

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Mécanique
Ref 10



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: هندسة ميكانيكية
المرجع: 10

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister

Option
Systèmes énergétiques et maîtrise de l'énergie

**Etude théorique et expérimentale d'un échangeur air/sol
destiné au rafraîchissement des locaux par la géothermie**

Présenté par :

HEMZA NEBBAR

Soutenu publiquement le 28/06/2012

Devant le jury composé de :

Dr. ABDELHAFID BRIMA
Pr. NOUREDDINE MOUMMI
Dr. ABDELHAFID MOUMMI
Dr. ADEL BENCHABANE

Maître de conférences.
Professeur.
Maître de conférences.
Maître de conférences.

Président.
Rapporteur
Examineur
Examineur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

INTRODUCTION GENERALE

L'être humain se sent bien entre 18 et 27°. Il dépense énormément d'énergie pour maintenir la température dans cette marge, sans toutefois toujours y parvenir. En hiver nous chauffons, en été nous climatisons.

Le puits canadien est un système qui se sert de l'inertie thermique du sol pour égaliser ces variations thermiques.

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 rafraîchit. Il s'agit ainsi du système de géothermie le plus simple qui soit, avec une consommation électrique réduite celle du ventilateur utilisé pour la circulation de l'air.

Ce travail est basé sur des modélisations et des simulations numériques de la température du sol et de l'air à la sortie d'un échangeur air/sol. Ceci permet de mettre en évidence l'effet du diamètre, de la longueur, du débit volumétrique, de la différence de température entre le sol et l'air entrant sur le flux thermique fourni par le puits canadien.

Dans le premier chapitre nous présenterons succinctement les projets pilotes et démonstrations qui sont à la base de cette étude sur les échangeurs air/sol. On a exposé pour chaque travail le but, et quelques résultats obtenus à travers des courbes et tableaux.

Le deuxième chapitre présenter une étude théorique du phénomène de transfert thermique ainsi que les équations qui gouvernent la conduction et la convection.

Dans le troisième chapitre nous présentons l'importance et les différents types et techniques de la géothermie, et les paramètres qui influencent les dimensionnements d'un puits canadien et l'installation d'un échangeur air/sol.

Le quatrième chapitre, s'intéresse à la formulation mathématique du problème pour déterminer modèle de la température du sol par conduction puis la modélisation de la température de l'air à la sortie d'un canal enterré horizontalement et canal enterré verticalement.

Le cinquième chapitre est consacré à la résolution numérique des phénomènes de la convection de la chaleur entre le tube enterré et le sol.

Le sixième chapitre est consacré aux résultats obtenus suivis des commentaires faisant intervenir l'effet de certains paramètres sur l'évolution de température de sol, ambiante et l'air à la sortie du système étudié.

Enfin, une conclusion générale dans laquelle sont récapitulés les principaux résultats obtenus.

I-Etude bibliographique

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les projets qui sont à la base de cette étude sur les échangeurs air/sol.

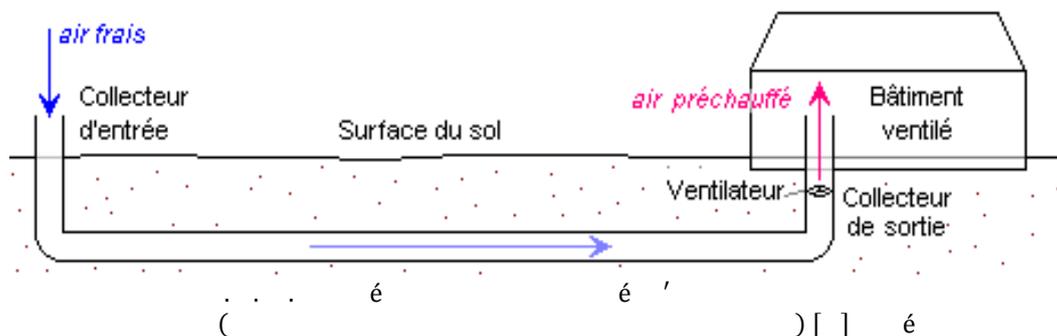
Dans le but de situer notre travail par rapport aux travaux effectués on essaye dans ce chapitre de présenter les principaux travaux de recherche rencontrés dans la littérature qui sont menés dans le même domaine et qui traitent soit les études théoriques, soit celles expérimentales dans un but de dimensionnement ou d'optimisation de ces systèmes.

I-Analyse des travaux effectués

Les travaux menés rencontrés dans la littérature en relation avec notre travail sont les suivants :

I-1 Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive

Ce travail de recherche présenté par Bruno PEUPORTIER [1] en 2008 a été réalisé au Centre Énergétique et Procédés (CEP) de l'École des mines de Paris. Il est consacré à la caractérisation des bâtiments à énergie positive, par leur modélisation, puis par l'évaluation de leurs performances à travers la simulation de bâtiments.



Modèle de la température de sol

La température du sol est calculée à partir d'un modèle simple où elle est une fonction sinusoïdale de la profondeur et du temps t :

$$T(x, t) = T_m + \frac{A}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{P} (t - \tau) \right) + \dots \dots \dots (I.1) [1]$$

Avec :

() : Température moyenne annuelle du sol à la profondeur [°]

() : Amplitude des oscillations de la température du sol... .. [°]

: Pulsation des oscillations... .. [rad.s]

() : Déphasage des oscillations... .. [rad]

Modèle de la température de l'air entre de tube

$$() = + [() | -] - \dots \dots (I.2)[1]$$

Avec :

() : Température de l'air dans le tube à une distance x de l'entrée... .. [°]

: Température du sol au niveau des tubes... .. [°]

: Longueur caractéristique de l'échange thermique, dépendant du débit d'air et des propriétés thermiques de l'air et du tube... .. []

La longueur caractéristique de l'échange thermique est:

$$= \frac{\dot{m} \cdot c_p}{h \cdot 2 \cdot r} \dots \dots \dots (I.3)$$

\dot{m} : Débit massique de l'air dans le tube [.]

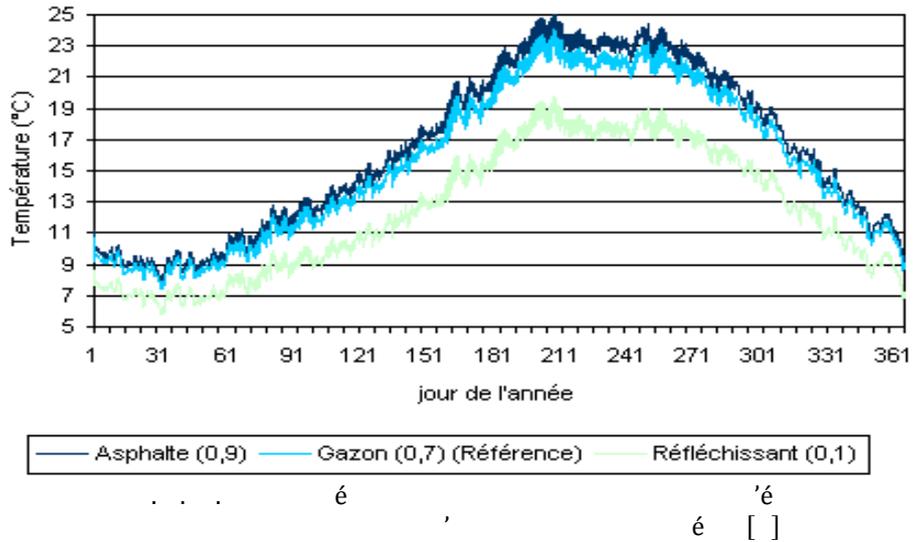
: Capacité calorifique massique de l'air... .. [. °]

h : Coefficient d'échange par convection entre l'air et le tube... .. [. °]

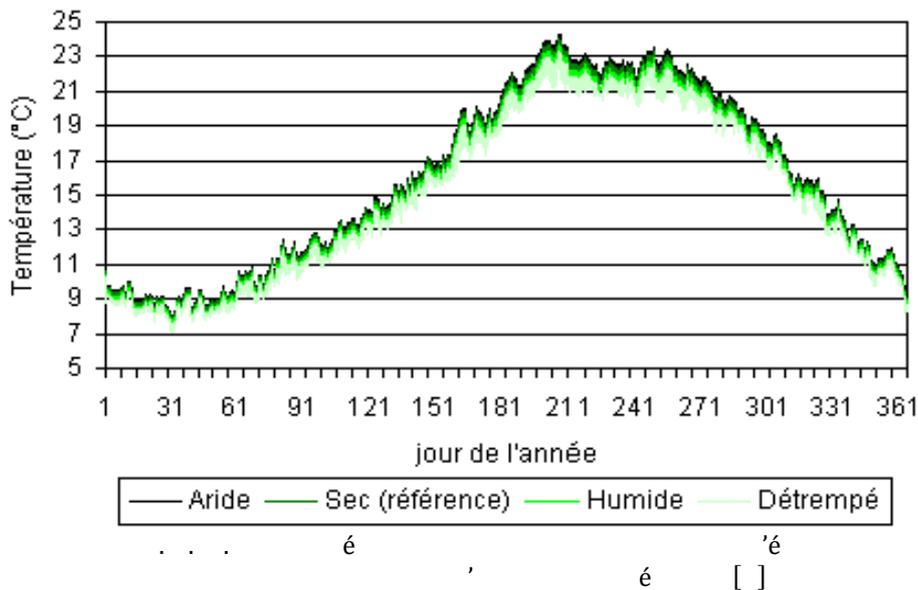
: Rayon intérieur du tube... .. []

Les résultats

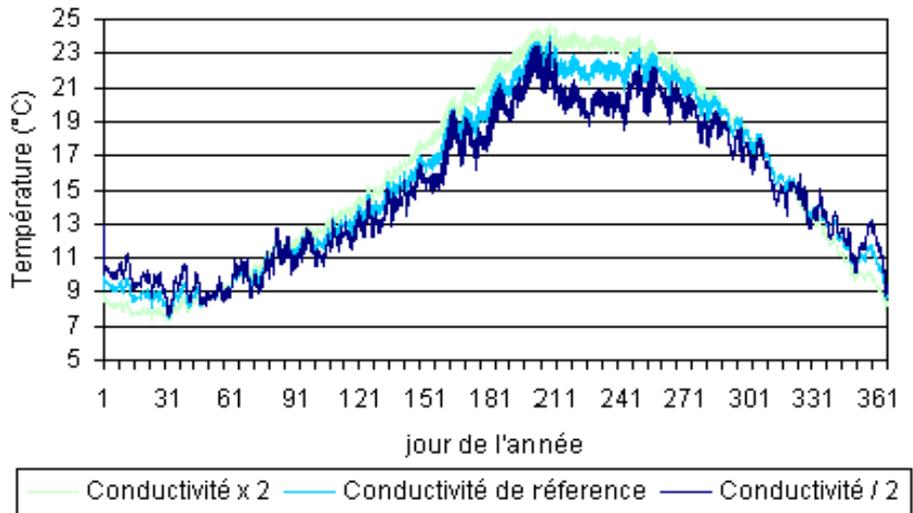
La part du rayonnement solaire absorbée par le sol dépend de la nature de sa surface. La (.) montre pour un sol très absorbant (asphalte), la température du sol sera plus élevée que si le sol était peu absorbant (revêtement réfléchissant), en particulier lors des périodes où le rayonnement solaire est important



L'humidité de la surface du sol intervient sur les échanges latents entre l'air extérieur et la surface du sol. La (.). Ces échanges sont de moindre importance que les échanges par convection ou par rayonnement.



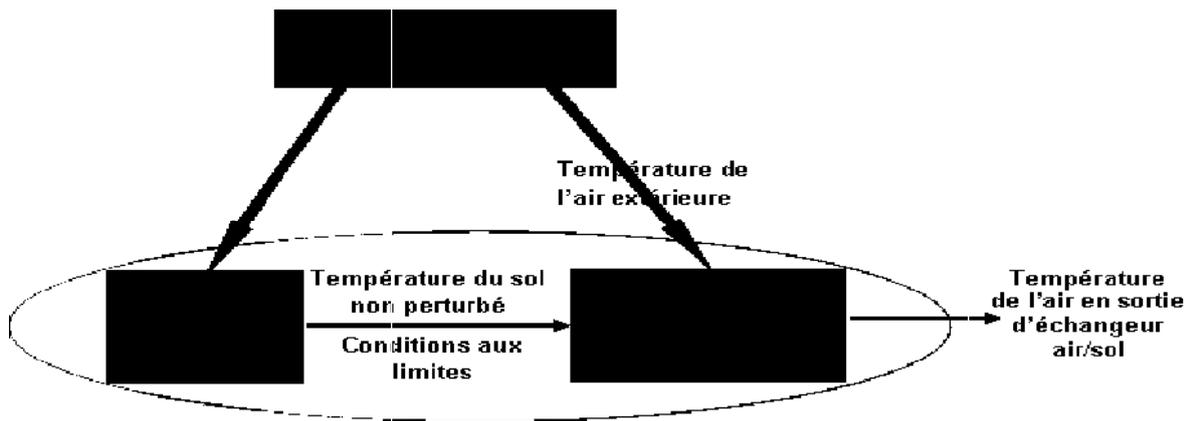
La conductivité thermique du sol intervient à la fois sur la profondeur de pénétration du signal thermique dans le sol et sur le comportement dynamique du sol au voisinage des tubes. Par conséquent, ce paramètre modifie l'amplitude et le déphasage du signal de température du sol ainsi que l'efficacité globale de l'échangeur. La (.). Pour la conductivité du sol est faible, l'amplitude de variation de la température en sortie d'échangeur est plus élevée.



... é 'é -
é []

I-2 Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments

Cette étude présentée par Stéphane THIERS, Bruno PEUPORTIER [2] en 2007 est consacrée à la modélisation thermique d'un échangeur air/sol pour le rafraîchissement de bâtiments. C'est une étude à caractère théorique. Ils ont considéré un échangeur horizontal (Fig. I.5) dont le schéma structurel de fonctionnement est le suivant:



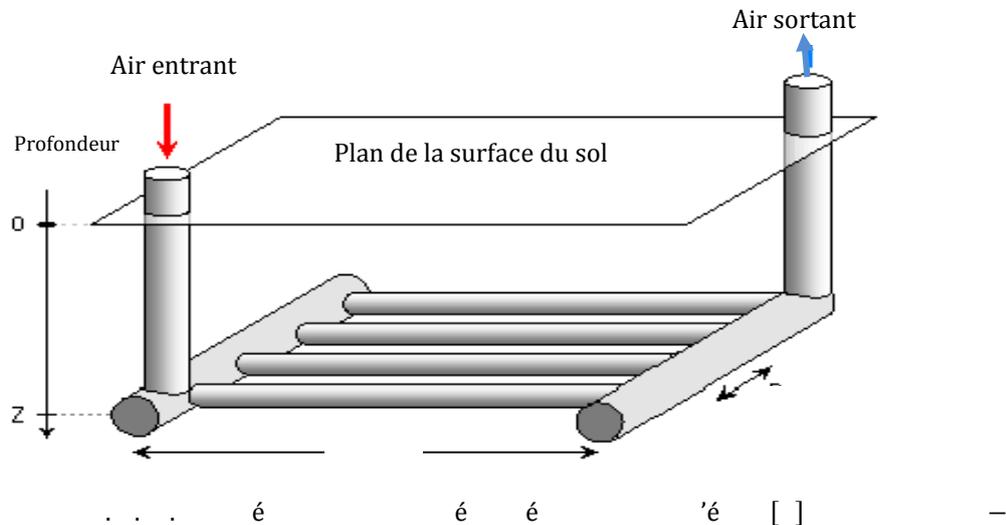
... è 'é - []

Modèle thermique de l'échangeur air-sol

Le modèle d'échangeur a été conçu comme un compromis entre un modèle très simple, et un modèle très détaillé. En conséquence, seuls les phénomènes prépondérants de l'échange thermique air-sol y ont été inclus.

Hypothèses géométriques

L'échangeur air-sol modélisé possède les caractéristiques géométriques suivantes:



- Une entrée d'air verticale située entre la surface du sol ($z=0$) et le niveau d'enfouissement des tubes ($z=+Z$).
- Un ou plusieurs (N tubes) tubes disposés horizontalement sous la terre à la profondeur $z=+Z$, formant une nappe de tubes.
- Une sortie d'air verticale située entre le niveau d'enfouissement des tubes ($z=+Z$) 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) ne sont pas prises en compte dans le modèle thermique.
- Les tubes horizontaux, de même que les collecteurs, sont considérés comme strictement identiques entre eux : mêmes longueurs (L tube), mêmes épaisseurs (e tube), mêmes diamètres intérieurs et extérieurs (respectivement d_i et d_e), mêmes propriétés physiques, mêmes orientations. Ils sont disposés côte à côte dans un même plan horizontal (une seule nappe horizontale).

Hypothèses thermiques

En plus des hypothèses géométriques formulées ci-dessus, les performances de l'échangeur air-sol sont supposées avoir été optimisées au moment de la conception de manière que, pour chaque tube:

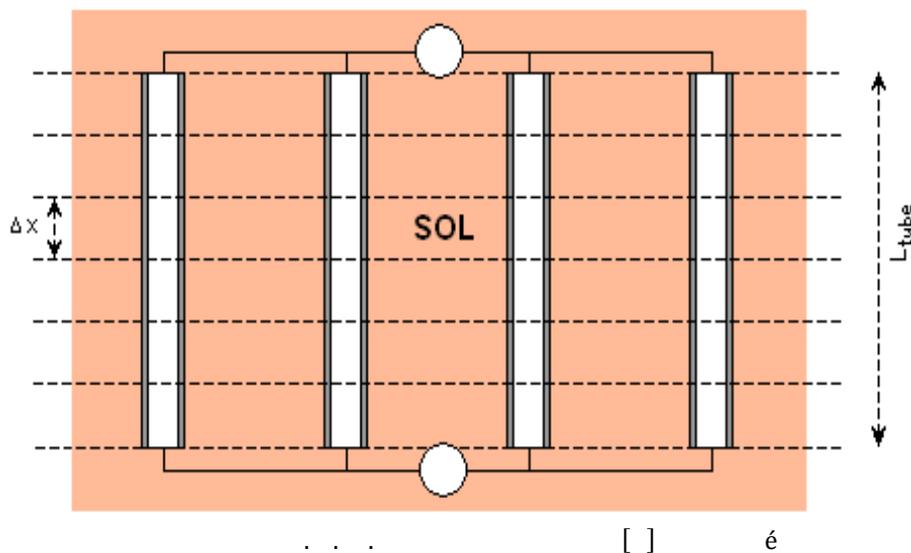
- le sol au voisinage des tubes présente des propriétés thermiques homogènes et identiques.
- le raccordement des tubes aux collecteurs soit réalisé de manière identique.

- Les tubes étant en tout point identique, le débit d'air est supposé identique dans chacun des tubes, à tout instant.

Le maillage

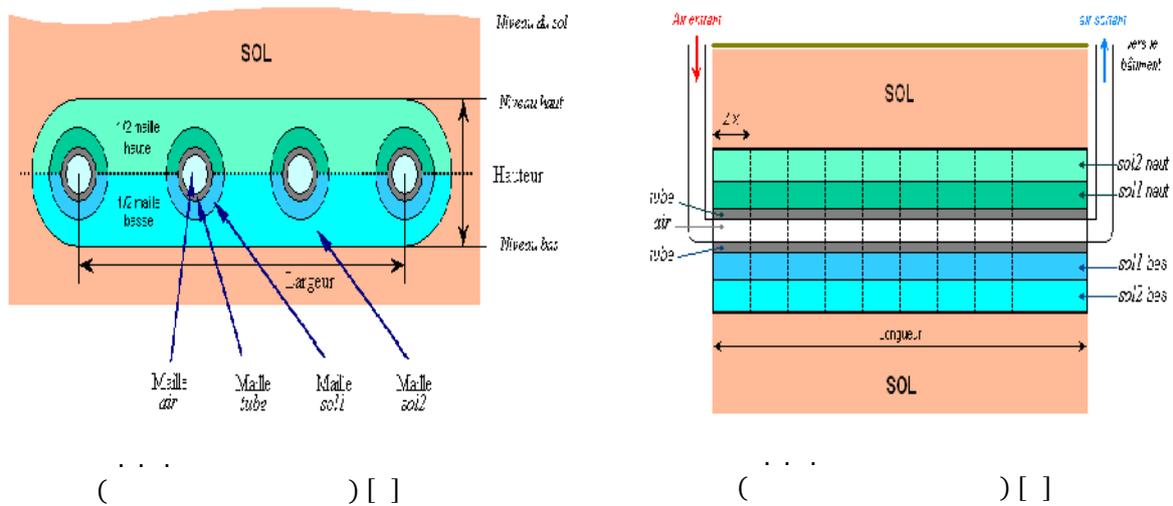
La méthode des différences finies, couramment utilisée pour la simulation d'échangeurs thermiques, a été retenue pour cette modélisation. Par cette méthode, le système modélisé est découpé en volumes (ou mailles). Chaque volume donne lieu à l'établissement d'un bilan thermique. La température et toutes les propriétés physiques au sein de chaque maille sont supposées uniformes.

Le maillage proposé est constitué par un découpage des tubes en n_{pas} tronçons réguliers de longueur $\Delta x = L_{\text{tube}}/n_{\text{pas}}$. Ces tronçons sont délimités par des plans verticaux perpendiculaires aux tubes. Les tronçons sont représentés pour un échangeur à quatre tubes en vue de dessus et les collecteurs d'entrée et de sortie sont symbolisés par des cercles.



Les tranches verticales ainsi définies sont ensuite découpées en mailles cylindriques coaxiales centrées sur chaque tube. En cheminant de l'intérieur vers l'extérieur du tube, les mailles se répartissent comme suit:

- une maille à section circulaire représentant l'intérieur du tube où circule l'air (maille air).
- une maille à section annulaire représentant le tube (maille tube).
- une première maille de sol à section annulaire (maille sol1).
- une seconde maille de sol à section longue (maille sol2).



Les résultats

Les courbes qui suivent montrent l'évolution de la température de l'air mesurée et celle simulée. On constate que les courbes des températures mesurées et simulées sont très proches (Fig. I. 10).

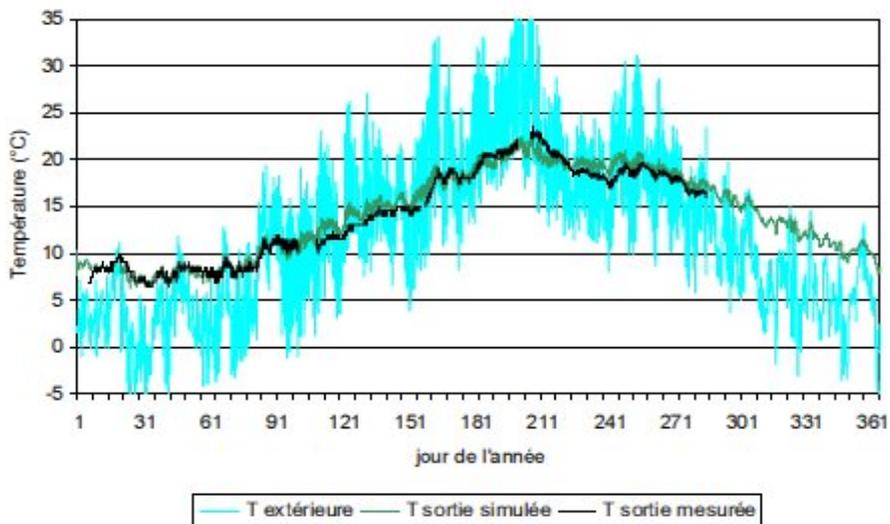
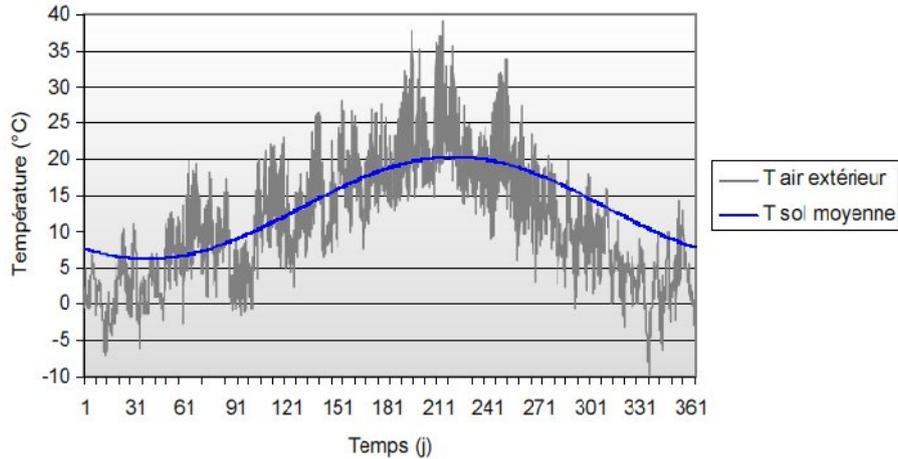


Figure I. 10 : Evolution de la température de l'air mesurée et simulée.

La température de l'air extérieur varie journalièrement, la température du sol, forme une sinusoïde de période annuelle, à l'amplitude atténuée par rapport à la température extérieure (Fig. I. 11).



... .. é à []

I-3 Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien »

Ce travail présenté par David AMITRANO [3] en 2006 est basé sur des simulations numériques d'échange thermique par convection forcée dans un tube enterré. Ceci permet de mettre en évidence l'effet du diamètre.

Le modèle de la température de surface

Ils ont adopté le modèle suivant comme variation de la température de l'air à la surface du sol:

$$T(t) = T_m + A \sin(\omega t - \phi) \dots \dots \dots (I.4) \quad []$$

- :Température moyenne sur l'année... .. [°]
- :Amplitude des variations de température... .. [°]
- : Pulsation... .. [/]
- : Déphasage.

Le modèle de la température en profondeur dans le sol

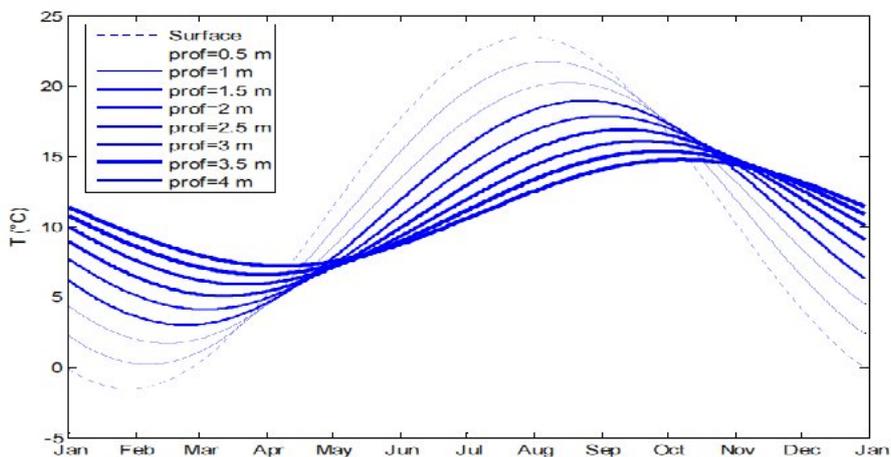
L'équation obtenue après développement théorique pour traduire la variation de la température du sol à une certaine profondeur est la suivante:

$$T(z, t) = T_m + e^{-\frac{z}{2a}} \sin \left(\omega t - \frac{\omega z}{2a} - \phi \right) \dots \dots \dots (I.5) \quad []$$

a: Diffusivité thermique

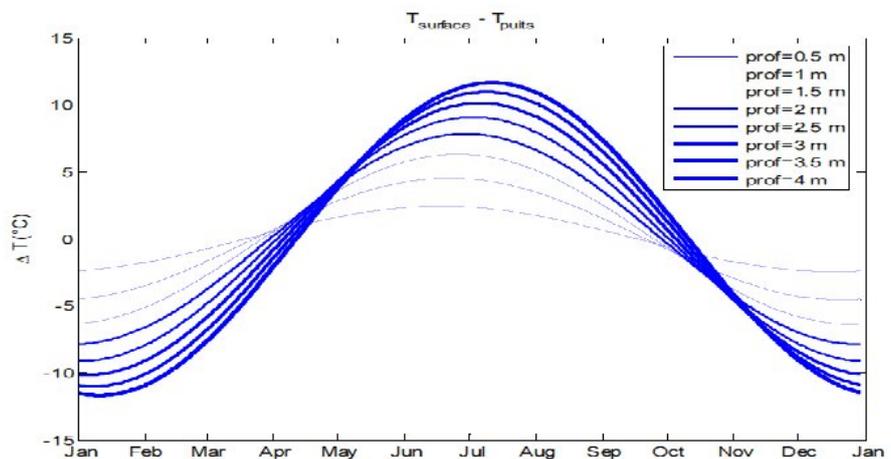
Les résultats obtenus

La figure (Fig. I. 12) montre les températures en surface et à différentes profondeurs cycle annuel de température, de moyenne de 11°C et d'amplitude crête à crête de la profondeur, on observe bien une diminution de l'amplitude des variations et augmentation du déphasage. A 4 m de profondeur le déphasage atteint 2 mois.



é []

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 (Fig. I. 13) montre l'évolution de cette différence au cours de l'année, pour différentes profondeurs d'enfouissement de la gaine.

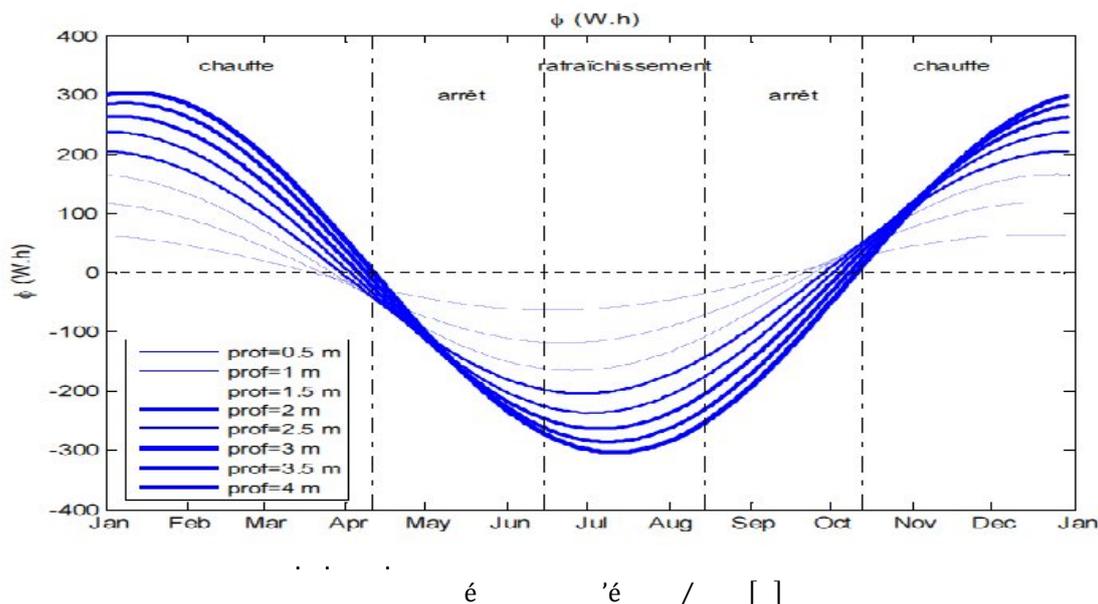


é []

A partir de la différence de température entre l'air extérieur et le sol, on calcule le flux thermique récupérable au cours de l'année pour différentes profondeurs:

$$= \frac{1}{3} (\quad - \quad) \dots \dots \dots (I. 6)$$

L'apport thermique annuel est donné par comparaison avec la déperdition induite par une ventilation prélevant l'air directement à l'extérieur. La figure (Fig.I.14) montre ces résultats, pour une gaine de diamètre 100 et une longueur de gaine de 30 m. Le flux thermique a été considéré constant par durée de 1 heure. L'énergie échangée est exprimée en Wh. Nous avons considéré une période de chauffe du 15 octobre au 15 avril ainsi qu'une période de rafraîchissement du 15 juin au 15 août. Il est intéressant de noter que durant les intersaisons (début du printemps et début de l'automne) l'apport thermique est négatif alors qu'il n'y pas nécessité de rafraîchir le bâtiment ; au contraire ces périodes nécessitent de conserver la chaleur dans le bâtiment. Il est donc préférable d'arrêter le fonctionnement de l'échangeur pendant ces périodes.



I-4 Performances d'un échangeur thermique de type air-sol

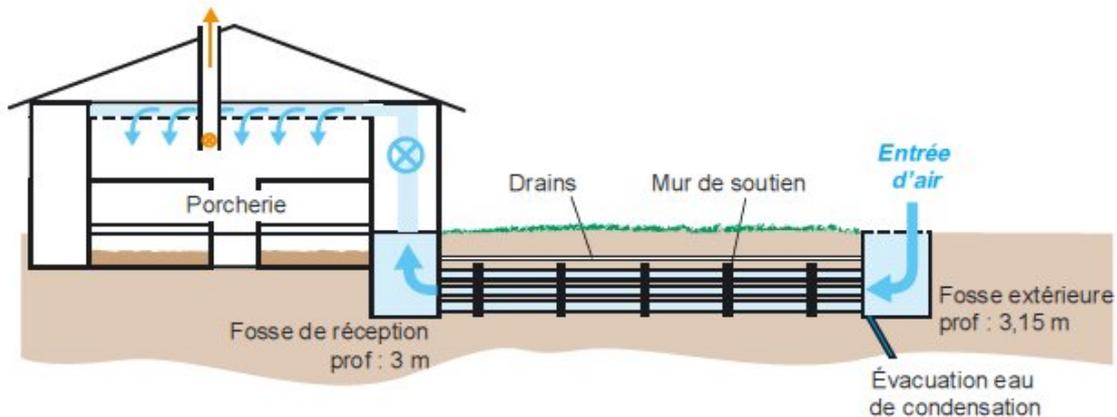
Le travail de recherche présenté par David BARTOLOMEU [4] en 2005 est consacré au dimensionnement d'un tel système pour optimiser ses performances qui sont analysées tout au long de l'année en distinguant les saisons hivernales et estivales. L'analyse a été basée sur de méthodologie d'évaluation et étude paramétrique sous différents climats.

Matériel et méthode

L'échangeur thermique expérimenté est constitué d'un réseau de 36 tubes de 16 cm de diamètre, longs de 25 m et situés à 3 profondeurs différentes : 2 m, 2,5 m et 3 m (Fig.I.15).

Les tubes sont disposés en quinconce et espacés les uns des autres d'une distance entre axe de 50 cm. Pour soutenir correctement l'ensemble des 36 tubes, ceux-ci sont scellés sur des murets transversaux en béton espacés de 2 m les uns des autres. Un caniveau en sortie

d'échangeur et une pente de 2 % permettent de recueillir les eaux de condensation et de les évacuer en cas de besoin à l'aide d'une pompe. Par ailleurs, deux fosses de réception en béton sont construites à l'entrée et en sortie d'échangeur. Un ventilateur de 450 mm est ajouté à l'entrée du bâtiment afin de compenser les pertes de charge générées par le système. Le sol est constitué d'un sable fin compacté qui entoure l'ensemble des 36 tuyaux. Au dessus, le couvert végétal est présent sur environ 50 cm.



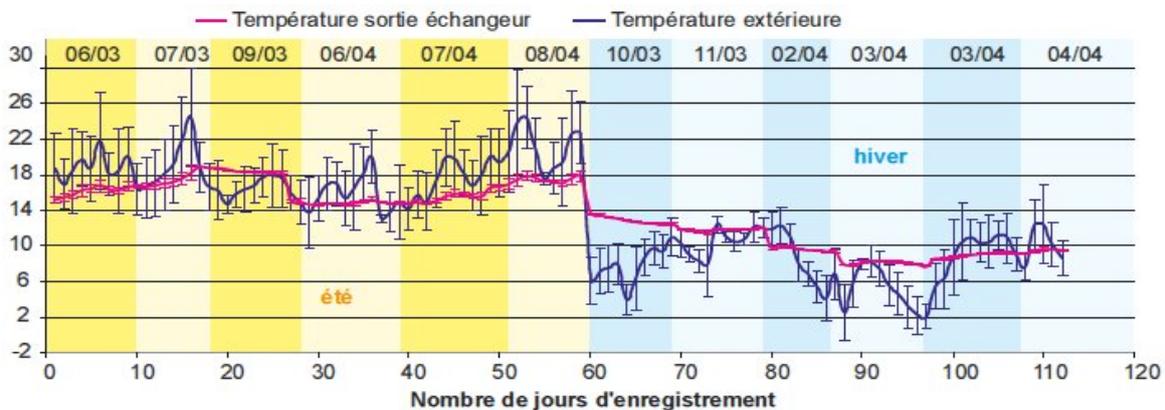
[] é

Modèle de la température de sortie de l'air obtenu:

$$() = , () + , () + . - é - ... (I.7) []$$

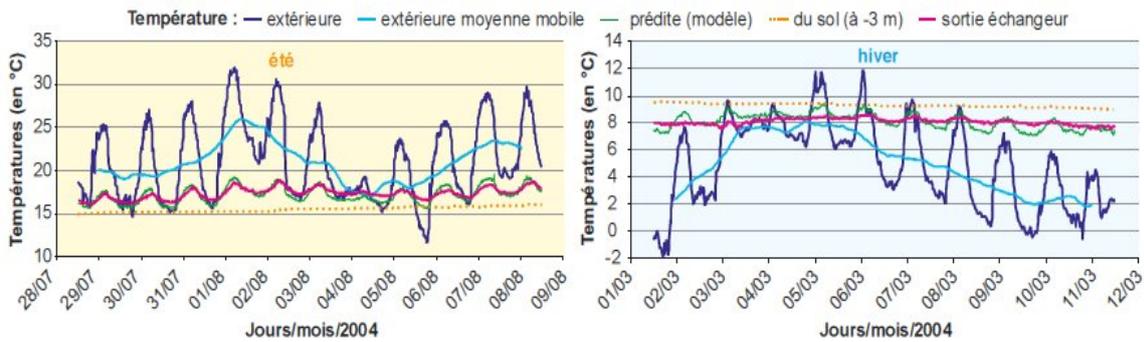
Les résultats obtenus

La figure (Fig.I.16) montre qu'en saison hivernale, la température du sol est supérieure à celle de l'air extérieur. L'échangeur permet de réchauffer l'air de 10°C dans les conditions extrêmes. Et en saison estivale, la température du sol est inférieure à celle de l'air extérieur. L'échangeur permet de refroidir l'air de 13.4°C dans les conditions extrêmes



[] é

La figure (Fig.I.17) montre la moyenne pour mieux visualiser l'évolution de la température extérieure au fil des jours : des cycles courts de 5 à 7 jours apparaissent en été alors qu'en hiver les cycles sont beaucoup plus longs. Ces facteurs naturels ne semblent pas affecter l'efficacité du système puisque la température en sortie d'échangeur reste stable quelle que soit la saison, avec un décalage de 2 à 3°C par rapport à la température du sol.



... É. é 'é é []

I-5 Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systématique

Le travail de recherche présenté par Pierre HOLLMULLER [5] en 2002 est consacré à l'utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. C'est une étude théorique et expérimentale. L'analyse a été basée sur des mesures récoltées et simulations effectuées avec un modèle numérique développé à cet effet.

Le modèle analytique de la température de l'air

Le développement théorique des équations du bilan thermique, a conduit à l'équation suivante, qui traduit l'évolution de la de la température de l'air :

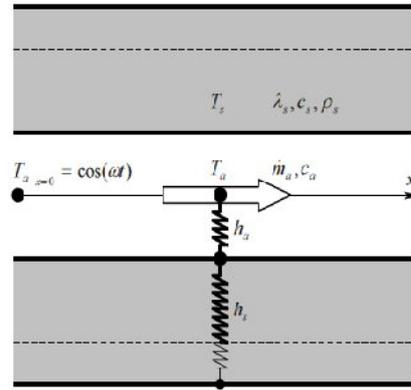
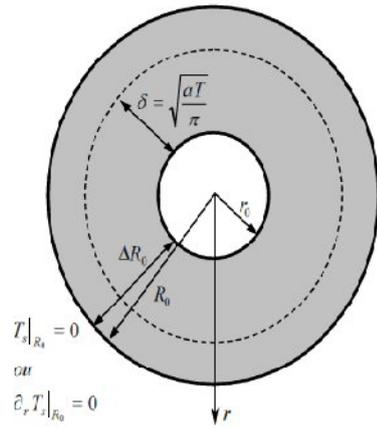
$$(\theta) = \theta_0 \cdot e^{-\frac{h}{\rho \cdot c \cdot x}} \cdot \cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{v} \right) \dots \dots \dots (I.8) [5]$$

: Amplitude de la température d'air à l'entrée du tube... .. [°]

: Surface d'échange... .. []

: Fréquence angulaire du signal sinusoïdal... .. []

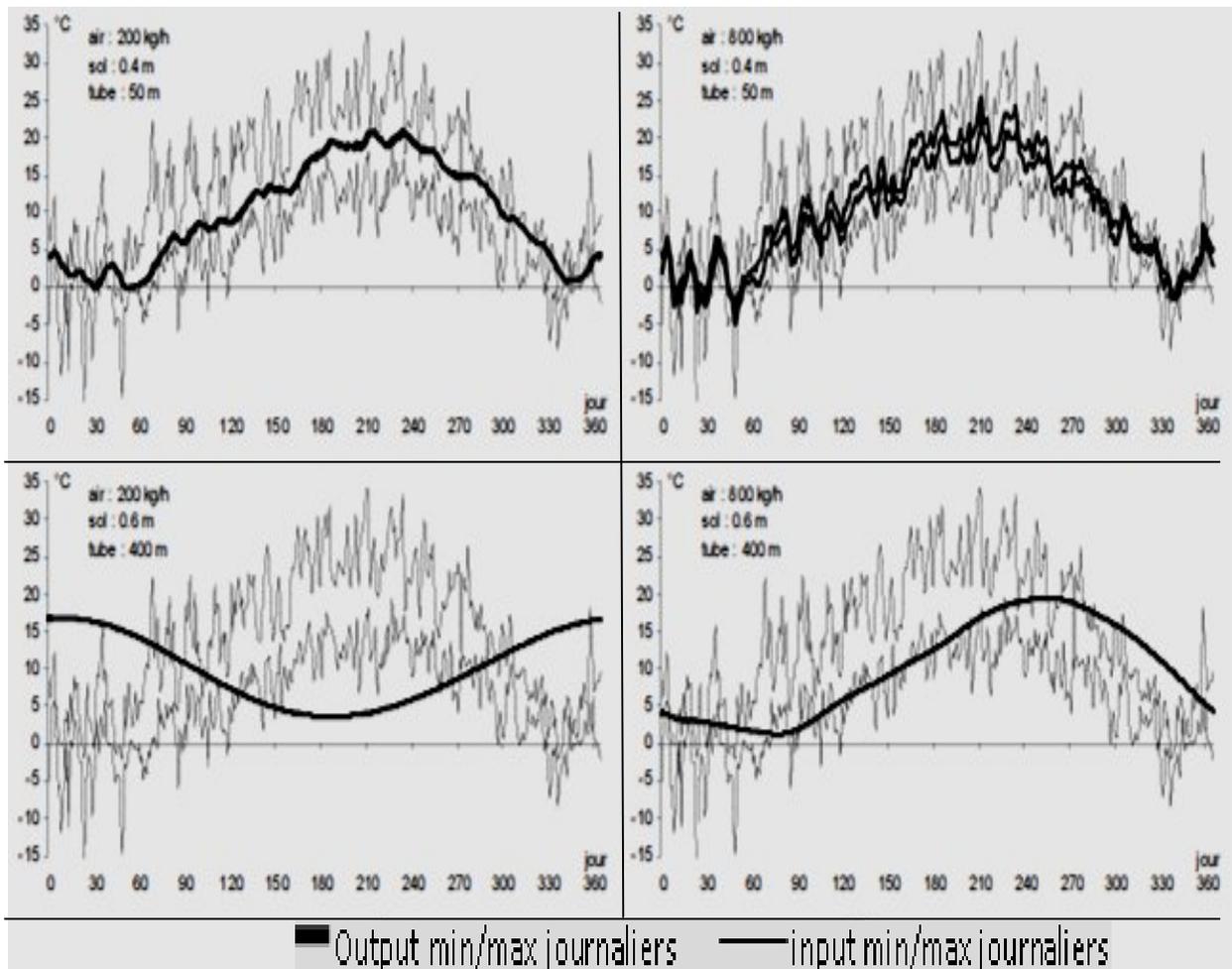
: Le temps nécessaire au flux d'air pour parcourir la distance x. []



... é / :

[]

Résultats obtenus



... é / à

, é é é []

I-6 Synthèse globale des travaux remontés dans la littérature

Le dimensionnement d'un puits canadien est assez délicat du fait du nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de tubes, profondeur d'enfouissement, distance entre les tubes, débit de ventilation, type de sol, température de l'air sortie.

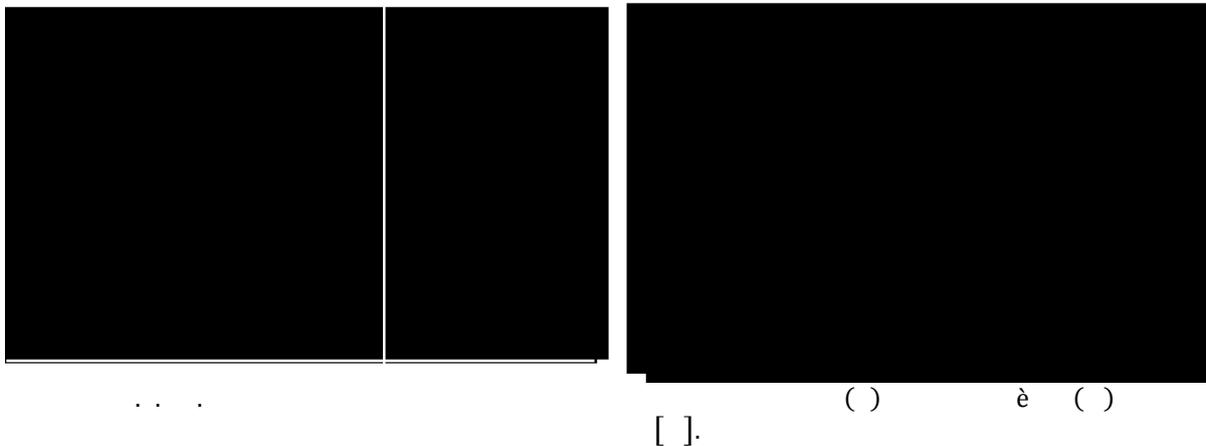
Les paramètres influençant sur les dimensionnements d'un puits canadien[6]

1. La longueur du puits [6]

D'après l'analyse des travaux rencontrés, cette longueur doit être comprise entre 25 et 40 mètres. En dessous de 25 mètres, le puits canadien ne permet pas d'obtenir une température de sortie proche de celle du sol car le rendement de l'échange est moyen. En revanche au delà de 40 mètres le rendement n'augmente plus de manière significative.

2. Le diamètre de la conduite et le débit d'air [6]

Ces deux paramètres sont liés par la vitesse de l'air parcourant le puits. Celle-ci ne doit pas dépasser les 3 mètres par seconde afin de ne pas induire des pertes de charges trop importantes dans le puits. La qualité de l'échange varie peu en fonction du diamètre. Afin d'obtenir un débit significatif, ce dernier doit être compris entre 15 et 25 centimètres. Plus le débit est important, plus la longueur du puits devra être importante.



Pour obtenir un rendement d'échange thermique d'environ 80 %, on peut se baser sur le tableau suivant :

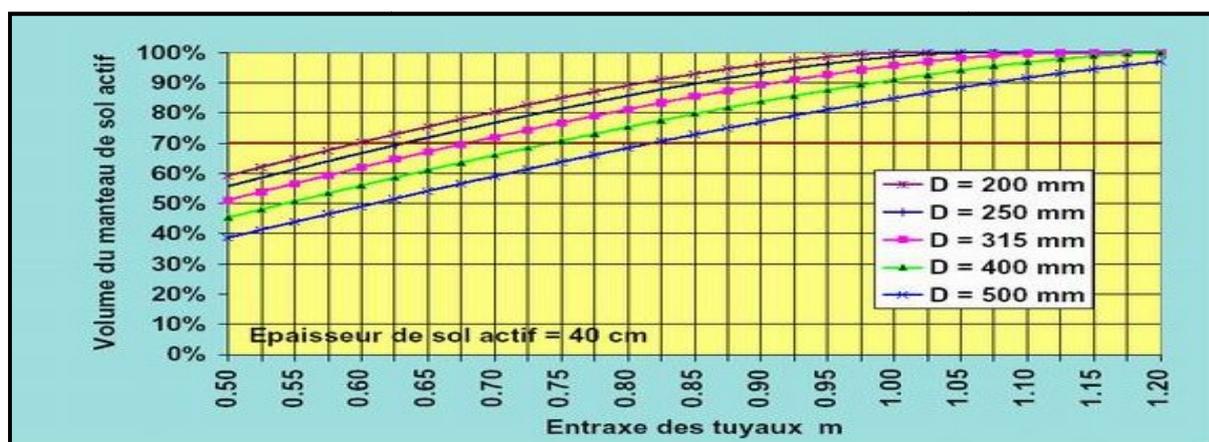
Débit par conduite [m ³ /h]	Diamètre 100 mm	Diamètre 150 mm	Diamètre 200 mm	Diamètre 250 mm	Diamètre 300 mm
100	10,6	11,7	13,3		
200	11,3	12,7	14,3	15,9	17,2
300		13,1	15,1	17,2	19
400		13,7	15,9	17,7	20,4
500		14,1	16,4	19	21,6
600		14,7	16,9	19,8	22,5
700			17,7	20,2	23,6
800			18,3	21	24,6
900			18,5	21,5	25,1
1 000			18,6	21,8	25,8

é ' è [6]

Par exemple, pour alimenter une maison avec 300 m³/h (ventilation hygiénique), on peut opter pour un conduit de 15 m et 200 mm de diamètre, ou pour 2 conduites de 12 m et 15 mm de diamètre, amenant chacune 150 m³/h. Le nombre de conduite sera fonction de la place disponible. On évitera les longues conduites présentant des coudes, pour leur préférer de multiples conduites linéaires. [6]

3. La distance entre canalisations [6]

L'amortisseur thermique du puits est assuré 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 jeux. 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.



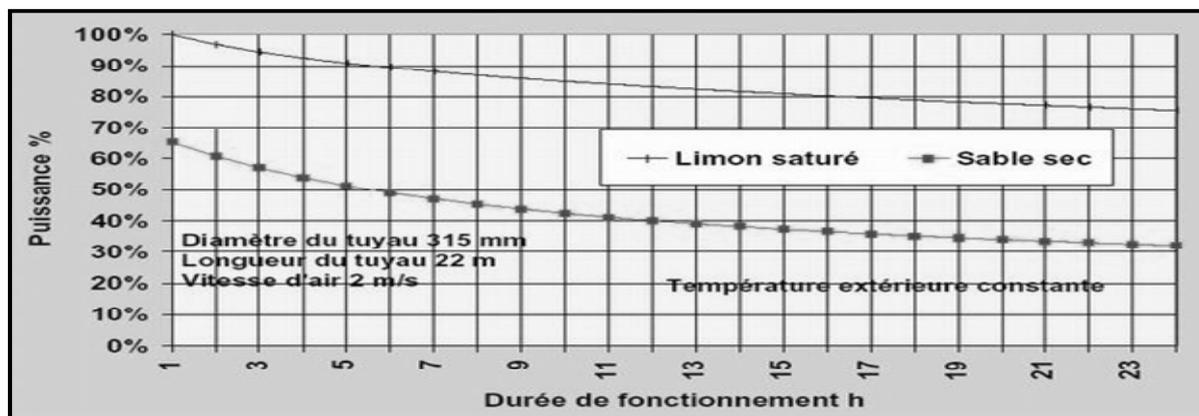
é è () [6]

4. La température de sortie [6]

Elle est directement liée à la température du sol. Son amplitude diminue fortement avec la profondeur. Le puits doit donc être enterré assez profondément de manière à profiter au mieux de l'inertie du sol.

5. Le type de sol [6]

Il n'influe pas de manière importante sur la température de sortie dans le cas d'un puits unique à condition que le débit ne soit pas trop élevé. Si par contre plusieurs puits sont placés à proximité il faut les espacer suffisamment pour que le sol puisse se régénérer.



'é [6]

6. Propriétés thermiques du terrain [6]

La conductivité thermique moyenne de la couche de terrain traversée par les sondes géothermiques influe sur les performances de l'échangeur.

7. Les propriétés physiques des canalisations [6]

La capacité et conductivité thermiques des canalisations sont généralement négligées dans l'ensemble des études, 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 les prendre en compte.

8. La géométrie de l'échangeur [6]

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.

9. Le rayonnement solaire et la surface du sol [6]

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 études.

10. Le régime de fonctionnement du puits canadien [6]

Lors du rafraîchissement d'été, le débit doit être plus élevé que lors du préchauffage d'hiver.

11. La qualité de l'air : [6]

L'objectif est d'éviter les pollutions qui pourraient résulter du système (odeurs, humidité, bactéries,...).pour cela, il est recommandé de:

- ❖ Utiliser pour l'entrée du puits canadien un matériau faiblement émissif (vapeur, odeur...).
Ex: aluminium, tôle...
- ❖ Protéger au minimum l'entrée à l'aide d'une grille fine, pour éviter que des animaux y pénètrent (rongeurs, moustiques...).
- ❖ Placer l'entrée à une hauteur suffisante (1,20 m) pour éviter d'aspirer de la poussière et loin des sources de pollution.
- ❖ L'entrée doit être accessible pour le nettoyage.
- ❖ Ne pas placer l'entrée au milieu de plantes vertes.

II-Généralités sur le transfert de chaleur

II-1 Le transfert par convection

Définitions

Lorsque le transfert de chaleur s'accompagne d'un transfert de masse, il est appelé transfert par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides ou lorsque un fluide circule autour d'un solide. Le transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres:

- la différence de température entre la paroi et le fluide.
- la vitesse du fluide.
- la capacité thermique massique du fluide.
- la surface d'échange.
- l'état de surface du solide.
- sa dimension...etc.

Les différents types de convection

Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

❖ La convection naturelle ou libre

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet :

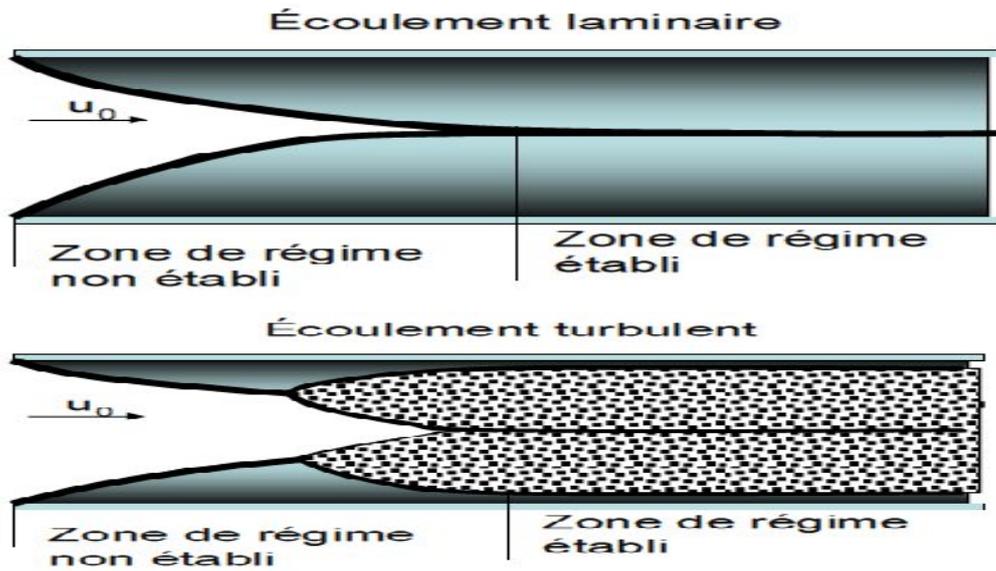
- des différences de masses volumiques résultant des différences de températures sur les frontières.
- d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

❖ La convection forcée

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).

Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement. On distingue :

- Ecoulement en régime turbulent.
- Ecoulement en régime laminaire.



. . . é ('é) [7]

La loi de Newton

La loi de Newton donne l'expression de la quantité échangée entre la surface d'un solide à la température et le fluide à la température .

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur transmis est donné par la relation dite loi de Newton :

$$P = h \cdot S \cdot (T_c - T_f) \quad (1)$$

Où:

- P : La puissance transmise... [W]
- h : Coefficient d'échange... [W / m² .°]
- $T_c - T_f$: Différence température entre le corps et le fluide... [°]
- S : Surface d'échange... [m²]

Coefficient d'échange par convection

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

La quantité de chaleur qui traverse une surface pendant l'intervalle de temps , peut s'écrire:

$$Q = h \cdot S \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad [7]$$

h : Le coefficient d'échange par convection... [/ (.°)]

S : La surface d'échange par convection... []

Q : La quantité de chaleur... []

\dot{Q} : La quantité de chaleur par unité de temps... []

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer h qui dépend de nombreux paramètres :

- caractéristiques du fluide.
- nature de l'écoulement.
- la température de l'air.
- la forme de la surface d'échange.

❖ **Le nombre de Prandtl**

Caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température :

$$Pr = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad [7]$$

❖ **Le nombre de Nusselt**

Il caractérise l'importance de la convection par rapport à la conduction : C'est le rapport de la quantité de chaleur échangée par convection $h.S.\Delta T$ à une quantité de chaleur échangée par conduction $\lambda.S.\Delta T/d$:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad [7]$$

❖ **Le nombre de Reynolds**

Le régime d'écoulement d'un fluide peut être laminaire ou turbulent. Le passage d'un régime à un autre est caractérisé par le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad [7]$$

$Re = 2200$: Une valeur critique.

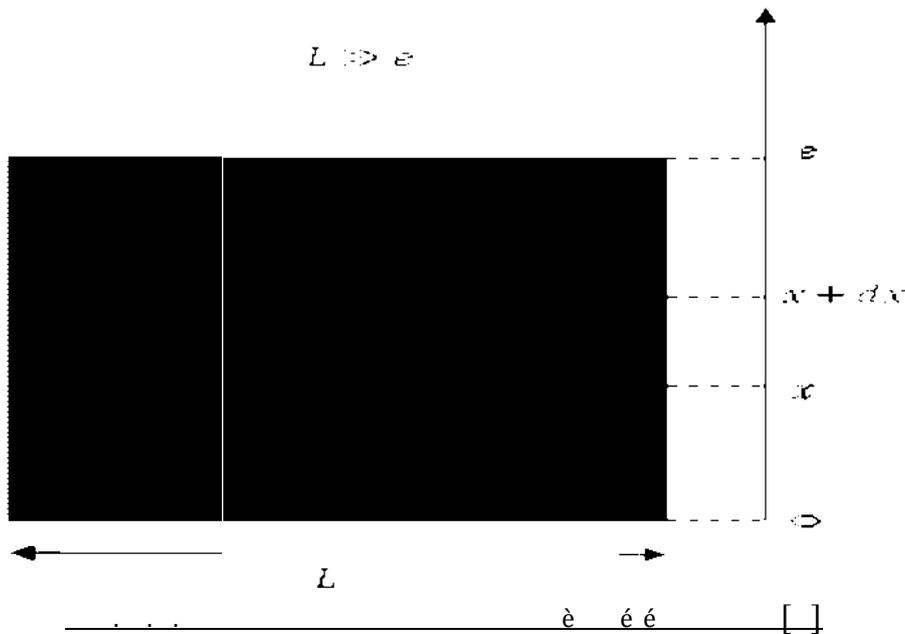
$Re < 2200$: Le régime est dit laminaire.

$Re > 2200$: Le régime est dit turbulent.

II-2 Le transport de chaleur par conduction

1^{ère} loi de conduction de la chaleur

Dans sa forme monodimensionnelle, elle décrit le transfert de chaleur unidirectionnel au travers d'un mur plan:



Considérons un système d'épaisseur L dans la direction x et de section d'aire S normalement à la direction x . Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit [8]:

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_{\text{ext}} = \dot{Q}_{x+dx} + \dot{Q}_{\text{int}} \quad (6)[8]$$

Avec: $\dot{Q}_x = -k S \frac{dT}{dx}$ et $\dot{Q}_{x+dx} = -k S \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(-k S \frac{dT}{dx} \right) dx$
 $\dot{Q}_{\text{ext}} = \dot{Q}_{\text{ext}}$ et $\dot{Q}_{\text{int}} = \dot{Q}_{\text{int}}$ [/]

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par $S dx$, nous obtenons :

$$\frac{d}{dx} \left(-k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\dot{Q}_{\text{ext}}}{S dx} = \frac{d}{dx} \left(-k \frac{dT}{dx} \right) + \dot{Q}_{\text{int}} \quad (7)$$

Soit :

$$\frac{d}{dx} \left(-k \frac{dT}{dx} \right) + \dot{Q}_{\text{int}} = \dot{Q}_{\text{int}}$$

Et dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} = \dots \dots \dots (- 8)$$

II-3 Équation générale du transport de chaleur par conduction

❖ **Loi de conservation de l'énergie**

$$\dots = \dots \dots \dots (- 8)$$

❖ **Equation générale**

$$\dots = \dots (-) \dots \dots \dots (- 10)$$

: La capacité thermique volumique.

II-4 La diffusion thermique

Equation de la chaleur ou de la diffusion thermique (sans ou avec sources) :

Sans sources

$$= (\lambda) \dots \dots \dots (- 11)$$

Avec sources

$$+ (1/ \alpha) (\dot{q}) = (\lambda) \dots \dots \dots (- 12)$$

Où : $\alpha = \lambda / \rho c_p$

: La génération de puissance thermique [W / m³].

: La diffusivité thermique [m² / s].

Différentes techniques de la Géothermie

III-1 Généralités

III-1-1 Définition de la Géothermie

La Géothermie: c'est une science qui étudie des phénomènes thermiques internes du globe terrestre et de leur utilisation comme source d'énergie.

L'énergie Géothermique: c'est principalement due à la différence de température entre le centre de la terre et la surface.



. . . é é 'é []

Devant la multitude d'échanges thermiques qui sont mis en jeu, les principaux, sont:

- Apport radiatif solaire total (flux direct + flux diffus + effet de serre)
- Convection dans l'air
- Rayonnement infrarouge émis par le sol
- Conduction dans le sol et dans l'air

III-1-2 Différents types de gisements géothermiques

Les gisements peuvent être classés selon plusieurs critères: Le contexte géologique, le niveau de température, le mode d'exploitation, le type d'utilisation. On retrouve la classification en fonction de la température:

➤ Géothermie haute énergie ($T > 150^{\circ}\text{C}$)

Qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.

➤ Géothermie moyenne énergie ($90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$)

Par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire.

➤ Géothermie basse énergie ($30^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$)

Géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. Principale utilisation : les réseaux de chauffage urbain.

➤ Géothermie très basse énergie ($T < 30^{\circ}\text{C}$)

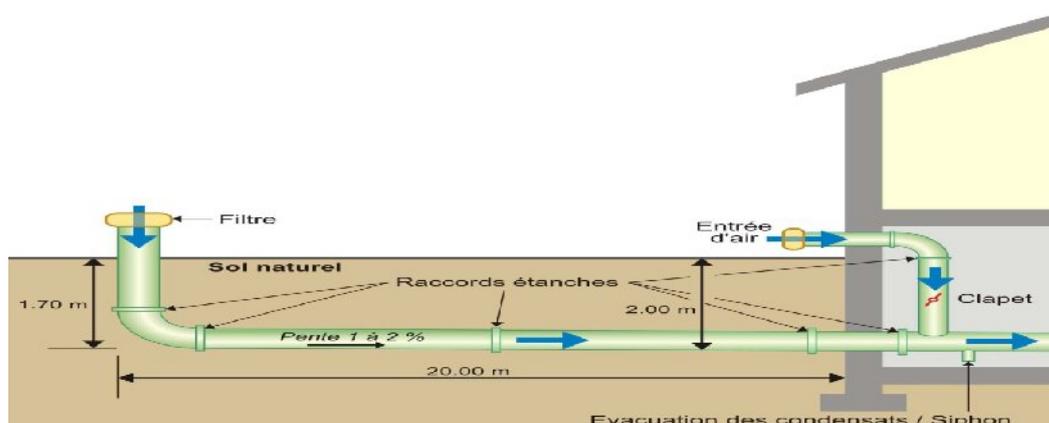
Géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30°C. Principales utilisations : le chauffage et la climatisation.

III-2 L'échangeur thermique air/sol (puits canadien)

III-2-1 Définition

Le puits canadien ou puits provençal est un système dit géothermique qui utilise l'énergie présente dans le sol à proximité de sa surface pour chauffer ou refroidir l'air neuf de ventilation des bâtiments. Il est basé sur le fait que la température du sol à quelques mètres de profondeur reste plus stable, est plus élevée que la température ambiante en hiver, et plus basse en été.

III-2-2 Principe de fonctionnement du puits canadien



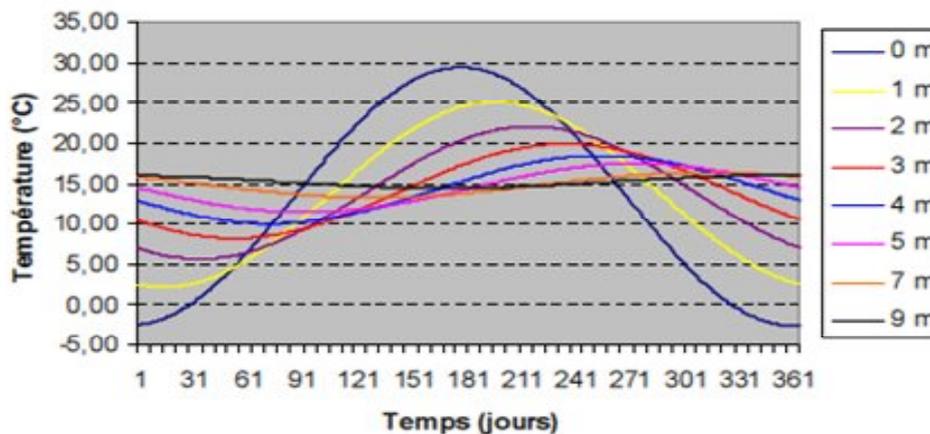
. . é

[]

Le principe du puits canadien/provençal est de faire circuler l'air neuf de ventilation dans un conduit enterré grâce à un ventilateur, avant de l'insuffler dans le bâtiment.

En hiver, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré. Le puits est alors dit puits canadien.

En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à la température extérieure. Le puits est alors dit puits provençal.



é

III-2-3 Les 4 principaux éléments d'un puits canadien/provençal

1) L'entrée d'air neuf

- ❖ Type d'entrée: il s'agit généralement d'une bouche extérieure pour le secteur résidentiel et d'un plénum pour le secteur tertiaire nécessitant de plus gros volumes de renouvellement d'air.
- ❖ Hauteur de la prise d'entrée d'air neuf : elle doit être supérieure à 1,10 m pour limiter l'encrassement.
- ❖ Chapeau de protection : il permet d'éviter les infiltrations d'eau de pluie à l'intérieur du puits.
- ❖ Grille de protection à fin maillage: elle est indispensable pour éviter l'intrusion de rongeurs, oiseaux, insectes. Elle doit être facilement accessible pour nettoyage.
- ❖ Filtres: il est conseillé de munir les entrées d'air des puits canadiens/provençaux d'un filtre. La classe du filtre à utiliser dépend de la densité et du type de poussières à proximité de l'entrée d'air.

❖ Positionnement de l'entrée d'air neuf: celle-ci doit être implantée loin des sources de pollution (voirie, parking, poubelles) et loin de toute végétation pouvant produire des pollens allergisants.

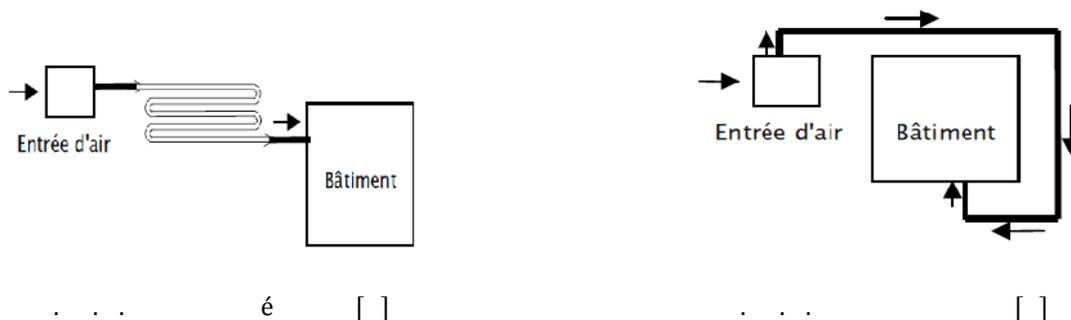
2) Les conduits

❖ Nombre de tubes: le conduit du puits peut être constitué d'un seul tube posé en méandre ou en boucle autour du bâtiment ou être organisé sous la forme d'un réseau de tubes parallèles installés entre des collecteurs afin d'augmenter le débit d'air circulant dans le puits.

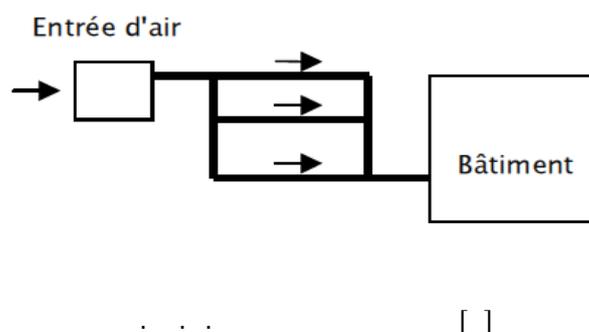
❖ Longueur de chaque tube: elle est habituellement de l'ordre de 30 à 50 m afin de limiter les pertes de charge. La longueur totale du conduit est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique et du type d'installation choisie.

❖ Diamètre des tubes: pour optimiser les transferts thermiques sol/air, la vitesse de l'air au sein du puits doit être comprise entre 1 et 3 m/s. En fonction des débits d'air requis, le diamètre du conduit du puits est alors calculé pour respecter ces conditions de vitesse d'air.

❖ Disposition des tubes: afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter son entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes. Deux dispositions sont majoritairement utilisées lorsque le puits ne comporte qu'un seul tube : [6]



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



- ❖ Profondeur d'enfouissement des tubes: la profondeur préconisée est souvent comprise entre 1,5 et 3 m. A ces profondeurs, la température du sol varie bien moins que la température de l'air extérieur entre l'été et l'hiver. Il est cependant possible d'enfouir les tubes plus profondément mais cela augmente les contraintes de terrassement et de pose du conduit.
- ❖ Espacement entre les tubes: il est préférable qu'il soit supérieur à 3 fois le diamètre des tubes afin de garantir un bon échange thermique de chaque tube avec le sol.
- ❖ Pente du conduit: elle doit être comprise entre 1 et 3% pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud est en contact avec les parois plus froides du puits.
- ❖ Matériau constitutif des tubes: le choix du matériau est important car il influe directement sur les échanges thermiques sol/puits. L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits. Les matériaux utilisés doivent également avoir une bonne tenue à l'enfouissement. Les tubes entrant dans la composition des puits canadiens/provençaux actuellement en fonctionnement sont généralement en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide. Certains tubes sont constitués de matières plastiques emprisonnant des bulles d'air, ce qui diminue l'échange thermique sol/conduit. Le recours à ce type de tube est donc déconseillé.
- ❖ Etanchéité du réseau (tubes et raccords): elle est indispensable pour empêcher la pénétration de racines ainsi que les phénomènes d'infiltration d'eau et de radon au sein du conduit.
- ❖ Type de tuyaux
 - Polychlorure de vinyle (PVC): le moins cher, pas très écologique. Il peut "éventuellement" dégager des vapeurs nocives dues au mode de fabrication.
 - Polyéthylène (PE): le plus écologique à prix équivalent au PVC.
 - Tuyau annelé de protection de câbles électriques (TPC): très bon marché pour des petits diamètres. Annelé à l'extérieur, mais lisse à l'intérieur. Ils peuvent être posés en parallèles. Toutefois, ce type de tuyau n'est pas prévu à l'origine pour être enterré à forte profondeur, ce qui peut nuire à leur tenue dans le temps.
 - Tuyaux de béton: utilisé pour des diamètres supérieurs à 300 mm. Les raccords sont difficiles à étanchéfier.

L'échange thermique est plus important (la conductivité du béton est plus élevée que celle des tuyaux en plastique, relativement isolants). Le principal problème de ce type de tuyau (outre la mise en œuvre complexe), est qu'ils ne garantissent pas une véritable étanchéité sauf avec une mise en œuvre particulièrement soignée. Le radon du sol s'il y en a peut donc s'infiltrer dans le tuyau, et aller contaminer ensuite la maison.

▪Tuyaux en fonte: Sa rigidité, sa résistance mécanique et sa conductivité thermique élevée font de ce matériau une solution très compatible pour un puits canadien. Il faut veiller à ce que le revêtement extérieur du tuyau résiste à la corrosion (type zingage anticorrosion), ainsi que l'utilisation de joints en acier inoxydable.

❖ Conseils

▪Le tuyau doit avoir une stabilité suffisante pour supporter l'enfouissement dans la terre.

▪Le PVC est à écarter pour la raison simple que la craie contenue dans le PVC empêche l'échange thermique.

▪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 ($> 30^\circ$).

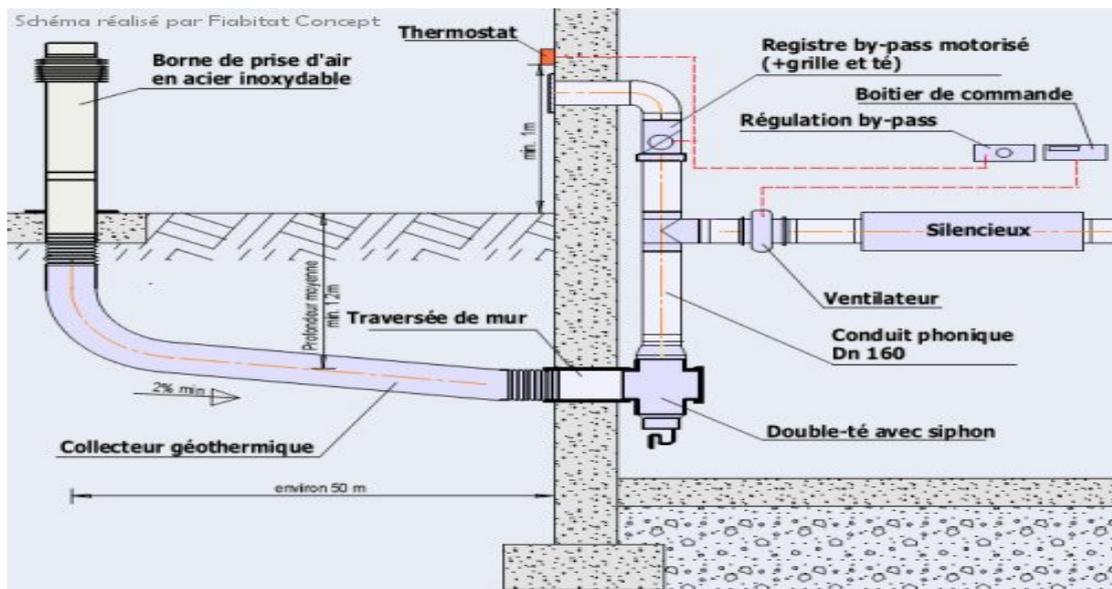
▪Le tuyau sera de préférence lisse à l'intérieur pour diminuer les pertes de charge et rester en régime laminaire. Pour l'extérieur, privilégier les tuyaux annelés pour augmenter l'échange thermique entre le sol et le tuyau.

3) Le système d'évacuation des condensats

La vapeur d'eau contenue dans l'air qui circule dans le conduit enterré peut se condenser en fines gouttelettes lorsque celui-ci est en contact avec les parois intérieures froides du puits. La stagnation de cette eau de condensation au sein du puits favorise le développement de germes et de bactéries, peut perturber la circulation et altérer la qualité de l'air neuf dans le puits. Afin d'éviter ces phénomènes, le puits, dont le conduit est incliné, doit impérativement être muni d'un système d'évacuation des condensats. La structure de ce système dépend de la présence ou non d'un sous-sol au sein du bâtiment:

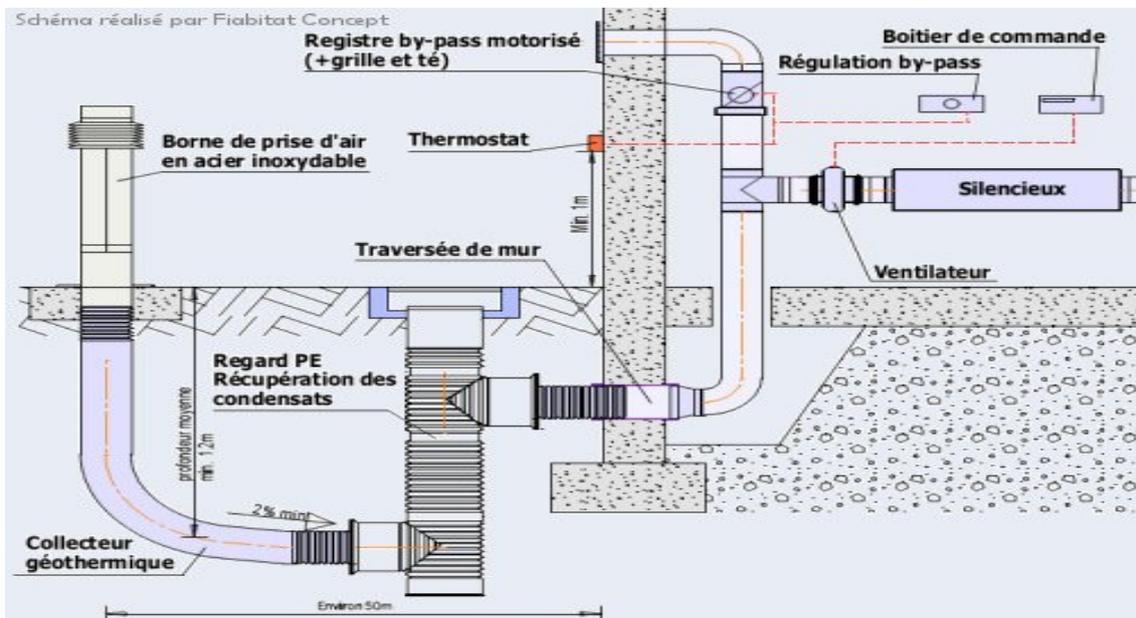
❖ Présence d'un sous-sol

La récupération des condensats peut alors se faire dans le sous-sol. Ils sont ensuite évacués vers l'égout à l'aide d'un siphon, ce qui permet une étanchéité parfaite du puits depuis l'entrée d'air neuf jusqu'au système de ventilation. Cette solution est donc à privilégier dans les zones à forte concentration de gaz radon dans le sol ou si le sol entourant le puits est très humide.



❖ Absence de sous-sol

Un regard doit être placé à l'endroit le plus bas du puits (sous la bouche d'entrée d'air si le conduit est montant, à l'extrémité du conduit côté bâtiment si celui-ci est descendant) afin d'évacuer les condensats soit par infiltration dans le sol à l'aide d'un lit de cailloux, soit en utilisant une pompe de relevage. Ce regard permet également d'inspecter visuellement le conduit afin de détecter d'éventuels problèmes et de procéder à l'entretien du puits.



4) Le système de régulation et le ventilateur

La régulation permet d'envisager un fonctionnement du ventilateur de puits canadien sur l'année. Le ventilateur fonctionnera avec un thermostat placé à l'extérieur de l'habitation et fera varier à l'aide d'un by-pass l'air du puits et l'air extérieur.

Le ventilateur doit être dimensionné en fonction du débit d'air neuf nécessaire. Il doit avoir un rendement suffisant pour ne pas dégrader le facteur de performance du puits.

III-2-4 Le couplage du puits canadien à une VMC

Le puits canadien peut être relié à une VMC simple flux ou double flux :

➤ En simple flux

L'air est renouvelé, cela évite les condensations et les moisissures, la sensation de flux d'air froid est atténuée par rapport à une simple VMC, bon système de rafraîchissement l'été.

L'hiver, on préchauffe, l'été on rafraîchit, mais en demi-saison, le puits canadien doit être arrêté sinon il refroidit la maison.

➤ En double flux (gestion de l'entrée d'air et de son extraction)

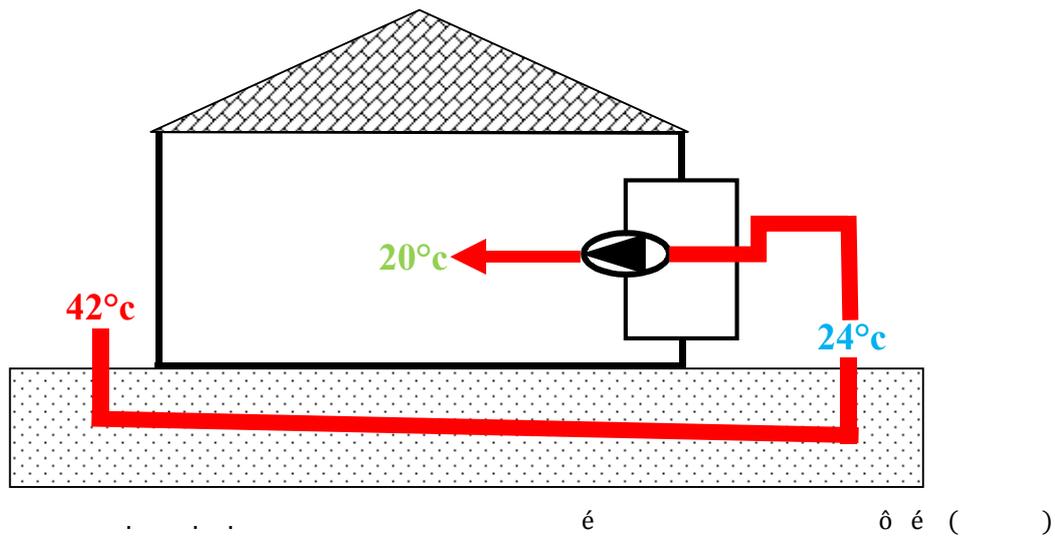
Les ventilations doubles flux sont pourvues d'un échangeur de chaleur, système qui va récupérer les calories de l'air évacué pour réchauffer l'air rentrant (avec des rendements de 60% pour des échangeurs à courants croisés et 80-90% pour les échangeurs à contre courant et les échangeurs rotatifs). L'air est renouvelé, évite les condensations et les moisissures. Les avantages que conserve la solution double-flux par rapport à son homologue, c'est le filtrage de l'air, et son insufflation à température quasi-ambiante dans la maison.

III-2-5 Le ventilateur mécanique contrôlé (VMC)

III-2-5-1 Les différents types de ventilateur mécanique contrôlé (VMC)

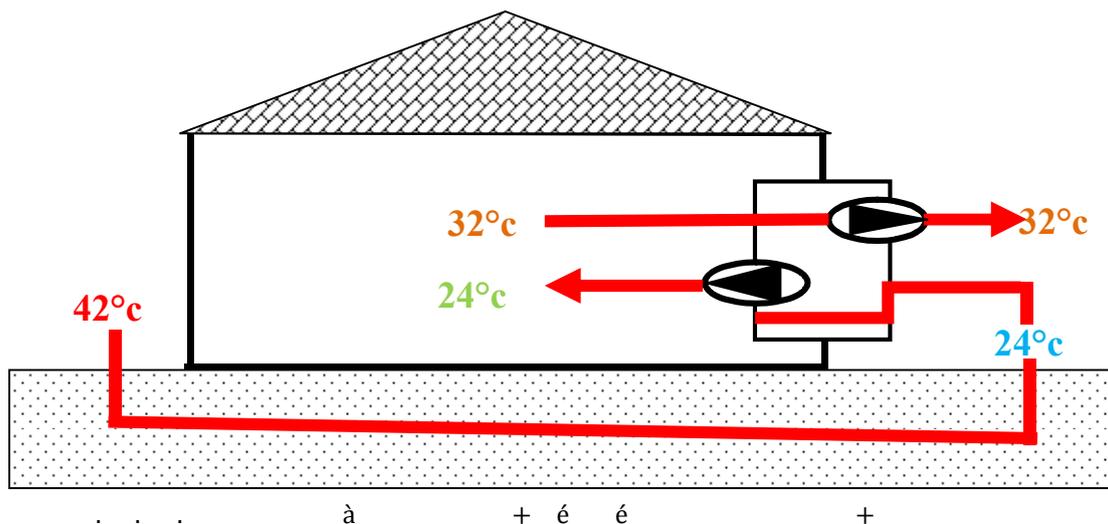
1) Le ventilateur mécanique contrôlée(VMC) simple flux

L'air neuf est admis dans les pièces principales par des entrées d'air auto-réglables dont le rôle est d'atténuer l'effet du vent pour maintenir constants les débits entrants. Sous l'effet de la dépression générée par le groupe moto-ventilateur (extracteur), l'air traverse le logement transitant des pièces principales vers les pièces les plus polluées par le droit des portes intérieures ou par un détalonnage de ces portes en partie basse. L'air vicié est évacué par des bouches d'extraction situées dans les pièces de service (cuisine, salle de bain, WC...).

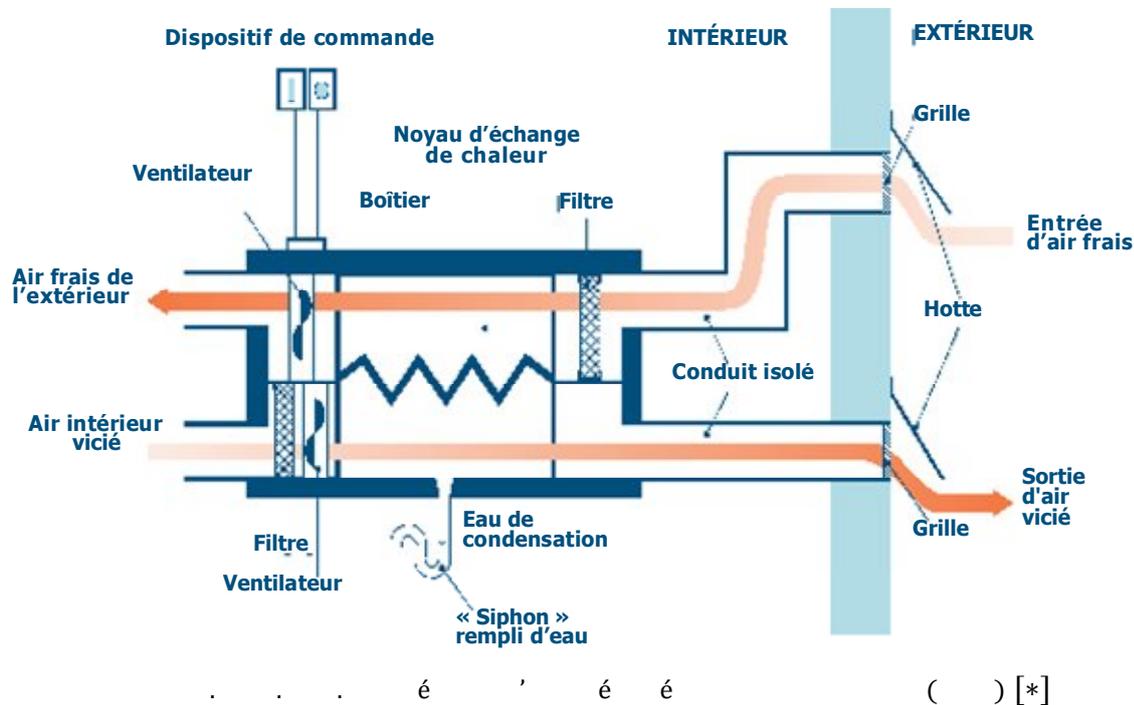


2) Le ventilateur mécanique contrôlée (VMC) double flux avec récupérateur

C'est une ventilation double flux haute performance où l'air chaud extrait des pièces humides, telles cuisine et salles d'eau, traverse un échangeur de chaleur avant d'être rejeté vers l'extérieur, via un réseau de conduits relié à un caisson. L'air froid provenant de l'extérieur est amené dans la maison à l'aide d'un réseau de gaines. Filtré, l'air neuf traverse l'échangeur et récupère jusqu'à 90 % de la chaleur de l'air expulsé avant d'être redistribué dans les pièces de vie de la maison.



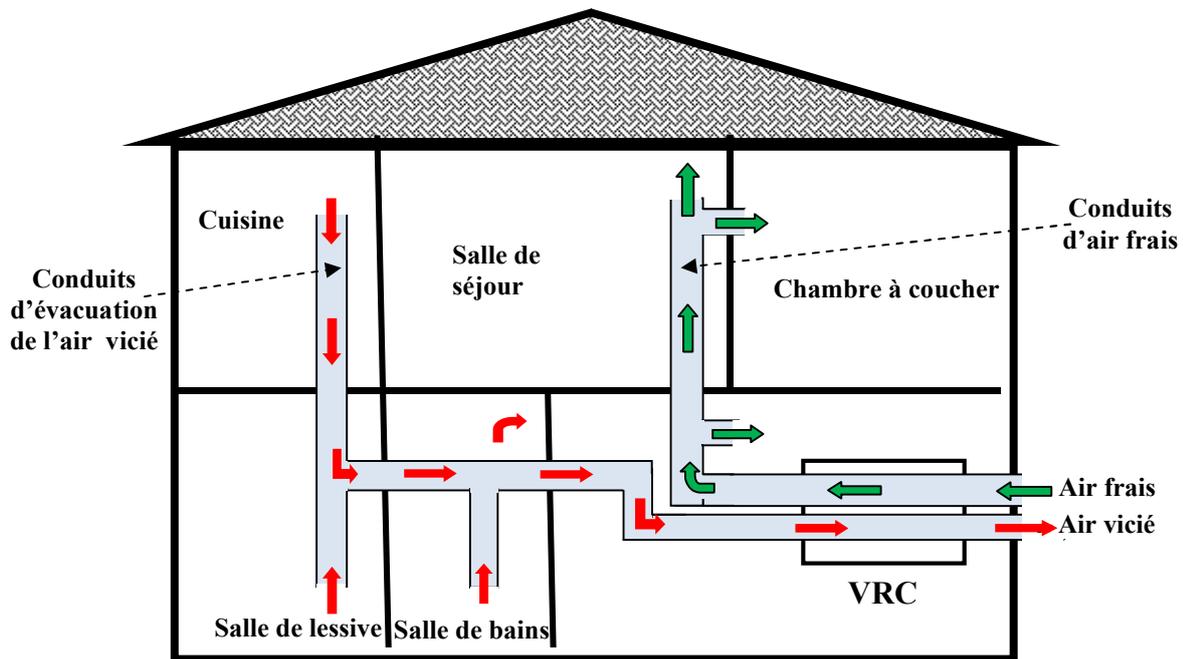
III-2-5-2 Les éléments d'un système ventilateur récupérateurs de chaleur (VRC)



Un système VRC comprend normalement le matériel suivant:

- conduits isolés pour l'alimentation en air (frais) et la sortie d'air (vicié), avec hottes extérieures.
- conduits de distribution de l'air frais dans toute la maison et de retour de l'air vicié au VRC.
- ventilateurs de distribution de l'air dans toute la maison et d'acheminement de l'air vicié vers l'extérieur.
- filtres pour empêcher la poussière de pénétrer dans le noyau d'échange thermique.
- mécanisme de dégivrage (certains appareils sont dotés d'un préchauffeur) pour empêcher le givre d'obstruer le noyau lorsque l'air extérieur est froid (non illustré).
- un drain pour purger la condensation de l'intérieur du VRC (non nécessaire sur tous les modèles).
- dispositif de commande pour régler le VRC en fonction des besoins de ventilation.

III-2-5-3 Exemple de VRC à conduits directs



. . . é ' é é () à

III-2-6 Les différents types d'installation des puits canadien

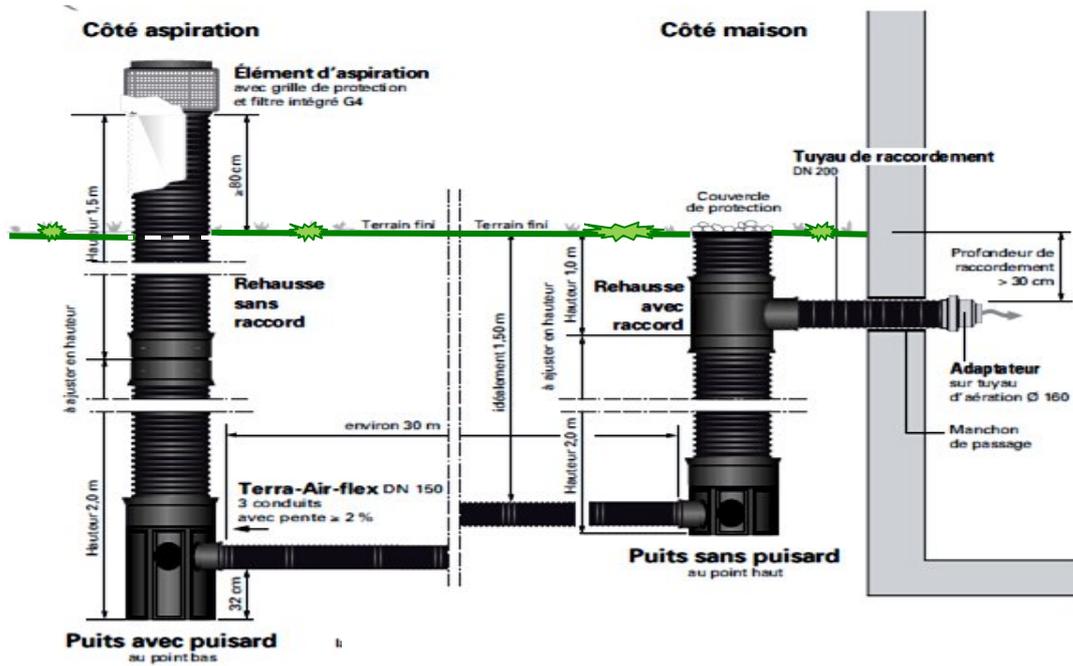
1) Type H

Le Terra-Air Type H qui nécessite en règle générale une fouille spécifique, facilite pourtant la pose des conduits à un même niveau, le respect des écarts nécessaires entre les tuyaux et la profondeur idéale avec la pente régulière de $\geq 2\%$ au point bas.

La fouille idéale aura une largeur d'environ 3,0 m, une profondeur d'au moins 1,50 m et une longueur de 34 m. Ces données pourront varier suivant la place disponible.

A. Type H - raccordement par pénétration par le mur

Installation à l'extérieur des fouilles du bâtiment avec pénétration par le mur.

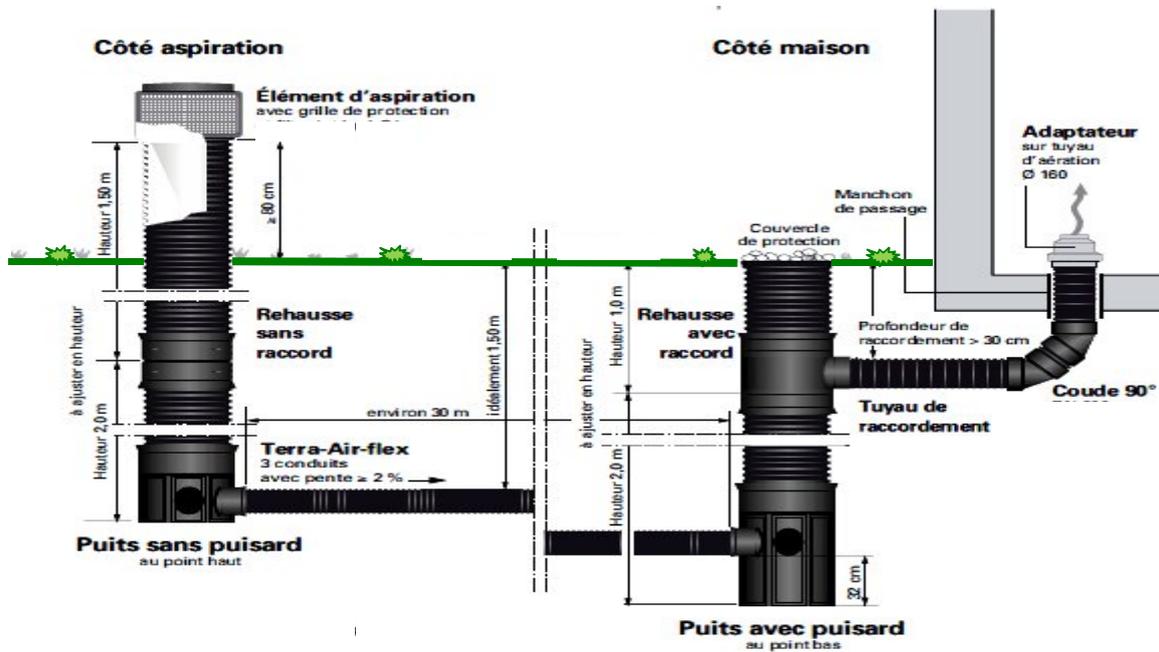


é é

[*]

B. Type H - raccordement par pénétration par la dalle de fondation

Installation l'extérieur du bâtiment avec pénétration par la dalle de fondation.

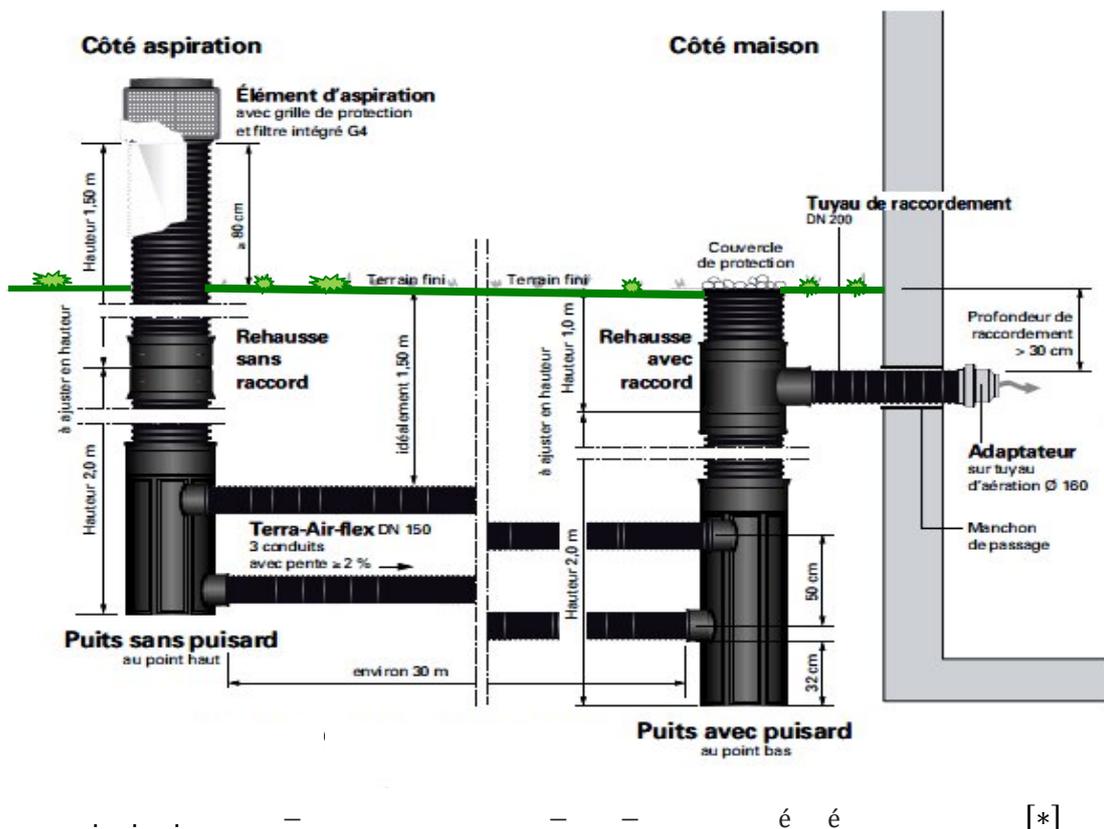


é é

[*]

2) Type V

Installation dans la fouille autour du bâtiment avec pénétration par le mur. Dans ce cas Terra-Air-Type V avec les 3 tuyaux Terra-Air-flex décalés en V vertical, s'intègre mieux dans l'espace de cette fouille. Lorsqu'un drainage du bâtiment est prévu, celui-ci devrait être placé avant la mise en place de l'EGT type V. La largeur nécessaire pour le tuyau inférieur est de 0,5 m, la profondeur idéale de 2 m. La largeur nécessaire pour les deux tuyaux supérieurs est de 1,50 m. La différence en hauteur entre les deux niveaux est d'environ 50 cm.



III-3 Les avantages et les inconvénients de la géothermie pour la production de chaleur

Les avantages

Sont énormes en termes de performance énergétique et d'impact écologique :

- Performance énergétique : les coefficients de performance peuvent atteindre des valeurs entre 10 et 20 (entre 2 à 4 pour des climatisations classiques).
- La maintenance est restreinte.
- Coût de maintenance : très faible par rapport à une climatisation classique.

- Intégration possible avec d'autres systèmes de climatisation.
- Coût énergétique : très faible par rapport à une climatisation classique.
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables.
- Énergie de base, indépendant des conditions climatiques (fonctionne 24hx24h, 365j/an).
- Economies d'énergie : très faible consommation électrique, uniquement le ventilateur.
- Ecologie : n'utilise pas de fluides frigorigènes, ni de compresseur et consomme peu d'électricité.
- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport (de risques de pollution).
- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement (pas de déchet, émissions gazeuses très réduites).

Les handicaps

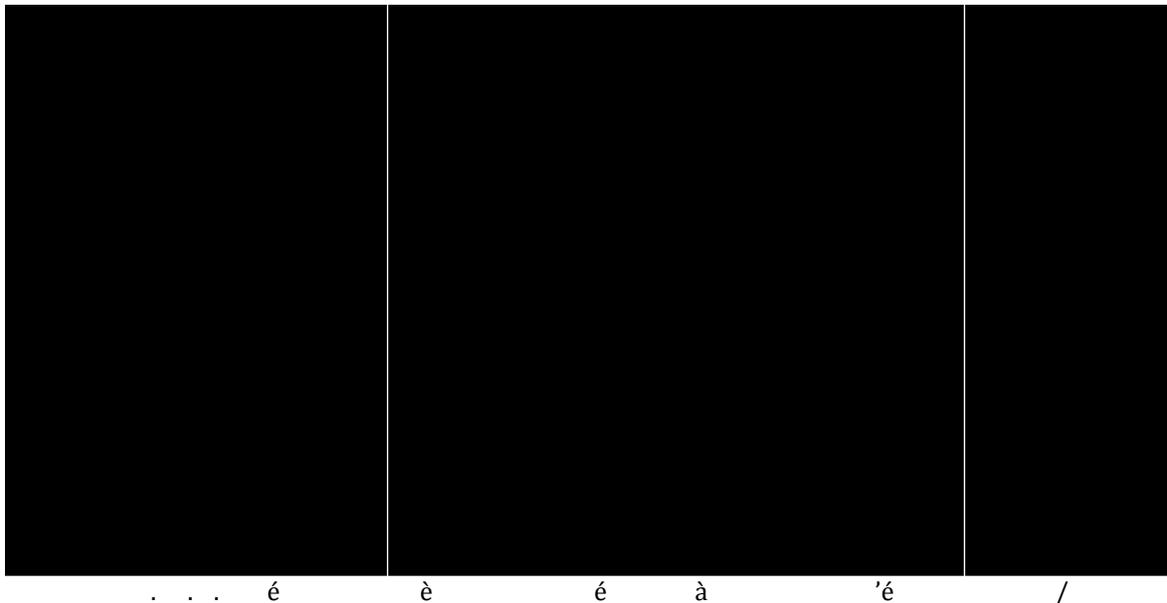
- Ressource naturelle du sous-sol dont l'extraction nécessite la réalisation de forages.
- Délai important dans la mise en valeur d'une ressource géothermique.
- Coût d'investissement important comparé aux autres énergies renouvelables (travaux d'exploration, réalisation de forages).

IV-Problématique et modélisation de la température à la sortie de l'échangeur air/sol

La structuration du système

Dans cette étude on s'intéresse à:

- ❖ Trouver l'évolution de la température du sol de sa surface à une certaine profondeur dite optimale pour placer l'échangeur air/sol (transfert de chaleur par conduction): résoudre un problème de conduction.
- ❖ Trouver la température de l'air à la sortie du tube enterré (transfert de chaleur par convection), donc la modélisation de la température de l'air à la sortie du tube enterré verticalement et horizontalement, en considérant l'écoulement permanent d'un fluide Newtonien, incompressible à viscosité constante dans un tube de section circulaire on supposera que le régime dynamique est établi.



IV- Modélisation de la température du sol et de l'air à la sortie de l'échangeur air/sol

IV-1 Modélisation de la température du sol (transfert de chaleur par conduction)

Dans la géothermie de surface, on s'intéresse aux quelques premiers mètres en dessous de la surface du sol. De ce point de vue, le sol peut être considéré comme un milieu semi-infini. 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. On a considéré les températures ambiantes journalières durant une année.

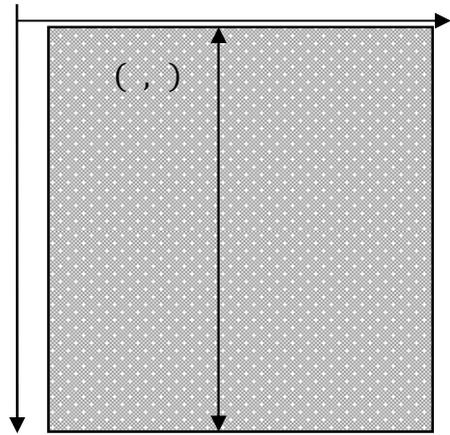
Afin de faciliter l'emploi de ces données de température, lors des calculs, les évolutions de température en fonction du temps (jour) ont été représentées adéquatement par des fonctions cosinus:

$$T(x,t) = T_m + C \cos(\omega t - \phi - \frac{x}{\lambda})$$

Le problème supposé unidimensionnel suivant l'axe(x). Le mode de transfert de chaleur dominant est la conduction. En supposant un milieu homogène, l'équation instationnaire de la chaleur dans ce cas s'écrit:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Ou bien: $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$ (.1)



- : Température ambiante journalière [°]
- : Fréquence angulaire [= 2 /365] [rad/jour].
- : Température moyenne annuelle [°].
- : C'est l'amplitude de la variation de température. (La ville de Biskra égale 12°C). [°]
- : Jour de l'année où la température maximale.(= 206) []
- : Conductivité du sol [/(.°)]
- : Capacité calorifique massique du sol [/ .°]
- : Masse volumique du sol [/]
- : Température du sol, fonction de et de [°]
- : Temps []
- : Profondeur en dessous de la surface du sol []
- : Diffusivité thermique [/]

Où: $\lambda = \sqrt{\frac{k}{\rho c}}$

Pour résoudre cette équation différentielle, on a besoin de définir des conditions initiales et aux limites.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots (2)$$

Avec les conditions aux limites:

- $T(x=0, t) = T_s + (T_0 - T_s) \cos(\omega t)$
- $T(x \rightarrow \infty, t) = T_0$

Introduisons la variable: $\xi = x - \alpha t \dots \dots \dots (*)$

: C'est la température de sol à une profondeur x , telle que $T(x, t) = T(\xi > 0)$

L'équation différentielle aux dérivées partielle prendra la forme:

$$\frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots (3)$$

En posant:

$$T = T(\xi) \dots \dots \dots (**)$$

Avec:

- $T(\xi=0) = T_s + (T_0 - T_s) \cos(\omega t)$
- $T(\xi \rightarrow \infty) = T_0$

En utilisant la méthode de séparation des variables:

$$T = \alpha(\xi) \cdot T(t) \dots \dots \dots (4)$$

Remplaçons dans l'équation différentielle aux dérivées partielles:

$$\alpha(\xi) \cdot T(t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \alpha(\xi) \cdot T(t) \dots \dots \dots (5)$$

Divisons les deux membres de l'équation par α et T :

$$\frac{\alpha(\xi)}{\alpha(\xi)} = \frac{T(t)}{T(t)} = \dots \dots \dots (6)$$

:Constant

La température sinusoïdale imposée en surface, régime périodique où le problème étant linéaire, en recherche d'une solution de même fréquence que l'excitation.

En supposons : $\alpha = \dots$ où $\dots = -1$

$$(\mathcal{B} \Rightarrow () - () = 0 \dots \dots \dots (\mathcal{Y}$$

$$\Rightarrow \dots = 0$$

$$\Rightarrow \dots = \dots$$

$$\Rightarrow \dots = \dots$$

$$\Rightarrow \ln \dots = \dots +$$

$$\Rightarrow \dots = \dots$$

$$\Rightarrow \dots = K \dots$$

K, : Constants.

Cherchons :

$$\frac{()}{()} = \dots \dots \dots (\mathcal{B}$$

$$\Rightarrow () - () = 0$$

C'est une équation différentielle 2^e ordre homogène qui admis comme solution:

$$\Rightarrow () = \dots + \dots$$

lim \rightarrow () vers une limite finie $\Rightarrow \rightarrow 0$

$$\Rightarrow () = \dots$$

On considère soit la partie réelle soit la partie imaginaire de la solution selon que la température varie comme cos (ωt) ou sin (ωt) et de nature périodique.

On aura: () = ... comme $\sqrt{-} = \sqrt{-}$

On aura : é [(). ()] = é $\overline{-()}$ (.9)

Qui doit satisfaire l'équation (,) au point d'origine des abscisses = 0

$$(= 0,) = + (-)$$

$$= é \dots .1$$

$$= é [\dots . (\cos + \sin)]$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{= ()}}$$

$$(.9) \Rightarrow (,) = \frac{-()}{\cos} . \quad \dots\dots\dots (.10)$$

$$\Rightarrow (,) = \frac{-()}{\cos} .$$

$$\Rightarrow (,) = \frac{+ (-)}{\cos} . \quad (\cos + \sin) . \cos \frac{-}{2} + \sin \frac{-}{2}$$

$$\Rightarrow (,) = \frac{+ (-)}{\cos} . \quad \cos . \cos \frac{-}{2} - \cos \sin \frac{-}{2} + \sin \cos \frac{-}{2} - \sin \omega t . \sin \frac{-}{2}$$

Alors:

$$\Rightarrow (,) = \frac{+ (-)}{\cos} . \quad \cos . \cos \frac{-}{2} + \sin \omega t . \sin \frac{-}{2} + \sin \cos \frac{-}{2} - \cos \sin \frac{-}{2}$$

$$\Rightarrow (,) = \frac{+ (-)}{\cos} . \quad \cos \frac{-}{2} + \sin \cos \frac{-}{2} - \cos \sin \frac{-}{2} \dots\dots\dots (.11)$$

La partie réelle dans l'équation:

$$\frac{+ (-)}{\cos} . \quad \cos \frac{-}{2}$$

Donc la solution de l'équation (.3)

$$(,) = \frac{+ (-)}{\cos} . \quad \frac{-}{2} \dots\dots\dots (.12)$$

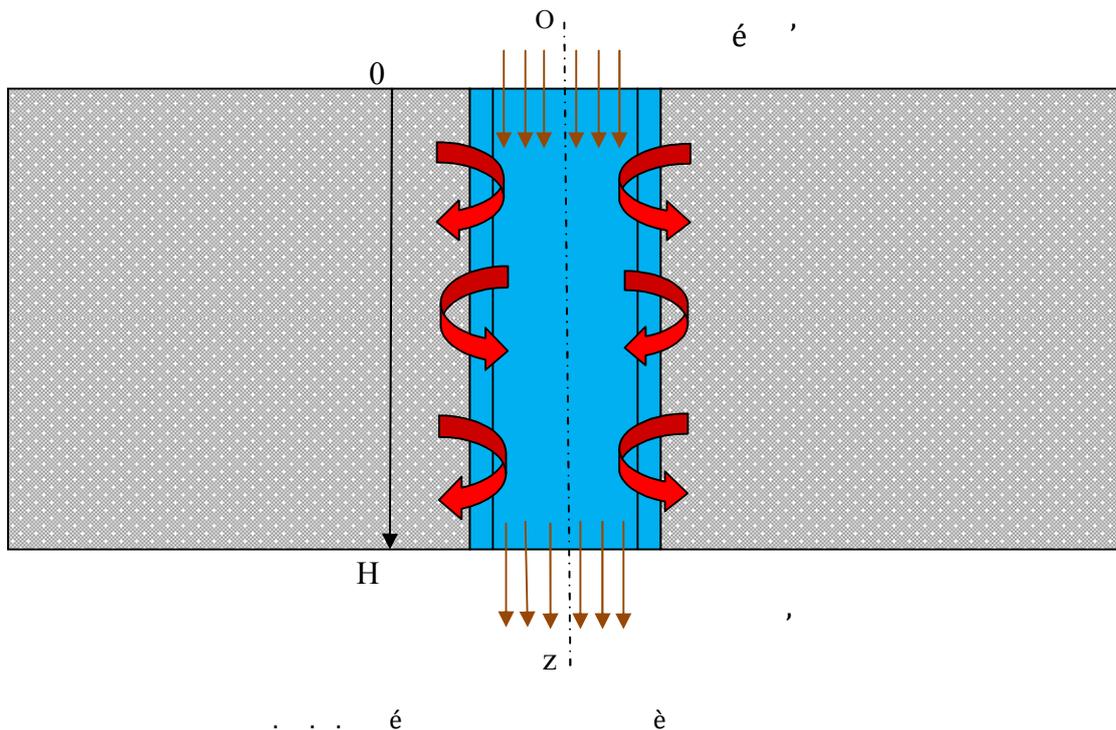
En remplaçons l'équation (**) dans l'équation(.12)

$$(,) = \frac{+ (-)}{\cos} . \quad \frac{-}{2} \dots\dots\dots (.13)$$

En remplaçons l'équation (*) dans l'équation(.13)

$$\Rightarrow (,) = + (-) . \frac{ - }{ 2 } + \frac{ 1 }{ } + \dots \dots \dots (.14)$$

IV-2 Modélisation de la température de l'air à la sortie du tube enterré verticalement (Transfert de chaleur par convection)



L'équation du bilan thermique pour ce tube est:

$$- = \rightarrow - \rightarrow + \dots \dots \dots (.15)$$

On considère l'écoulement permanent d'un fluide Newtonien, incompressible à viscosité constante dans un tube de section circulaire on supposera que le régime dynamique est établi:

- L'air est un fluide incompressible $\vec{\rho} = 0$.
- mouvement unidirectionnel suivant $\rightarrow \Rightarrow (= =)$

La vitesse de l'air suivant(.)

La vitesse de l'air suivant().

La vitesse de l'air suivant().

: La pression de l'air.

$$\Rightarrow \dots = 0, \dots = 0 \dots \dots \dots (.16)$$

- Établi $\dots \rightarrow 0$
- le fluide à propriétés physiques \dots, C, \dots constantes.
- l'énergie interne est donnée par $\dots = C + \dots$

$$\dots = \dots \dots \dots (.17)$$

➤ L'écoulement de l'air est permanent:

$$\dots = 0$$

$$\Rightarrow \dots = \frac{1}{\dots} \dots + \dots$$

Alor:

$$(.15) \Rightarrow C \dots = \frac{1}{\dots} \dots + \dots + \dots \dots \dots (.18)$$

En générale, le terme de dissipation visqueuse \dots et le terme de conduction longitudinale \dots sont négligeables.

Dans ces conditions, l'équation (.18) s'écrit:

$$C \dots = \dots \dots \dots (.19)$$

$$\Rightarrow C \dots = \dots + \frac{1}{\dots}$$

$$\Rightarrow \dots = \frac{\dots}{C} \dots + \frac{1}{\dots} \dots \dots \dots (.20)$$

On peut simplifier l'équation (.20) comme suit:

$$= \frac{\dots}{C}$$

L'équation (20) sera:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_r} \dots \dots \dots (21)$$

Pour une section rectangulaire ∇ va être remplacé par ∇ . Dans ce cas, on peut écrire l'équation d'énergie dans les coordonnées cartésiennes on aura alors:

$$\dots \dots \dots (22)$$

IV-3 Modélisation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement (transfert de chaleur par convection)

▪ **Le coefficient d'échange convectif**

Le coefficient d'échange convectif dans un tube est défini par:

$$h = \frac{q}{A \cdot \Delta T} \dots \dots \dots (23)$$

Où :

- : Nombre de Nusselt [-]
- : Conductivité thermique de l'air [(°)]
- : Diamètre intérieur du tube []
- h : Coefficient d'échange convectif [(°)]

Le nombre de Nusselt est calculé à l'aide de la relation de Colburn:

$$Nu = 0.0214 \cdot (Re - 100)^{0.8} \dots \dots \dots (24)$$

Où:

- : Nombre de Reynolds [-]
- : Nombre de Prandtl [-]

$$\dots \dots \dots (25)$$

Où:

- : Vitesse de l'air [/]
- : Diamètre intérieur du tube []
- : viscosité dynamique de l'air [/ .]

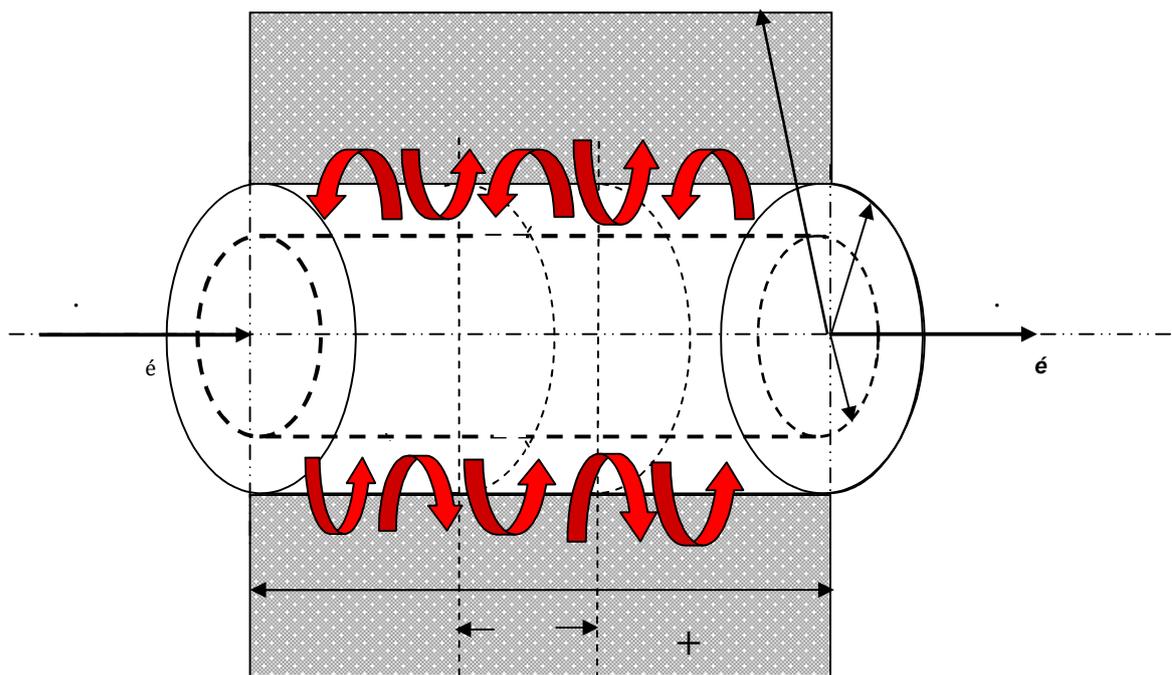
$$\dots \dots \dots (26)$$

Où:

- : Viscosité cinématique de l'air [/]
- : Masse volumique de l'air [/]
- : Chaleur massique de l'air [/ °.]
- : Conductivité thermique de l'air [(°.)]

▪ **La modélisation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement**

L'échangeur 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.



é

L'équation de bilan thermique pour ce tube est :

$$\dots \dots \dots (27)$$

Avec :

- ρ : é [/]
- c_p : Chaleur massique de l'air [/ .°]
- \mathcal{R} : Résistance thermique correspondant à l'échange convectif entre l'air et le tube [.° /]
- \mathcal{R} : Résistance thermique du tube enterré [.° /]
- \mathcal{R} : Résistance thermique entre le tube et le sol [.° /]
- T_s : Température de sol (non perturbé par le débit d'air dans le tube enterré)... .. [°]

$$\mathcal{R} = \frac{1}{h \cdot 2 \cdot r} \dots \dots \dots (\quad .28$$

$$\mathcal{R} = \frac{1}{2 \cdot r} - \dots \dots \dots (\quad .29$$

$$\mathcal{R} = \frac{1}{2 \cdot r} - \dots \dots \dots (\quad .30$$

Avec:

- r_i : Rayon intérieur du tube enterré []
- r_e : Rayon extérieur du tube enterré []
- r_a : Rayon de la couche adiabatique du sol []
- λ_t : Conductivité thermique du tube enterré [/ (.°)]
- λ_s : Conductivité thermique du sol [/ (.°)]

Soit la résistance thermique totale entre l'air et le sol non perturbé:

$$= \frac{1}{\mathcal{R} + \mathcal{R} + \mathcal{R}} \dots \dots \dots (\quad .31$$

L'équation(.29) devient:

$$\dots \dots \dots = \dots \dots \dots (\quad .32$$

L'intégrale de (.32)

$$(-) = \frac{-}{\cdot} + C \dots\dots\dots (.33)$$

Pour = 0

$$= \quad \acute{e}$$

$$\Rightarrow C = (-) \cdot \acute{e} \dots\dots\dots (.34)$$

En remplaçant C par sa valeur dans (.33) on obtient :

$$\frac{-}{-\acute{e}} = \frac{-}{\cdot} \dots\dots\dots (.35)$$

Par suite:

$$+ (-\acute{e}) \cdot \dots\dots\dots (.36)$$

Pour = :

$$\cdot = \frac{-}{+ +} \cdot (-)$$

$$+ (-\acute{e}) \cdot \dots\dots\dots (.37)$$

➤ **L'efficacité du tube enterré**

L'efficacité du tube enterré sera alors déterminée à l'aide de l'équation suivante:

$$= \frac{-}{-\acute{e}} \cdot \acute{e} \dots\dots\dots (.38)$$

L'efficacité du tube enterré.

Les équations (.37) et (.38) donnent:

$$= 1 - \dots$$

$$+ \epsilon \left(- \dots \right) \cdot \epsilon \left(1 - \dots \right) \dots \dots \dots (.39)$$

$$+ \epsilon \left(- \dots \right) \cdot \epsilon \dots \dots \dots (.40)$$

➤ Perte de charge dans le tube enterré

La différence de pression dans un tube est donnée par l'expression suivante:

$$= - \dots \frac{\dots}{2} \dots \dots \dots (.41)$$

Les pertes de charge dans un tube sont données par:

$$= - \dots \frac{1}{2} \dots \dots \dots (.42)$$

Où:

- : La différence de pression. []
- : Longueur du tube. []
- : Diamètre intérieur du tube. []
- : Masse volumique de l'air. [/]
- : Vitesse de l'air. [/]
- : Coefficient de perte de charge singulière. [-]
- : La pesanteur [/]
- : Les pertes de charge []

On suppose:

L'écoulement laminaire (< 2000) donc:

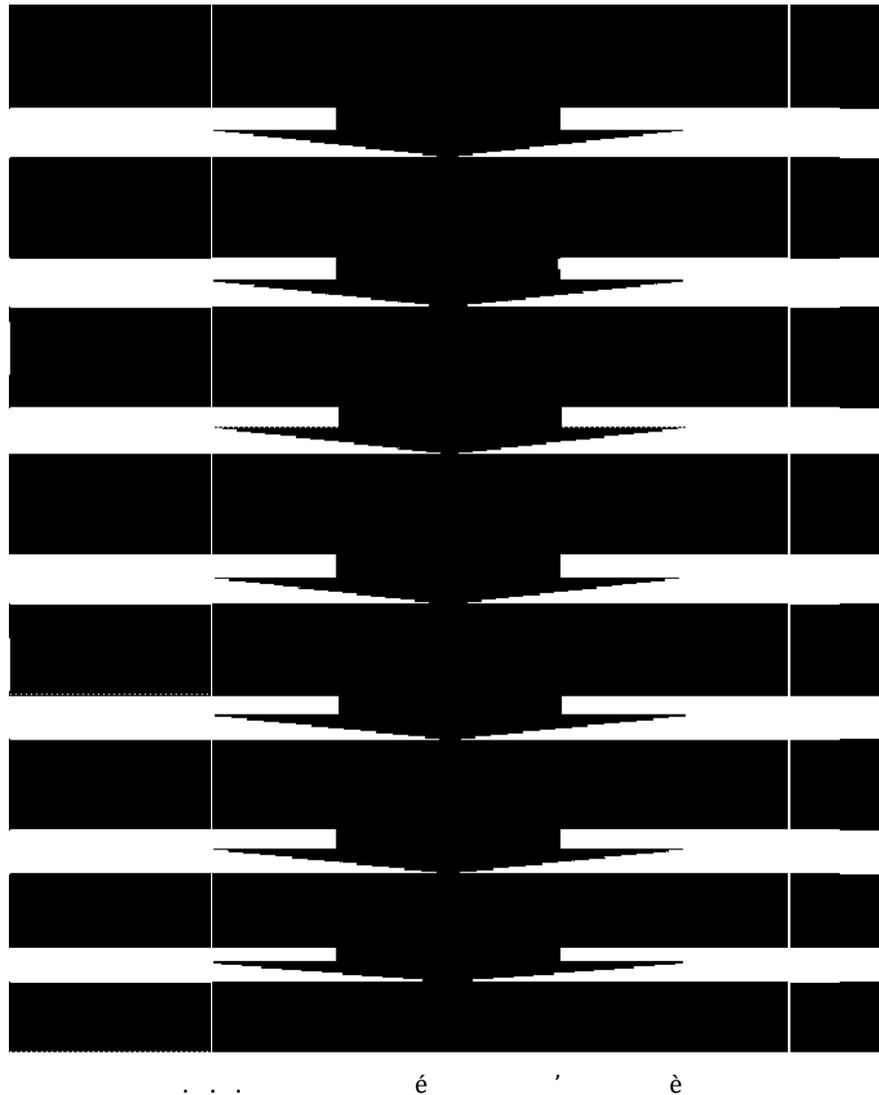
$$= \frac{64}{\dots}$$

V) Résolution numérique du problème et les résultats obtenus

V-1 La méthode numérique de résolution et de discrétisation d'équation de convection

V-1-1 Planning de résolution d'un problème

La figure ci-dessous représente les étapes de résolution numérique du problème convectif de transfert de chaleur entre le fluide et le sol:



V-1-2 La résolution numérique de l'équation de convection

Ces phénomènes sont en générale complexes et régis par des équations aux dérivées partielles. La résolution de ce fait se fait numériquement:

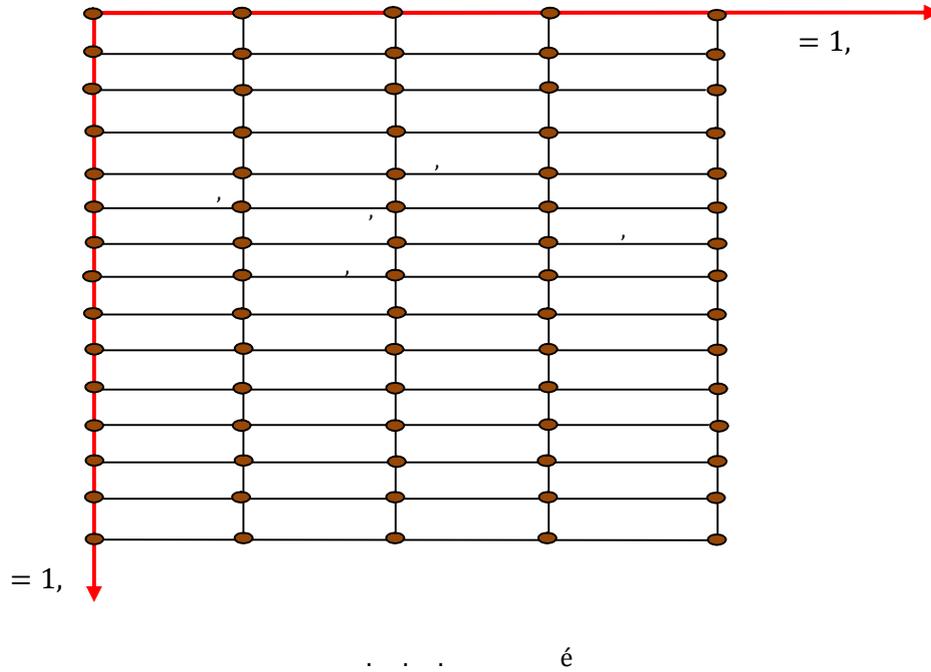
Nous avons l'équation ci-dessous qui caractérise le phénomène de convection :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots \dots \dots (.1)$$

La discrétisation de l'équation:

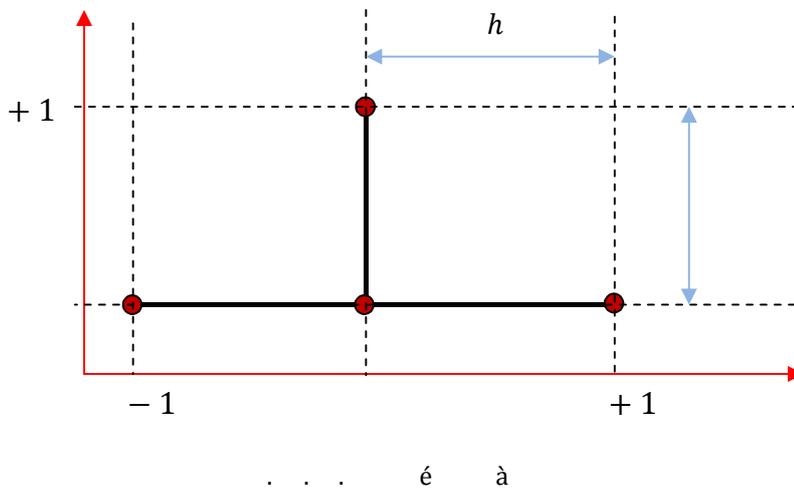
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -2$$

On pose la vitesse constante



Du fait de la présence d'une dérivée seconde par rapport à x , il est nécessaire d'introduire trois points en espace. Pour un pas d'espace h uniforme, la méthode la plus simple : Explicite. Les dérivées sont approchées comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2h} \quad (\text{é } i) \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}}{h^2} \quad (\text{é } i) \end{array} \right. \dots \dots \dots (2)$$



En remplaçant l'approximation (.2) dans l'équation(.1), il vient:

$$\frac{u}{h} = - \frac{u + u - 2}{h} \dots\dots\dots (.3)$$

En considérons le cas de l'écoulement d'air à l'intérieur de la conduite avec une vitesse constante = en tous points de la section droite.

$$(.3) \Rightarrow \frac{u}{h} = \frac{u + u - 2}{h}$$

$$\Rightarrow \frac{h}{h} \cdot \frac{u}{h} - \frac{h}{h} \cdot \frac{u}{h} = \frac{u}{h} + \frac{u}{h} - 2 \cdot \frac{u}{h} \dots\dots\dots (.4)$$

$$(.4) \Rightarrow \frac{u}{h} - \frac{u}{h} - \frac{u}{h} = -2 \cdot \frac{u}{h} + \frac{u}{h}$$

$$\Rightarrow \frac{h}{h} \cdot \frac{u}{h} - \frac{u}{h} + \frac{u}{h} = \frac{h}{h} - 2 \cdot \frac{u}{h} \dots\dots\dots (.5)$$

Où : — :

On pose:

$$= \frac{u}{h} \text{ et } = \frac{u}{h}$$

$$\Rightarrow = \frac{u}{h} - \frac{u}{h} + \dots\dots\dots (.6)$$

V-2 Résultats et Interprétations

Introduction

Dans ce chapitre on présente les résultats des calculs effectués relatifs à l'influence de quelques paramètres sur la variation de la température du sol ainsi que celle à la sortie de l'échangeur air/sol.

V-2-1 Variation de la température ambiante

Les figures (.) et (.) montrent la variation de la température ambiante de forme sinusoïdale de période journalière et annuelle.

La figure (.) présente la variation de la température ambiante annuelle, pour ville Biskra d'amplitude = 12° et de température moyenne annuelle = 17.16° , = 22.625°C, = 28.08°C.

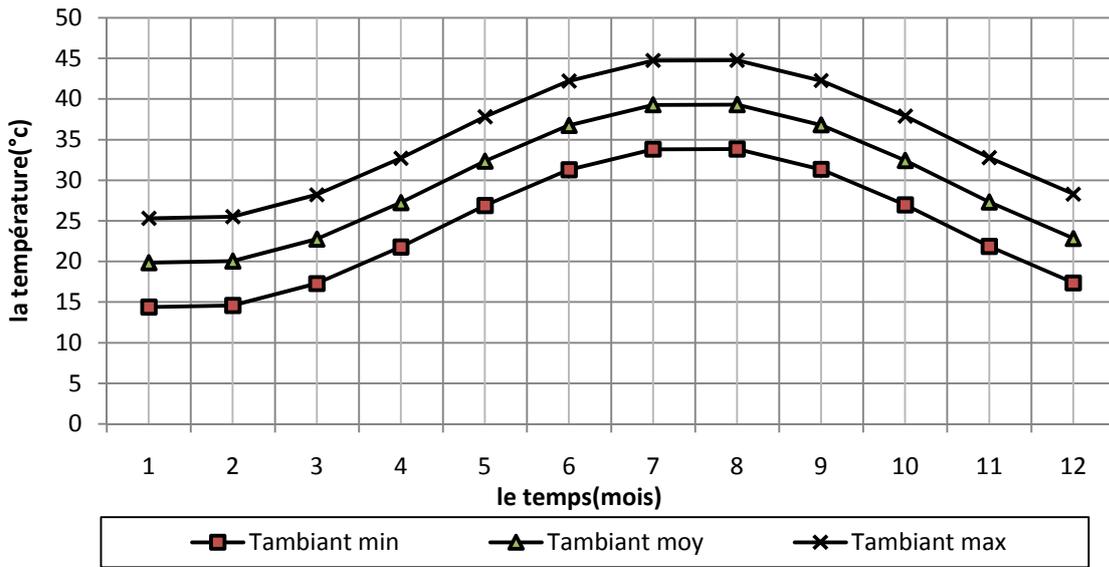


Figure 5.3

é

La figure (.) présente la variation de la température ambiante journalière, d'amplitude de = 12° et de température moyenne annuelle = 28.08° .

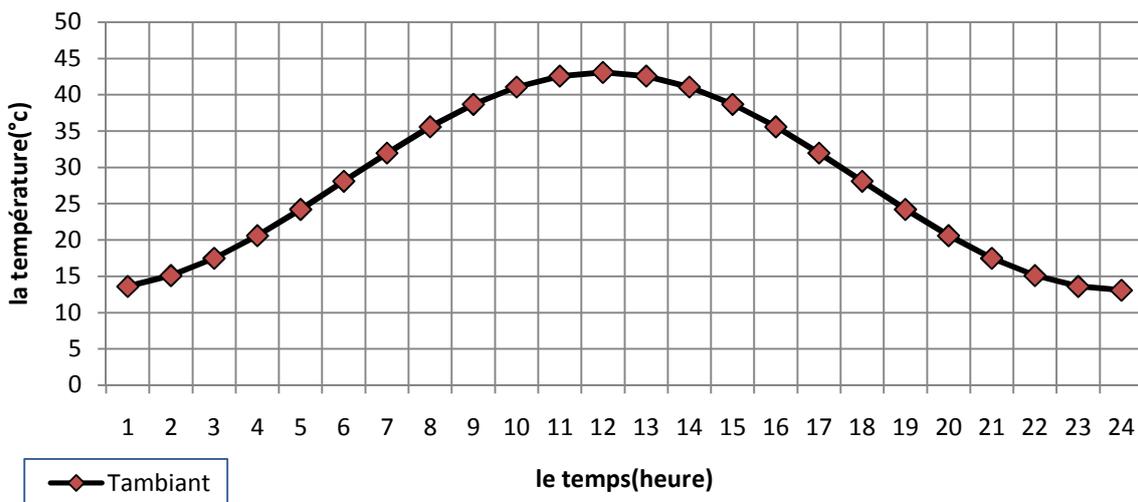


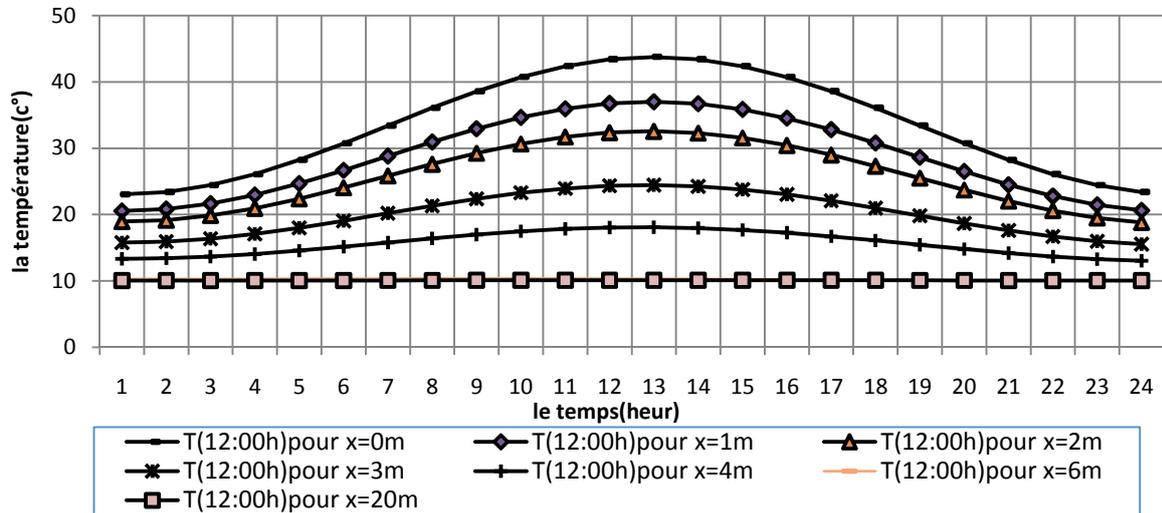
Figure 5.4

é

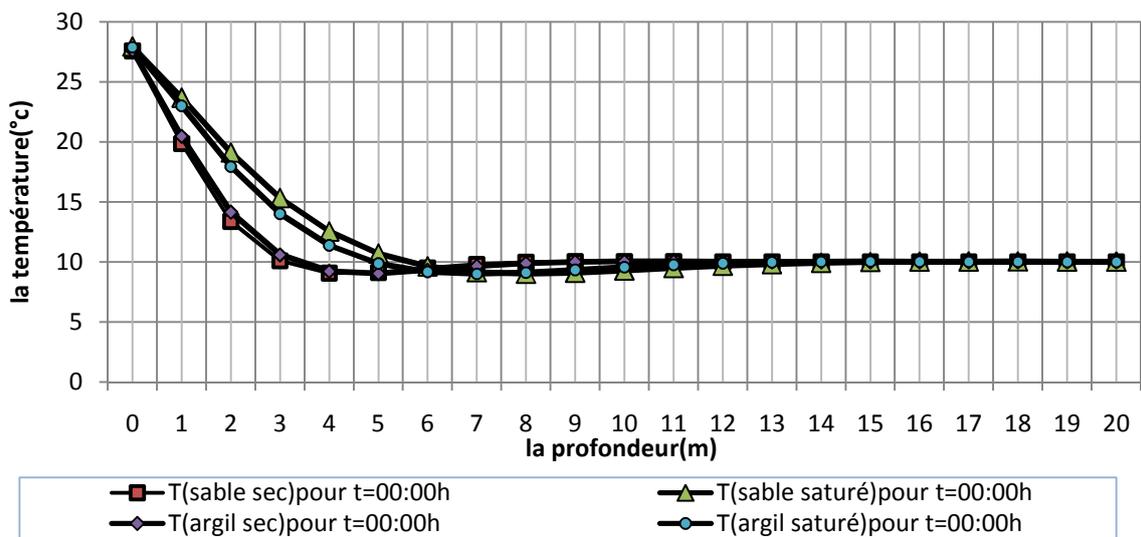
è

V-2-2 Variation de la température du sol

La figure () montre la variation de la température du sol qui forme une sinusoïde de période journalière dans les différentes des profondeurs, d'amplitude = 12° et de température moyenne annuelle = 28.08° .



Les figures () et () présentent la variation de la température du sol en fonction de la profondeur et de la nature du sol, pour minuit et midi, d'amplitude = 12° et de température moyenne annuelle = 28.08° . Cette valeur se stabilise pour des profondeurs supérieures à 6m quelque soit le temps.



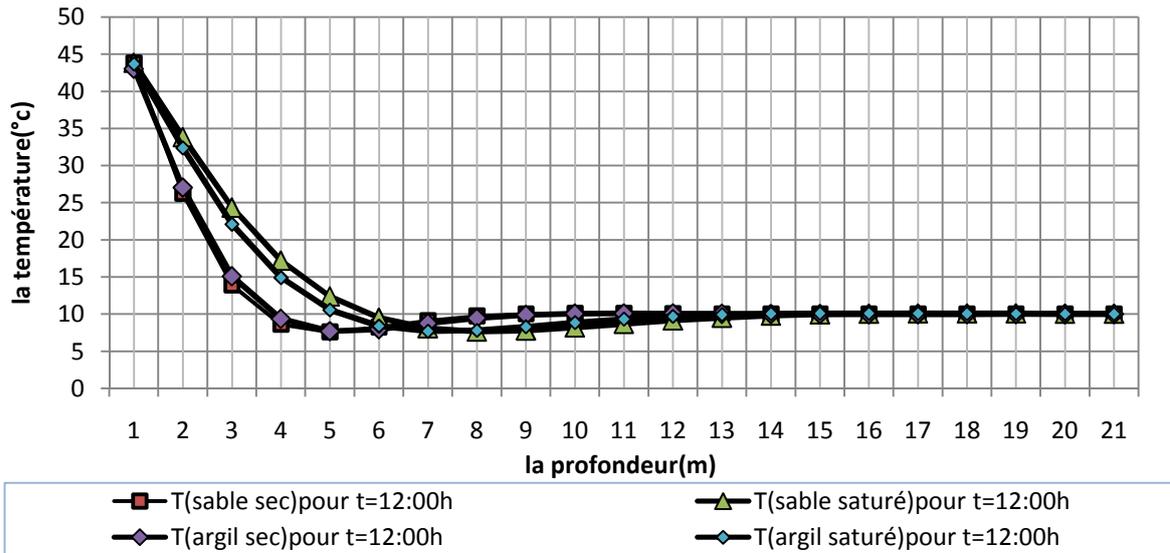


Figure 5.1 : Variation de la température du sol (sable saturé) en deux temps $t=00:00h$ et $t=12:00h$ en fonction de la profondeur, d'amplitude $= 12^\circ$ et de température moyenne annuelle $= 28.08^\circ$. Sa valeur se stabilise pour des profondeurs supérieures à 6m quelque soit le temps.

La figure (5.1) présente la variation de la température du sol (sable saturé) en deux temps $t=00:00h$ et $t=12:00h$ en fonction de la profondeur, d'amplitude $= 12^\circ$ et de température moyenne annuelle $= 28.08^\circ$. Sa valeur se stabilise pour des profondeurs supérieures à 6m quelque soit le temps.

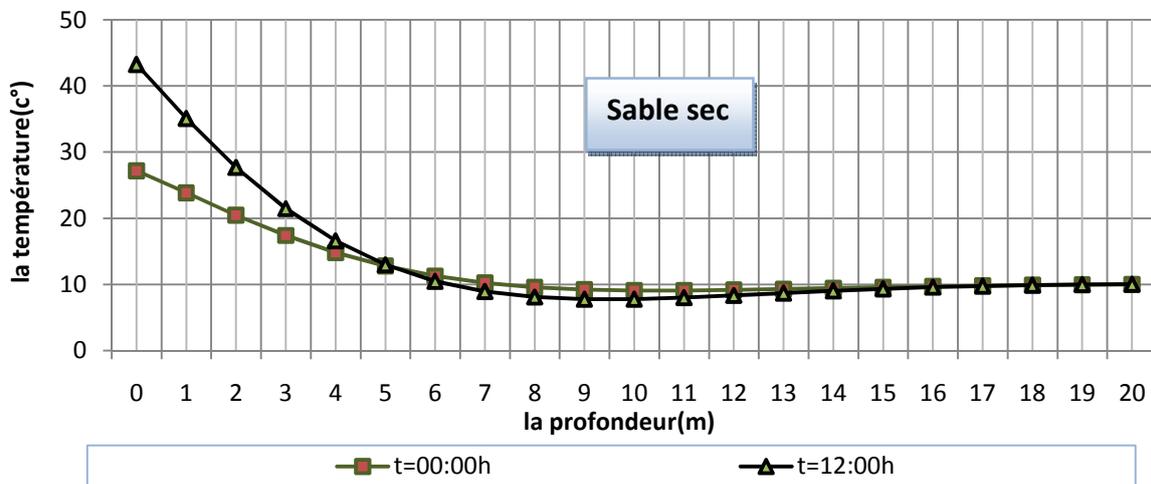


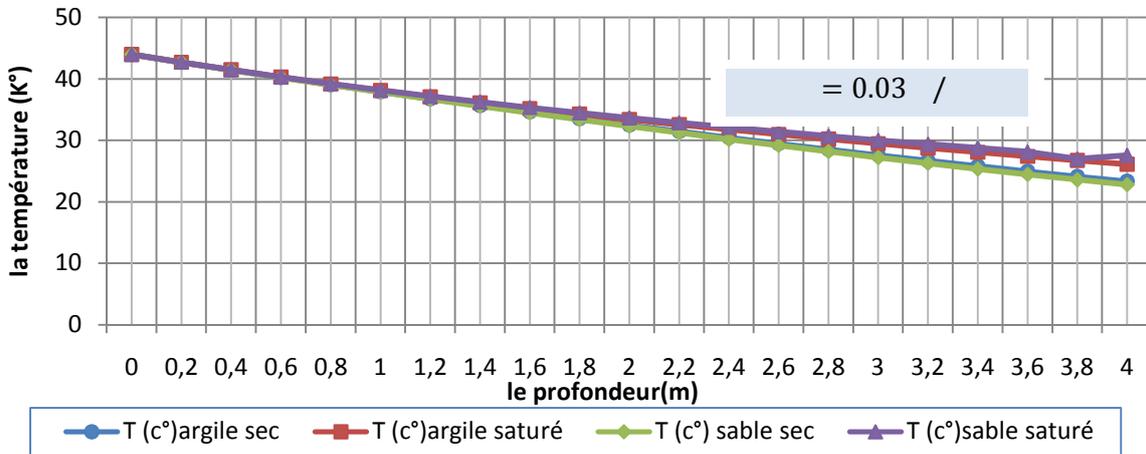
Figure 5.2 : Variation de la température du sol (sable saturé) en deux temps $t=00:00h$ et $t=12:00h$ en fonction de la profondeur, d'amplitude $= 12^\circ$ et de température moyenne annuelle $= 28.08^\circ$. Sa valeur se stabilise pour des profondeurs supérieures à 6m quelque soit le temps.

V-2-3 Variation de la température de l'air dans l'échangeur

❖ Tronçon vertical

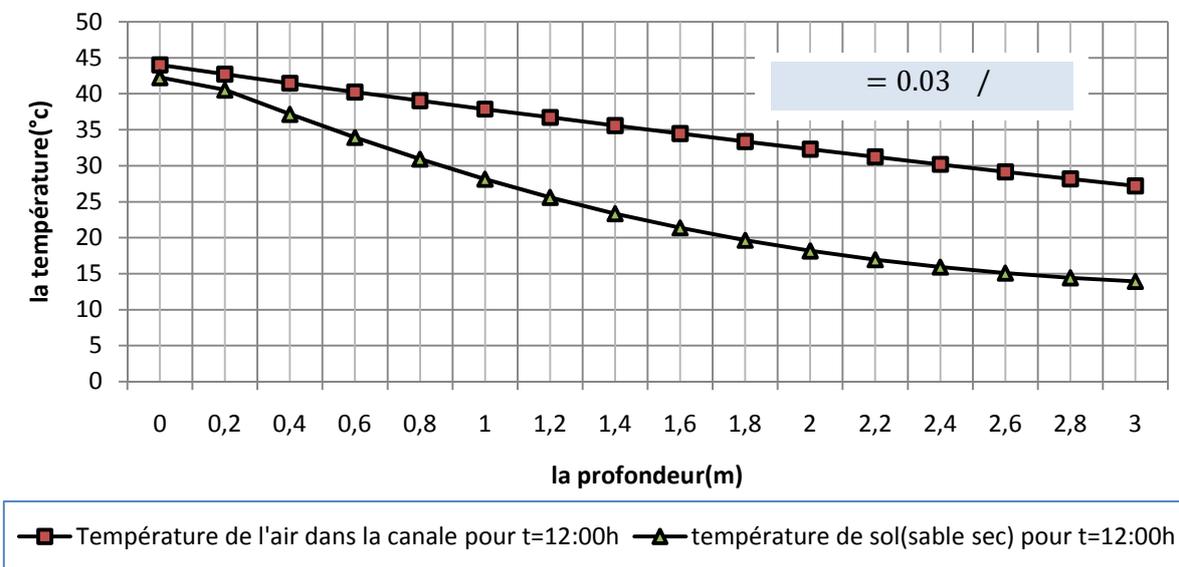
En ce qui concerne l'échange thermique entre l'échangeur et le fluide caloporteur nous avons obtenu les résultats suivants :

La figure (.10) présente la variation de la température de l'air en centre du tube enterré verticalement suivant la nature de sol (argile sec, argile saturé, sable sec, sable saturé) et en fonction de la profondeur. On observe la même variation de la température de l'air quelque soit la nature du sol.



é

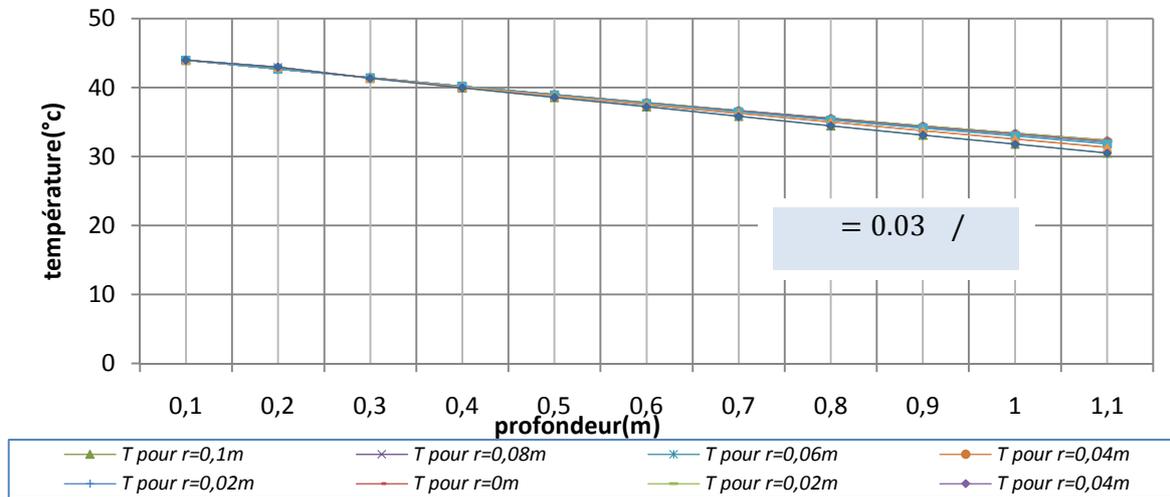
La figure (.11) montre qu'en saison estivale, la température du sol (sable sec) atténué par rapport à la température de l'air dans un canal enterré verticalement, où l'air écoule à une vitesse constante $= 0.03 \text{ /}$.



é

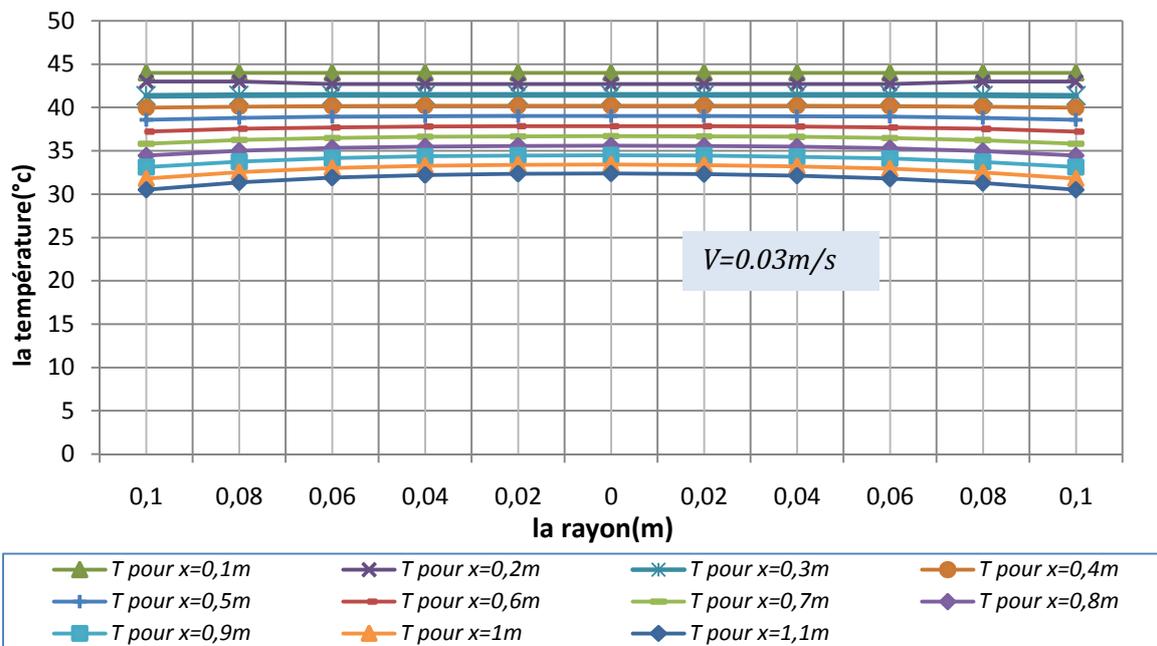
On constate que la température de l'air baisse de l'entrée jusqu'à une profondeur relative à un tronçon de la longueur verticale du tube équivaut à 1,1m. Par ailleurs on peut dire que la température dans les différentes sections transversale du tube est homogène.

La figure (.1) présente la variation de la température de l'air dans un tube enterré verticalement en fonction de la profondeur pour quelques valeurs du rayon du canal. On observe la même variation de la température de l'air, où l'air écoule à une vitesse constante $= 0.03 \text{ /}$.



é

La figure (.1) présente la variation de la température de l'air dans un tube enterré verticalement en fonction du rayon du canal pour quelques valeurs de la profondeur.



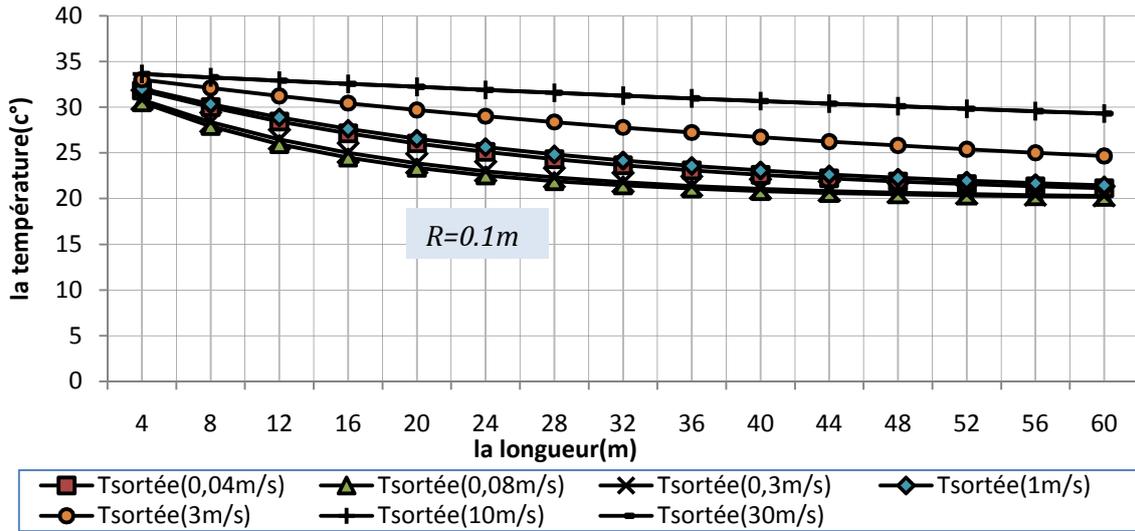
é

❖ **Tronçon horizontal :**

En ce qui concerne l'échange thermique entre le fluide caloporteur qui écoule dans le tube enterré horizontalement et le sol. Nous avons obtenu les résultats suivants :

Les figures (.14) et (.15) montre l'influence de la vitesse et la longueur sur la température de l'air à la sortie de tube.

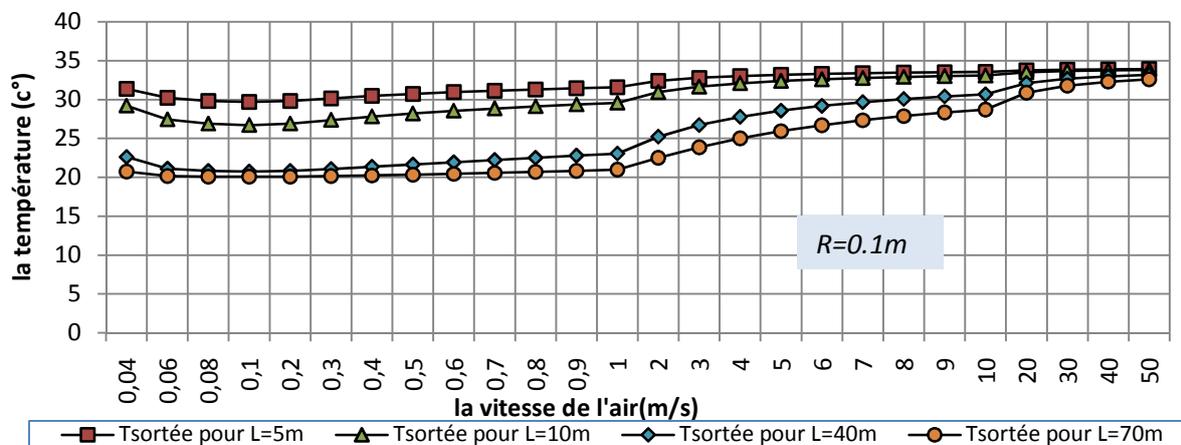
La figure (.14) présente la variation de la température de l'air à sortie du tube enterré horizontalement suivant la longueur du canal et la vitesse de l'air.



à

é

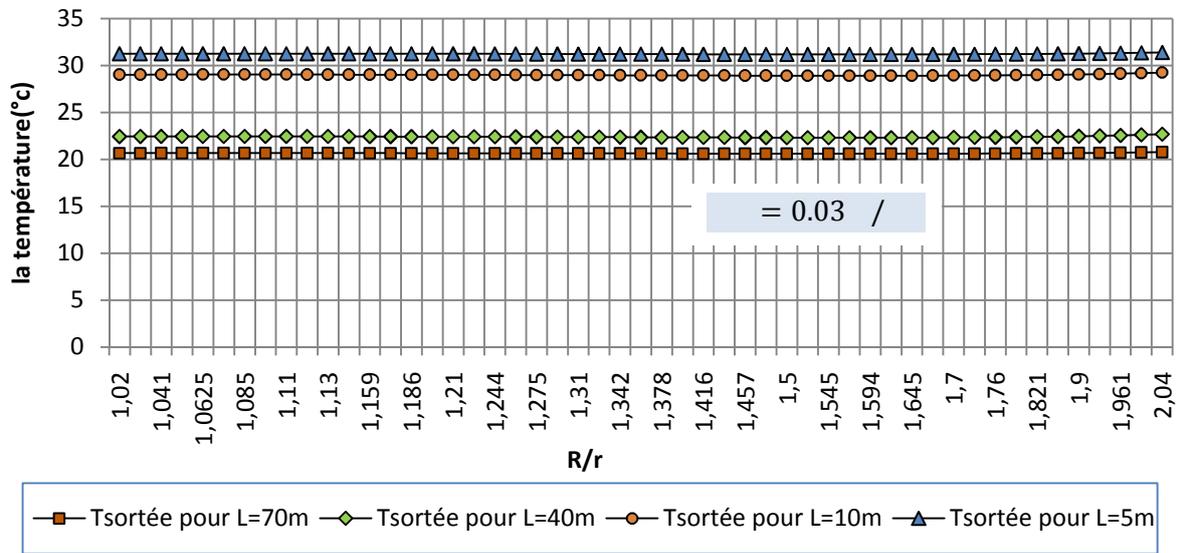
La figure (.15) présente la variation de la température de l'air à sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la vitesse de l'air pour quelques valeurs de la profondeur.



à

é

Les figures (VI. 16) et (VI. 17) présentent la variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction du rapport (R/r).

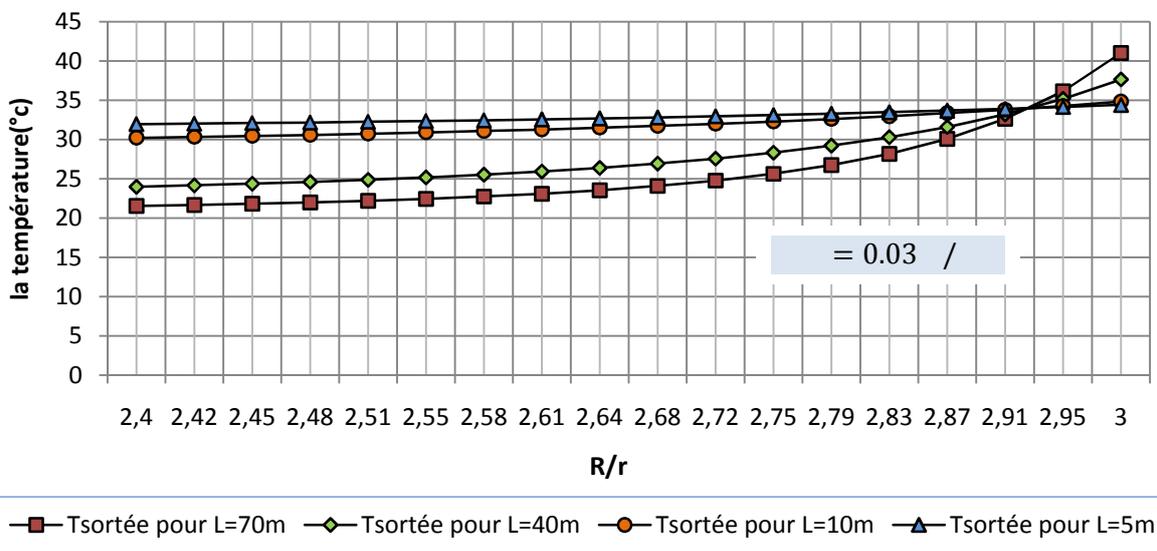


. . .

àé

(/)

é



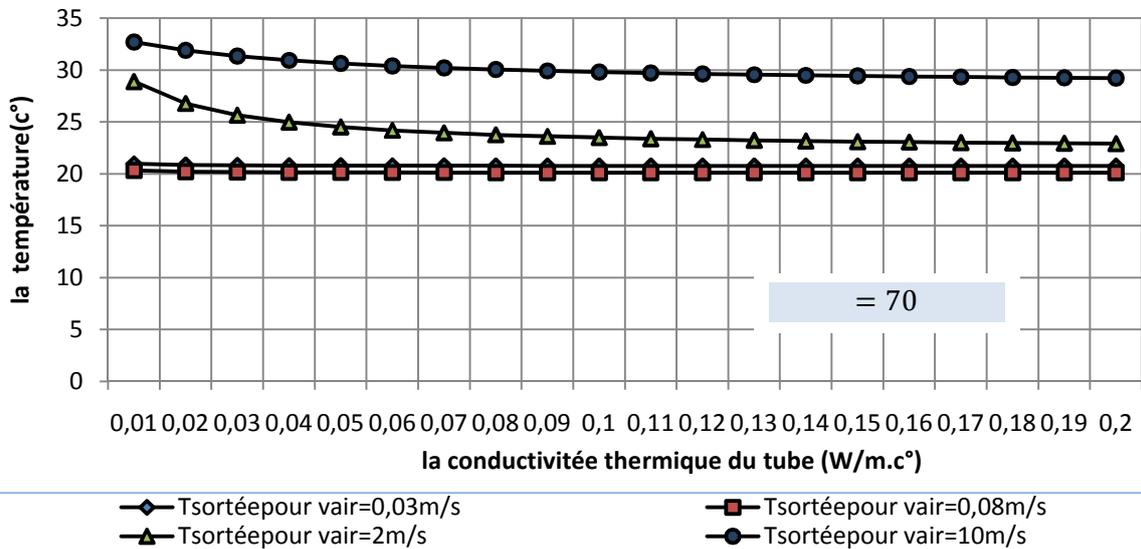
. . .

àé

(/)

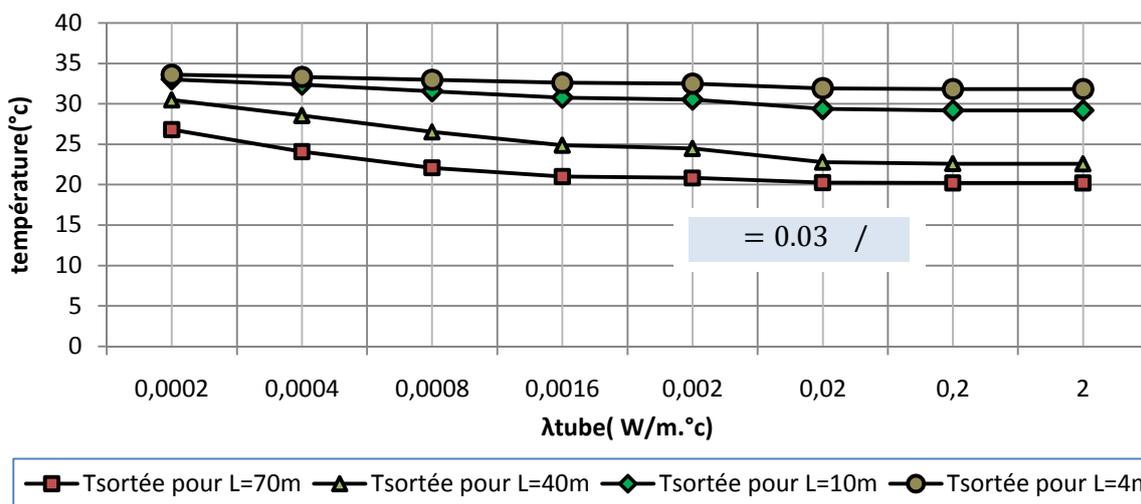
é

La figure (.18) présente la variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité thermique du tube pour quelques valeurs de la vitesse de l'air.



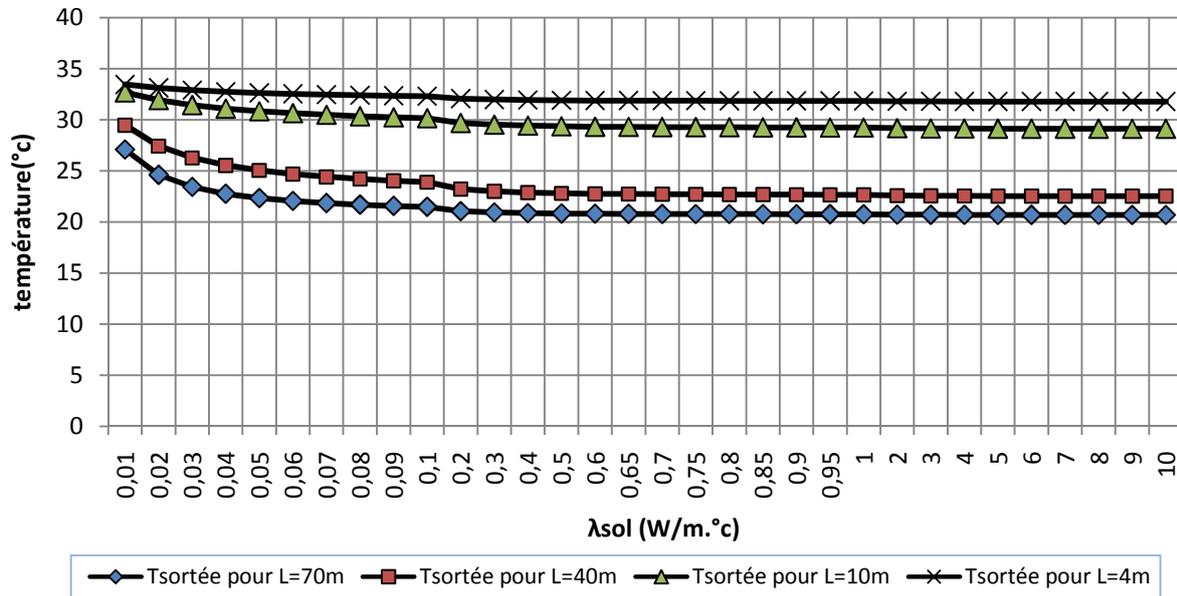
à é é

La figure (.19) présente la variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité thermique du tube pour quelques valeurs de la longueur du tube.



à é é

La figure (.20) présente la variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité thermique du sol pour quelques valeurs de la longueur du tube.

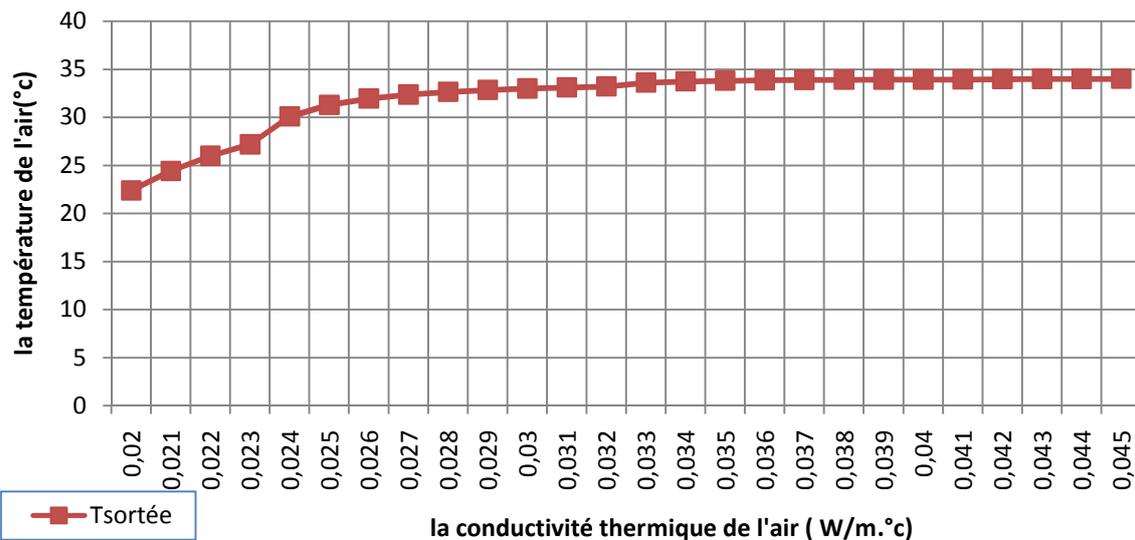


à é

é

é

La figure (.21) présente la variation de la température de l'air à la sortie de tube enterrée horizontalement en fonction de la conductivité de l'air.

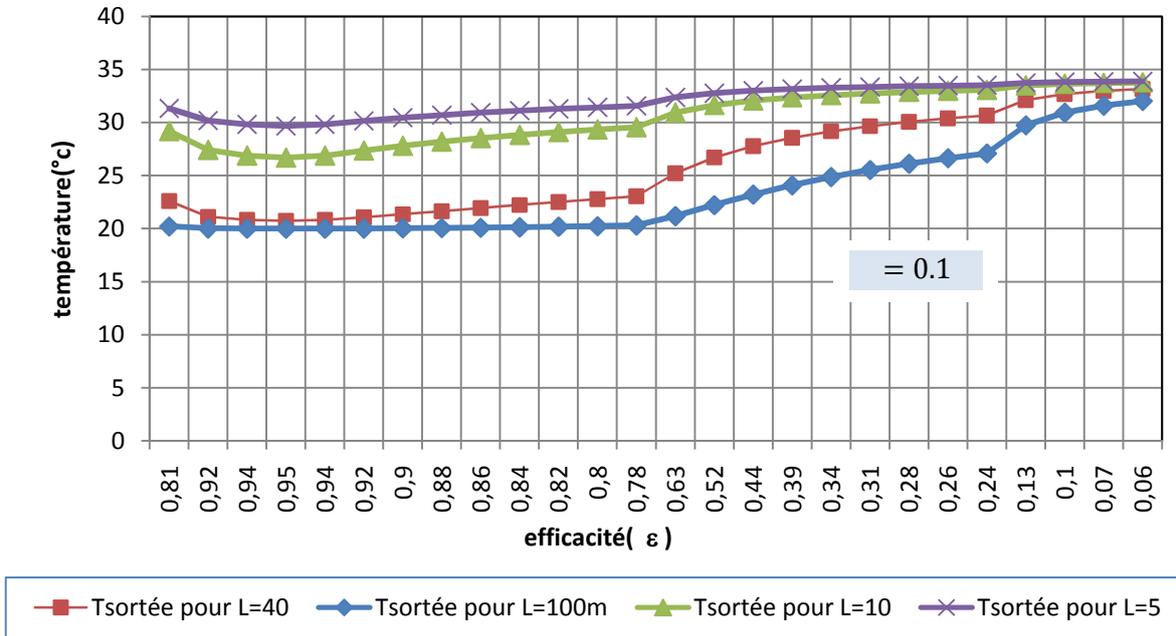


à é

é

é

La figure (VI.22) présente la variation de la température de l'air à la sortie du tube enterrée horizontalement en fonction de l'efficacité du tube pour quelques valeurs de la longueur du tube.

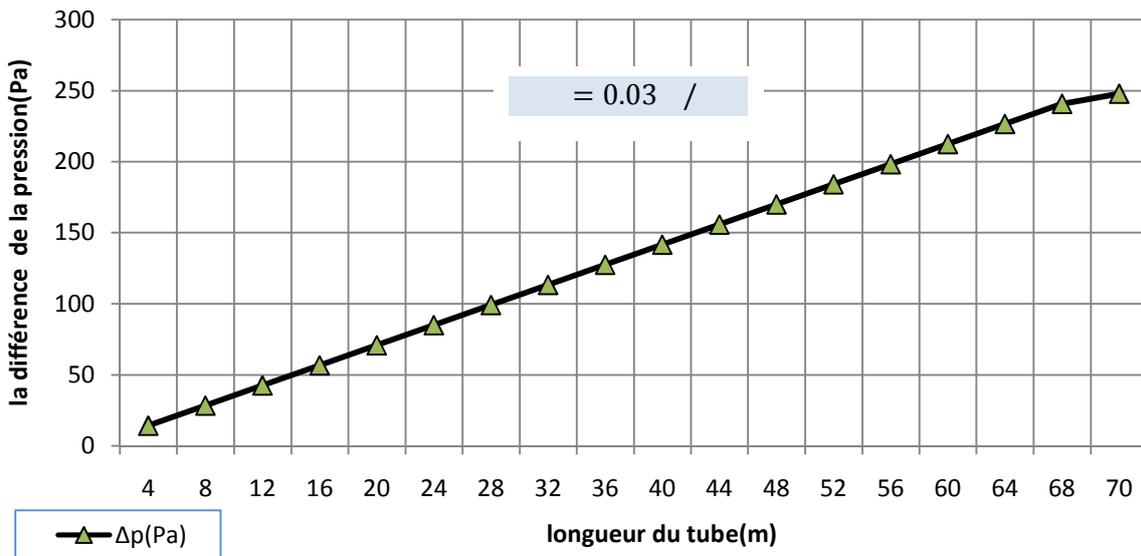


à

é

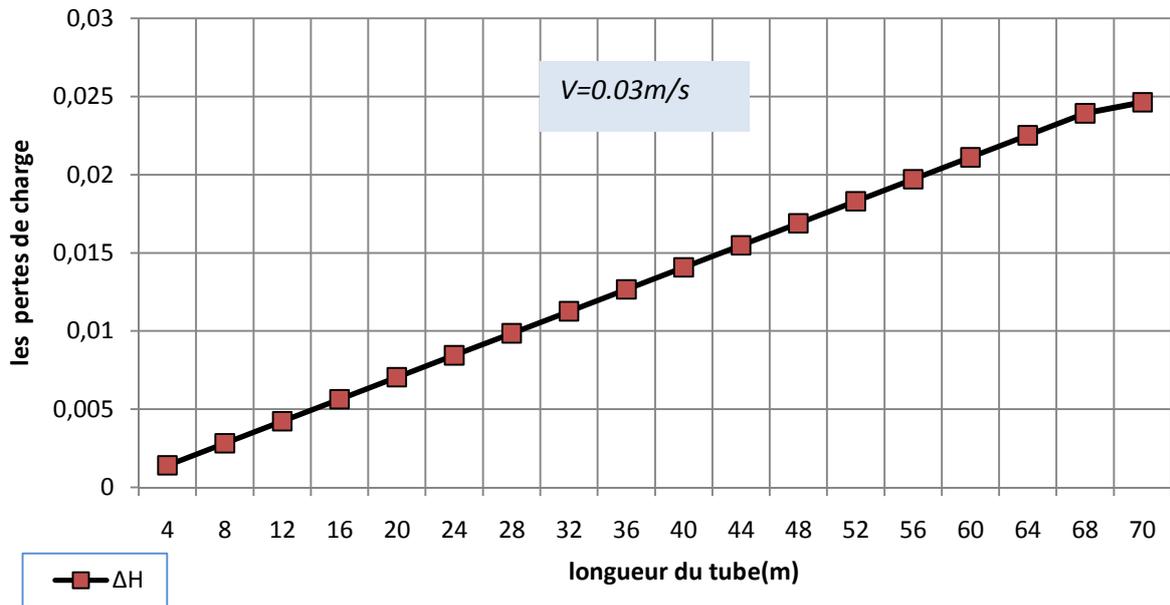
é

La figure (VI.23) présente la variation de la différence de pression du tube enterré horizontalement en fonction de la longueur du tube pour une vitesse = 0.03 /s.

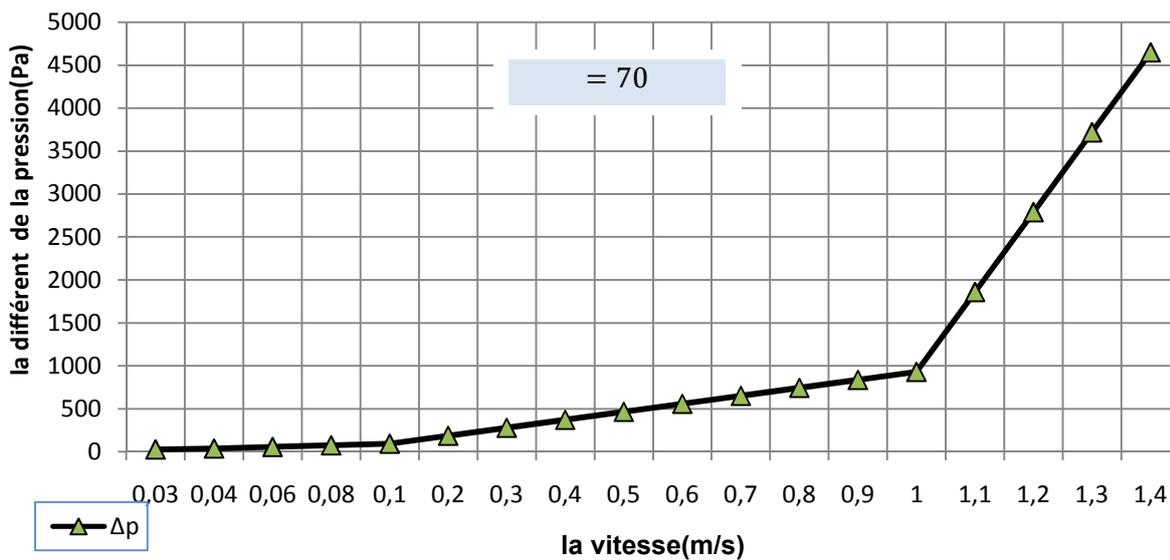


é

La figure (VI.24) présente la variation des pertes de charge du tube enterré horizontalement en fonction de la longueur du tube pour une vitesse $= 0.03 \text{ m/s}$.

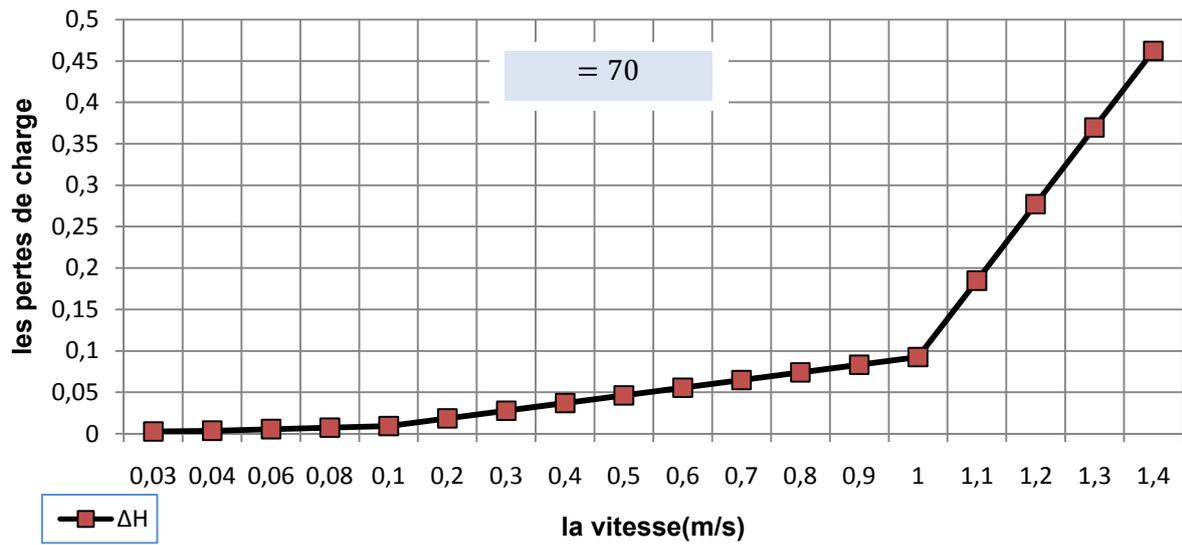


La figure (VI.25) présente la variation de la différence de la pression du tube enterré horizontalement en fonction de la vitesse de l'air pour une longueur $= 70 \text{ m}$.



é

La figure (VI.26) présente la variation des pertes de charge d'un tube enterré horizontalement en fonction de la vitesse de l'air pour une longueur $L = 70$.



Conclusion Générale

Au terme de cette étude relative à l'étude théorique et expérimentale d'un échangeur air/sol dit puits Canadien utilisé pour le rafraîchissement des locaux par la géothermie, nous avons étudié un système très intéressant en génie climatique, caractérisé par son aspect non polluant, performant et qui pourra être exploité industriellement. L'impact de l'utilisation de ce système ainsi que sa généralisation sur l'économie national est certain.

A travers le travail mené nous avons essayé d'évaluer le potentiel de l'utilisation de la géothermie dite de surface et la technologie appropriée pour son exploitation. Celle-ci 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 utilisant les propriétés du sol et la température ambiante. Pour cela nous avons établi l'évolution de la température du sol de sa surface à une certaine profondeur dite optimale pour placer l'échangeur air/sol.

En deuxième phase, nous avons établi 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 en supposant que le régime dynamique est établi. A partir du modèle obtenu nous avons montré 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 s'est faite numériquement par une méthode numérique appropriée. Des outils mathématiques et numériques ont été manipulés.

Des résultats très encourageants sont obtenus. Il s'agit de courbes qui traduisent la variation, journalière et annuelle de la température du sol sous l'effet de divers paramètres relatif au site ainsi que les conditions climatiques variables. Ensuite ceux qui montrent la variation de la température à la sortie de l'échangeur air/sol sous l'influence de divers paramètres qui ont une influence directe sur le fonctionnement de l'échangeur et par la suite l'écart de température entre le milieu ambiant et la température à la sortie de cet échangeur.

Cet écart détermine les possibilités offertes à la technique du rafraîchissement par la géothermie pour être appliqués dans les sites de climats variés en Algérie surtout les zones arides et très chaudes : grand sud, régions à climat chaud et continental.

CONCLUSION GÉNÉRALE

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 dont l'impact industriel est certain.

Liste des figures

Chapitre I:

Fig. I.1. Schéma simplifié d'un puits canadien monotube (exemple de fonctionnement en préchauffage).....	3
Fig. I.2. Température en sortie de l'échangeur air-sol en fonction de l'absorptivité de la surface du sol.....	5
Fig. I.3. Température en sortie de l'échangeur air-sol en fonction de l'humidité de la surface du sol.....	5
Fig. I.4. Température en sortie de l'échangeur air-sol en fonction de la conductivité du sol...	6
Fig. I.5. Structure du modèle d'échangeur air-sol.....	6
Fig. I.6. Schéma de la géométrie de l'échangeur air-sol.....	7
Fig. I.7. Le maillage proposé.....	8
Fig. I.8. Aspect du maillage (coupe transversale)	9
Fig. I.9. Aspect du maillage (coupe longitudinale)	9
Fig. I.10. Confrontation des températures simulées et mesurées de l'air en sortie d'échangeur	9
Fig. I.11. La température du sol à la profondeur du puits.....	10
Fig. I.12. Evolution annuelle de la température en surface et en profondeur	11
Fig. I.13. Evolution annuelle de la différence de température entre la surface et la profondeur pour un cycle annuel.....	11
Fig. I.14. Evolution annuelle du gain de chaleur apportée par l'échangeur air/sol.....	12
Fig. I.15. Échangeur thermique de Romillé.....	13
Fig. I.16. Évolution des températures au cours des campagnes d'enregistrement.....	13
Fig. I.17. Évolution des températures les plus chaudes d'été et les plus froides hivernales...	14
Fig. I.18. Schéma de principe pour la formulation analytique de l'échange diffusif cylindrique air/sol : Coupes perpendiculaire et longitudinale	15
Fig. I.19. Modélisation analytique par transformée de Fourier d'un échangeur air/sol à condition au bord adiabatique, étude paramétrique.....	15
Fig. I.20. Rendement thermique en fonction de la longueur (L) et du diamètre (D) des tuyaux.....	16

Fig. I.21. Relation entre le débit d'air et diamètre de conduite	17
Fig. I.22. Effet de l'entraxe des tuyaux sur le volume du manteau de sol active pour différents diamètres (D)	17
Fig. I.23. Influence du type de sol sur la puissance de l'échangeur de chaleur souterrain....	18

Chapitre II :

Fig. II.1. La nature du régime d'écoulement (laminaire et turbulent)	21
Fig. II .2. Bilan thermique sur un système élémentaire.....	23

Chapitre III :

Fig.III.1. Schéma présentant les principales sources d'échange de chaleur en sol	25
Fig.III.2. Schéma de principe de fonctionnement du puits canadien	26
Fig.III.3. La température du sol moyen en fonction de profondeur.....	27
Fig.III.4. Tube en méandre.....	28
Fig.III.5. Tube en boucle.....	28
Fig.III.6. Faisceaux de tubes.....	28
Fig.III.7. Système puits canadien avec siphon pour récupération des condensats.....	31
Fig.III.8. Système puits canadien avec regard pour récupération des condensats.....	31
Fig.III.9. La ventilateur mécanique contrôlée(VMC) simple flux.....	33
Fig.III.10. Ventilation à double-flux+ récupérateur de chaleur+ puits canadien.....	33
Fig.III.11. Schéma d'un ventilateur récupérateurs de chaleur (VRC).....	34
Fig.III.12. Schéma d'un ventilateur récupérateurs de chaleur (VRC) à conduits.....	35
Fig.III.13. Type H –raccordement par pénétration par le mur.....	36
Fig.III.14. Type H - raccordement par pénétration par la dalle de fondation.....	36
Fig.III.15. Type V - les 3 tuyaux Terra-Air-flex sont décalés en V vertical.....	37

Chapitre IV

Fig. IV.1. Schéma du Modèle de la température à la sortie de l'échangeur air/sol	39
Fig. IV.2. Le transfert de chaleur dans le sol.	40
Fig. IV.3. Schématisation du problème physique.....	44
Fig. IV.4. Transfert de chaleur entre le tube enterré horizontal et le sol.....	47

Chapitre V

Fig. V.1. Planning de résolution d'un problème...	51
Fig. V.2. La discrétisation de l'équation...	52
Fig. V.3. Schéma à trois points explicite...	52
Fig. V.4. La variation de la température ambiante annuelle pour ville Biskra à 25juillet	54
Fig. V.5. La variation de la température ambiante journalière pour ville Biskra à 25juillet ..	54
Fig. V.6. L'évolution de la température de sol en fonction de temps pour ville Biskra à 25juillet	55
Fig. V.7. L'évolution de la température de sol à minuit en fonction de la profondeur pour ville Biskra à 25juillet	55
Fig. V.8. L'évolution de la température de sol à midi jour en fonction de la profondeur pour ville Biskra à 25juillet	56
Fig. V.9. La variation de la température de sol suivant la profondeur pour ville Biskra à 25juillet	56
Fig. V.10. La variation de la température de l'air en centre du tube enterré verticalement. .	57
Fig. V.11. La variation de la température du sol et l'air en fonction de la profondeur...	57
Fig. V.12. La variation de la température de l'air en fonction de la profondeur pour quelques valeurs du rayon de canal...	58
Fig. V.13. La variation de la température de l'air en fonction du rayon pour quelques valeurs de profondeur...	58
Fig. V.14. La variation de la température de l'air à sortie de canal enterrée horizontalement en fonction la longueur...	59
Fig. V.15. La variation de la température de l'air à la sortie de canal enterrée horizontalement en fonction de la vitesse de l'air...	59
Fig. V.16. La variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction du rapport (R/r)	60
Fig. V.17. La variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction du rapport (R/r)	60
Fig. V.18. La variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité thermique du tube et de la vitesse de l'air...	61
Fig. V.19. La variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité thermique du tube...	61

Fig. V.20. La variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité thermique du sol... ..62

Fig. V.21. La variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité de l'air... ..62

Fig. V.22. La variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de l'efficacité du tube... .. 63

Fig. V.23. La variation de la différence de la pression en fonction de la longueur du tube. 63

Fig. V.24. La variation des pertes de charge en fonction de la longueur du tube... .. 64

Fig. V.25. La variation de la différence de la pression en fonction de la vitesse de l'air....64

Fig. V.26. La variation des pertes de charge en fonction de la vitesse de l'air... .. 65

TABLE DES MATIERES

Remerciements...	I
Table des matières...	II
Nomenclature...	V
Liste des figures...	VII
Introduction générale .	1
Chapitre I : Analyse bibliographique...	3
I- Analyse des travaux effectués...	3
I-1 Bilans énergétique et environnementaux de bâtiments à énergie positive ...	3
I-2 Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments...	6
I-3 Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien» ...	10
I-4 Performances d'un échangeur thermique de type air-sol ...	12
I-5 Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique...	14
I-3 : Synthèse globale des travaux remontés dans la littérature...	16
Chapitre II : Généralités sur le transfert de chaleur...	20
II-1 Transfert par convection...	20
II-2 Transport de chaleur par conduction...	23
II-3 Equation générale du transport de chaleur par conduction...	24
II-4 La diffusion thermique ...	24

Chapitre III : différentes technique de la géothermie... ..	25
III-1 Généralités... ..	25
III-1-1 Définition la Géothermie... ..	25
III-1-2 Différents types de gisements géothermiques... ..	25
III-2 L'échangeur thermique air/sol (puits canadien)... ..	26
III-2-1 Définition... ..	26
III-2-2 Principe de fonctionnement du puits canadien... ..	26
III-2-3 Les 4 principaux éléments d'un puits canadien/provençal... ..	27
1) L'entrée d'air neuf... ..	27
2) Les conduits... ..	28
3) Le système d'évacuation des condensats... ..	30
4) Le système de régulation et le ventilateur... ..	32
III-2-4 Le couplage du puits canadien à une VMC... ..	32
➤ En simple flux... ..	32
➤ En double flux... ..	32
III-2-5Le ventilateur mécanique contrôlé (VMC)... ..	32
III-2-5-1 Les différentes types de ventilateur mécanique contrôlé (VMC)...	32
1- Le ventilateur mécanique contrôlée (VMC) simple flux... ..	32
2- Le ventilateur mécanique contrôlée (VMC) double flux avec récupérateur... ..	33
III-2-5-2 les éléments d'un système ventilateur récupérateurs de chaleur (VRC)... ..	34
III-2-5-3 Exemple de VRC à conduits directs... ..	35
III-2-6 Les différents types d'installation des puits canadien... ..	35
1-Type H – horizontal... ..	35
A-Type H - raccordement par pénétration par le mur	35
B-Type H - raccordement par pénétration par la dalle de fondation ..	36
2-Type V – vertical... ..	37

III-3 Les avantages et les avantages de la géothermie pour la production de chaleur.....	37
Chapitre IV-Problématique et modélisation de la température à la sortie de l'échangeur air/sol.....	39
IV- Modélisation la température du sol et de l'air à la sortie de l'échangeur air/sol:.....	39
IV-1 Modélisation la température du sol (transfert de chaleur par conduction).....	39
IV-2 Modélisation de la température de l'air à la sortie du tube enterré verticalement (Transfert de chaleur par convection).	44
IV-3 Modélisation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement (Transfert de chaleur par convection)	46
Chapitre V - Résolution numérique du problème et les résultats obtenus.....	51
V-1 La méthode numérique de résolution et de discrétisation d'équation de convection	51
V-1-1 Planning de résolution d'un problème.....	51
V-1-2 La résolution numérique de l'équation de convection.....	51
V-2 Résultats et explications.....	53
VI-2-1- Variation de la température ambiante.....	54
VI-2-2- Variation de la température du sol	55
VI-2-3 Variation de la température de l'air dans l'échangeur	56
❖ Tronçon vertical.....	56
❖ Tronçon horizontal.....	59
Conclusion générale.....	66
Bibliographie	68
Résumé	

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bruno PEUPORTIER : Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive. Centre Énergétique et Procédés (CEP) de l'École des mines de Paris (2008)
- [2] Stéphane THIERS, Bruno PEUPORTIER: modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France 2007.
- [3] David AMITRANO: Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien ».Université J. Fourier, Grenoble 2006.
- [4] David AMITRANO: Performances d'un échangeur thermique de type air-sol Université J. Fourier, Grenoble (2005)
- [5] Pierre HOLLMULLER: Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Université de Genève Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie (2002.)
- [6] Les puits canadiens/provençaux Guide d'information Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques(2008).
- [7] Jean-Marie SEYNHAEVE : Les bases du transfert de chaleur.Université Catholique de Louvain. (2005)
- [8] Yves JANNOT : Transferts thermiques. Ecole des Mines Nancy (2009)
- [9] Documentation HELIOS échangeurs géothermique. (2007).
- [10] Vanmoeseke : Réaliser un puits canadienne /provençal. Bruxelles environnement.IBGE-institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (2007)
- [11] Source : EUR Observer 2007 (d'après Européen Géothermal Congres 2007).
- [12] Rabah BENSAID : Comportement des sols gypseux sous irrigation en zone aride.
Comite Nationale d'Evaluation et de Programmation de la Recherche Universitaire. Université de Batna (2010).
- [13] M. Hellel, O. Bellache et A. Chenak : Chauffage par énergie géothermique des bungalows d'un complexe touristique. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Alger (2006).

- [14] A.Mermoud : régime thermique du sol .Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.(2006).
- [15] Julien HEINTZ : Les puits canadiens/provençaux Guide d'information. Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques(2005)
- [16] Michel Leroy : La mesure au sol de la température et des précipitations.Météo-France - Direction des systèmes d'observation(2002)
- [*] Données sur sites Internet.