,' Optimisation analytique et validation expérimentale d'un échangeur enterré', 'Revue des énergies renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 525 – 535'
- [13] David Amitrano, 'Université J. Fourier, Grenoble', 'Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien »', 'Version du 28-04-2006'
- [\*] Données sur sites Internet, <http://www.cder.dz/>

## ملخص

في المجال الحالي للطاقة، ونظم الطاقة الحرارية الأرضية هي متطورة جدا في قطاع البناء والتشييد. بين هذه النظم للاهتمام في قطاع الطاقة، وهناك خاصة مبادلات الجوي الأرضي يسمى عادة "الحوض الكندي" التكنولوجيا مقتبسة من نظام مستعملا سابقا من قبل أسلافنا.

في العمل الحالي، تم إجراء دراسة الأداء الحراري للمبادل حراري الجوي الأرضي عن طريق الدراسة النظرية. أولا، نريد التحقق من صحة نموذج من درجة حرارة التربة ودرجة حرارة الهواء في المبادل الحراري، ومن ثم أجرينا دراسة تجريبية حول تأثير بعض المعايير، وهي العمق، و طول الأنبوب على درجة الحرارة داخل المبادل.

الكلمات المفتاحية: مبادل الجوي الأرضي- حوض كندي- الطاقة الحرارية الأرضية- تبريد

## Résumé

Dans le domaine 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 thermiques d'un échangeur air-sol a été entreprise par voie d'une étude théorique. Nous avons premièrement validé le modèle de la température du sol et la température de l'air dans l'échangeur, puis nous avons mené une étude expérimentale dans laquelle nous avons analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir: la profondeur, la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur.

Mots clés : Echangeur air-sol, puits canadien, géothermie, rafraichissement.