

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 de l'influence des paramètres  
climatiques sur la température du sol  
(application au site de Biskra)**

**Présenté par:**

**MABROUKI DJAMEL**

**Proposé et dirigé par:**

**Pr. NOUREDDINE MOUMMI**

**Promotion : Juin 2013**

# *Dédicace*

*À celle Qui m'a appris le sens de la vie, mon premier professeur : « ma mère »*

*À mes frères*

*À ceux que j'ai aimé et ceux qui m'ont aimés*

*À la promotion 2013,*

*À toute ma famille et à mes chers amis chacun en son nom, à ceux qui m'ont aidé  
à réaliser ce modeste travail et pour leurs encouragements. Ainsi qu'à tous mes  
enseignants,*

*À chaque personne qui m'a aidé*

*Je dédie ce mémoire*

*Djamel.*

# *Remerciements*

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier toute  
Personne qui a contribué de près ou de loin à la  
réalisation de cette étude.*

*Tout d'abord, j'adresse mes vifs remerciements au  
Pr. Moummi Noureddine et au  
Dr. Aliouali Abdelouahid  
Pour leurs aides, leurs conseils et leurs  
Encouragements tout au long de ce travail.*

*Ma gratitude également à tous les enseignants et personnel du  
Département de Génie Mécanique pour leur contribution à notre  
Formation.*

# Sommaire

Nomenclature.

Index des figures.

Introduction générale.

## Chapitre I: Etude Bibliographique

I-1: Introduction	10
I-2-Analyses des travaux effectués	10
I-2-1 M. Benhamou et B. Draoui	10
I-2-2 B. Mebarki et Al	11
I-2-3 N. Moumami et al	14
I-2-4 M. Benhamou et al	16
I-2-5 David Amitrano	18
I-2-6 Mohammed Rhachi et al	20

## Chapitre II: Etude Théorique

II-1: Introduction	24
II-2-Rappels sur les modes de transfert de chaleur	25
II-2-1-Transfert de chaleur par Conduction	25
II-2-2Transfert de chaleur par convection	26
II-2-2-1-Convection naturelle et forcée	26
II-2-2-2-Calcul du coefficient d'échange par convection h	26
II-2-3-Transfert de chaleur par rayonnement	27
II -3-Analyse des paramètres	29
II -3-1 -Profondeur d'enfouissement des canalisations	30
II -3-2- La qualité du sol et le taux d'humidité	30
II -3-3-Capacité calorifique du sol : $C_S$	31
II -3-4-Conductivité thermique du sol $\lambda$	31
II -3-5 - Le débit dans les canalisations	32
II -3-6_ La longueur des canalisations	32
II -3-7- Le diamètre des canalisations	32

II -3-8- La distance entre canalisations	33
II -3-9- Echange convectif air/tube	33
II -3-10- Les autres canalisations	35
1-La rugosité intérieure des canalisations	35
2-Les propriétés physiques des canalisations	35
3- La géométrie de l'échangeur	36
4-Le rayonnement solaire et la surface du sol	36
5- Conseils de mise en œuvre	36

### **Chapitre III : Simulation numérique, résultats**

III-1/Introduction	38
III-2 Données météorologiques de la ville de Biskra	38
III-3 Propriétés physiques du sol de la région de Biskra (nature de sol : Limon argilo sableux)	38
III-4- Equations du bilan thermique à la surface du sol	39
III-4-1 Apport radiatif solaire net $R_n$	39
III-4-2-Equation du flux de chaleur sensible H	40
III-4-3-Flux de chaleur latente $L_v E$	40
III-5- Résolution analytique	41
III-6- Résolution numérique	43
III-7- Les paramètres étudiés	43
III-8-Algorithmes des calculs	44
III-9- Présentation des résultats et interprétation	45
* Cas de la variation des températures de la journée	47
*Cas de Variation de la Vitesse du vent et de l'humidité relative	48
*Cas de variation du Flux de chaleur	50
*Cas de la Variation de la profondeur	51
*Cas de la Variation de la température du sol	53

### **Chapitre IV : Etude Expérimentale**

IV-1-Introduction	56
IV-2- Description géométrique	56
IV-3-Schémas des échangeurs	57
IV-4-Les instruments de Mesure utilisés	58

a -Mesure du rayonnement solaire	58
b. Mesure de la vitesse du vent et de la température	58
c-Mesure de l'humidité	58
d-Mesure de la température dans l'échangeur	59
IV-5-Résultats des mesures	60
1- Evolution de la température de l'air dans l'échangeur et du rayonnement solaire	61
2- Evolution de la température de sortie pour différentes vitesses d'écoulement	64

# Nomenclature

$\rho$	La masse volumique.	(kg/m <sup>3</sup> )
$\lambda$	La conductivité thermique du matériau	(W/K .m)
$C_p$	La capacité thermique massique.	(J/kg K)
$q^m$	La densité volumique du flux développé dans l'échantillon.	(W/m <sup>3</sup> )
$\varphi$	Le flux de chaleur transmis par conduction	(W)
$S$	Aire de la section de passage du flux de chaleur.	(m <sup>2</sup> )
$h$	Coefficient d'échange par convection	(W/m <sup>2</sup> C°)
$\theta_m - \theta$	Différence de la température de la paroi et du fluide.	(K°)
$U_m$	Vitesse moyenne du fluide.	(m/s)
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide.	(Kg/ms)
$D$	Dimension caractéristique de la surface d'échange.	(m)
$N_U$	Nombre de Nusselt.	
$Re$	Nombre de Reynolds	
$Pr$	Nombre de Prandtl	
$T_s$	Température de la surface.	(K°)
$\varepsilon_{ij}$	Facteur de forme entre les surfaces $i$ et $j$ .	
$\sigma$	Constante de Stéphane Boltzmann. ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )	(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$S$	Superficie de la surface.	(m <sup>2</sup> )
$Q_{ij}$	Flux de rayonnement à grande longueur d'onde entre les surfaces $i$ et $j$ .	(W/m <sup>2</sup> )
$X_i$	La teneur de sol en constituant $i$ .	(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
$\rho_i$	Masse volumique	(kg/m <sup>3</sup> )
$C_i$	Capacité thermique	(j/k.m <sup>3</sup> )
$R_n$	Rayonnement net.	(j. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation d'eau.	(j. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )
$H$	Flux de chaleur du à la convection du vent.	(j. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )
$G$	Flux de chaleur conductif dans le sol.	(j. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )

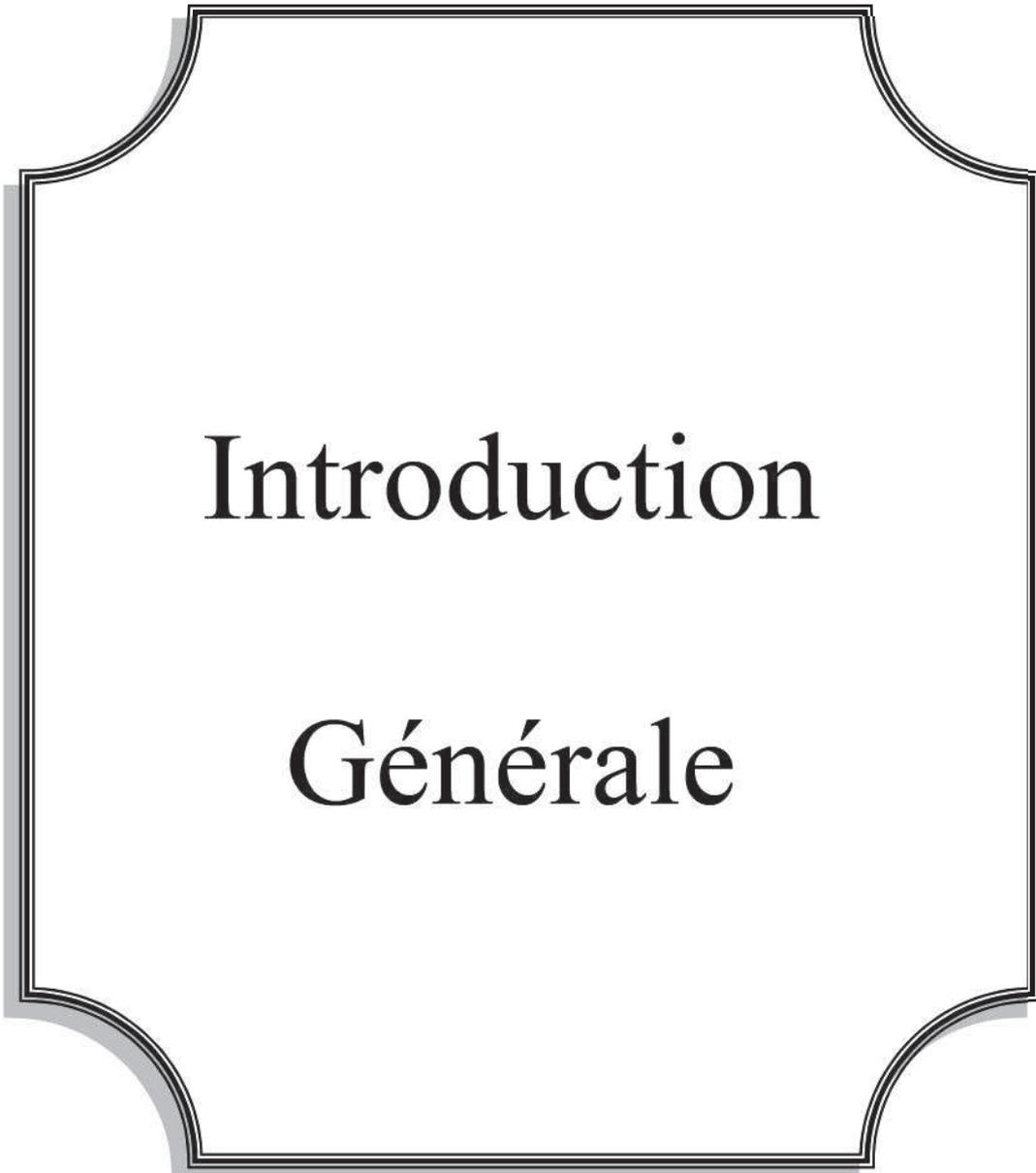
<b>J</b>	Flux absorbé par la végétation (photosynthèse)	$(j. m^{-2} .s^{-1})$
<b>R<sub>g</sub></b>	Rayonnement solaire global.	$(j. m^{-2} .s^{-1})$
<b>a</b>	Albédo (coefficient donné suivant lieu géographique)	
<b>R<sub>t</sub></b>	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre la surface du sol et la coute céleste	$(j. m^{-2} .s^{-1})$
<b>ε<sub>sol</sub></b>	L'émissivité du sol.	$(W m^{-1} °K^{-1})$
<b>T<sub>surfsol</sub></b>	Température de la surface du sol.	$(K^0)$
<b>T<sub>ciel</sub></b>	Température de ciel.	$(K^0)$
<b>V<sub>vent</sub></b>	Vitesse de vent.	$(m/s)$
<b>E</b>	Flux massique de vapeur d'eau.	$(j. m^{-2} .s^{-1})$
<b>K<sub>E</sub></b>	Coefficient de transfert de masse.	
<b>M<sub>w</sub></b>	Masse molaire de la vapeur d'eau.	$Kg \backslash mole$
<b>R</b>	Constante des gaz parfaits.	$J/mole.K$
<b>P<sub>vs</sub></b>	Pression de vapeur saturante.	$Pa$
<b>P<sub>v</sub></b>	Pression de vapeur.	$Pa$
<b>HR</b>	Humidité relative	$( \%)$

# Index des figures

Fig. (I-1) : Profondeur de pénétration thermique en fonction de la nature du sol	10
Fig. (I-2) : Température moyenne à la surface du sol suivant la nature de sol	10
Fig. (I-3) : Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol	11
Fig. (I-4) : Variation de Température en fonction de la profondeur dans le sol	11
Fig. (I-5) : Géométrie de l'échangeur Air-Sol étudié	12
Fig. (I-6) : Variation de la température du sol durant toute l'année	12
Fig. (I-7): Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes diffusivité thermique	13
Fig. (I-8):Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes Profondeurs	13
Fig. (I-9) : Variation de l'efficacité en fonction de la longueur du tube durant toute l'année	14
Fig. (I-10): Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour différents débits	15
Fig. (I-11): Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour différents débits	15
Fig. (I-12): Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juin	16
Fig. (I-13): Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juillet	16
Fig. (I-14) Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne	17
Fig. (I-15): Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne quotidienne en fonction de la profondeur	17
Fig. (I-16): Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction du diamètre du tube	17
Fig. (I-17):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	17
Fig. (I-18) : Flux thermique récupérable en fonction de la différence de température air/sol et du débit volumique	18
Fig. (I.19) : Amplitude relative des variations de température en fonction de la profondeur pour un cycle annuel et journalier	19

Fig. (I-20) : Evolution annuelle de la température en surface et en profondeur, pour un cycle de moyenne de 11°C et d'amplitude crête à crête de 25°	19
Fig. (I-21) : Evolution annuelle de la différence de température entre la surface et la profondeur pour un cycle annuel	20
Fig. (I-22) : Relevés des températures par la technique classique	21
Fig. (I-23) : Relevés des températures par la nouvelle technique	22
Fig. (II-1) : Différents types de flux	24
Fig. (II -2) : Températures moyennes du sol en fonction de la profondeur dans un site au centre de la France	30
Fig. (II-3) : Nature du sol	31
Fig. (II-4) : Coefficient d'échange convectif de l'air en fonction de la vitesse , à 10°C, pour un tube cylindrique	35
Fig. (III-1): Différent types de flux	39
Fig. (III-2): Modélisation du transfert conductif dans le sol	43
Fig. (III-3) : Variation de température à profondeur différentes au cours de temps	45
Fig. (III-4) : Variation de température surf sol-air au cours de temps	46
Fig. (III-5) : Variation de flux de chaleur au cours de temps	46
Fig. (III-6):Variation de température à profondeur différentes au cas de varie température (24h)	47
Fig. (III-7) : Variation de température surf sol-air au cas de varie température (24h)	47
Fig. (III-8) : Variation de flux de chaleur cas de varie température (24h)	48
Fig. (III-9):Variation de température à profondeur différentes au cas de varie la $V_{vent}$ et HR	48
Fig. (III-10) : Variation de température surf sol-air au cas de varie la $V_{vent}$ et HR	49
Fig. (III-11) : Variation de flux de chaleur cas de varie la $V_{vent}$ et HR	49
Fig. (III-12) Variation de température à profondeur différentes au cas de varie le flux de chaleur	50
Fig. (III-13) : Variation de température surf sol-air au cas de varie le flux de chaleur	50
Fig. (III-14) : Variation de flux de chaleur cas de varie le flux de chaleur	51
Fig. (III-15) Variation de température à profondeur différentes au cas de varie la profondeur (3m)	51
Fig. (III-16) : Variation de température surf sol-air au cas de varie la profondeur(3m)	52

Fig. (III-14) : Variation de flux de chaleur cas de varie la profondeur(3m)	52
Fig. (III-18) Variation de température à profondeur différentes au cas de varie la température de sol ( $23C^0$ )	53
Fig. (III-19) : Variation de température surf sol-air au cas de vari la température de sol ( $23C^0$ )	53
Fig. (III-20) : Variation de flux de chaleur cas de varie la température de sol ( $23C^0$ )	54
Fig. (IV-1): Schéma de la géométrie de l'échangeur	57
Fig. (IV-2) : Emplacement des deux échangeurs thermiques	57
Fig. (IV-3): Emplacement du premier échangeur (échangeur bas) longueur (47.63m)	58
Fig. (IV-4) : Emplacement du second échangeur (échangeur haut) longueur (44.21m)	58
Fig. (IV.5): Les instruments des Mesures	59
Fig. (IV-6) : Evolution de la température (22-04-13)	60
Fig.(IV-7) Evolution temporelle du rayonnement solaire le 22-04-2013	60
Fig. (IV-8) : Evolution de la température (23-04-13)	61
Fig. (IV-9) Evolution temporelle du rayonnement solaire le 23-04-2013	61
Fig. (IV-10) : Evolution de la température (29-04-13)	62
Fig. (IV-11) Evolution temporelle du rayonnement solaire le 29-04-2013	62
Fig. (IV-12) : Evolution de la température (02-05-13)	63
Fig. (IV-13) Evolution temporelle du rayonnement solaire le 02-05-2013	63
Fig. (IV-14) : Evolution de la température de sortie pour deux vitesses différentes (v=3 et v=4,5 m/s)	64
Fig. (IV-15) : Evolution de la température de sortie pour deux vitesses différentes (v=3,5 et v=5 m/s)	64



Introduction

Générale

### **Introduction générale :**

L'inertie thermique du sol fait qu'il maintient une température stable à certaines profondeurs quelle que soit la température de l'air à la surface. Cette propriété permet de l'exploiter pour la climatisation ou le chauffage. La température du sol influe principalement sur les performances d'un tel phénomène du fait que le sol, à une certaine profondeur devient le facteur primordial pour les échanges thermiques entre l'air qui circule à l'intérieur de l'échangeur et le milieu qui l'entoure. Le phénomène du rafraîchissement par la géothermie s'appuie principalement sur le fait qu'en été la température du profond du sol étant basse par comparaison à celle de l'air ambiant. 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 principal aux échanges thermiques qui ont lieu entre l'air qui circule à l'intérieur de l'échangeur et le milieu qui l'entoure.

Dans ce travail, on a mené en premier lieu, une étude de recherche bibliographique sur les travaux menés en vue de suivre l'évolution de la température du sol de sa surface à différentes profondeurs et l'influence de certains paramètres thermo-physique, structurels et d'environnement sur la température du sol. Ensuite une étude théorique qui décrits les phénomènes de transfert de chaleur qui ont lieu dans le sol. Puis les paramètres qui influent sur le comportement du fonctionnement d'un puits canadien.

Ensuite une étude numérique pour l'établissement d'un modèle qui traduit le mieux l'évolution de la température du sol. L'objectif est de calculer la température du sol à n'importe quelle profondeur et pour n'importe quel jour de l'année à travers la modélisation numérique pour simuler sa température selon divers contextes.

Enfin une étude expérimentale concernant l'évolution de la température de sortie d'un échangeur air sol installé à l'Université de Biskra.

# Chapitre I

## Etude

### Bibliographique

**I-1: Introduction :**

Dans le but de situer notre travail par rapport aux travaux effectués on essaye **dans ce** chapitre de présenter les principaux travaux rencontrés dans la littérature qui sont menés dans le même domaine.

**I-2/ Analyses des travaux effectués :**

Les travaux menés rencontrés dans la littérature en relation avec notre travail sont résumés comme suit :

**M. Benhammou et B. Draoui : [1] :****Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar - Effet de la nature du sol**

Dans ce travail est étudiée l'influence de la nature du sol sur la température en profondeur du sol, ainsi que sur le déphasage et la profondeur de pénétration du signal de température. Dans ce contexte, est réalisé cette étude sous les conditions météorologiques de la ville d'Adrar.

Les résultats obtenus nous indiquent que la profondeur de pénétration annuelle de même que le déphasage sont beaucoup influencés par la nature du sol, alors que la température moyenne de la surface du sol y est insensible

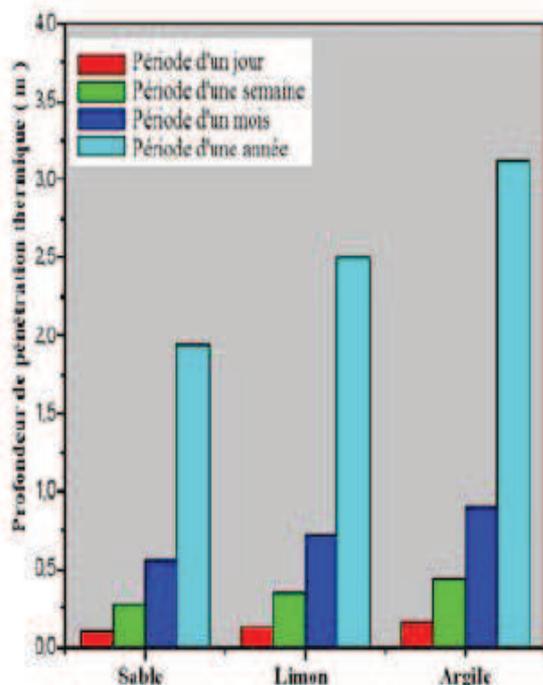


Fig. (I.1) : Profondeur de pénétration Thermique en fonction de la nature du sol

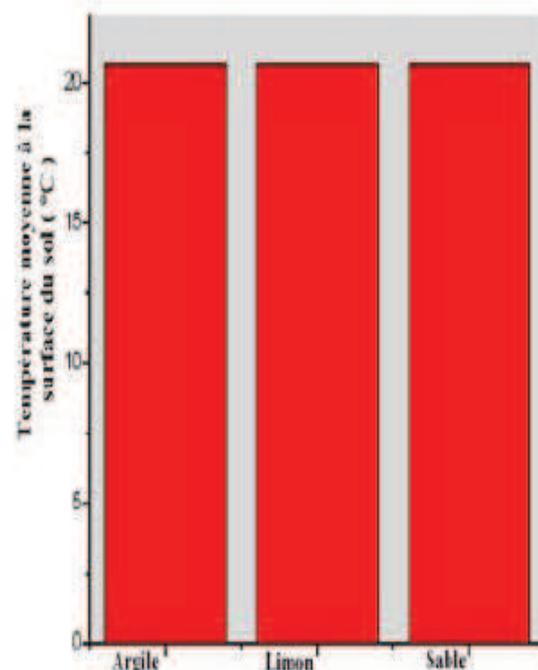


Fig. (I.2): Température moyenne à la surface du sol suivant la nature de sol

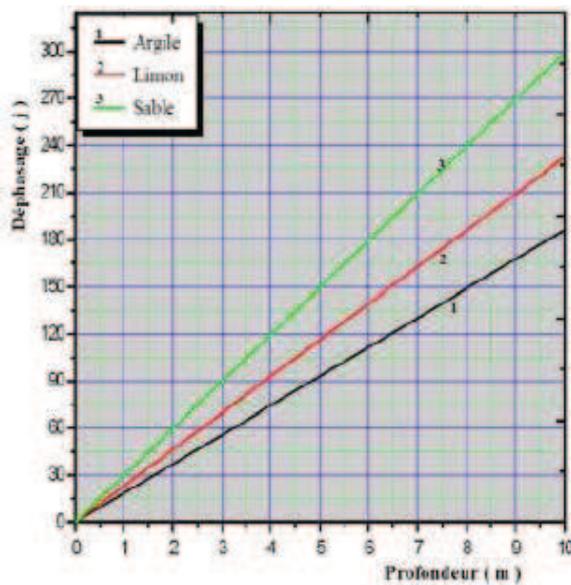


Fig. (I.3) : Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol

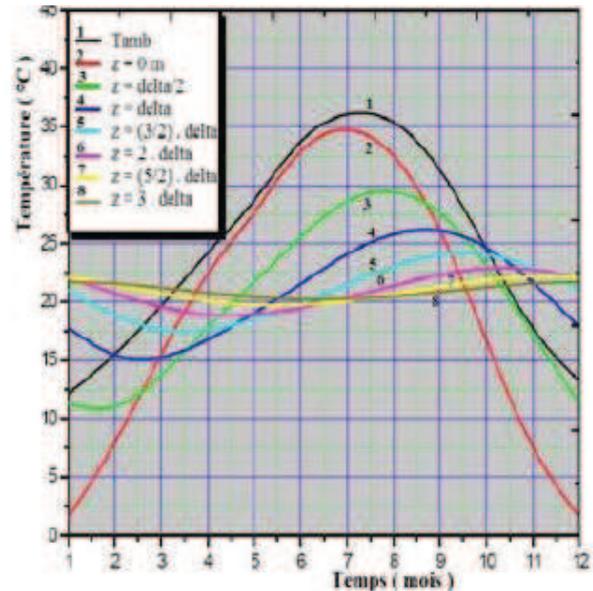


Fig. (I.4) : Variation de Température en fonction de la profondeur dans le sol

Quant à l'évolution du déphasage selon la profondeur, les résultats illustrés dans la figure 3 nous indiquent que plus on s'enfonce dans le sol, plus le déphasage devient important. Afin que les résultats soient indépendants de la nature du sol, on a pris, dans la figure 4 comme unité de longueur la profondeur de pénétration annuelle. L'évolution de la température du sol au cours d'une année en fonction de la profondeur dans le sol montre que l'amplitude du signal de température décroît quand la profondeur augmente et au-delà d'une distance valant deux fois la profondeur de pénétration, la température du sol n'a plus la forme d'une sinusoïde et se stabilise autour d'une certaine valeur

**B. Mebarki et Al [2] :**

### **Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar**

Ce travail est une étude des performances d'un échangeur air-sol qui a été entreprise par voie de modélisation analytique. Ils ont premièrement validé le modèle de la température de sol et la température de l'air dans l'échangeur, puis Ils ont analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir: la profondeur, le diamètre et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur.

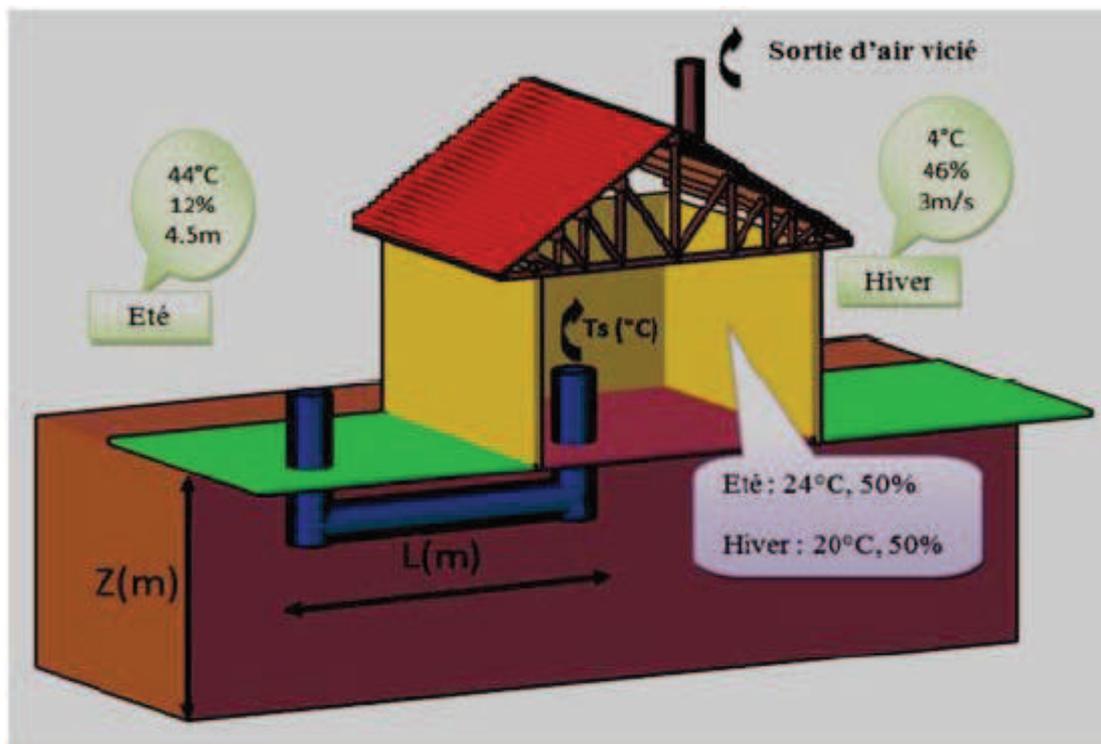


Fig. (I.5) : Géométrie de l'échangeur Air-Sol étudié

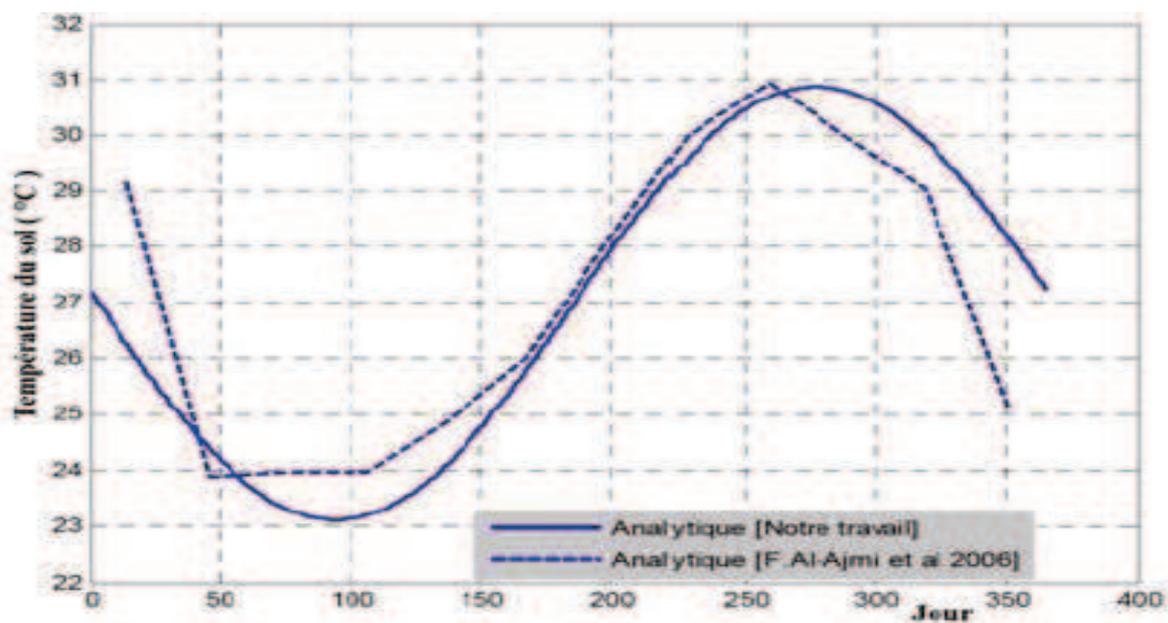


Fig. (I.6) : Variation de la température du sol durant toute l'année

La figure 6 montre un exemple de validation de cette dernière. Les valeurs qui ont servi à cette comparaison sont les valeurs expérimentales et analytiques d'Al Ajmi et al. 2006 .La comparaison montrent une très bonne concordance avec une erreur de 1 %, c'est-à-dire un écart de 1°.

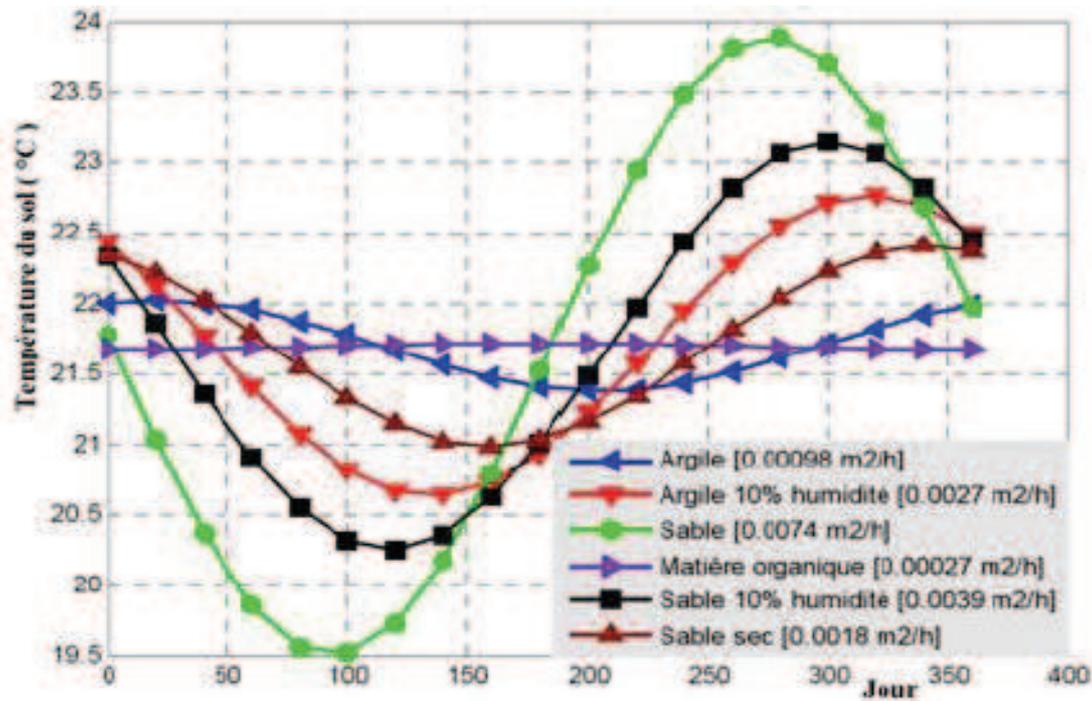


Fig. (I.7): Variation de la température du sol durant toute l’année pour différentes Diffusivité thermique

Pour mieux choisir le type du sol, la figure 7 illustre la variation de la température du sol durant toute l’année pour différentes diffusivités thermiques. On constate une variation sinusoïdale pour toutes les diffusivités testées, on remarque aussi qu’au fur et à mesure que la diffusivité augmente, la température du sol augmente.

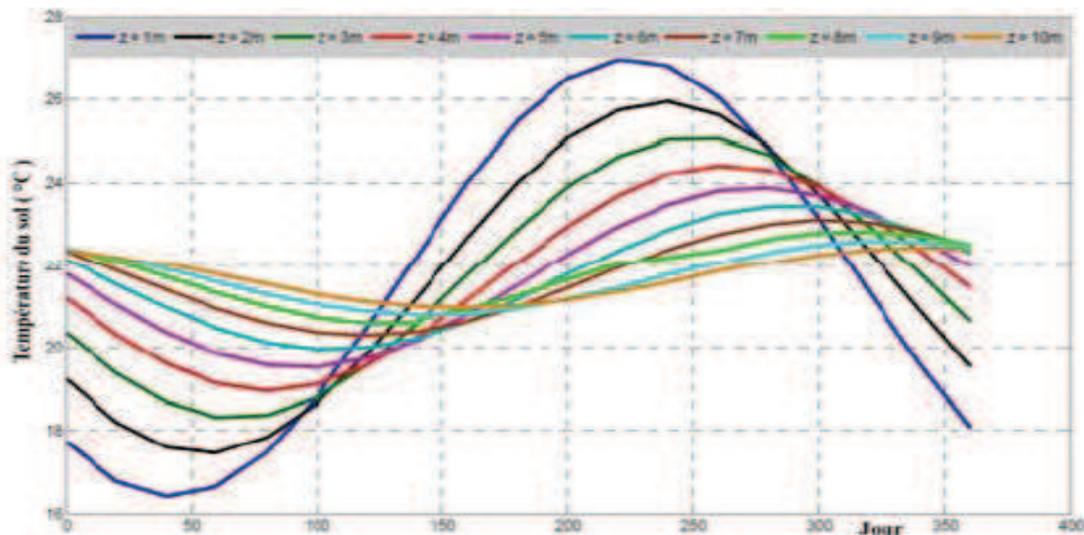


Fig. (I.8) : Variation de la température du sol durant toute l’année pour différentes Profondeurs

La figure 8 montre la variation de la température du sol en fonction des jours de l'année pour différentes profondeurs. Il est clair que la température du sol suit une variation sinusoïdale. On constate qu'en pénétrant au sol la température diminue.

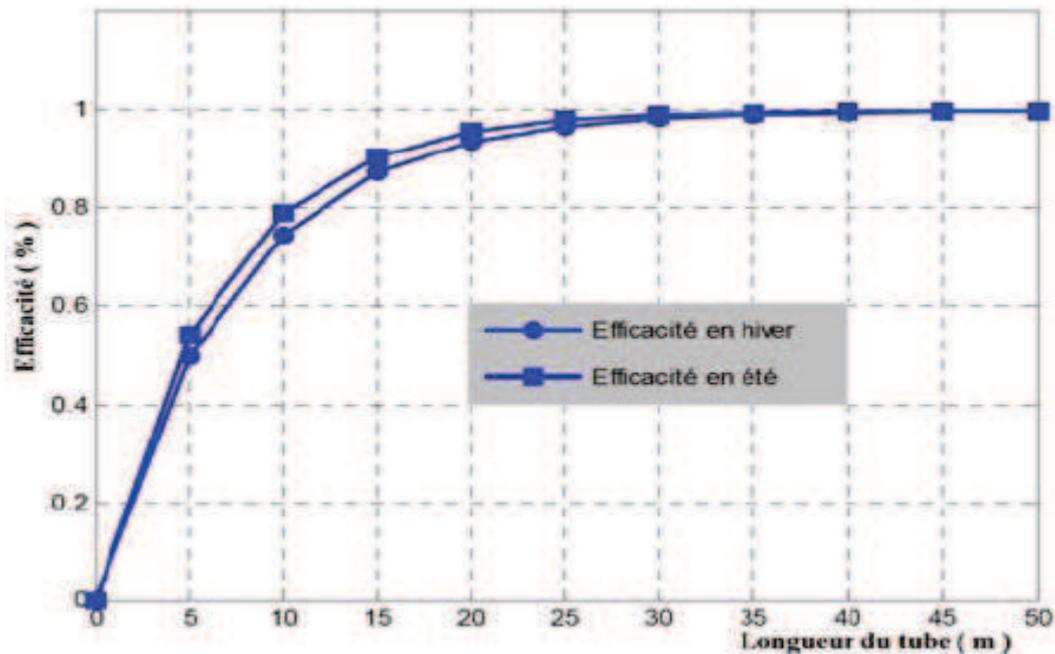


Fig. (I. 9) : Variation de l'efficacité en fonction de la longueur du tube durant toute l'année

La figure 9 représente l'évolution de l'efficacité de l'échangeur en fonction de sa longueur. On constate que l'efficacité augmente d'une manière logarithmique avec la longueur. A partir de 30 m, elle devient maximale et demeure constante. Le phénomène est le même, été comme en hiver. Ces résultats traduisent le bon fonctionnement du puits.

**N. Moumni et al [3]:**

**Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra(2010)**

A travers la modélisation et l'expérimentation, ils ont essayé dans ce projet pilote d'évaluer les performances d'un échangeur air/sol dit 'puits canadien'. Le modèle analytique comparé aux résultats expérimentaux traduit l'influence des propriétés du sol, de la nature du conduit et la localisation du site 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 en été. L'écart avec la température ambiante détermine les possibilités offertes à la technique du rafraîchissement par la géothermie pour être utilisée dans les sites de climats variés en Algérie.

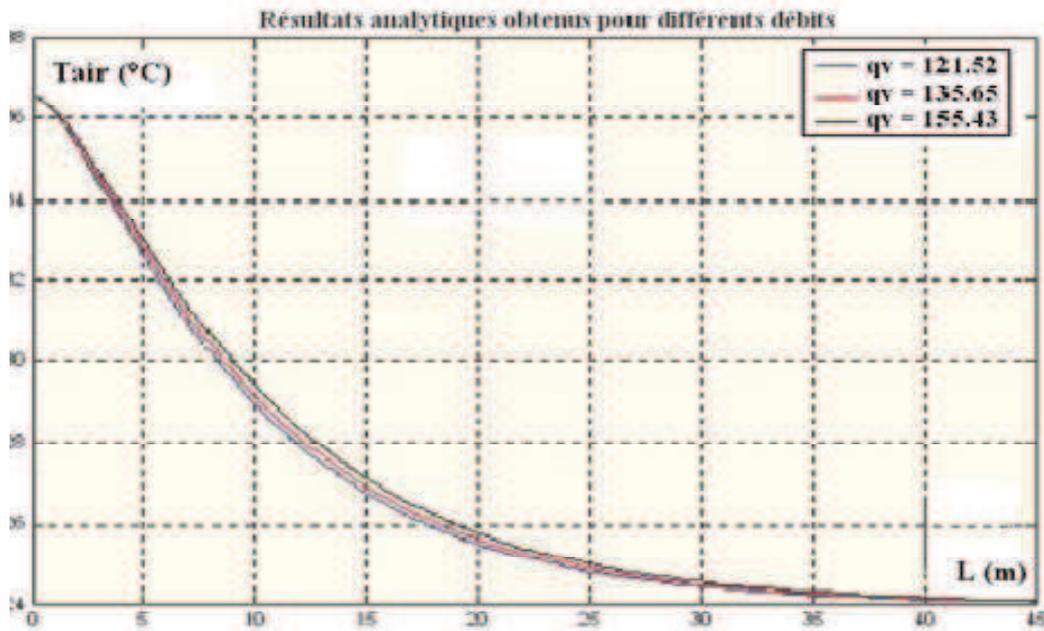


Fig. (I.10): Variation de la température de l'air le long de l'échangeur pour différents débits

Les courbes qui suivent montrent l'évolution selon le modèle analytique l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie. On remarque que la température de l'air décroît de l'entrée de l'échangeur jusqu'à la sortie.

Un écart important (environ 12 °C) est enregistré. Cet écart correspond à une distance de l'entrée égale à 35 m. Au-delà de cette longueur, aucune chute remarquable n'est à noter.

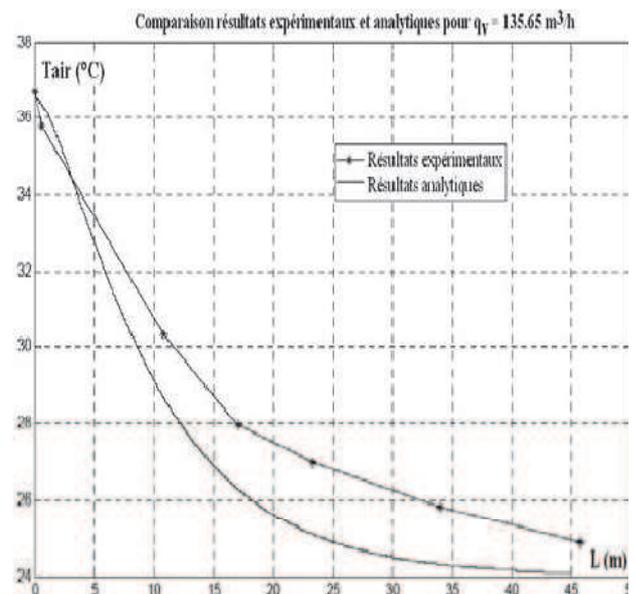
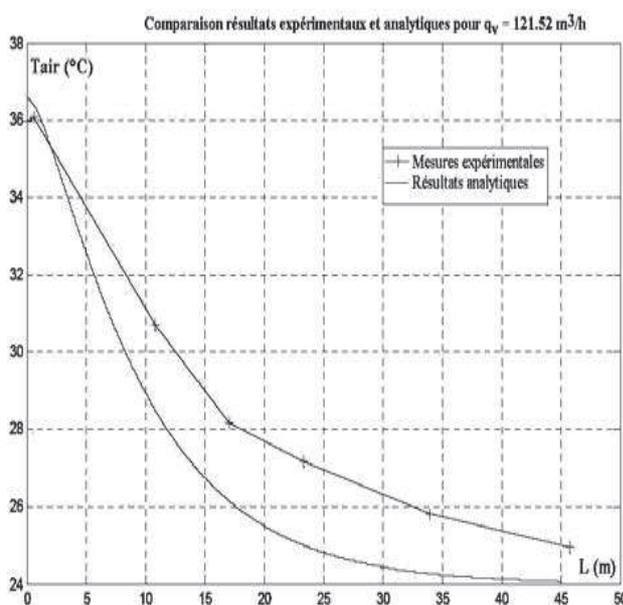


Fig. (I.11): Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur pour différents débits

Les résultats obtenus ont montré l'existence d'un écart significatif entre le modèle théorique et les résultats expérimentaux. Ceci est dû aux hypothèses considérées et principalement aux valeurs approximatives des propriétés du matériau du conduit et celles du sol.

**M. Benhamou et al[4] :**

**Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie.**

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 ce travail, est présentée une étude effectuée sur un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments. Les résultats obtenus sont très encourageants et nous indiquent que cette technique bon marché peut couvrir une bonne partie des besoins en matière de climatisations domestiques. Cette étude a permis également d'examiner l'influence des paramètres de l'échangeur sur son efficacité moyenne quotidienne et sur la température de l'air refroidi en sortie de l'échangeur.

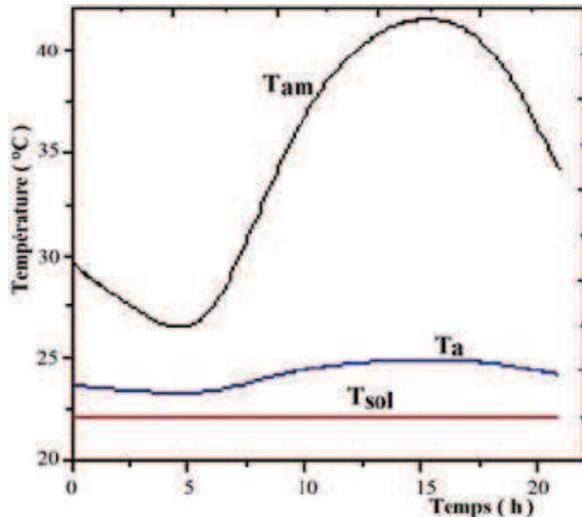


Fig. (I.12): Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi Pour le mois de juin

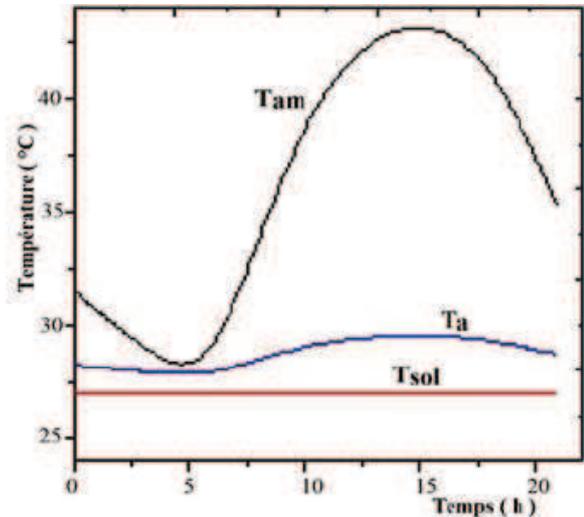


Fig. (I.13): Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juillet

Les écarts de température correspondants entre l'air ambiant et l'air refroidi en sortie de l'échangeur sont respectivement: 16.5 °C et 8.8 °C. Cela s'explique par le fait que lorsque la température de l'air ambiant est plus grande que celle du sol, les pertes thermiques vers les parois de tube sont grandes aussi. Ce qui fait que sa température s'abaisse considérablement.

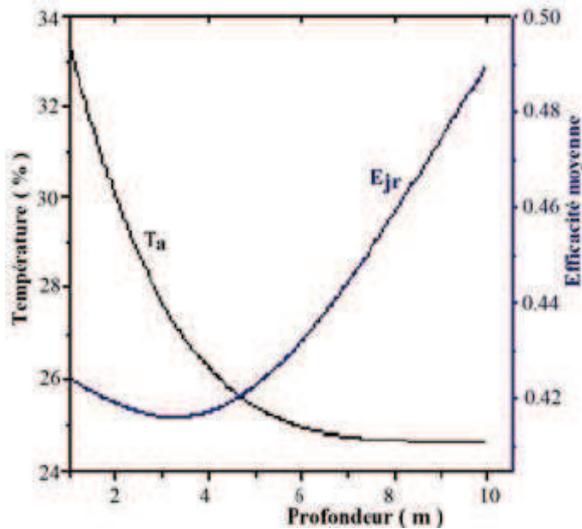


Fig. (I.14) Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne quotidienne en fonction de la profondeur

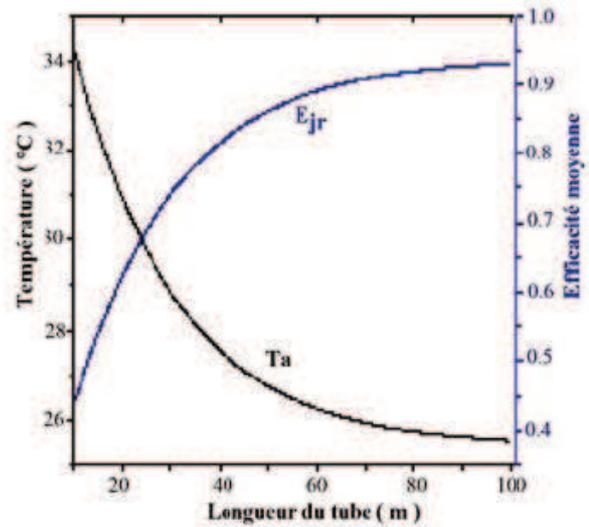


Fig. (I.15): Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne quotidienne en fonction de la

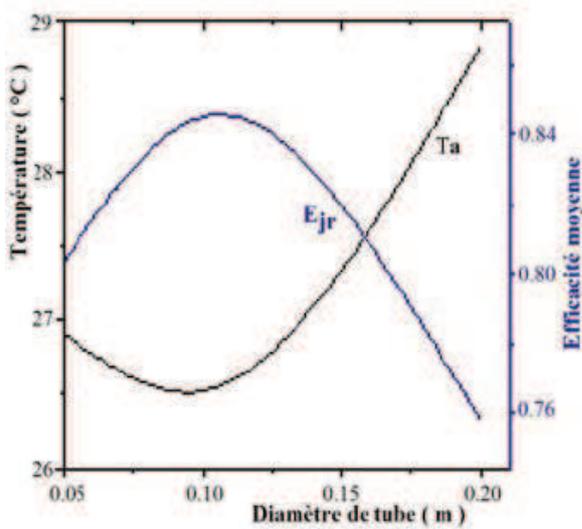


Fig. (I.16): Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction du diamètre du tube

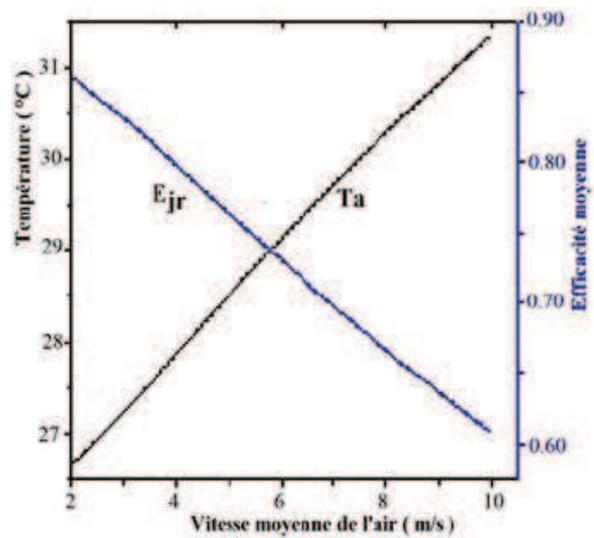


Fig. (I.17): Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction de la vitesse moyenne de l'air dans le tube

Pour une profondeur de 3 m, la température de l'air refroidi obtenue à midi est de 27.6 °C. Mais elle est égale à 25°C pour une profondeur de 6m. (Figure I.14). En ce qui concerne la variation de l'efficacité moyenne quotidienne en fonction de la profondeur, on constate qu'elle diminue puis elle remonte. Quant à l'influence de la longueur du tube, la figure (I. 15)

illustre que quand la longueur s'accroît, la température de l'air refroidi s'abaisse, tandis que l'efficacité moyenne quotidienne augmente. Le diamètre du tube influence beaucoup le fonctionnement de l'échangeur (Fig. I.16). En effet, la température de l'air refroidi décroît puis elle augmente. Son minimum est obtenu pour un diamètre égal à 10 cm. Cependant, l'efficacité moyenne journalière a l'allure d'une cloche : elle remonte puis elle redescend et elle admet un maximum de 87% correspondant à un diamètre de 10 cm. Pour ce qui est de l'effet de la vitesse moyenne de l'air sur la température de l'air refroidi, la figure 17 montre que la température de l'air refroidi augmente linéairement en fonction de la vitesse d'écoulement alors que l'efficacité quotidienne diminue linéairement aussi.

**David Amitrano:[5]**

### Éléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol dit puits canadien

L'utilisation d'un échangeur air/sol, système appelé communément « puits canadien » en France et parfois « puits provençal » lorsqu'il sert à 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. En hiver, l'air est réchauffé avant de pénétrer dans la maison ; en été il est rafraîchi. Il s'agit ainsi du système de géothermie le plus simple qui soit, avec une consommation électrique réduite à la celle du ventilateur utilisée pour la circulation de l'air.

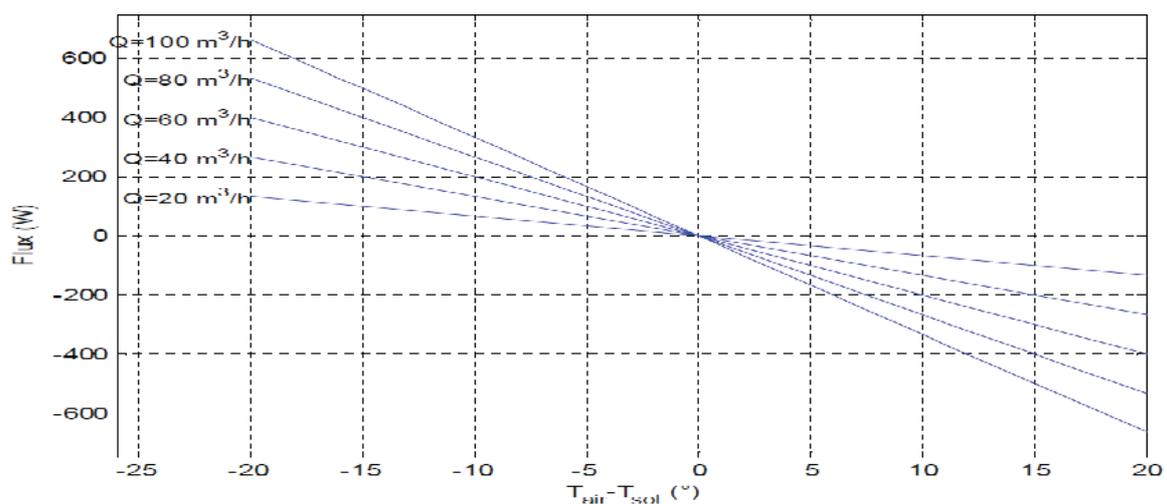


Fig. (I.18) : Flux thermique récupérable en fonction de la différence de température air/sol et du débit volumique.

La figure(I.18) montre l'effet du débit et de la différence de température entre le sol et l'air sur le flux thermique. Pour les périodes où la température du sol est supérieure à celle de l'air, le flux est positif (réchauffement du bâtiment) Dans le cas contraire, le flux est négatif (rafraîchissement du bâtiment).

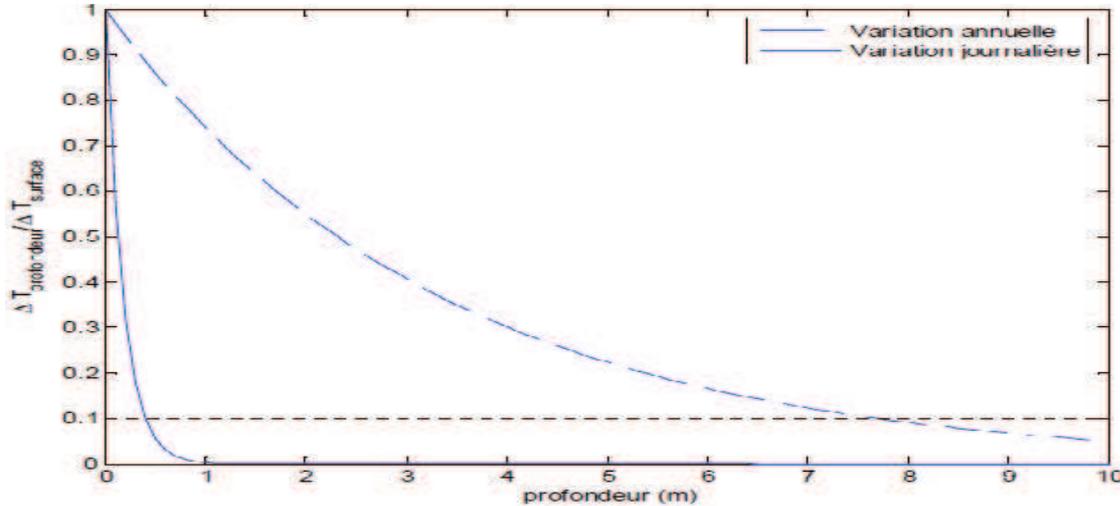


Fig. (I.19) : Amplitude relative des variations de température en fonction de la profondeur pour un cycle annuel et journalier.

La (Fig. I.19) montre la décroissance de l'amplitude des variations de température en profondeur ( $\Delta T_{prof}$ ) rapportée à l'amplitude en surface ( $\Delta T_{surf}$ ) pour une variation de température annuelle ou journalière.

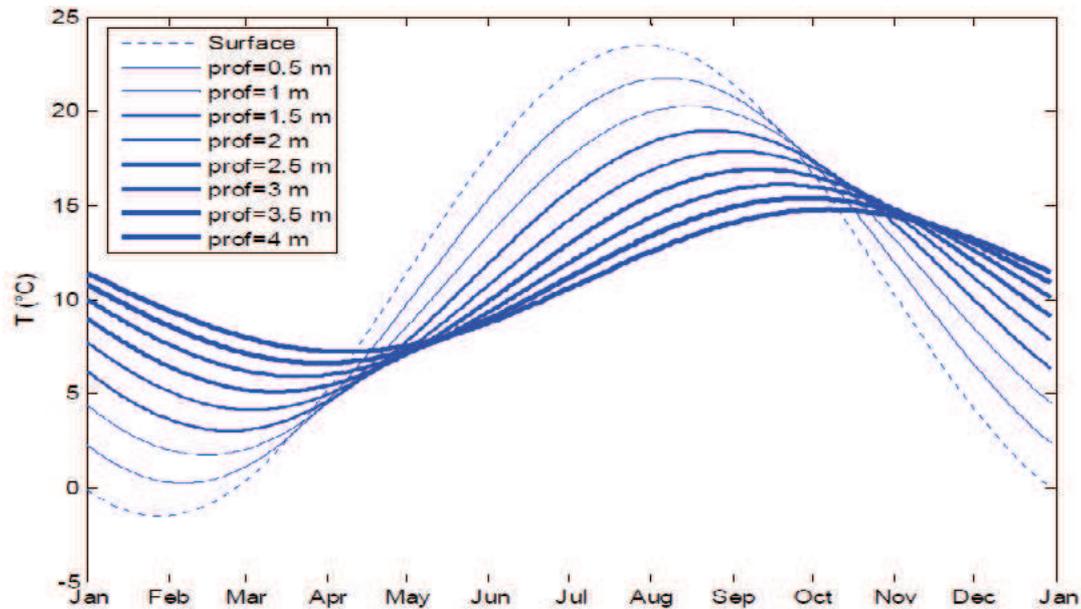


Fig. (I.20) : Evolution annuelle de la température en surface et en profondeur, pour un cycle de moyenne de 11°C et d'amplitude crête à crête de 25°C.

La Figure(I.20) montre les températures en surface et à différentes profondeurs pour un cycle annuel de température, de moyenne de 11°C et d'amplitude crête à crête de 25°C. Avec la profondeur, on observe bien une diminution de l'amplitude des variations et une augmentation du déphasage. A 4 m de profondeur le déphasage atteint 2 mois.

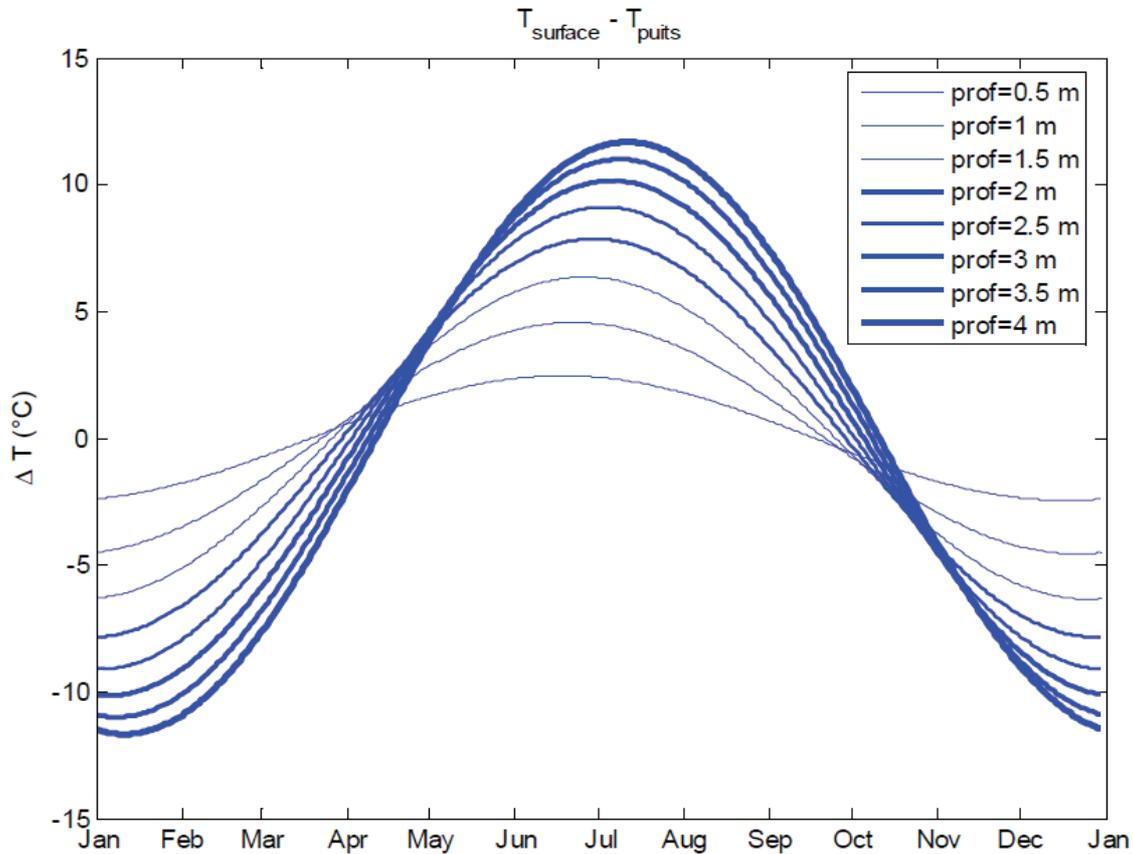


Fig. (I .21) : Evolution annuelle de la différence de température entre la surface et la profondeur pour un cycle annuel.

Le flux thermique récupérable par un échangeur air/sol est proportionnel à la différence de température entre l'air de surface et le sol. La Figure(21) montre l'évolution de cette différence au cours de l'année, pour différentes profondeurs d'enfouissement de la gaine.

**Mohammed Rhachi et al : [6]**

#### **Etude d'une nouvelle technique de mesure des températures dans le sol**

La mesure des températures dans le sol est généralement réalisée en implantant des sondes à différentes profondeurs. Pour la mise en place de ces sondes dans le sol et afin de résister aux contraintes de cisaillement, des piquets rigides servent de supports. L'utilisation de ces piquets, généralement en métal donc très conducteurs, induit certaines perturbations

thermiques au niveau des différentes couches du sol. Pour minimiser ce genre de perturbations, une étude qualitative d'une nouvelle technique de mesure de la température est présentée. Le principe de cette technique consiste à remplacer le piquet de la technique classique par une tige fendue longitudinalement, amovible, pouvant être retirée après la mise en place des sondes. Mis à part l'aspect thermique, des tests mécaniques sur l'efficacité du dispositif expérimental de la nouvelle technique sont réalisés. Une étude comparative entre les deux techniques a été menée afin de relever l'influence des piquets, généralement utilisés par la technique classique, sur les résultats de mesures. L'étude s'intéresse particulièrement aux profondeurs de 20, 30 et 50 cm, et met en évidence les écarts en température et en déphasage enregistrés par les deux techniques

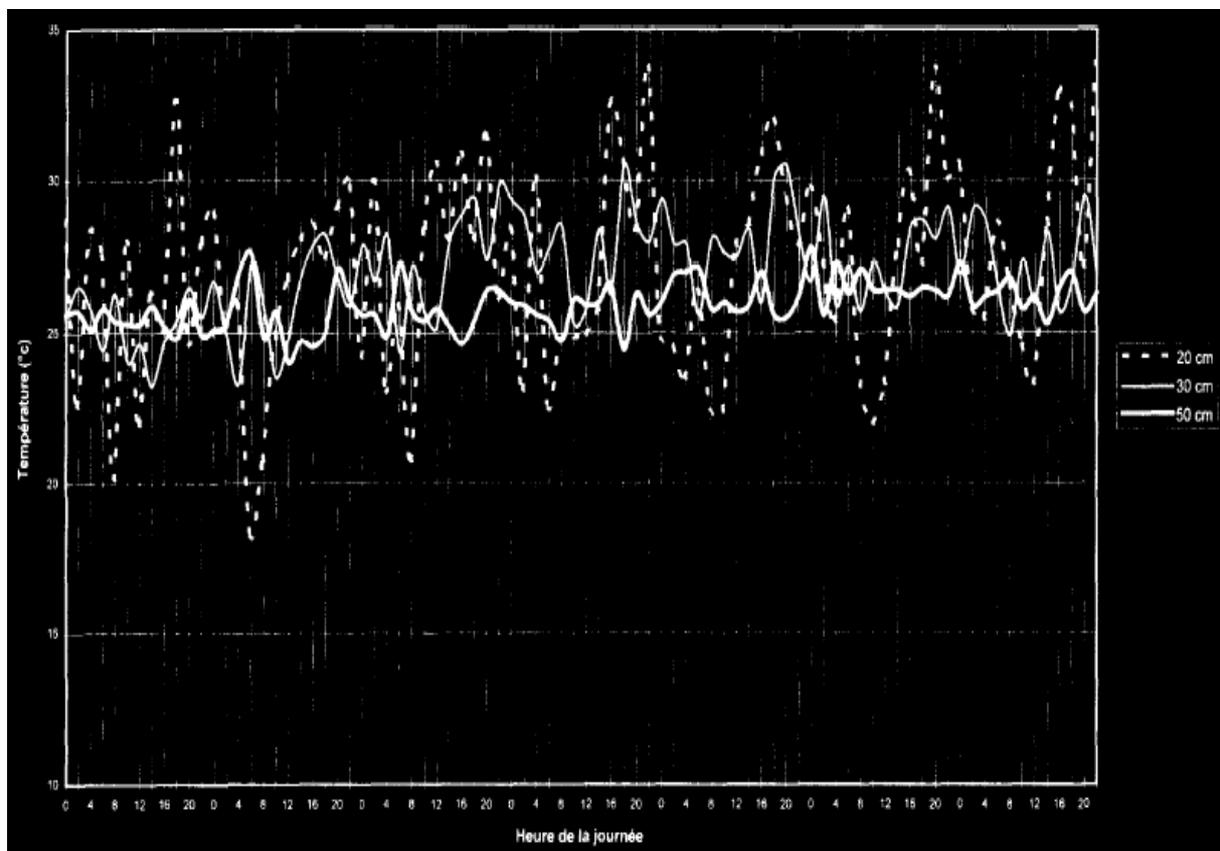


Fig. (I.22) : Relevés des températures par la technique classique.

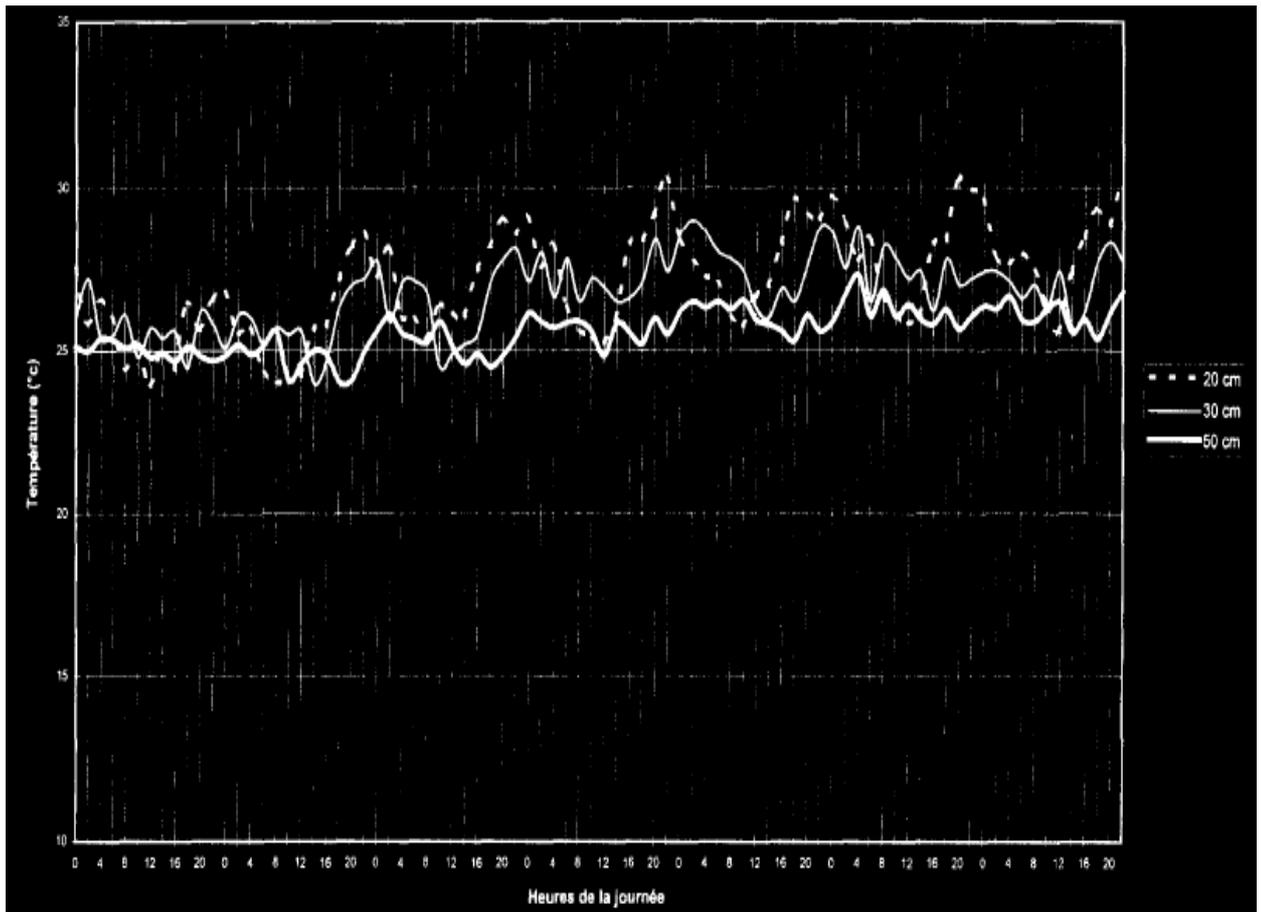
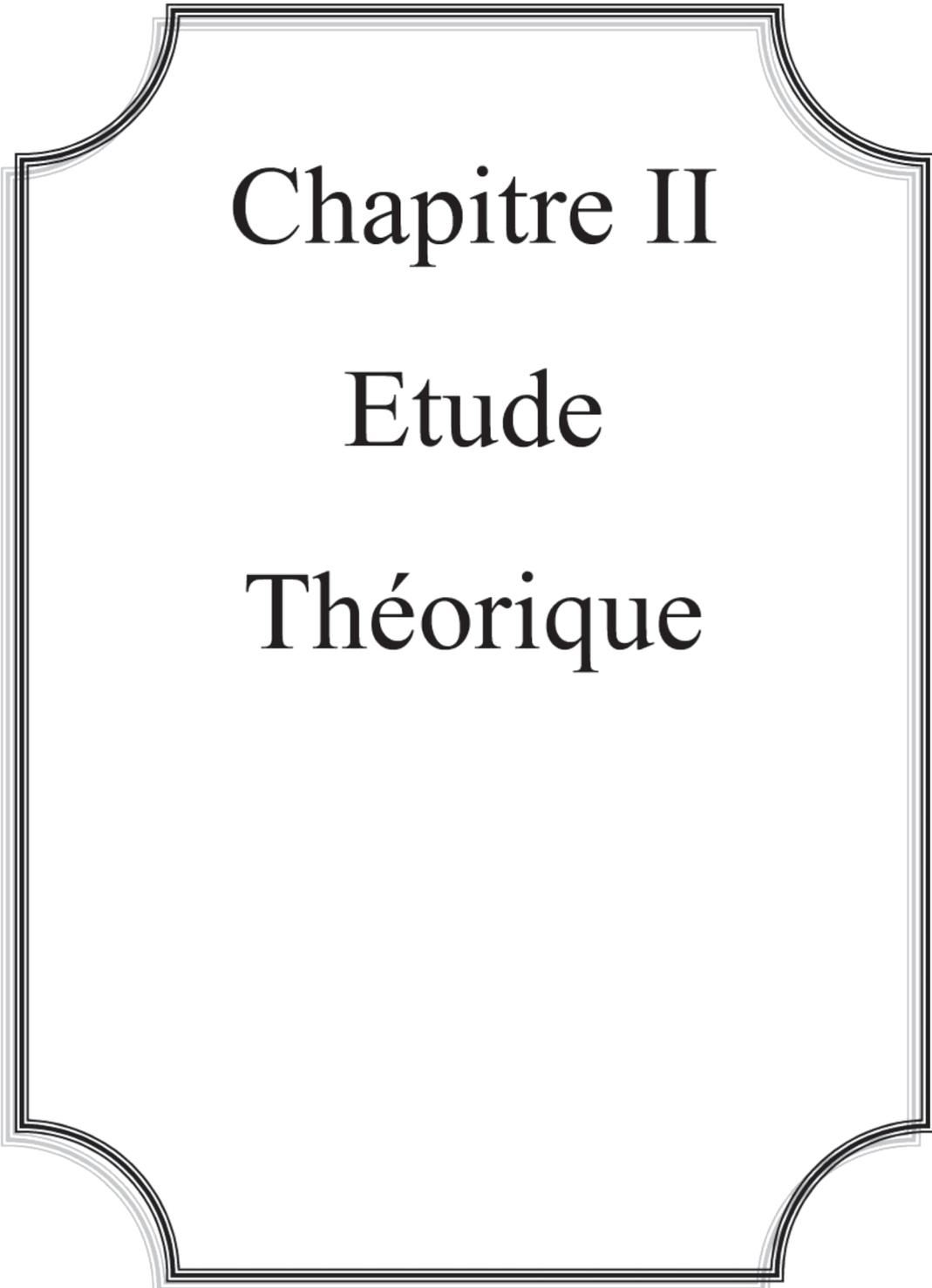


Fig. (I-23) : Relevés des températures par la nouvelle technique.

Il est remarqué aussi que les températures mesurées par la technique classique sont, durant la journée, généralement supérieure à celles relevées par la technique nouvelle (présence d'ensoleillement) alors que durant la nuit, les températures mesurées par la TC sont inférieures à celles de la TN. Ces écarts de températures montrent bien l'influence du piquet sur les valeurs des températures mesurées (l'influence des caractéristiques thermo physiques du piquet sur les apports de chaleur à différents profondeurs dans le sol)



Chapitre II

Etude

Théorique

## II-1-Introduction :

L'évaluation des flux de chaleur échangés entre le sol et le milieu environnant est donnée par l'intermédiaire des valeurs des températures de l'air ambiant et celle du sol. La température dans le sol est une donnée très importante qui influe sur les différents flux régissant entre l'atmosphère et la surface du sol (flux du rayonnement net, flux conductif dans le sol, chaleur latente et flux convectif), Figure 1.

Le bilan d'énergie à la surface du sol suit la loi de conservation de l'énergie. Une partie dite l'énergie net qui arrive à la surface sert à réchauffer le sol par conduction, une autre à l'évaporation de l'eau son changement de température ( $L_V E$ ), une autre va dans l'échange convectif sol-air ( $H$ ).

La surface du sol absorbe le rayonnement solaire selon son coefficient d'albédo : il s'agit d'un apport énergétique majeur dont l'effet sur la température du sol est important, bien que souvent négligé dans les rapports consultés.

Un modèle qui tient compte de tous les flux est établi. Par la suite une démarche numérique est faite dans le but de suivre l'évolution spatiale et température du sol selon diverses sollicitations. Ceci est très important pour les applications de l'énergétique, génie civil et même dans le domaine de l'agriculture.

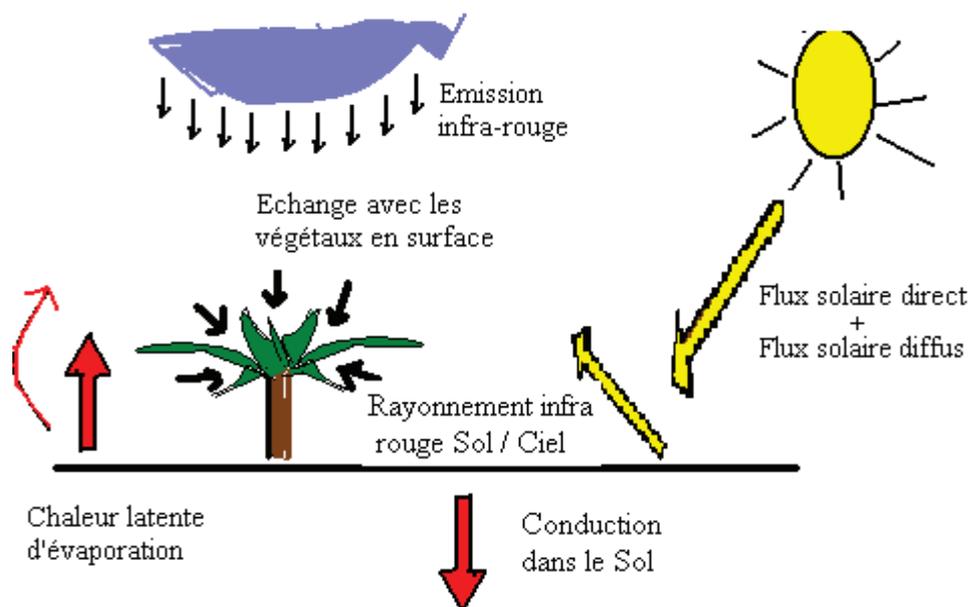


Fig. (II-1) : Différents types de flux [10]

## II-2- Rappels sur les modes de transferts de chaleur:[7]

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

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

### II-2-1 Conduction:

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

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

En absence d'hypothèses simplificatrices, la propagation de la chaleur est un phénomène tridimensionnel qui répond à la loi de Fourier sous la forme générale:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q^m \quad (\text{II-1})$$

$\rho$  est la masse volumique ( $kg/m^3$ ),

$\lambda$  est la conductivité thermique du matériau ( $W/Km$ ),

$C_p$  est la capacité thermique massique ( $J/kgK$ ),

$q^m$  est la densité volumique du flux développé dans l'échantillon ( $W/m^3$ ).

En faisant les hypothèses:

$\lambda$  constant,

pas de puissance dissipée  $q_m = 0$

régime permanent  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$

flux monodimensionnel  $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$

la forme simplifiée de telle loi qui dit que la valeur instantanée du débit calorifique est égal à:

$$\varphi = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II-2})$$

Avec:

$\varphi$  Le flux de chaleur transmis par conduction ( $W$ )

$S$  Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ ).

### II-2-2-Transfert de chaleur par convection:

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides dans lesquels il est généralement prépondérant.

#### II-2-2-1- Convection naturelle et forcée:

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

- La convection libre ou naturelle: le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

- La convection forcée: le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

#### II-2-2-3- Calcul du coefficient d'échange par convection h:

On exprime le flux thermique échangé par convection par:

$$\varphi = h S(\theta_m - \theta) \quad (\text{II-3})$$

$h$  est appelée coefficient d'échange par convection. ( $W/m^2C^\circ$ )

$\theta_m - \theta$  différence de la température de la paroi et du fluide.

En convection forcée En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange  $h$  par convection est indépendant de la différence de la température de la paroi et du fluide mais il dépend des 6 grandeurs suivantes:

$U_m$  vitesse moyenne du fluide

$\rho$  masses volumiques du fluide

$C_p$  chaleur spécifique du fluide

$\mu$  viscosité dynamique du fluide

$\lambda$  conductivité thermique du fluide

$D$  dimension caractéristique de la surface d'échange.

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants:

$$N_U = \frac{h D}{\lambda} \quad \text{Nombre de Nusselt} \quad (\text{II-4})$$

$$R_e = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds} \quad (\text{II-5})$$

$$P_r = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad \text{Nombre de Prandtl} \quad (\text{II-6})$$

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélations mathématiques  $Nu = f(Re, Pr)$  qui permettent de calculer  $h$  par:

$$h = \frac{N_U \lambda}{D} \quad (\text{II-7})$$

$R_e$  le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide

$R_e < 2000$  écoulement laminaire

$2000 < R_e < 3000$  écoulement intermédiaire

$R_e > 3000$  écoulement turbulent

$Pr$  le nombre de Prandtl caractérise les propriétés thermiques du fluide

$Nu$  le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et

### II-2-3-Transfert de chaleur par rayonnement:

La chaleur du soleil frappe pourtant notre planète alors qu'il n'y a aucun support solide, liquide ou gazeux au delà de l'atmosphère terrestre. Ceci signifie donc que l'énergie thermique peut tout de même traverser le vide. Ce mode de transfert s'appelle le rayonnement. H correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par tout corps, quelle que soit sa température. Comme on l'imagine, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus élevé

que sa température est grande. Comme pour la conduction, ce sont les interactions entre atomes et molécules qui sont à l'origine de ce rayonnement. Elles peuvent le générer, ce qui diminue leur énergie, ou encore l'absorber, ce qui l'augmente. De par sa nature, le rayonnement n'intervient que dans les milieux transparents (gaz, verre, vide) ou semi opaque (gaz + fumées de CO<sub>2</sub>, gaz + vapeur d'eau). C'est une transmission d'énergie à distance, entre deux corps séparés ou non par un milieu matériel (transformation d'énergie thermique d'un émetteur en énergie électromagnétique, propagation, transformation partielle en énergie thermique sur un corps récepteur). C'est le cas de l'énergie qui nous vient du soleil. L'interprétation physique est la suivante: tout corps émet des particules désignées par "photons"; ceux-ci se déplacent à la vitesse de la lumière et transportent une énergie fonction de leur "longueur d'onde". Un corps C émettant des photons dans toutes les directions possibles, certains d'entre eux sont reçus par l'autre corps C' et éventuellement absorbés, en tout ou partie. Bien entendu, le corps C émet aussi des photons dont certains seront reçus et absorbés par C. Le bilan net se traduit par un échange d'énergie entre C et C'

La densité du flux (rayonnement) thermique émis par une surface dont la température est T, est donné par la loi de Stéphane Boltzmann.

$$Q = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{II.8})$$

Le rayonnement pur à grande longueur d'onde entre deux surfaces i et j est donné par la relation:

$$Q_{ij} = \varepsilon_{ij} S_i \sigma (T_{si}^4 - T_{sj}^4) = \varepsilon_{ji} S_j \sigma (T_{si}^4 - T_{sj}^4) \quad (\text{II.9})$$

$T_i$  température de la surface. (K°)

$\varepsilon_{ij}$  facteur de forme entre les surfaces i et j.

$\sigma$  constante de Stéphane Boltzmann. ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

S superficie de la surface (m<sup>2</sup>)

$Q_{ij}$  flux de rayonnement à grande longueur d'onde entre les surfaces i et j.

Si le coefficient d'émission s du corps est différent du facteur  $F_{ij}$ , on peut admettre que:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} - 1 + \frac{1}{\varepsilon_{ij}} + \frac{S_i}{S_j} \left( \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right)} \quad (\text{II.10})$$

On peut trouver dans la littérature que:

$$Q_{ij} = h_{ij} S_i (T_{Si} - T_{Sj}) \quad (\text{II-11})$$

avec

$$h_{ij} = \frac{\sigma(T_{Si} + T_{Sj})(T_{Si}^2 + T_{Sj}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_i} - 1 + \frac{1}{\varepsilon_{ij}} + \frac{S_i}{S_j} \left( \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right)} \quad (\text{II-12})$$

L'inversion thermique nocturne est le résultat d'un phénomène radiatif se produisant dans les basses couches de l'atmosphère

En effet, le sol et l'air émettent l'énergie qu'ils ont emmagasinés durant la journée. Cependant, le sol, parce qu'il est solide, rayonne beaucoup plus que l'atmosphère ; il est refroidi donc d'avantage et plus il se crée par rayonnement, un transport de chaleur du sol à l'atmosphère.

### II -3- Analyse des divers paramètres : [8]

Le but de cette étude est comprendre le comportement de la température du sol dans lequel on envisage de placer un échangeur géothermique. L'analyse approfondie de certaines références amène à identifier les paramètres physiques influant sur le comportement thermique d'un puits canadien.

Trois modes de fonctionnement:

#### **En hiver:**

L'objectif est de réchauffer l'air avant qu'il n'entre dans la maison. Pour obtenir le maximum d'échange thermique l'air devra circuler à une vitesse de  $1 \text{ m.s}^{-1}$  environ.

#### **En été :**

L'objectif est de rafraîchir au maximum la maison en cas de forte chaleur. La maison bioclimatique a été conçue pour gérer au maximum l'apport passif du soleil par les baies vitrées et donc de créer des zones ombragées pour éviter un apport calorifique important en journée (store extérieur, plantation au sud,).

Le puits canadien ne vient qu'en complément à toutes ces mesures. Pour obtenir le maximum d'efficacité, le débit de l'air devra être plus important pour renouveler l'ensemble de l'air de la maison toutes les 2 heures. La vitesse est le plus souvent maintenue en deçà de 3 à  $4 \text{ m.s}^{-1}$

#### **En intersaison :**

La température de confort est comprise entre  $18$  et  $22^\circ$  et le système sera déconnecté en cas de besoin par une dérivation pour ne pas rafraîchir la maison alors que la température extérieure est proche de la température de confort.

### II -3-1 -Profondeur d'enfouissement des canalisations :

Le sol joue un rôle de tampon thermique entre l'extérieur et la canalisation enterrée. C'est lui qui isole celle-ci de l'influence des conditions atmosphériques. La profondeur d'enfouissement est donc un paramètre important qui joue un rôle sur la qualité de cette isolation. Elle doit être déterminée en fonction de la nature du sol et de l'objectif recherché (chauffage ou rafraîchissement). Dans le cas d'un puits qui chercherait à utiliser le déphasage journalier (la fonction rafraîchissement est alors recherchée), une profondeur de 40 cm est a priori suffisante. Pour un déphasage saisonnier (on privilégie dans ce cas la fonction préchauffage), une profondeur minimale de 1,50 m est requise. Au-delà, l'efficacité du puits augmente encore, mais des contraintes économiques ne permettent pas généralement d'installer le puits à de telles profondeurs. Au delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne varie plus sous l'effet de l'évolution de la température extérieure. Des essais et des mesures concernant les températures du sol à différents profondeurs dans un site en France, ont aboutis à des résultats résumés dans le graphe suivant :

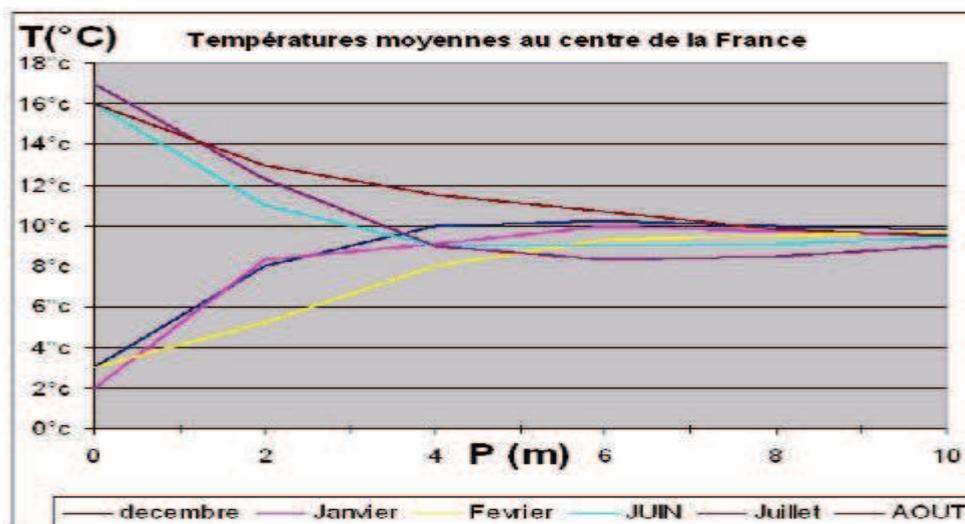


Fig. (II -2) : Températures moyennes du sol en fonction de la profondeur dans un site au centre de la France [8]

### II -3-2- La qualité du sol et le taux d'humidité :

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

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

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

### II -3-3-Capacité calorifique du sol : $C_S$

La capacité thermique du sol est la moyenne pondérée de capacités respectives de ses constituants :

$$C_S = \sum_i \chi_i \rho_i c_i \quad (\text{II-13})$$

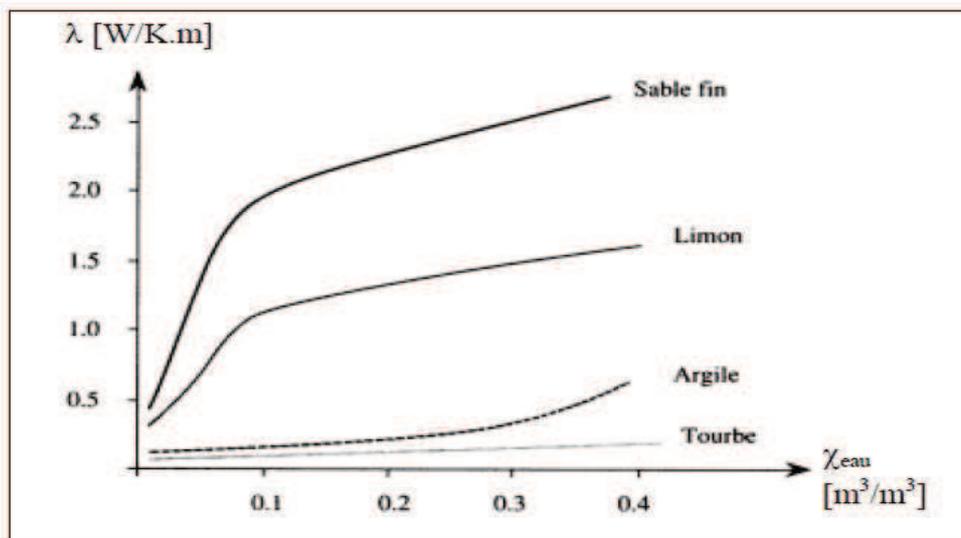
$\chi_i$  : La teneur de sol en constituant  $i$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$\rho_i$  : Sa masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_i$  : Sa capacité thermique ( $\text{J}/\text{K}\cdot\text{m}^3$ )

### II -3-4-Conductivité thermique du sol $\lambda$ [2]

La conductivité thermique du sol  $\lambda$  dépend de sa nature et de son teneur en eau. La courbe suivante présente la variation de la conductivité thermique ( $\lambda$ ) des différents gros de sol en fonction de la teneur en eau ( $\chi_{\text{eau}}$ )



Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau [Musy et Soutter, 1991].

Fig. (II-3) : Nature du sol [8]

### **II -3-5 - Le débit dans les canalisations**

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

Il impose le type d'écoulement (laminaire, turbulent) et influe donc non seulement sur la valeur du coefficient d'échange convectif entre l'air et les tubes, mais aussi sur les pertes de charges mécaniques qui doivent être compensées par le ventilateur.

### **II -3-6- La longueur des canalisations :**

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. En première approximation, le profil de température de l'air dans les tubes est asymptotique. La longueur optimale du puits va dépendre du débit dans les canalisations. En effet, la bibliographie montre que pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échangeur ne tempère plus l'air : il a atteint sa limite d'efficacité. Par contre, plus le débit augmente et plus cette longueur limite croît.

Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur, liée à la longueur caractéristique de l'échange thermique, qui peut être obtenue en confrontant le surcoût économique de l'échangeur à l'économie d'énergie apportée par l'allongement des tubes. Par conséquent, il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20m à 40 m) plutôt qu'un ou deux tubes beaucoup plus longs.

### **II -3-7- Le diamètre des canalisations:**

Une augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais n'augmente pas nécessairement l'échange thermique.

Au delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement de l'air, le coefficient d'échange convectif chute (INSA, 2004). Ceci est dû au fait l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite, où va être échangée la chaleur.

L'air circulant au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol.

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

**II -3-8- La distance entre canalisations:**

La fonction de stockage et d'amortisseur thermique du puits est assurée par la couche de sol se trouvant en contact ou à proximité de chaque canalisation, l'épaisseur de sol concernée dépendant de la période des phénomènes mis en jeu.

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

**II -3-9- Echange convectif air/tube :**

Le coefficient d'échange convectif entre le flux d'air et le tube  $h_a$  est un paramètre fondamental qui influe sur le comportement de l'échangeur air-sol. Il reflète les échanges thermiques qui ont lieu entre le flux d'air et la couche limite qui se développe à la surface du tube.

Le nombre adimensionnel de Nusselt donne la relation entre le coefficient de convection et le coefficient de conduction de l'air  $\lambda_a$  et le diamètre du tube  $d$  :

$$Nu = \frac{h_a d}{\lambda_a} \quad (\text{II-14})$$

Le nombre de Nusselt, est lui-même évalué en fonction de deux autres nombres adimensionnels, à savoir le nombre de Prandtl  $Pr$  (rapport entre viscosité cinématique et diffusivité thermique) et le nombre de Reynolds  $Re$  qui dépend de la viscosité cinématique  $\gamma_a$ , la vitesse du fluide  $v$  et le diamètre du tube  $d$  :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma_a} \quad (\text{II-15})$$

Ainsi, en s'appuyant sur [Ibarra Castanedo 2000] et [Hollmuller 2002], c'est la formule proposée par Gnielinski (1975) qui a été retenue, dans un premier temps :

$$Nu = 0,0214(Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \left(1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \cdot \left(\frac{T_a}{T_t}\right)^{0,45} \quad (\text{II-16})$$

Où les températures de l'air  $T_a$  et du tube  $T_t$  sont donnés en K.

Ainsi, le produit des deux termes correctifs :

$$\left(1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \cdot \left(\frac{T_a}{T_t}\right)^{0,45} \quad (\text{II-17})$$

Apporte une correction minime (inférieure à 1 %) qui peut être négligée. La formule simplifiée retenue est donc :

$$Nu = 0,0214(Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \quad (\text{II-18})$$

Le coefficient d'échange convectif vaut donc

$$h_a = 0,0214(Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \frac{\lambda_a}{2r_{int}} \quad (\text{II-19})$$

Le tableau suivant donne quelques propriétés de l'air

Température $T_a$ [K]	Conductivité $\lambda_a$ [W/K.m]	Viscosité $\gamma_a$ [m <sup>2</sup> /s]	Nombre de Prandtl Pr [-]
200	$18,1 \times 10^{-3}$	$7,59 \times 10^{-6}$	0,737
250	$23,3 \times 10^{-3}$	$11,44 \times 10^{-6}$	0,720
300	$26,3 \times 10^{-3}$	$15,89 \times 10^{-6}$	0,707

Tableau (II- 1) : Quelques propriétés de l'air [8]

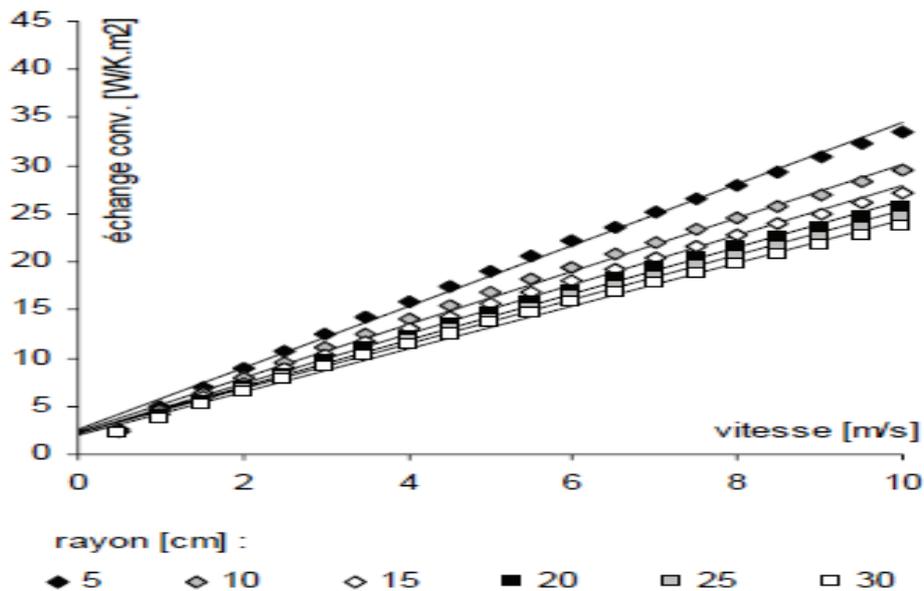


Fig. (II-4) : Coefficient d'échange convectif de l'air en fonction de la vitesse, à 10°C, pour un tube cylindrique [8]

### II -3-10- Les autres canalisations:

Certains paramètres sont peu ou pas cités dans la bibliographie des échangeurs air / sol à cause de leur faible influences sur les comportements des ces échangeurs. Il s'agit par exemple de la rugosité intérieure des canalisations, les propriétés physiques des canalisations, la géométrie globale du puits canadien, l'impact du rayonnement solaire sur la température du sol et enfin le régime de fonctionnement du puits canadien.

#### 1- La rugosité intérieure des canalisations :

Elle induit des pertes de charges hydrauliques indésirables qui vont nécessiter un surdimensionnement des systèmes de ventilation et des pertes énergétiques induites supplémentaires. Par contre, elle favorise le transfert convectif en créant de la turbulence. Cependant, les rugosités risquant d'entraîner des accumulations d'eau stagnante, une légère pente de l'ensemble des canalisations est indispensable pour permettre alors à l'eau condensée de s'écouler naturellement.

#### 2-Les propriétés physiques des canalisations:

Les capacités et conductivité thermiques des canalisations sont généralement négligées dans l'ensemble des documents consultés, la faible épaisseur des canalisations rendant ces dernières peu influentes sur le comportement général du puits. Pourtant ces propriétés peuvent avoir un impact sur le comportement dynamique de l'échangeur, et il est nécessaire de les prendre en compte.

### **3- La géométrie de l'échangeur:**

L'échangeur est généralement constitué d'une nappe de tubes placés parallèlement et regroupés en entrée et en sortie par des collecteurs. Les coudes, les bifurcations induisent des pertes de charges supplémentaires, à éviter dans la mesure du possible.

### **4-Le rayonnement solaire et la surface du sol :**

La surface du sol absorbe le rayonnement solaire selon son coefficient d'albédo : il s'agit d'un apport énergétique majeur dont l'effet sur la température du sol est important, bien que souvent négligé dans les rapports consultés.

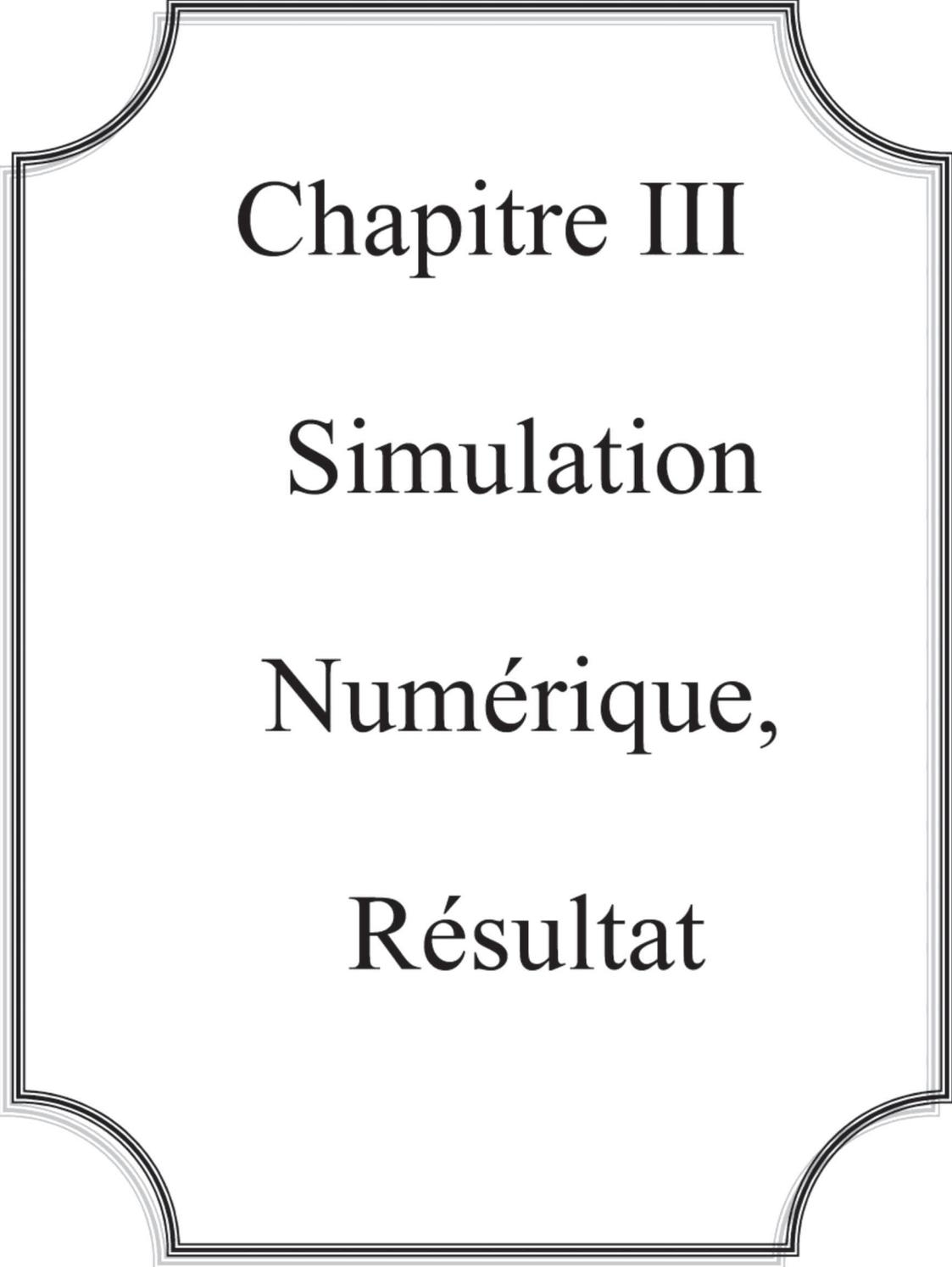
### **5- Conseils de mise en œuvre :**

Outre la nécessité de passer par des professionnels (architecte, ingénieur de bureaux d'études thermiques) pour dimensionner correctement un puits ou un réseau de puits, il est conseillé de respecter un certain nombre de précautions d'usage afin de maintenir le dispositif en bon état et d'assurer une bonne qualité de l'air insufflé.

L'entrée d'air doit être située loin des sources possibles de pollution (parking, local à poubelles...) et à une hauteur suffisante pour éviter l'aspiration de poussières. Elle doit être protégée des vents dominants qui pourraient venir perturber le fonctionnement du puits et fermée par une grille à faibles mailles pour empêcher l'intrusion de petits animaux ou de corps étrangers.

Les coudes et les bifurcations induisent des pertes de charge supplémentaires qu'il faut éviter. Par ailleurs, les conduits doivent être résistants à la pression de la terre, étanches à l'air et à l'eau. Le tuyau doit avoir une stabilité suffisante pour supporter l'enfouissement dans la terre. Par exemple, prendre une classe CR8 pour du PVC.

L'étanchéité est également importante pour éviter l'infiltration des eaux souterraines et la propagation de bactéries. Le matériau utilisé ne doit pas dégager de vapeur nocive comme cela peut être le cas du PVC par exemple lorsqu'il est soumis à des températures élevées (> 30°). Le tuyau sera de préférence lisse à l'intérieur pour diminuer les pertes de charge et rester en régime laminaire. Pour l'extérieur, privilégier les tuyaux annelés pour augmenter l'échange thermique entre le sol et le tuyau.



Chapitre III

Simulation

Numérique,

Résultat

### III-1/Introduction:

En transfert thermique, l'utilisation d'une méthode numérique de résolution n'est en fait qu'un procédé permettant une approximation de la distribution de la température qui est en réalité continue par sa discrétisation en un certain nombre de points appelés nœuds. Il va de soi que plus le nombre de nœuds est important, plus on s'approche de la solution exacte. Néanmoins, ceci implique aussi plus d'équations à résoudre et par conséquent plus de complexité dans la solution. En général la solution des problèmes passe par une représentation mathématique des phénomènes mis en jeu. Ces phénomènes sont en général multiples et compliqués. Pour les représenter, on est amené à négliger certains phénomènes et à simplifier certains autres. Même avec ces simplifications, les équations obtenues sont souvent insolubles par les méthodes algébriques connues. Il est, par conséquent, nécessaire de trouver une méthode traduisant ces fonctions continues en fonctions arithmétiques, alors pour aboutir à une solution numérique approchée il faut transformer les équations différentielles partielles obtenues en un système d'équations algébriques. Ce chapitre a pour objectif de présenter la variation de la température à différentes profondeurs, les températures de l'air et à la surface du sol et la variation des flux de chaleur au cours du temps.

### III-2 Données météorologiques de la ville de Biskra :

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Spt.	Oct.	Nov.	Déc.
Tem.moy.(°c)	11.9	13.7	16.2	20.0	25.2	29.9	33.5	32.7	27.5	22.1	16.5	12.8
Humi.rel.moy.	0.57	0.52	0.44	0.40	0.37	0.31	0.29	0.31	0.40	0.49	0.57	0.60
$V_{vent}$ moy.(m/s)	3.70	4.18	4.59	4.82	4.78	4.34	3.70	3.82	3.58	3.82	3.60	3.65
Rayon.so.moy.(w/m <sup>2</sup> )	211,7	295,5	411,7	489,7	511,2	533,5	525,1	476	398,8	304,2	219,2	177,7

Tableaux (III-1) : Données Météorologiques [9]

### III-3 Propriétés physiques du sol de la région de Biskra (nature de sol :

#### Limon argilo sableux)

Masse Volumique $\rho_{sol}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité calorifique $C_{p,sol}$ (J /kg K)	Conductivité thermique $\lambda_{sol}$ (w.m/k)	Diffusivité Thermique $a$ (m <sup>2</sup> /s)	Profondeur de pénétration $\delta$ (m)	Albédo ( $\alpha$ )
1800	1340	1.5	$6.22 \times 10^{-7}$	2.5	0.35

Tableaux (III-2) : Propriétés du sol [9]

### III-4- Equations du bilan thermique à la surface du sol : [10]

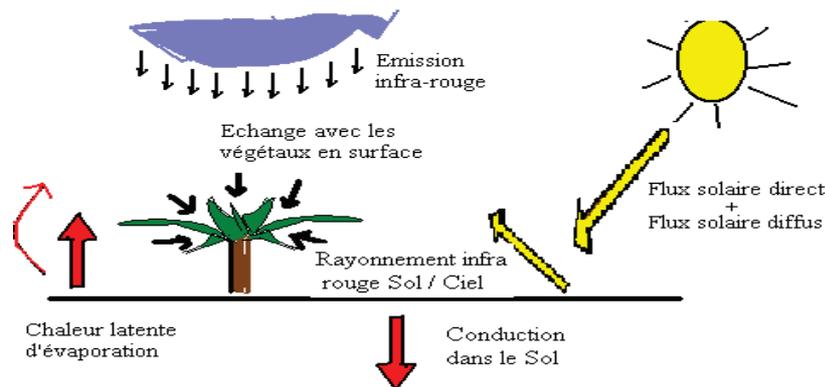


Fig. (III-1) : Différents types de flux [10]

Dans le domaine de la géothermie, la littérature n'énonce que la distribution des entités énergétiques à la surface de la terre générées par l'ensemble des processus écologiques et atmosphériques. L'ensemble des échanges sol-environnement est gouverné par l'équation d'équilibre énergétique donnée par:

$$R_n = L_v E + H + G + \quad (III.1)$$

$R_n$ : Rayonnement net ( $\text{j. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation d'eau ( $\text{j. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$H$  : est le flux de chaleur dû à la convection du vent ( $\text{j. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$G$  : est le flux de chaleur conductif dans le sol ( $\text{j. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$J$  : est le flux absorbé par la végétation (photosynthèse....) ( $\text{j. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Le sol reçoit de l'énergie net  $R_n$  par le rayonnement solaire, une partie sera cédée à l'atmosphère sous forme de chaleur latente de vaporisation d'eau à la surface du sol  $L_v \cdot E$ , une partie  $H$  échangée dans l'air par convection (le vent) dite flux de chaleur sensible, enfin une dernière partie  $G$  la chaleur absorbée par le sol qui correspond au le flux de chaleur conductif.

#### III-4-1 Apport radiatif solaire net $R_n$ :

Le flux solaire incident (direct et diffus) est une grandeur variable, dépendant de plusieurs paramètres (la date, l'heure, la position géographique, la nébulosité,...etc.). Cette quantité peut être calculée par l'expression suivante :

$$R_n = R_g (1 - \alpha) - R_t \quad (III.2)$$

$R_n$  : Rayonnement net ( $\text{j.m}^2.\text{s}^{-1}$ )

$R_g$  : Rayonnement solaire global ( $\text{j.m}^2.\text{s}^{-1}$ )

$\alpha$  : albédo (coefficient donné suivant lieu géographique)

$R_t$  : flux de chaleur échangé par rayonnement entre la surface du sol et la coute céleste ( $\text{j.m}^2.\text{s}^{-1}$ ), il exprime par la relation suivante :

$$R_t = \varepsilon_{sol} \sigma (T_{surf}^4 - T_{ciel}^4) \quad (\text{III.3})$$

Ou :  $\varepsilon_{sol}$   $\sigma$  sont respectivement l'émissivité du sol et la constante de Boltzmann alors que

$T_{surf\ sol}$  et  $T_{ciel}$  sont respectivement la température de la surface du sol et celle du ciel

donnée par la loi de Swinbank  $T_{ciel} = 0.0552.T_a^{1.5}$

La quantité de rayonnement infrarouge réémis par la surface du sol dépend directement de sa température. On utilise une émissivité moyenne du sol égale à 0.73, valeur qui varie entre 0.65 et 0.8 en fonction de la nature du milieu.

#### III-4-2-Equation du flux de chaleur sensible H :

H est le flux de chaleur du la à la convection du vent, il est calculé par la relation suivante :

$$H = h_c \cdot (T_a - T_{surf\ sol}) \quad (\text{j.m}^2.\text{s}^{-1}) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$h_c = 0,5 + 1,2\sqrt{V_{vent}} \quad (\text{III.5})$$

$V_{vent}$  : vitesse de vent

#### III-4-3-Flux de chaleur latente $L_V E$ :

Il est calculé par la relation de Stefan basés sur la théorie de transfert de masse appelée aussi théorie de film. Phénoménologiquement la diffusion se fait selon les lois de Fick

A partir de cette formule, Stefan a mis en œuvre une équation simplifiée sous la forme :

$$L_V E = \frac{L_V \cdot K_E \cdot M_W}{R \cdot T_a} (P_{VS}(T_s) - P_V(T_a)) \quad (\text{III.6})$$

Ou:

$L_V$  : Chaleur latente de vaporisation d'eau

E : Flux massique de vapeur d'eau

$K_E$  : Coefficient de transfert de masse.

$M_W$  : Masse molaire de la vapeur d'eau

R : Constante des gaz parfaits

$P_{VS}$  : Pression de vapeur saturante donnée par :

$$P_{VS}(T) = \exp(25,5058 - (5204,9/T)) \quad (\text{III.7})$$

Et  $P_V$  : pression de vapeur donnée par :

$$P_V(T_a) = HR P_{VS}(T_a) \quad (\text{III.8})$$

Avec HR : Humidité relative.

En remplaçant dans l'équation de bilan énergétique à la surface du sol on peut finalement écrire le flux de chaleur imposé sur cette même surface et comme condition à la limite supérieure du sol considère comme massif semi infini

$$G = (1 - \alpha)R_g - \varepsilon_{sol}\sigma(T_{surf\ sol}^4 - T_{ciel}^4) + h_c(T_a - T_{surf\ sol}) - L_v E \quad (\text{III.9})$$

Ce bilan prend en outre la température de l'air extérieur et le flux de rayonnement global incident, le vent et l'humidité relative de l'atmosphère c'est-à-dire : les spécificités du lieu considéré

### III-5- Résolution analytique :

Plusieurs démarches qui permette de résoudre l'équation de la chaleur dans le sol sont rencontrées dans la littérature, parmi elles, celle donnée par [ ] :

Le milieu étudié (sol) est considéré comme un mur semi infini, pour lequel la température pariétale est par exemple imposée selon  $\theta(x=0) = \theta_0 \cos \omega t$

Cette excitation est caractérisée par son amplitude  $\theta_0$ , sa pulsation  $\omega$ , sa fréquence  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  et sa période  $T_e$

A la température T on associe la température  $\bar{T}$  correspondant au même mur astreint une excitation pariétale en  $\theta_0 \sin \omega t$

On recherche la solution  $T^* = T + j\bar{T}$  et on en prendra ensuite la partie réelle

Cette fonction complexe  $T^*$  satisfait à :

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2}, \quad (\text{III.10})$$

Avec  $T^*(0, t) = \theta_0 e^{j\omega t}$  et  $T^*(\infty, t) = 0$

Recherchons pour  $T^*$  des fonctions du style :

$$T^*(x, t) = f(x) e^{j\omega t} \quad (\text{III.11})$$

Lesquelles correspondent à la phase de régime établi

La fonction  $f$  doit alors satisfaire

$$\frac{d^2 f}{dx^2} - \frac{j\omega}{a} f = 0 \quad (\text{III.12})$$

$$f(x=0) = \theta_0 \quad f(\infty) = 0$$

D'où les solutions :

$$f(x) = \theta_0 e^{-(j\omega t)^{1/2} x} \quad (\text{III.13})$$

$$T^*(x, t) = \theta_0 e^{-\sqrt{\frac{j\omega}{2a}} x} e^{j(\omega t - \sqrt{\frac{j\omega}{2a}} x)} \quad (\text{III.14})$$

Le retour à la partie réelle conduit à :

$$T(x, t) = \theta_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x} \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x\right) \quad (\text{III-15})$$

Soit encore :

$$T(x, t) = \theta_0 e^{-\sqrt{\frac{\pi}{T_e a}} x} \cos\left(\frac{2\pi}{T_e} \left(t - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_e}{\pi a}} x\right)\right) \quad (\text{III-16})$$

### III-6. Résolution numérique

Le sol est assimilé à un massif semi-infini homogène dont les propriétés physiques sont considérées constantes et indépendantes de la profondeur soumise au flux conductif  $G$ .

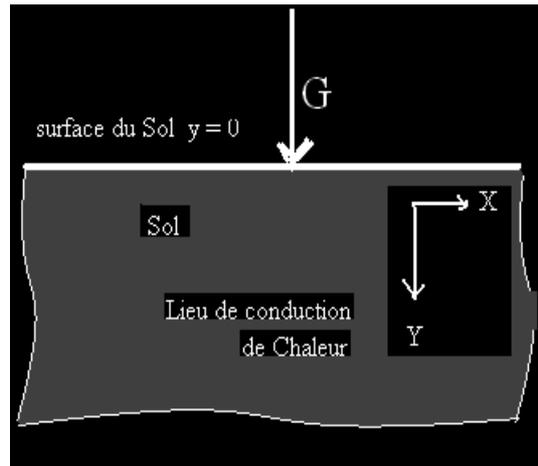


Fig. (III- 2) : Modélisation du transfert conductif dans le sol

Le flux de chaleur  $G$  est imposé comme condition à la limite à la surface du sol.

À cette frontière, cette condition s'écrit :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\text{Surf sol}} = G \quad (\text{III.17})$$

Avec et partout ailleurs aux autres frontières :

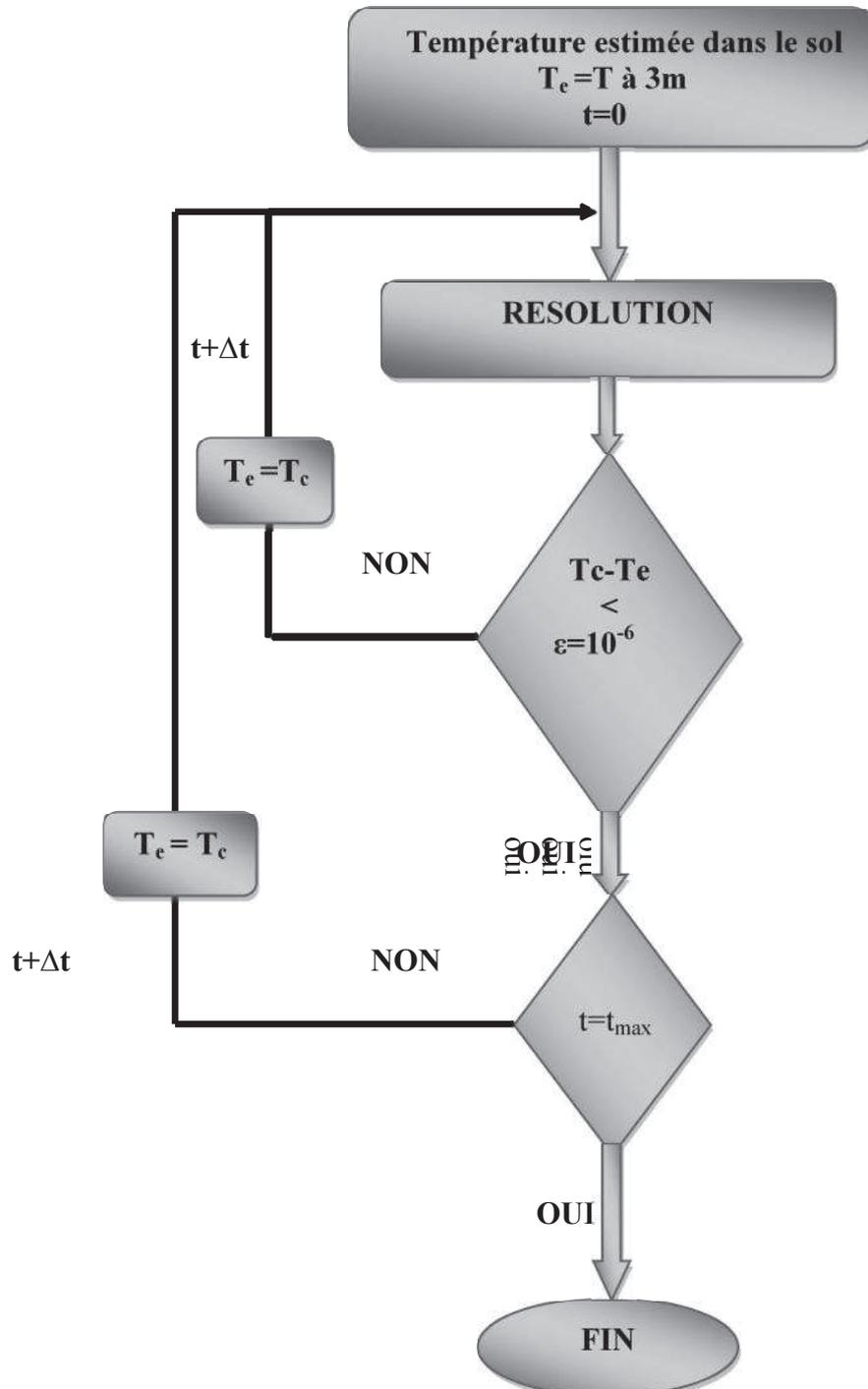
$$x = \infty, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad y = \infty, \frac{\partial T}{\partial y} = 0.$$

La méthode numérique proposée, repose sur la résolution incrémentale itérative se basant sur l'initialisation des températures dans les nœuds pour une valeur de  $17^\circ\text{C}$  [ ], valeur de température correspondante au relevé de la température du sol moyenne à 05 mètres de profondeur.

### III-7- Les paramètres étudiés:

- Les propriétés physiques de sol
- La vitesse du vent et l'humidité relative de l'air
- La température du sol
- La profondeur
- Le flux de chaleur
- Les températures de la journée

III-8- Algorithme des calculs



### III-9- Présentation des résultats et interprétation :

Dans cette étude, la résolution est faite par une méthode numérique incrémentale itérative purement élaborée dans un environnement MATLAB.

Les figures ci-dessus montrent la variation de la température à profondeurs différentes, température surf sol-air et la variation de flux de chaleur.

Les paramètres sont : les propriétés physiques du sol (site de Biskra), vitesse du vent = 4,6m/s, humidité relative de l'air = 0.642, température du sol = 17°C, profondeur = 5m

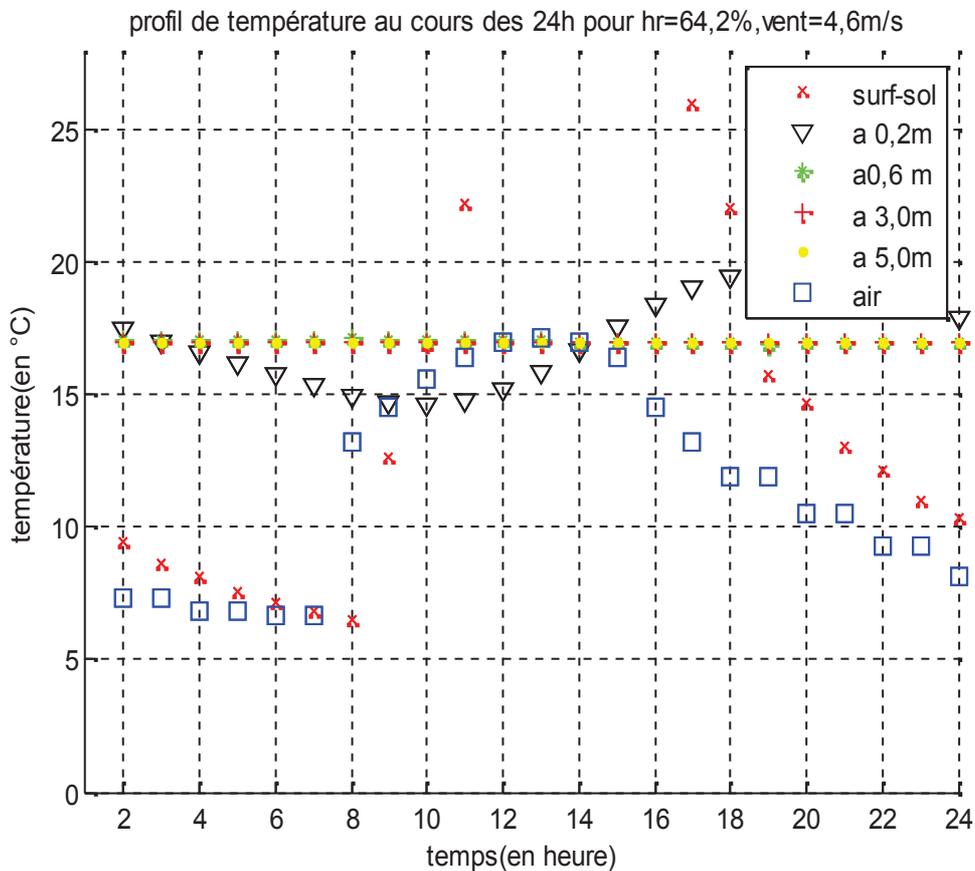


Fig. (III-3) : Variation de la température à profondeurs différentes au cours du temps

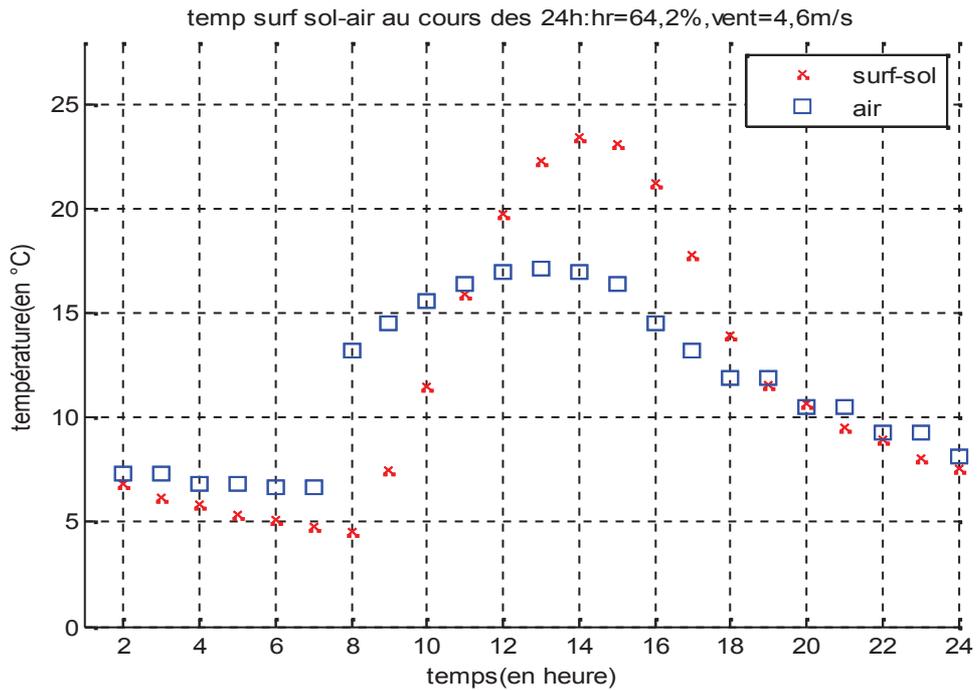


Fig. (III-4) : Variation de la température surf sol-air au cours du temps

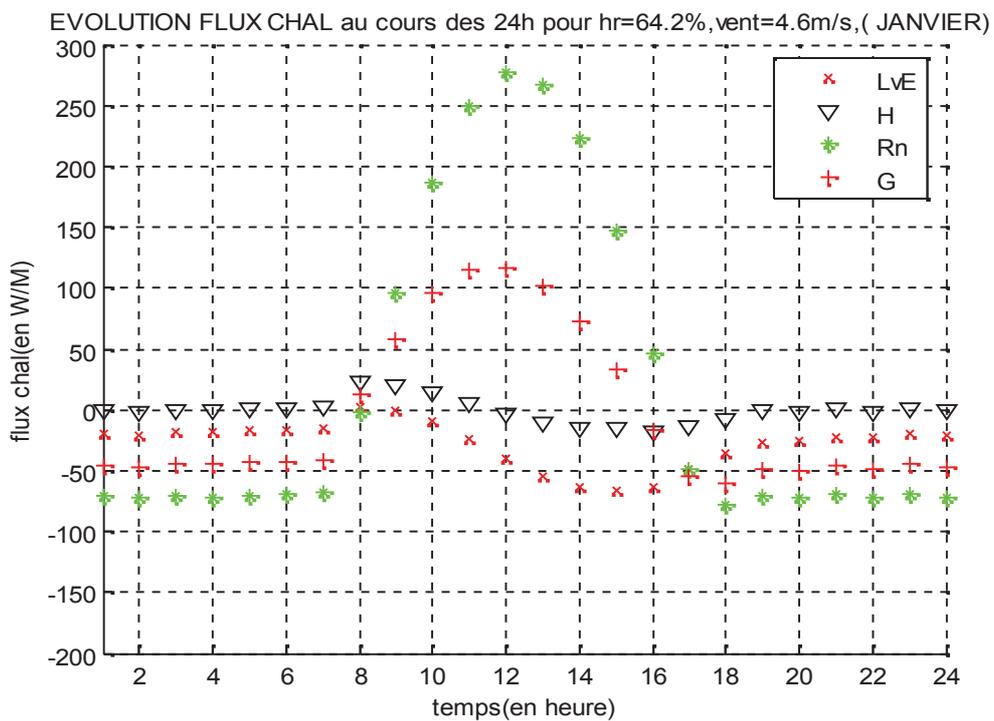


Fig. (III-5) : Variation du flux de chaleur au cours du temps

On remarque que la température du sol varie au cours du temps de sa surface jusqu'à une certaine profondeur qui dépend des propriétés du sol. Cette profondeur est celle recherchée pour installer le puits Canadian.

\* Cas de la variation des températures de la journée:

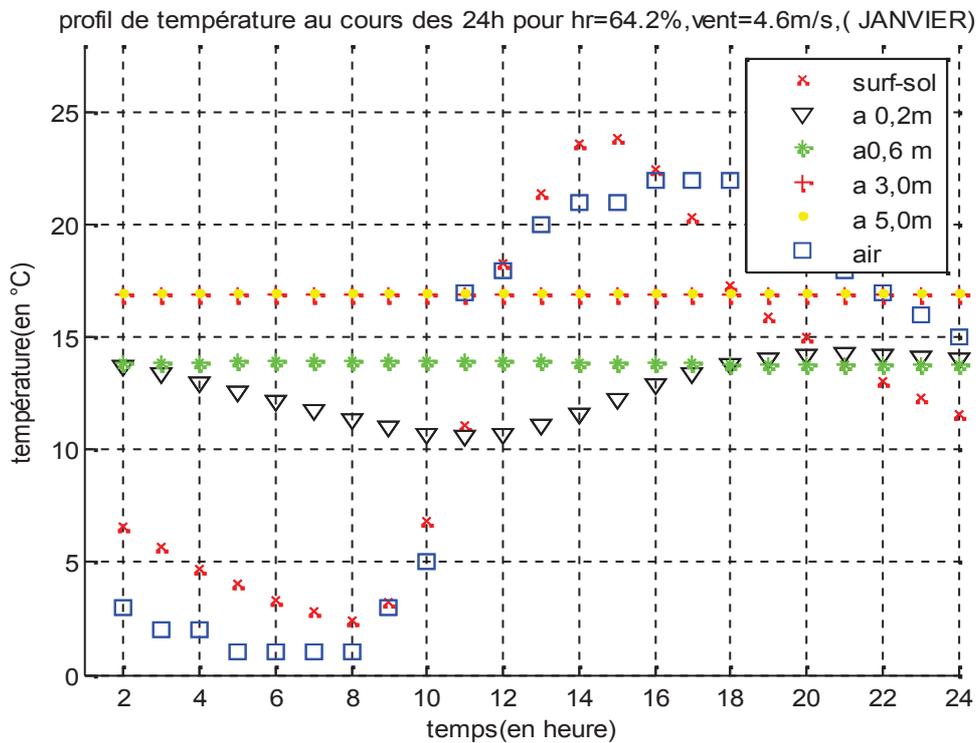


Fig. (III-6):Variation de la température à profondeurs différentes (24h)

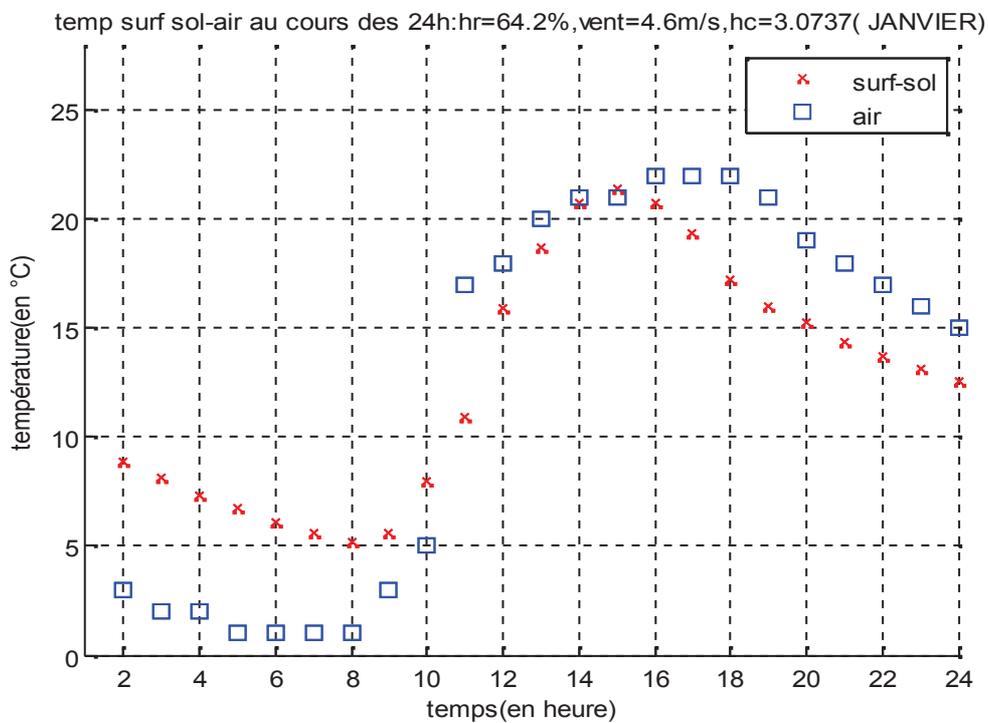


Fig. (III-7) : Variation de la température surf sol-air variation du temps (24h)

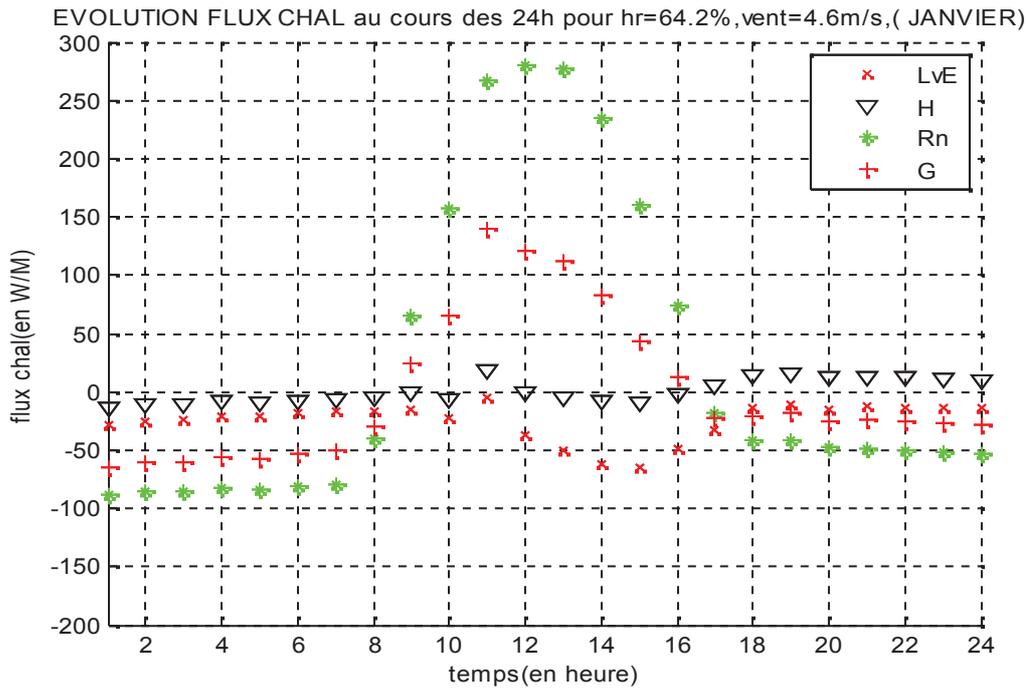


Fig. (III-8) : Variation du flux de chaleur (Variation des temps (24h))

Dans les figures ci-dessus on a varié les températures de la journée.

**\*Cas de Variation de la Vitesse du vent et de l'humidité relative :**

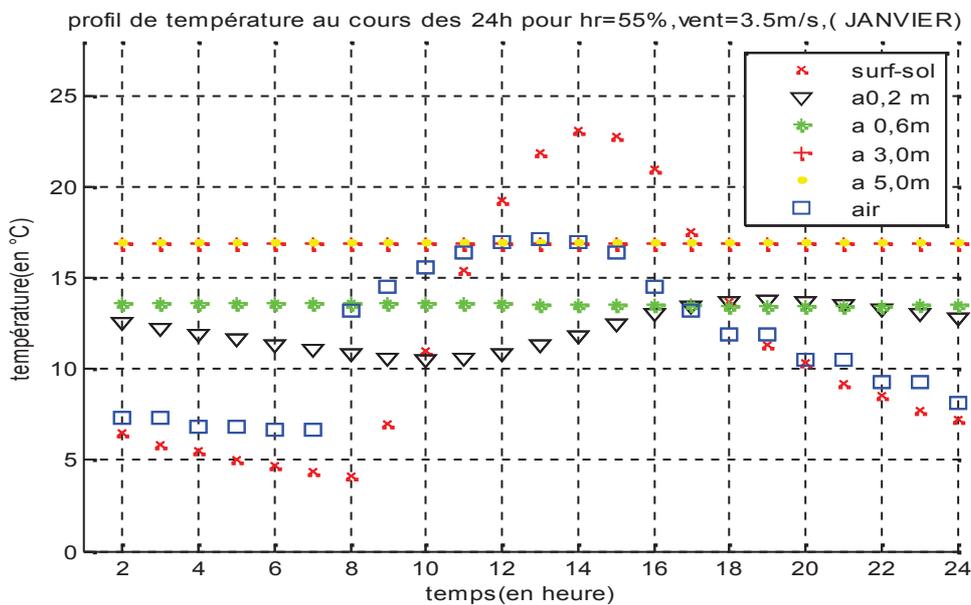


Fig. (III-9):Variation de la température à profondeurs différentes cas de Variation de la la  $V_{vent}$  et HR

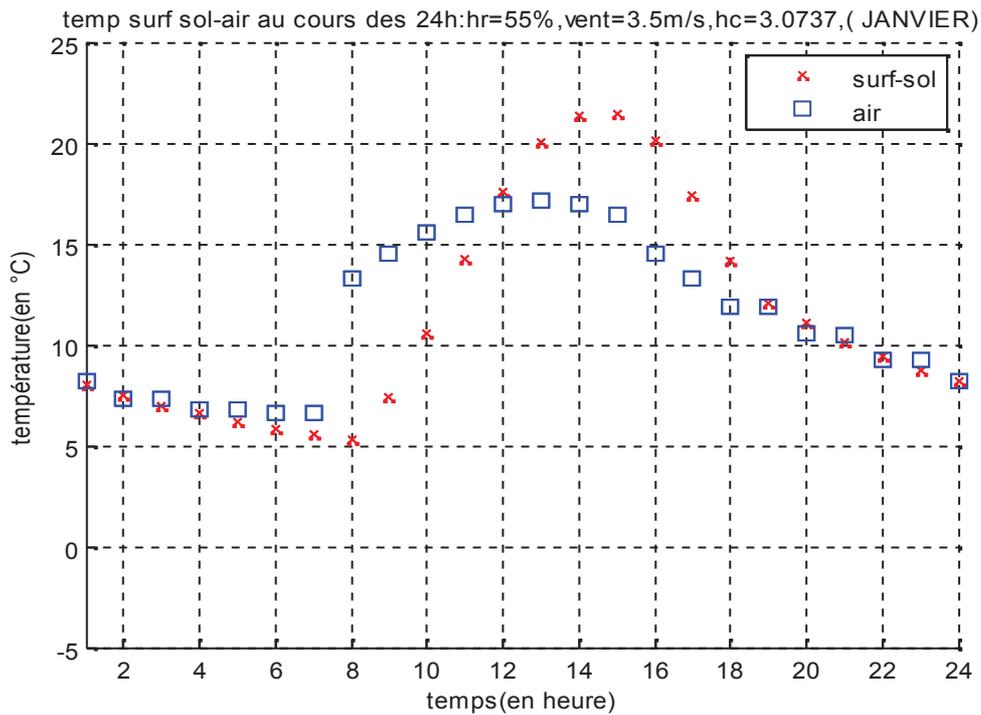


Fig. (III-10) : Variation de la température surf sol-air cas de Variation de la la  $V_{vent}$  et HR

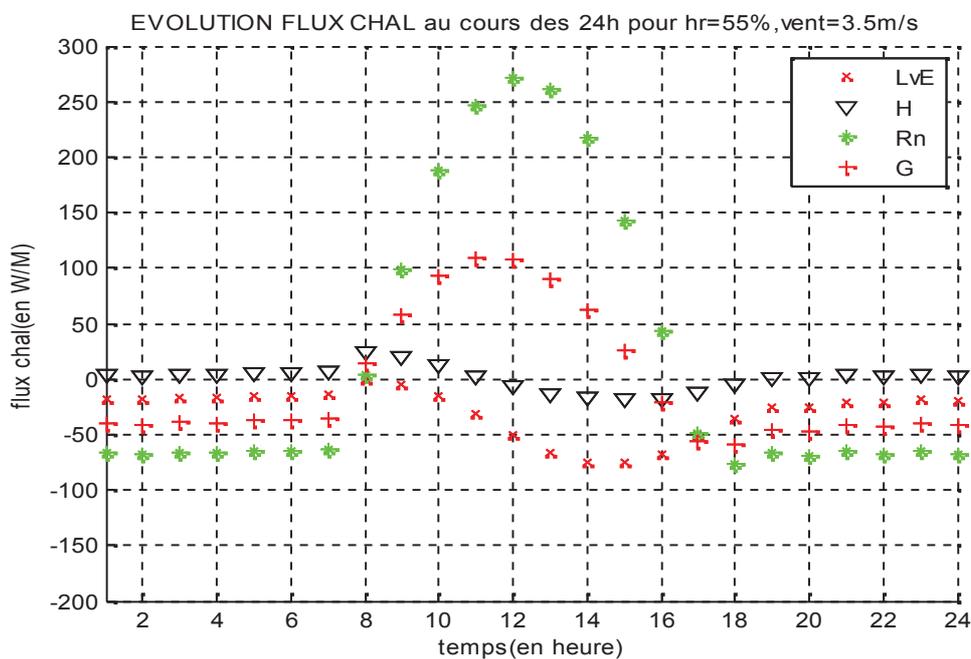


Fig. (III-11) : Variation du flux de chaleur Variation de la  $V_{vent}$  et HR

Dans les figures ci-dessus on a varié la vitesse de vent (3.5m/s) et humidité (0.55). On remarque qu'il y a une variation très petite sur les températures pour les profondeurs (0,2 et 0,6 m)

**\*Cas de variation du Flux de chaleur :**

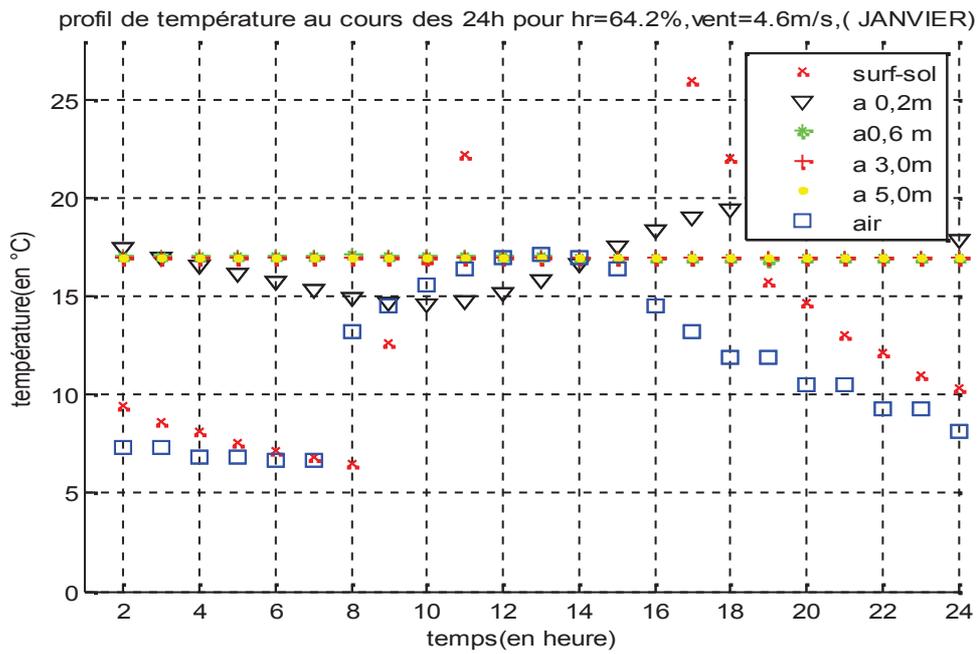


Fig. (III-12) Variation de la température à profondeur différentes cas de variation du flux de chaleur

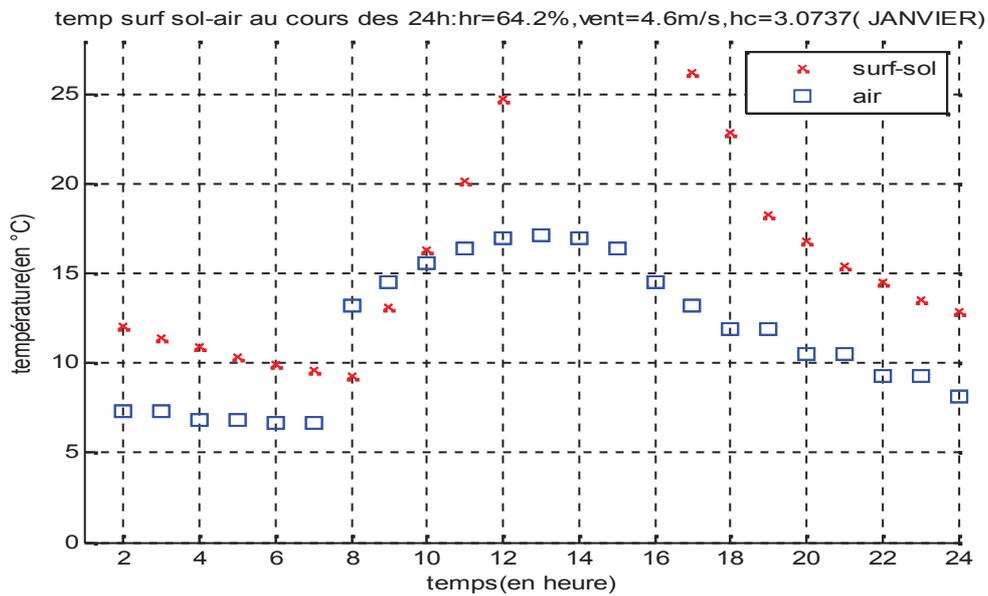


Fig. (III-13) : Variation de la température surf sol-air cas variation du flux de chaleur

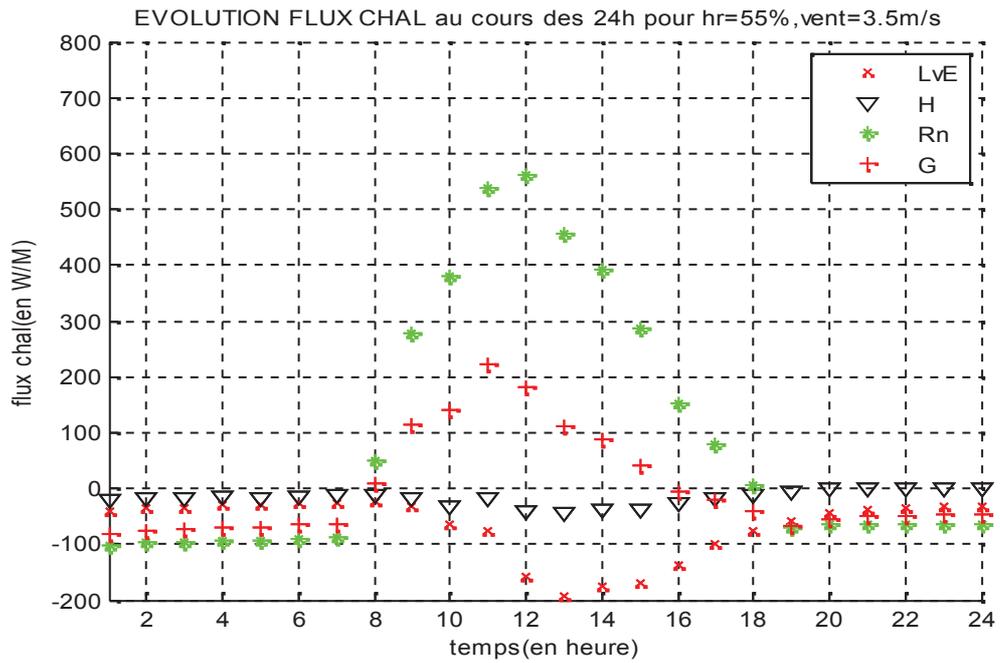


Fig. (III-14) : Variation du flux de chaleur

Dans les figures ci-dessus on a varié le flux de chaleur, on remarque que la variation de la température de surf-sol pour 0,2m et 0,6m induit une augmentation des flux de chaleur ( $R_n$ ,  $G$ )

**\*Cas de la Variation de la profondeur :**

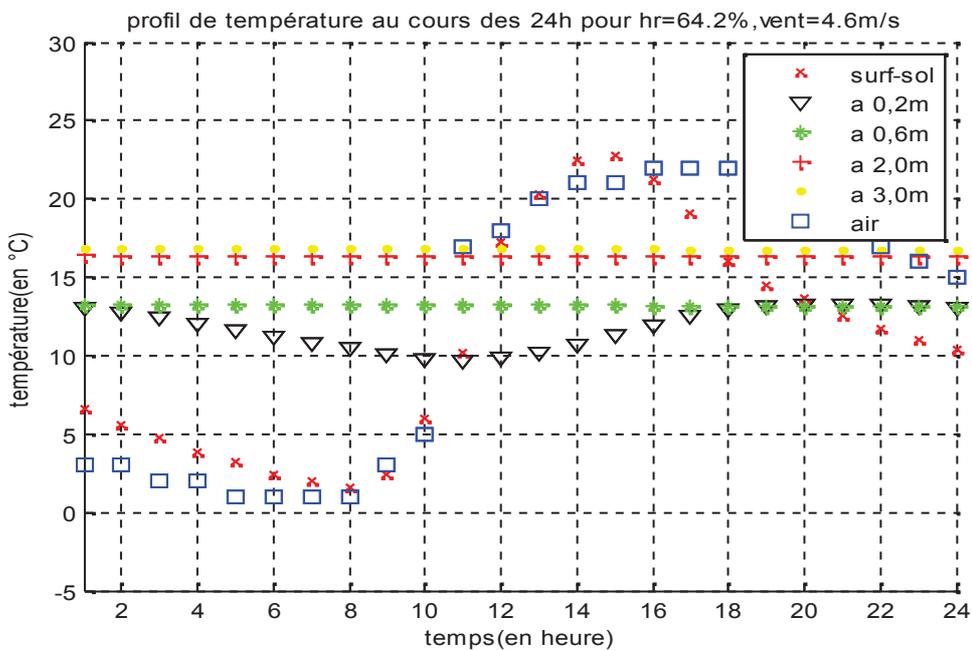


Fig.(III-15) :variation de température à profondeurs différentes cas de la profondeur(3m)

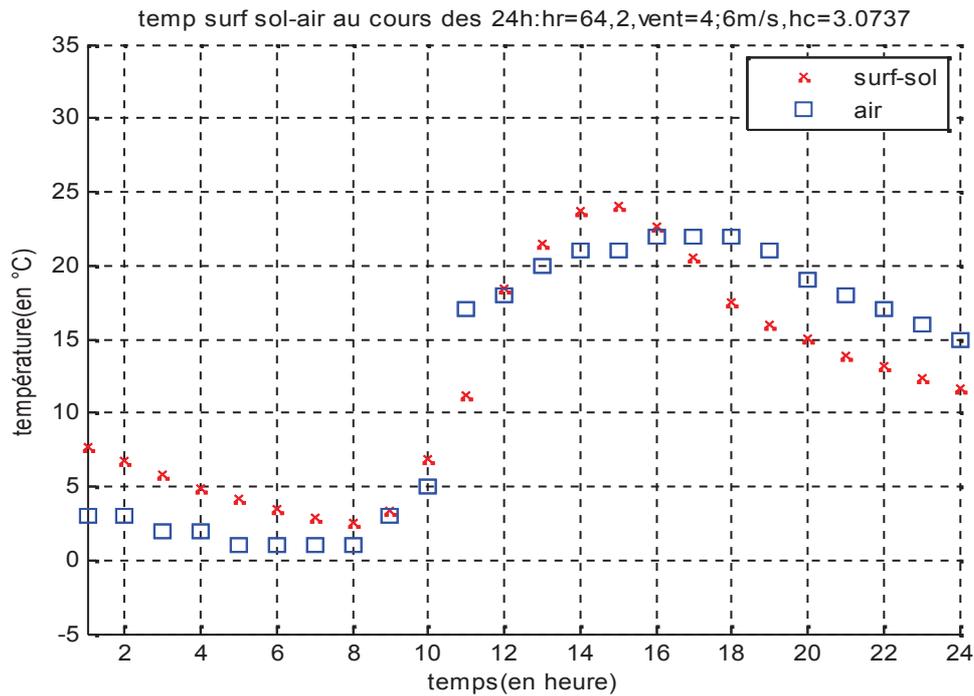


Fig. (III-16) : Variation de la température surf sol-air cas de la profondeur(3m)

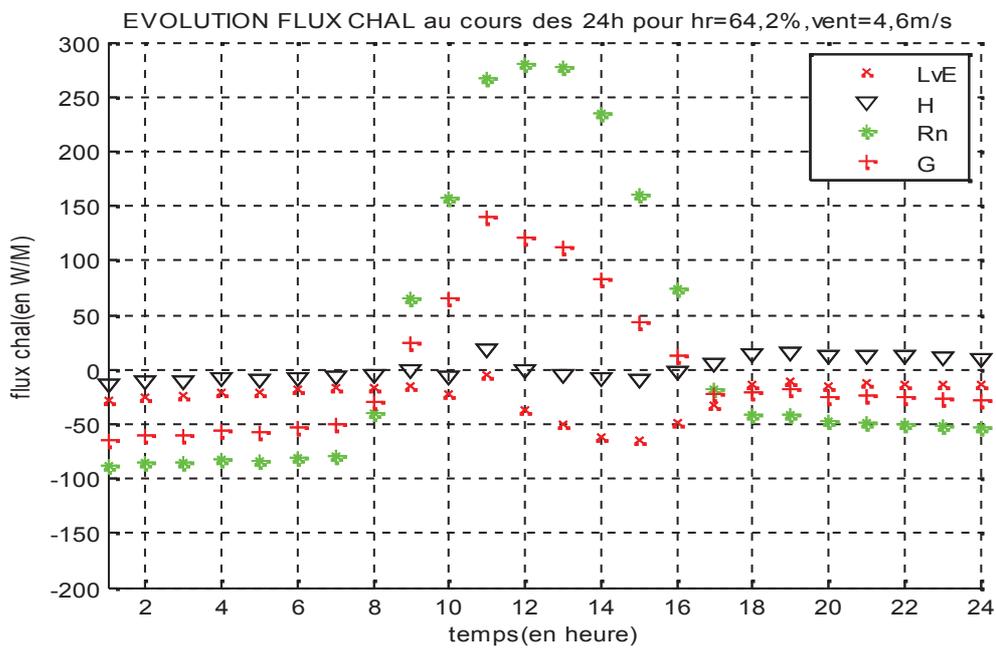


Fig. (III-17) : Variation de la température surf sol-air cas de la profondeur(3m)

Dans les figures ci-dessus on a varié la profondeur (3m) , on remarque que la variation de la température à différentes profondeurs, température de l'air et les flux de chaleur restent constants.

Cas de la Variation de la température du sol :

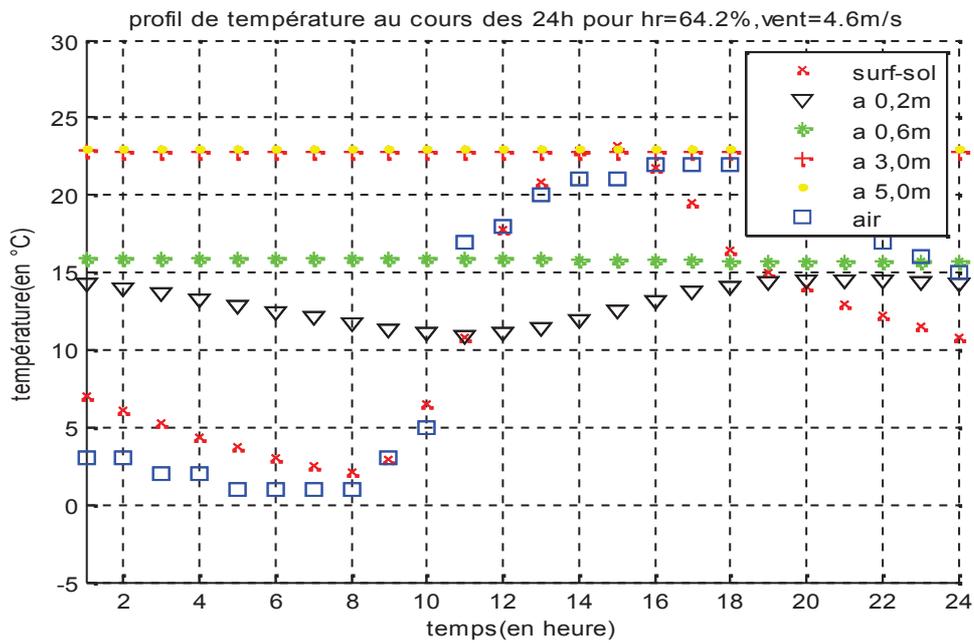


Fig. (III-18) Variation de la température à profondeur différentes cas de la température de sol (23C<sup>0</sup>)

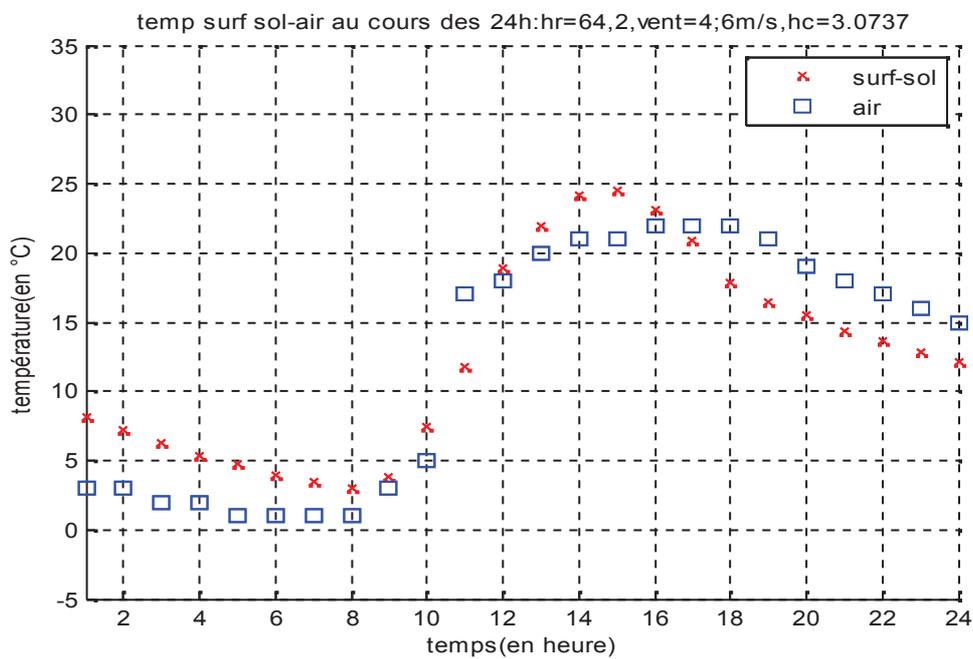


Fig. (III-19) : Variation de la température surf sol-air cas de la température de sol (23C<sup>0</sup>)

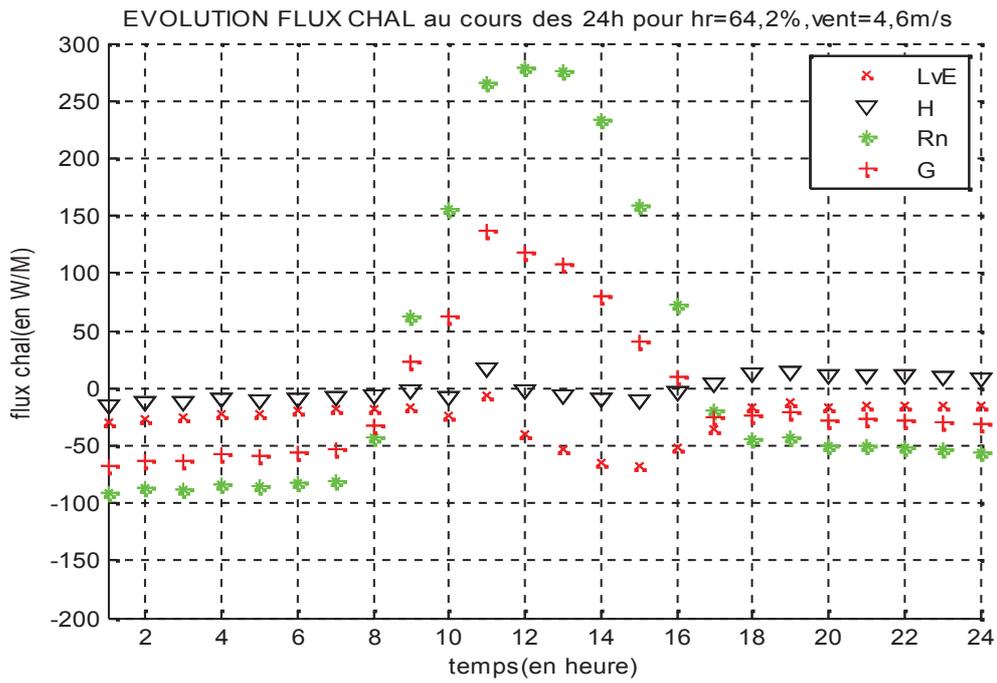


Fig. (III-20) : Variation de flux de chaleur cas de la température de sol (23C°)

Dans les figures ci-dessus on a varié la température du sol (23C°). On remarque que la variation de flux de chaleur reste constante

# Chapitre IV

Etude

Expérimentale

### IV-1-INTRODUCTION :

Cette partie est consacrée uniquement à l'expérimentation. Elle présente plusieurs expériences distinctes consacrées à l'étude d'un puits canadien installé à l'université de Biskra. On s'intéresse donc au rafraîchissement par la géothermie, une technique qui est jusqu'à présent non exploitée dans notre pays. Cette technique utilise un échangeur air/sol dit puits canadien.. 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. La température de l'air en entrée d'échangeur correspond à la température de l'air extérieur. Elle est facilement mesurable ou accessible à partir de bases de données météorologiques.

### IV-2- Description géométrique : [8]

Le puits canadien expérimenté possède les caractéristiques suivantes :

- Une entrée d'air verticale située entre la surface du sol ( $z=0$ ) et le niveau d'enfouissement du puits ( $z= 3m$ ).
- Quatre canalisations disposées horizontalement sous la terre à la profondeur  $z=3m$ .
- Une sortie d'air verticale située entre le niveau d'enfouissement du puits ( $z=3m$ ) et la surface du sol ( $z=0$ ). Les connexions entre les canalisations horizontales (tubes) et les conduites d'entrée et de sortie d'air (collecteurs) sont pas faits par des coudes. Les collecteurs sont identiques. De même, les tubes horizontaux sont identiques entre eux : mêmes dimensions, mêmes propriétés physiques, même orientation. Ils sont disposés côte à côte dans un même plan horizontal (une seule nappe horizontale), selon un espacement régulier fixé. Collecteurs et tubes sont à section circulaire, le débit de l'air dans chacun des tubes est identique. En effet, les tubes étant identiques en tout point, la répartition des débits sera uniforme entre chaque tube.

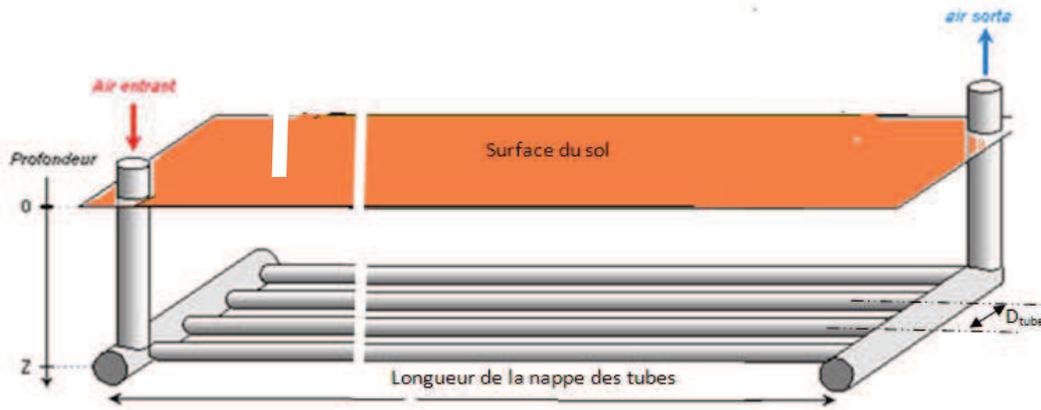


Fig. 11 Schéma de la géométrie de l'échangeur

Fig. (IV-1): Schéma de la géométrie de l'échangeur[8]

**IV-3-Schémas des échangeurs: [1]**

Le banc d'essai est un échangeur réalisé à l'Université de Biskra. Il s'agit de deux échangeurs en PVC de longueurs 44.21m et 47.63m placés à deux profondeurs différentes (3m et 2m) et dont les schémas d'installation sont les suivants :

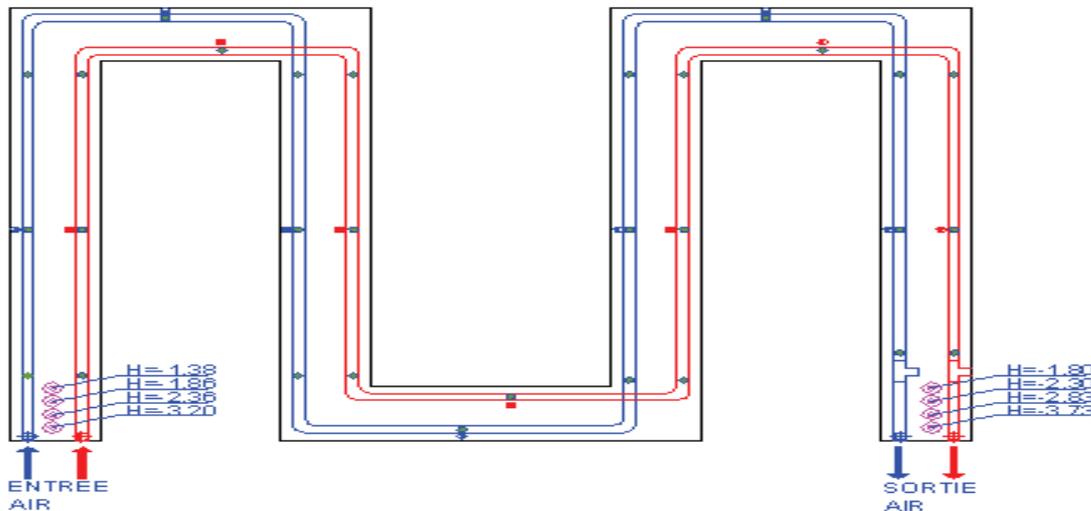


Fig. (IV-2) : Emplacement des deux échangeurs thermiques.

- Sonde de température de l'air dans la gaine • sonde de température du sol [échangeur bas)
- sonde de température de l'air dans la gaine • sonde de température du sol [échangeur haut]
- Sonde de température du sol au début et à la fin de l'échangeur

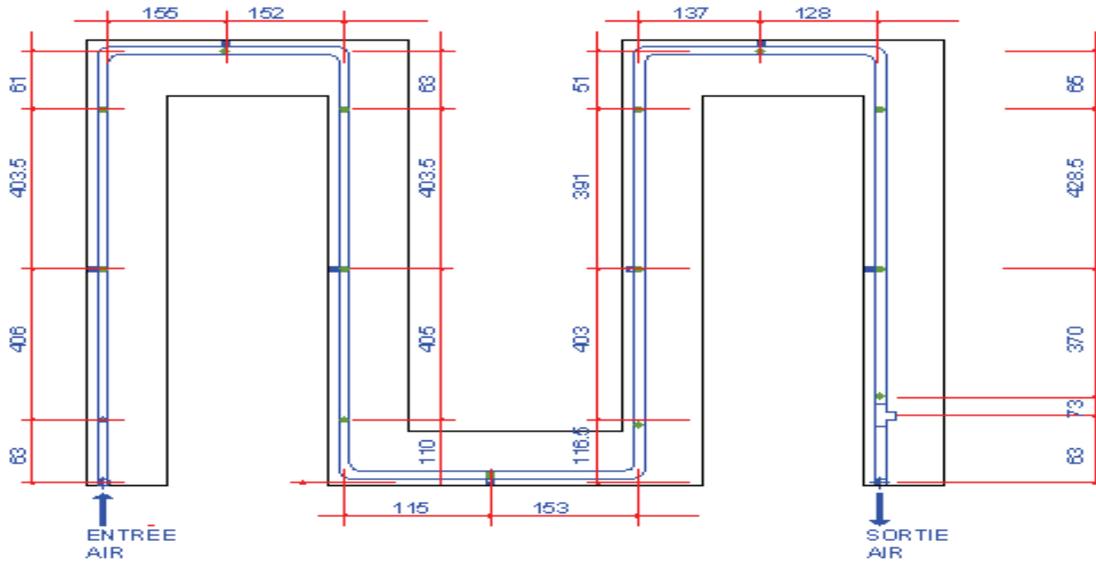


Fig. (IV-3): Emplacement du premier échangeur (échangeur bas) longueur (47.63m)

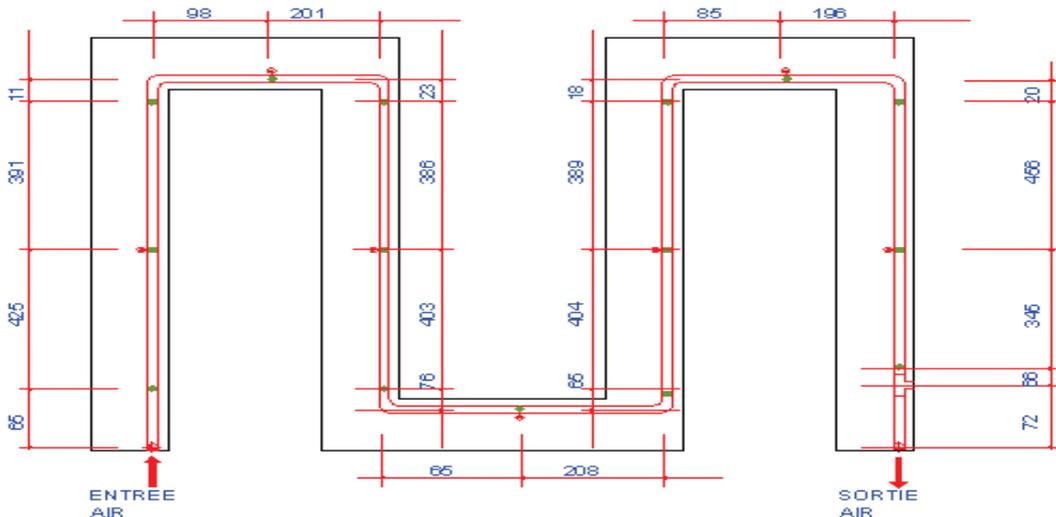


Fig. (IV-4) : Emplacement du second échangeur (échangeur haut) longueur (44.21m)

#### IV-4-Les instruments de Mesure utilisés :

##### a -Mesure du rayonnement solaire:

Pour mesurer le rayonnement solaire au niveau du sol on peut utiliser le pyranomètre qui est un radiomètre pour la mesure du rayonnement dans un plan. Le rayonnement incident étant issu de l'ensemble de l'hémisphère situé au-dessus de l'instrument. Figure (IV.5).

##### b. Mesure de la vitesse du vent et de la température :

La mesure de la vitesse du vent et la température (entre –sortie) sont effectuée à l'aide d'un anémomètre. Figure (I.5).

##### c-Mesure de l'humidité

La mesure de l'humidité (entre –sortie) est effectuée à l'aide d'un . Figure (IV.5).

**d-Mesure de la température dans l'échangeur**

Pour mesurer la température de l'air dans l'échangeur on a utilisé les sondes qui sont installées dans l'échangeur. Les mesures sont acquises à l'aide d'une carte d'acquisition reliée à un microordinateur.



Anémomètre : mesure de la vitesse du vent et l'humidité



Pyranomètre : mesure du rayonnement  
Solaire global



Emplacement des sondes

Fig. (IV.5): Les instruments des Mesures

IV-5-Résultats des mesures

1- Evolution de la température de l'air dans l'échangeur et du rayonnement solaire :

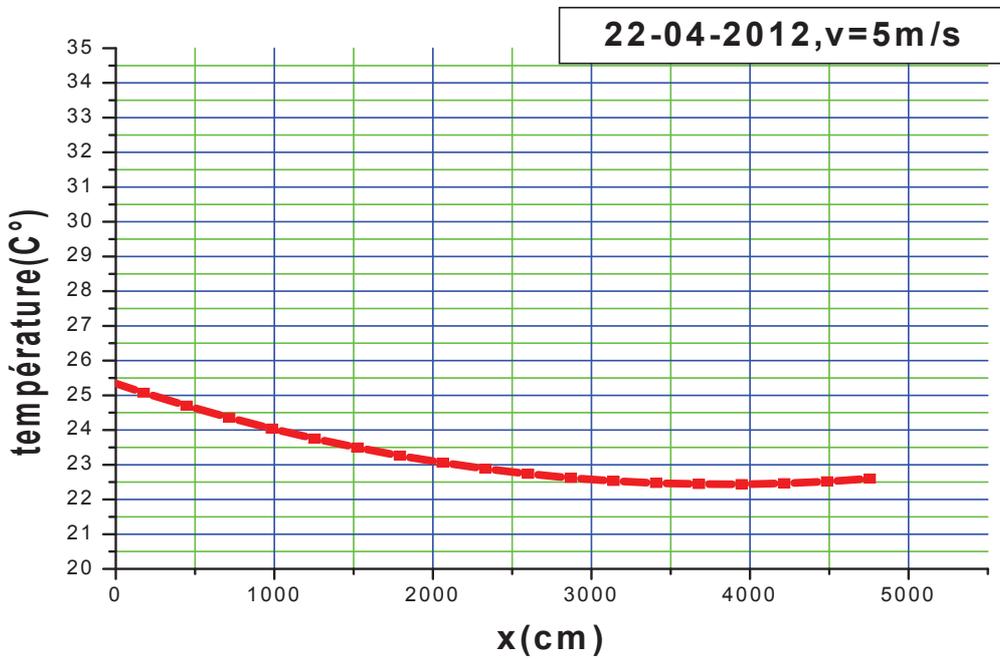


Fig. (IV-6) : Evolution de la température (22-04-13)

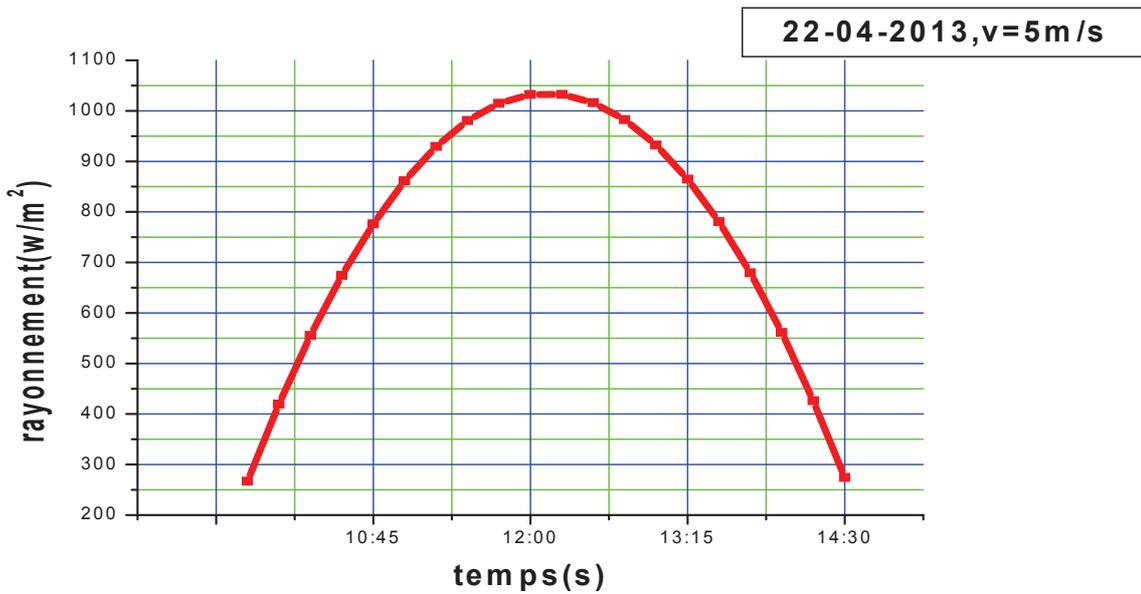


Fig.(IV-7) Evolution temporelle du rayonnement solaire le 22-04-2013

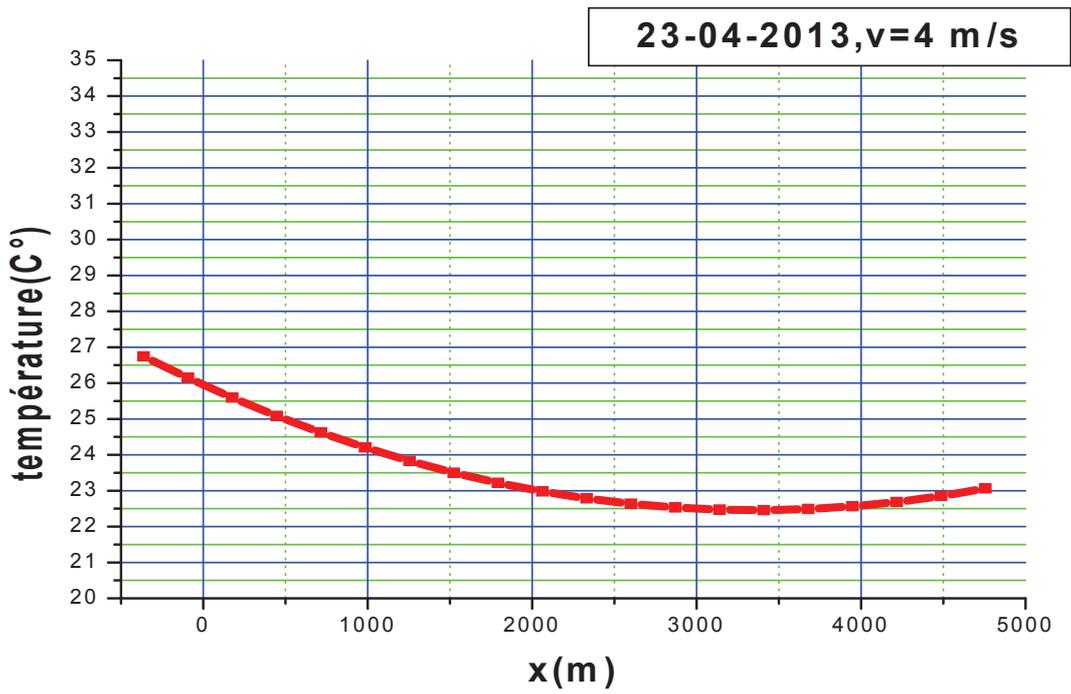


Fig. (IV-8) : Evolution de la température (23-04-13)

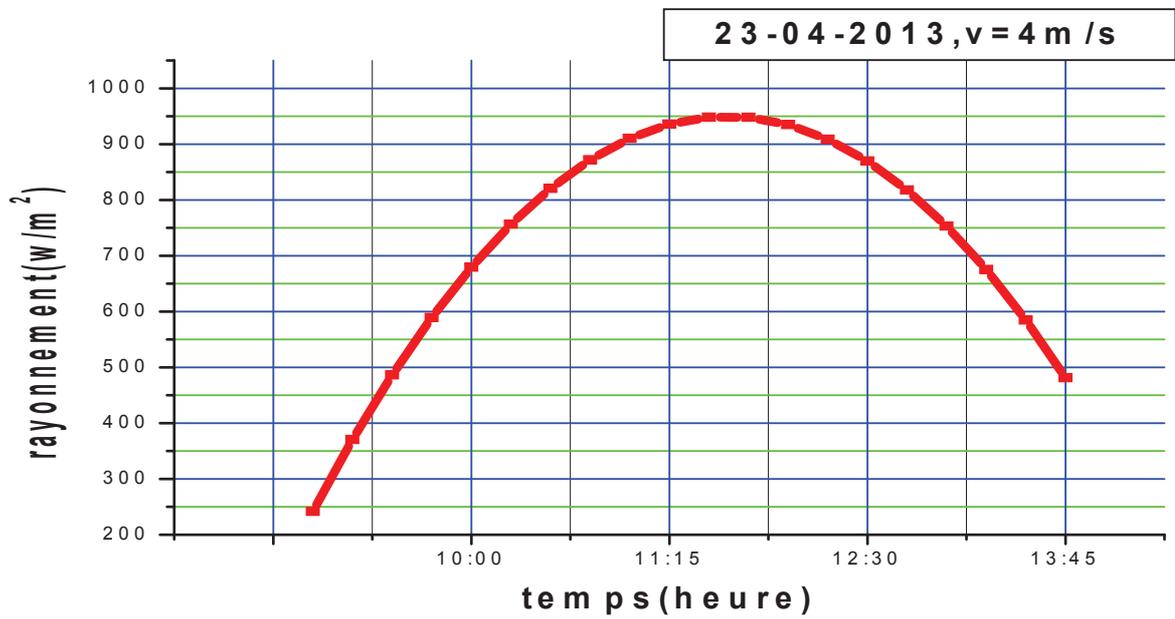


Fig. (IV-9) Evolution temporelle du rayonnement solaire le 23-04-2013

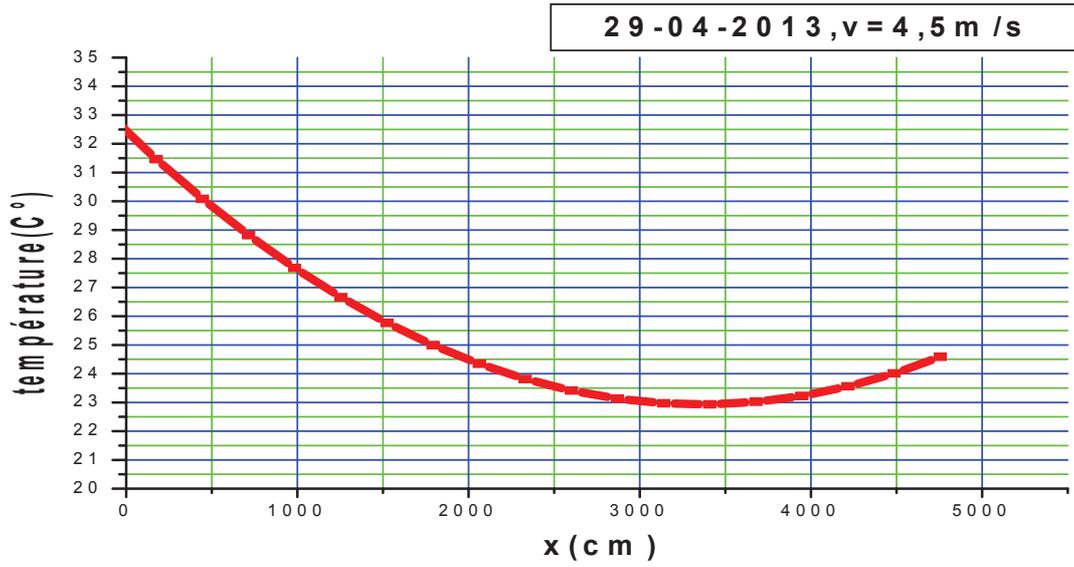


Fig. (IV-10) : Evolution de la température (29-04-13)

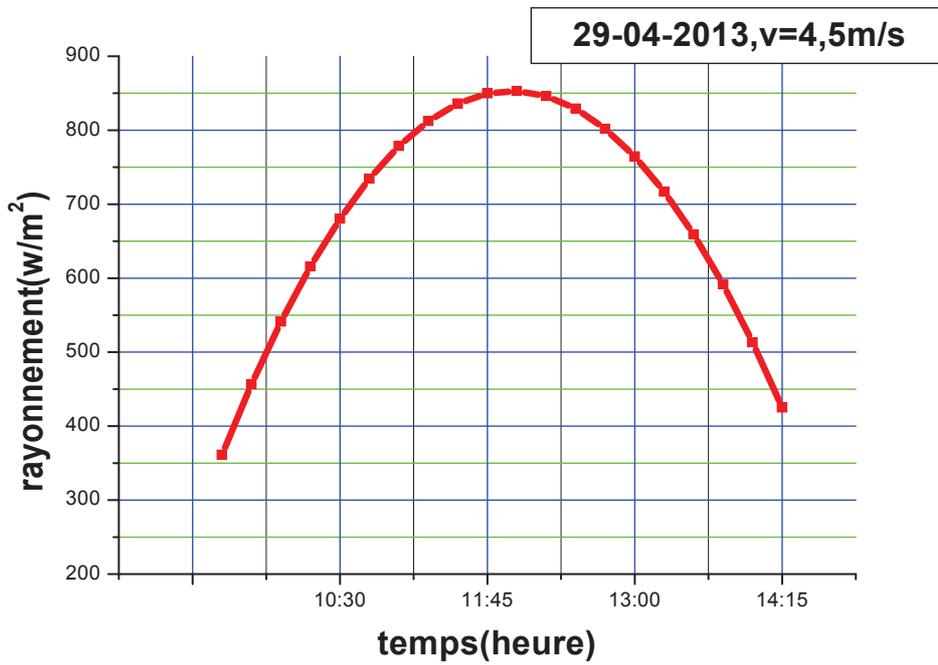


Fig.(IV-11) Evolution temporelle du rayonnement solaire le 29-04-2013

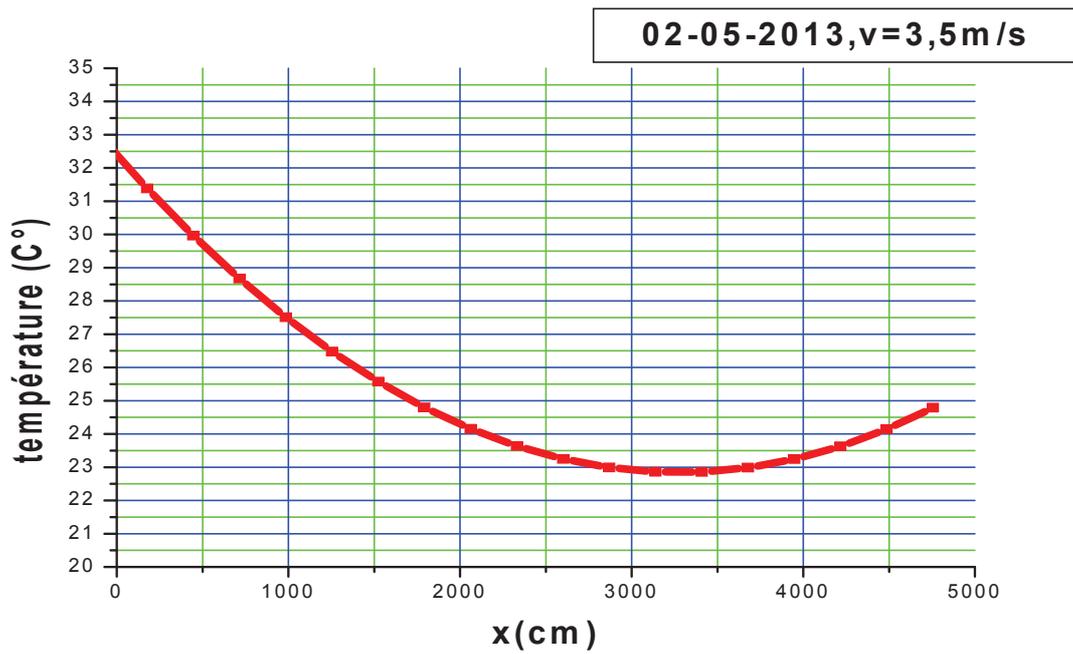


Fig. (IV-12) :Evolution de la température (02-05-13)

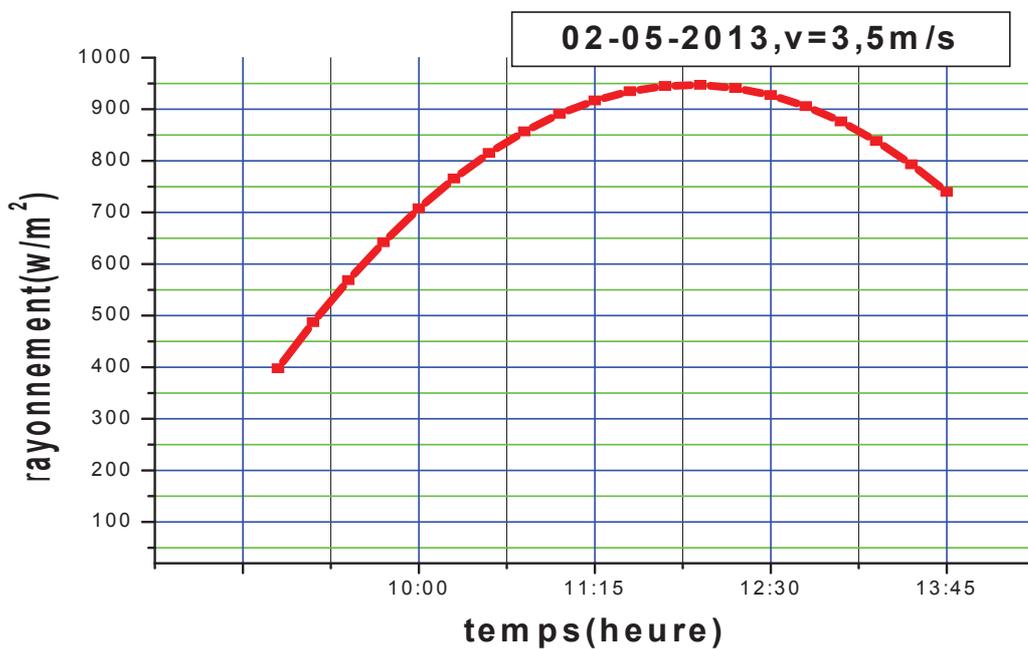


Fig. (IV-13) Evolution temporelle du rayonnement solaire le 02-05-2013

L'examen de ces courbes qui traduisent l'évolution de la température du fluide caloporteur (air) dans l'échangeur de l'entrée (à la température ambiante) jusqu'à la sortie montre qu'un écart est obtenu. Cet écart dépend du débit d'écoulement

2- Evolution de la température de sortie pour différentes vitesses d'écoulement :

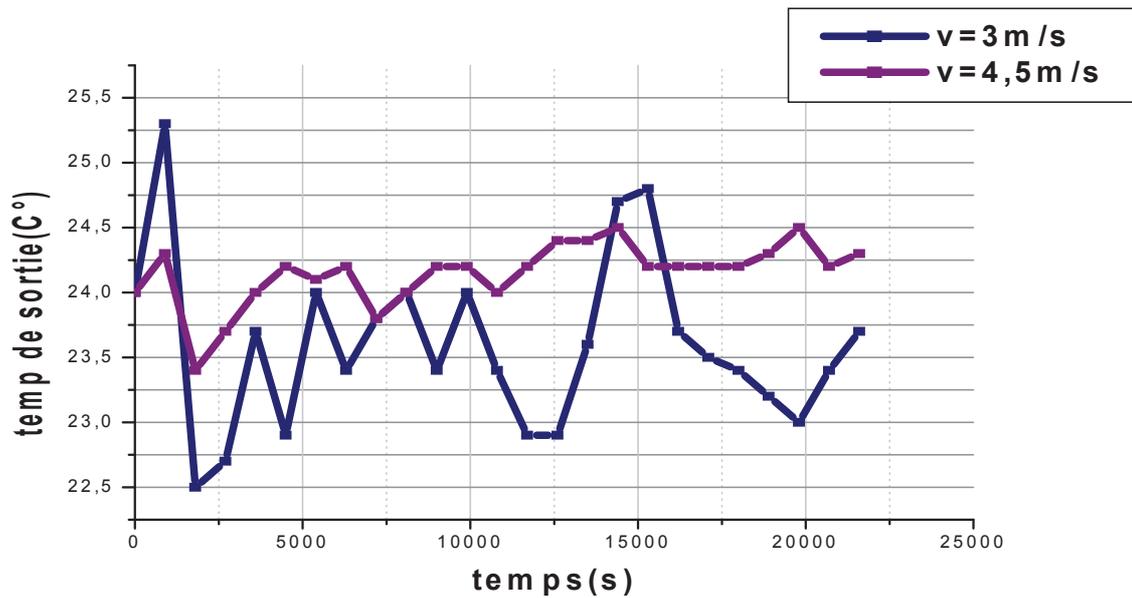


Fig. (IV-14) : Evolution de la température de sortie pour deux vitesses différentes ( $v=3$  et  $v=4,5$  m/s)

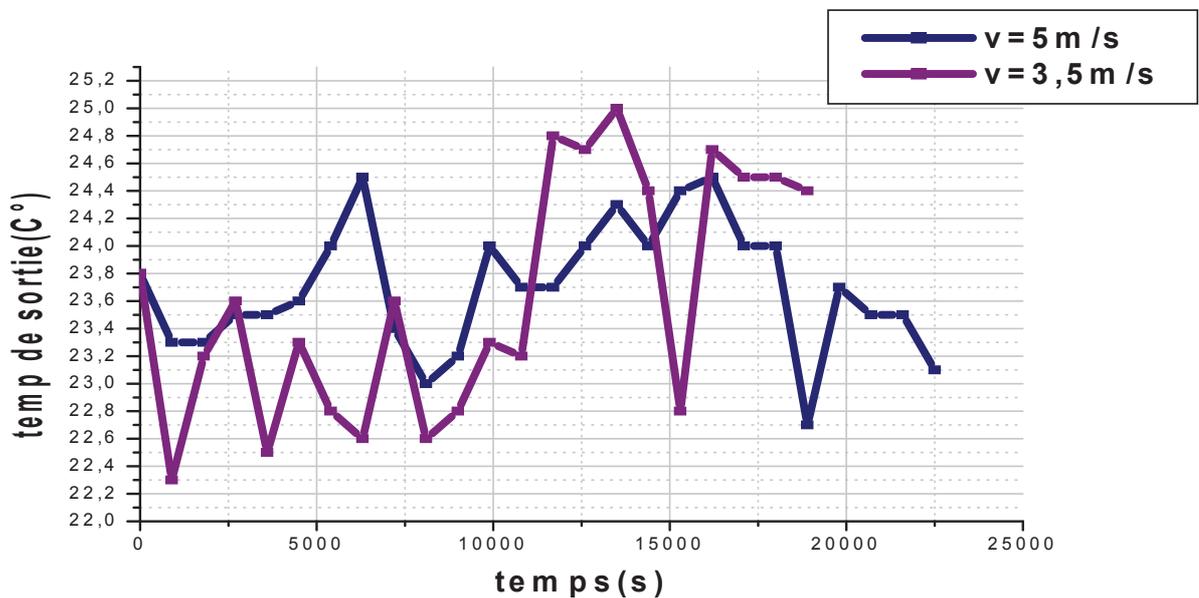
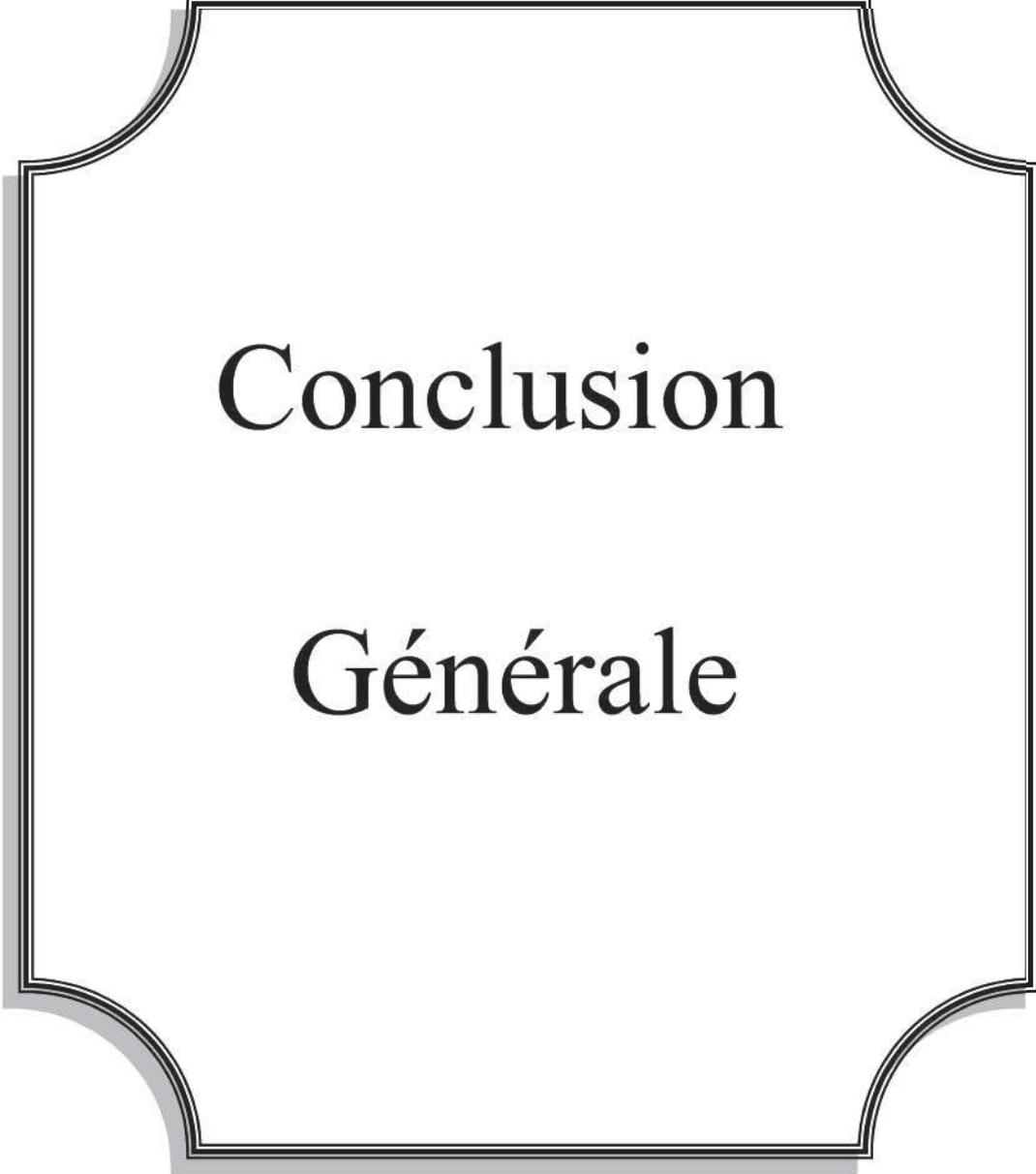


Fig. (IV-15) : Evolution de la température de sortie pour deux vitesses différentes ( $v=3,5$  et  $v=5$  m/s)

On constate que les courbes expérimentales progressent d'une façon irrégulière, ceci est dû aux passages nuageux qui ont perturbés le déroulement de l'expérience.



Conclusion

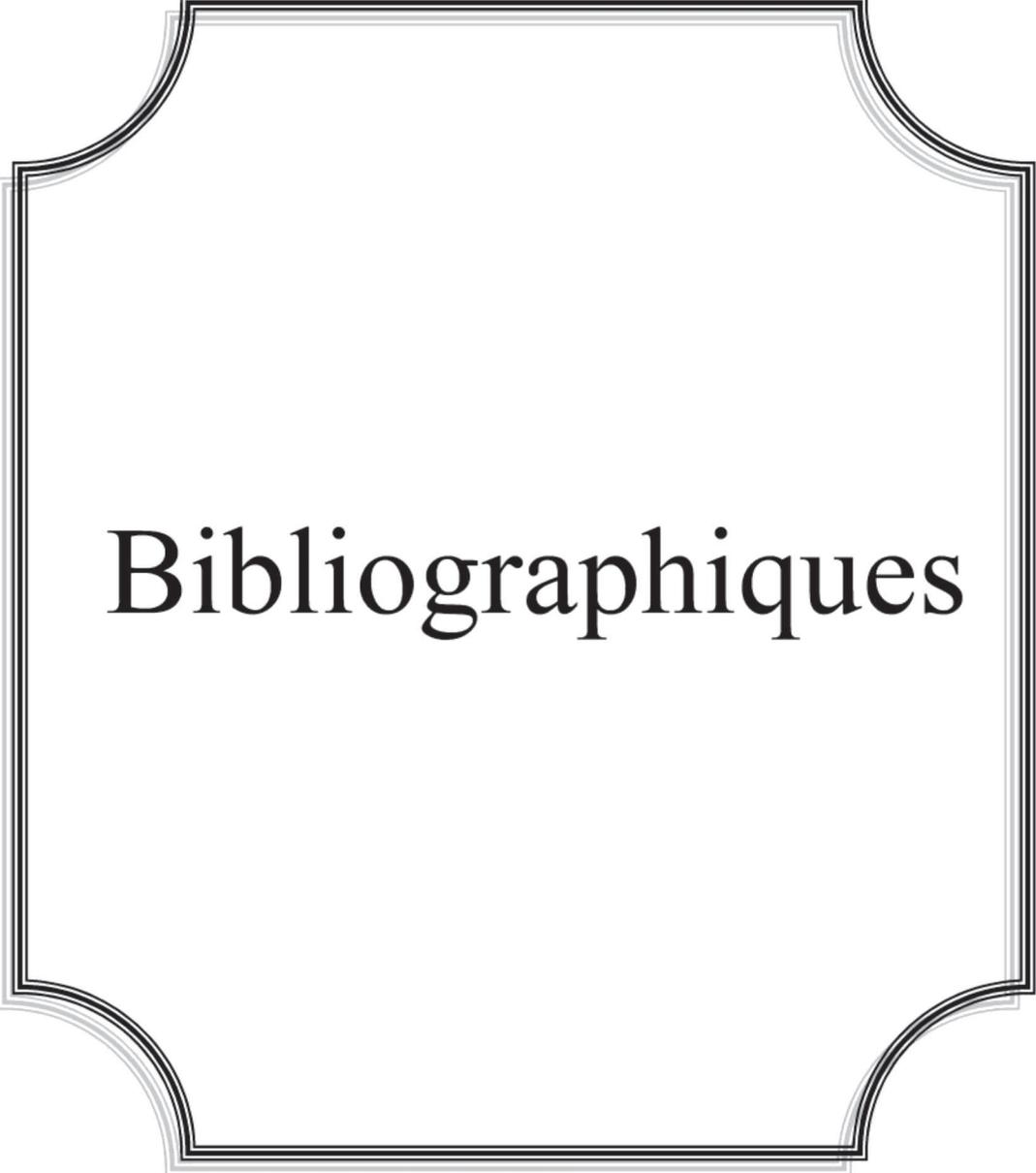
Générale

## Conclusion

Notre étude concernant l'étude des différents paramètres qui affectent la température du sol sera exploitée pour le dimensionnement des puits canadiens. La modélisation de la température du sol, à n'importe quel jour de l'année se base sur les caractéristiques du sol du site et sur la base de données météorologique. Les résultats obtenus sont satisfaisants et méritent d'être confrontés aux expériences pour valider le modèle numérique.

Il est à signaler l'influence de la capacité massique du sol, ce paramètre joue un rôle inverse à celui de la conductivité thermique. Il représente l'inertie thermique du sol. Un sol à forte inertie sera donc toujours préférable, qu'elle que soit la saison.

Les différents flux échangés entre le sol et l'environnement comme le montre les allures des courbes précédemment exposées, sont pratiquement semblables. La différence d'amplitude des flux de rayonnement net et du flux de la chaleur latente d'évaporation au sol



# Bibliographiques

## Bibliographie

### Références bibliographiques :

[1] **M. Benhammou et. Draoui** "Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar - Effet de la nature du sol", article-revue des énergies renouvelable vol.14 N°2(2011) P (219-228)

[2] **B. Mebarki et Al** "Etude d'un système de climatisation intégrant un puits Canadien dans les zones arides, cas de Béchar", article- revue des énergies renouvelable vol15 N°3(2012) P (465-478)

[3] **N. Moumami et al** "Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et Expérimentale dans le site de Biskra" article- revue des énergies renouvelable vol N°3(2010) P (399-406)

[4] **M. Benhammou et Al** "Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie", article- revue des énergies renouvelable vol .15 N°2 (2012) P (275-284)

[5] **David Amitrano** "Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol dit puits Canadien".article, université J.FOURIER-Grenoble(2006)

[6] **M.Rahachi et Al** "Etude d'une nouvelle technique de mesure des températures dans le sol", article-revue Gén therm-Elsevier, Paris (1997)P (851-860)

[7] **Okba Boukhalfa** "Etude théorique et expérimentale d'un chauffe-eau solaire", Mémoire de Master en génie Mécanique, Université de Biskra 2012

[8] **M. Saadeddine**, '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

[9] **Station météorologique Biskra** 2005

## Bibliographie

- [10] **C. Derfouf, A. Aliouali, N. Moummi**, ‘Determining the soil temperature for géothermal. Applications in Biskra’ – SIPE 11, 16 et 17 Janvier 2013 Bechar
- [11] **S. Thiers**, ‘Bilans énergétique et environnementaux de bâtiment à énergie positive’ Thèse de Doctorat, L’école national supérieur des mines de Paris, 2008
- [12] **P. Hollumer**, ‘Utilisation des Echangeurs Air/Sol pour le Chauffage et le Rafraîchissement des Bâtiments’, Thèse de Doctorat, Université de Genève, 2002.
- [13] **D. Bartolomeu**, ‘Performances d’un Echangeur Thermique de Type Air-Sol’, ITP Romillé, 2005.
- ’ .
- [14] **H. Benfattah**, ‘Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l’Habitat’, Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2009.
- [15] **J.F. Sacadura**, ‘Initiation aux Transferts Thermiques’, Technologie & Documentation, Edition Lavoisier, Lyon, 1980.
- [16] **Duffie, J.A., Becman, W. A.** (1991). Solar engineering of thermal processes (second edition). John Wiley & Sons. New York. 920 p.
- [17] **Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D.** (1995). Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers, Solar energy. Vol 53 (3). pp. 301–305.
- [18] **M. Capderou** “Atlas solaire de l’Algérie”, T2 aspect énergétique, OPU 1985

## Résume :

Le présent travail est relatif à l'étude de l'influence des paramètres climatiques et d'environnement ainsi que leur influence sur la température du sol. A travers la modélisation numérique, suivie d'un code de calcul nous avons montré l'évolution de la température de la surface du sol ainsi que les différents flux de chaleur échangés entre le sol et le milieu environnant. Enfin nous avons donné les résultats d'une étude expérimentale relative à un puits Canadian installé à l'Université de Biskra.

## خلاصة :

هذا العمل يتمثل في دراسة تأثير العوامل المناخية والمحيطية على درجة حرارة سطح الارض بواسطة النمذجة الرقمية المتبوعة بالبرمجة المعلوماتية. استطعنا ان نبين تغيير درجة حرارة سطح الارض وكذا التدفقات الحرارية المتبادلة بين سطح الارض والمحيط. كما قمنا بعرض نتائج اعمال تجريبية على نظام تبريد الهواء المسمى "Puits Canadian" الموجود على مستوى جامعة بسكرة