

## I-Etude bibliographique

### Introduction

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

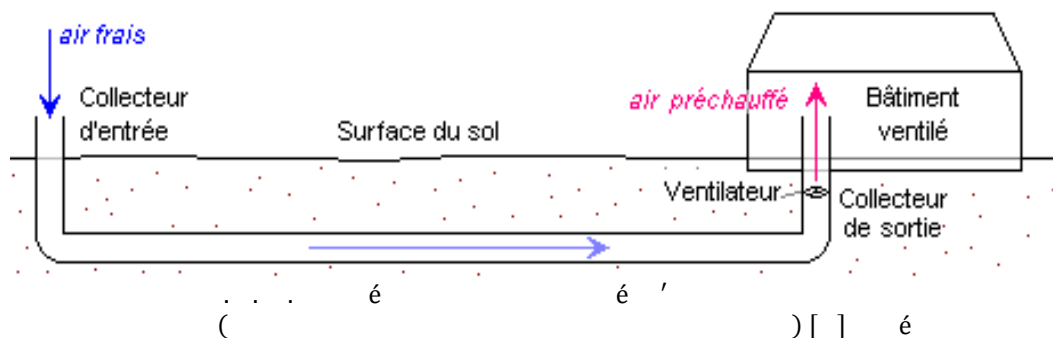
Dans le but de situer notre travail par rapport aux travaux effectués on essaye dans ce chapitre de présenter les principaux travaux de recherche rencontrés dans la littérature qui sont menés dans le même domaine et qui traitent soit les études théoriques, soit celles expérimentales dans un but de dimensionnement 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  $t$  :

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

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 ... .. [ . ]

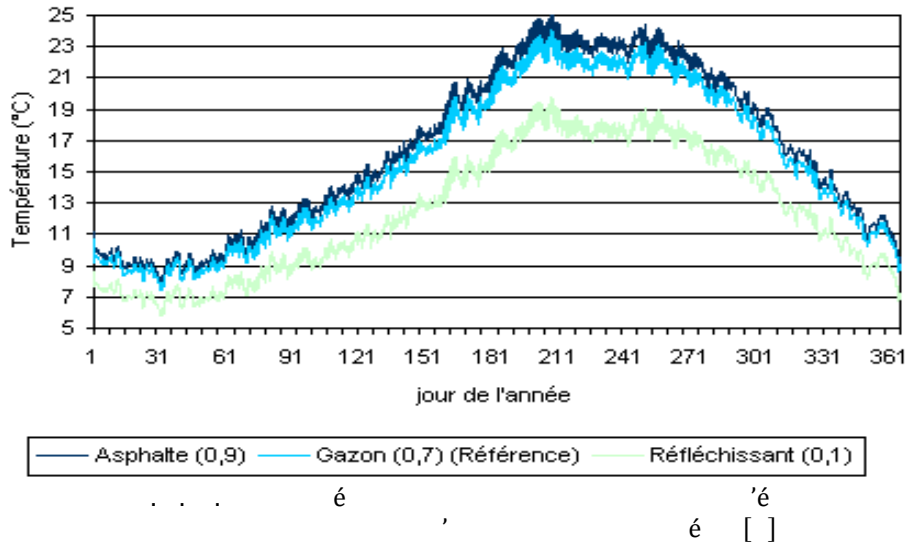
: Capacité calorifique massique de l'air... .. [ . ° ]

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

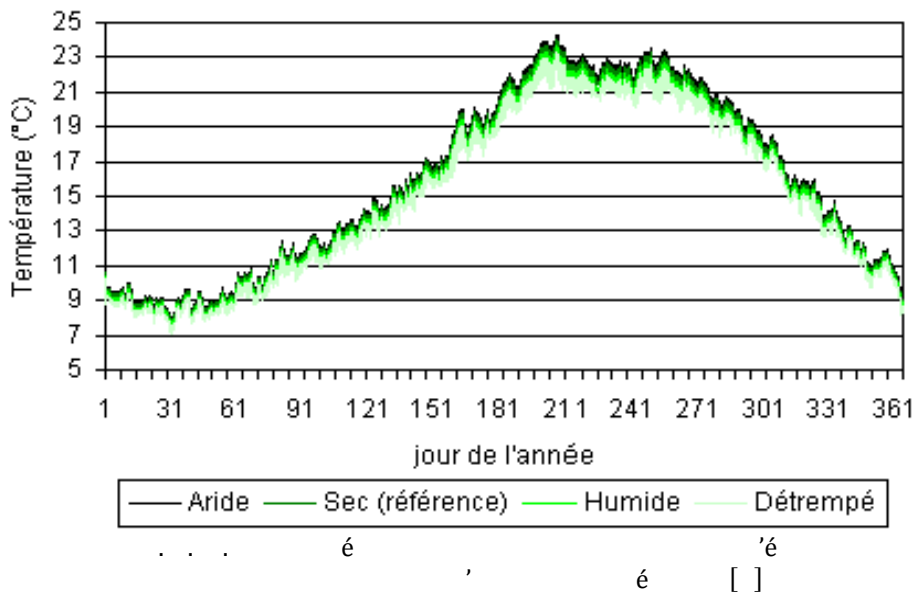
: Rayon intérieur du tube... .. [ ]

### Les résultats

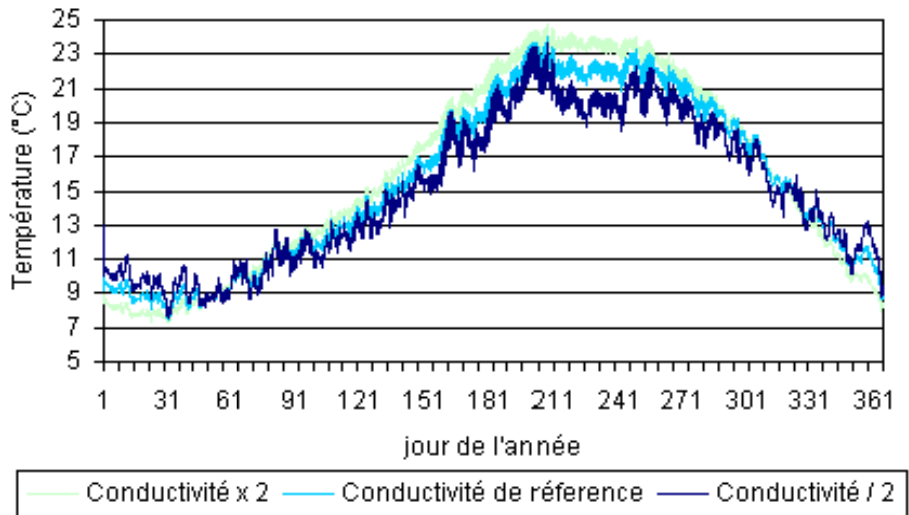
La part du rayonnement solaire absorbée par le sol dépend de la nature de sa surface. La ( . ) montre pour un sol très absorbant (asphalte), la température du sol sera plus élevée que si le sol était peu absorbant (revêtement réfléchissant), en particulier lors des périodes où le rayonnement solaire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



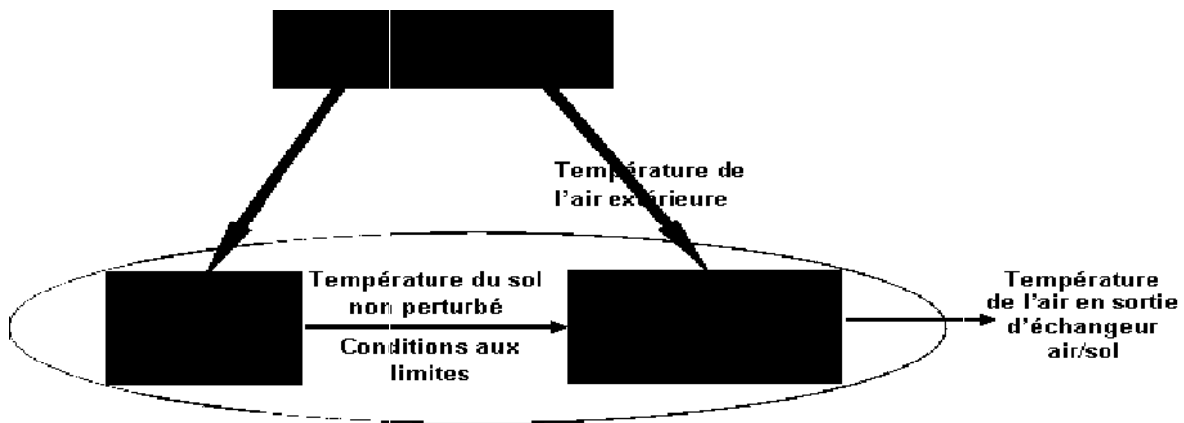
La conductivité thermique du sol intervient à la fois sur la profondeur de pénétration du signal thermique dans le sol et sur le comportement dynamique du sol au voisinage des tubes. Par conséquent, ce paramètre modifie l'amplitude et le déphasage du signal de température du sol ainsi que l'efficacité 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:



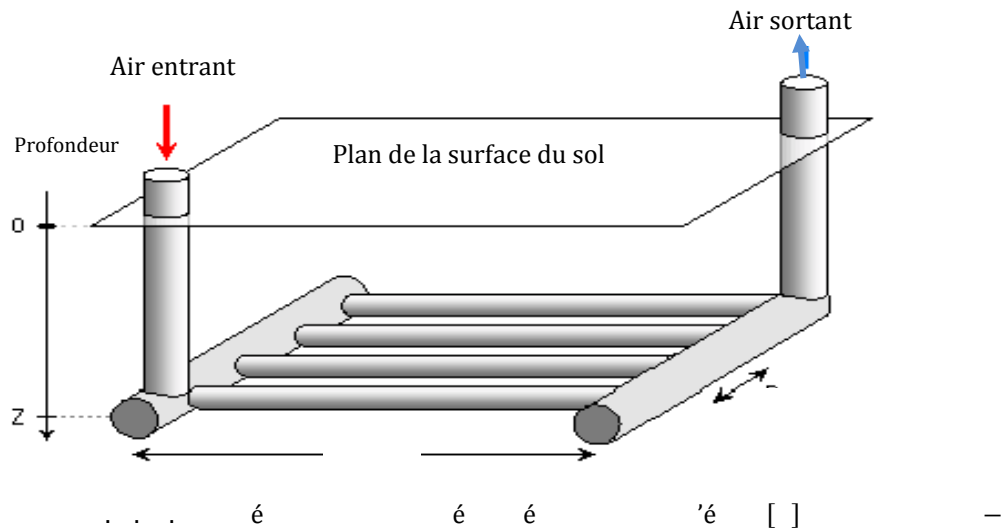
... è 'é - [ ]

**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  $\phi_i$  et  $\phi_e$ ), 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:

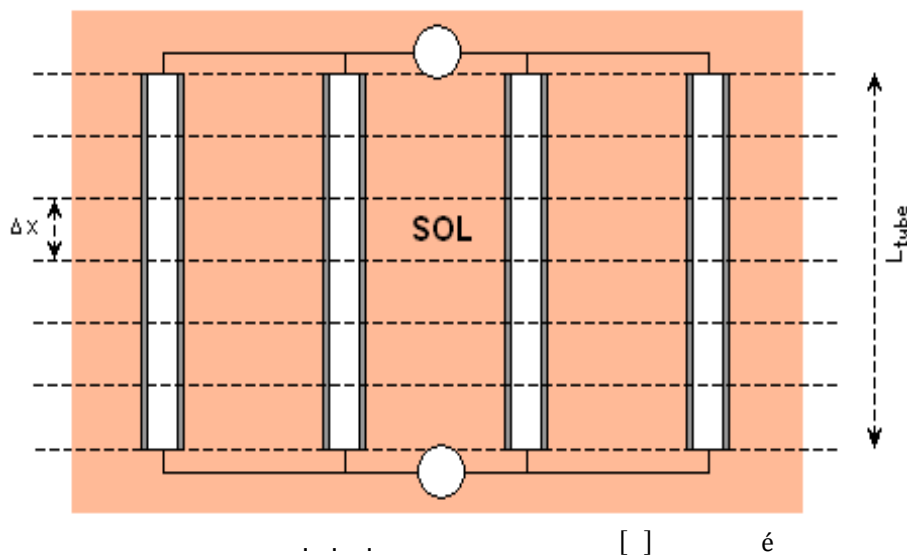
- le sol au voisinage des tubes présente des propriétés thermiques homogènes et identiques.
- le raccordement des tubes aux collecteurs soit réalisé de manière identique.

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

### Le maillage

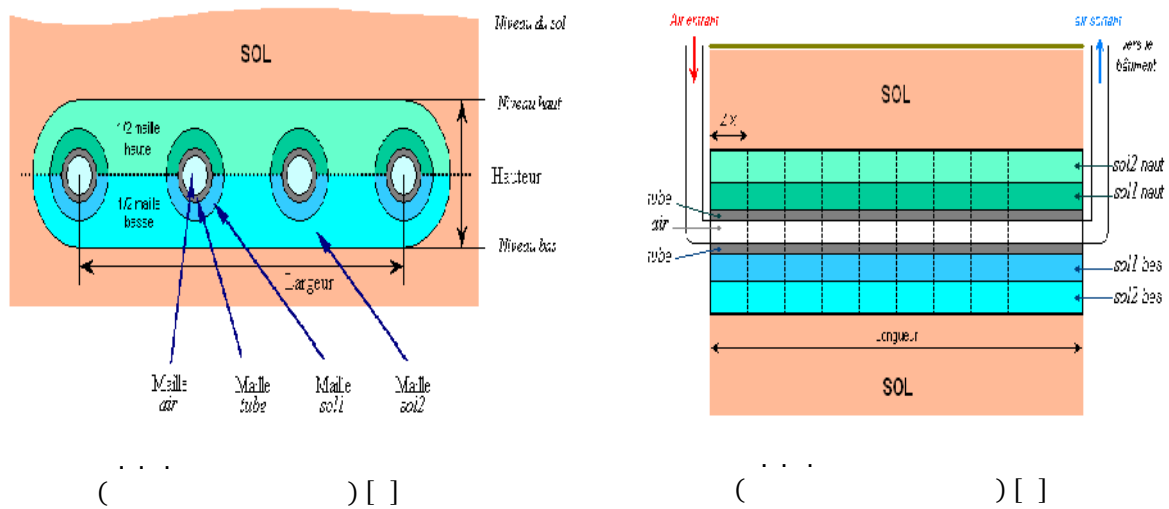
La méthode des différences finies, couramment utilisée pour la simulation d'échangeurs thermiques, a été retenue pour cette modélisation. Par cette méthode, le système modélisé est découpé en volumes (ou mailles). Chaque volume donne lieu à l'établissement d'un bilan thermique. La température et toutes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

Le maillage proposé est constitué par un découpage des tubes en  $n_{\text{pas}}$  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).

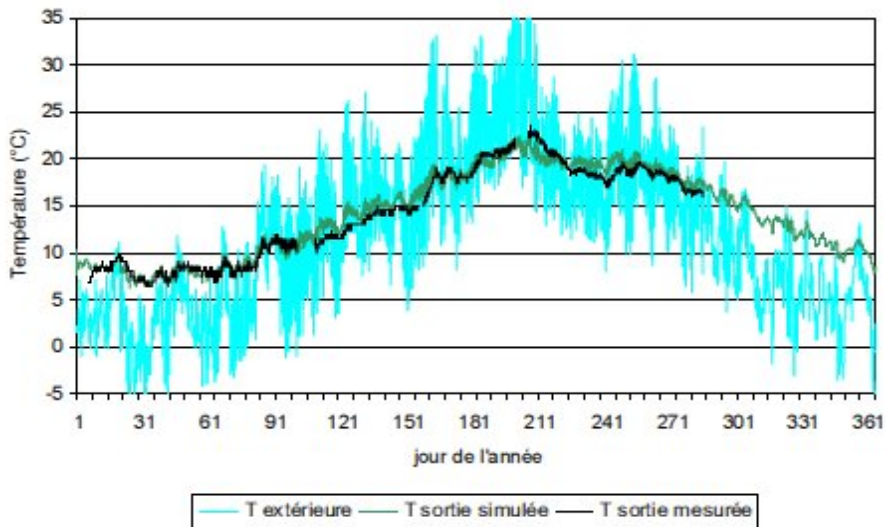
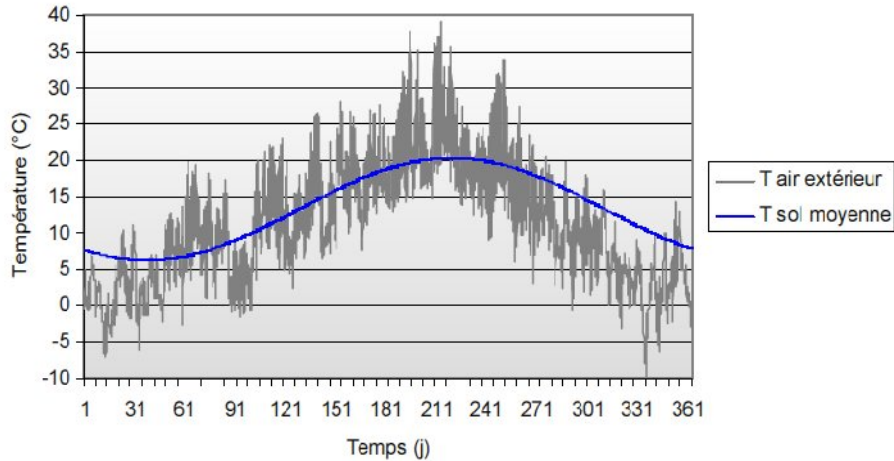


Figure I. 10 : Evolution de la température de l'air mesurée et simulée.

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:

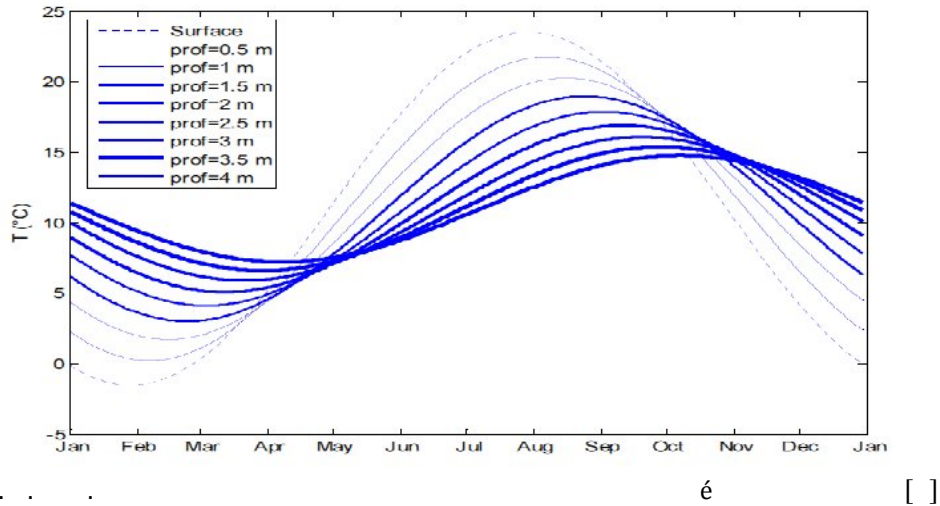
$$T(z, t) = T_m + e^{-\frac{z}{2a}} \sin\left(\omega t - \frac{\omega z}{2a}\right) \dots \dots \dots (I.5) \quad [ ]$$

a: Diffusivité thermique

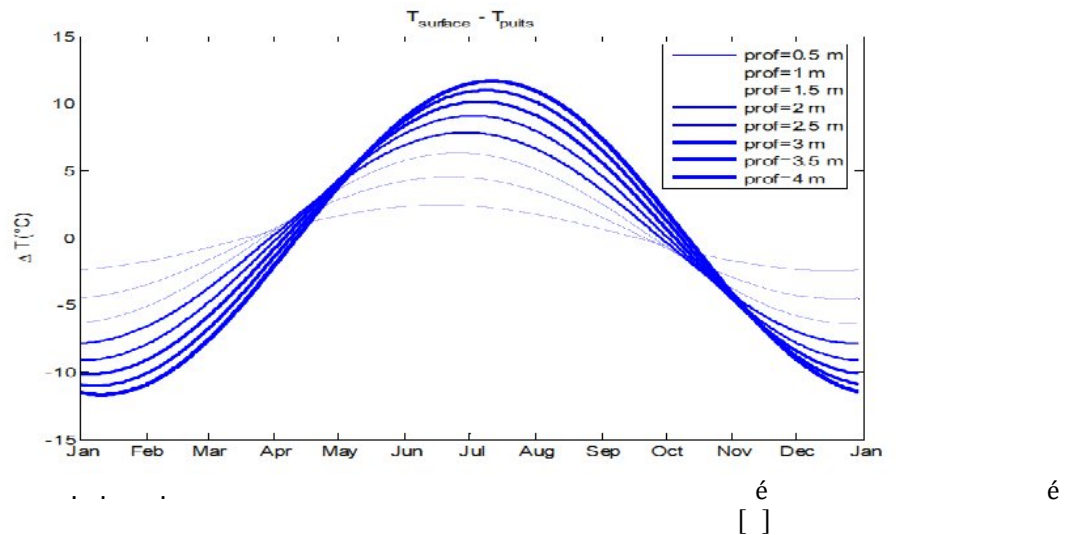


**Les résultats obtenus**

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.



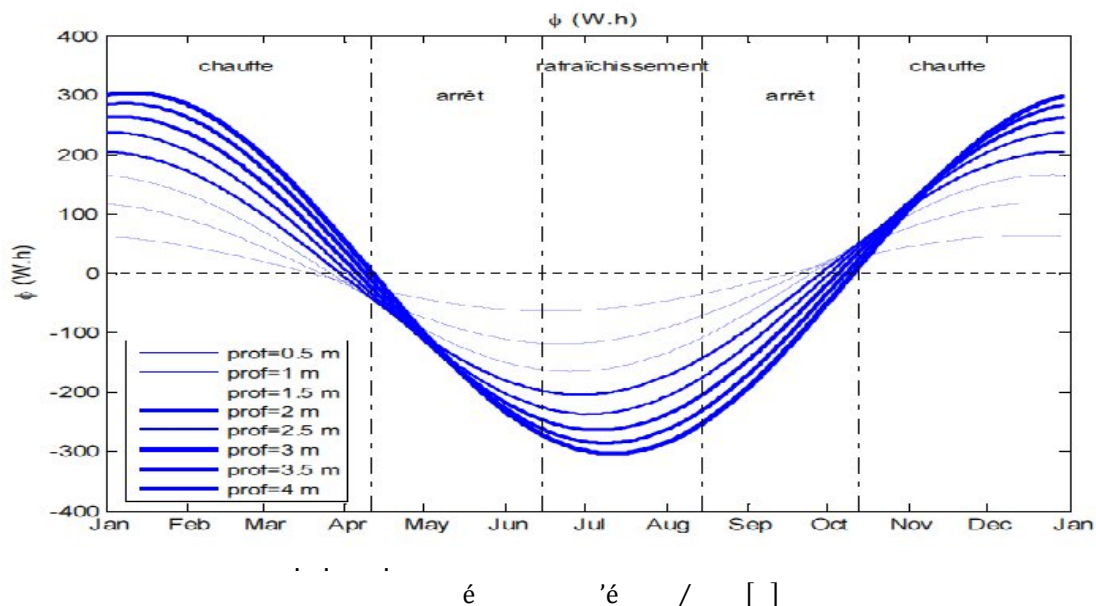
Le flux thermique récupérable par un échangeur air/sol est proportionnel à la différence de température entre l'air de surface et le sol. La figure (Fig. I. 13) montre l'évolution de cette différence au cours de l'année, pour différentes profondeurs d'enfouissement de la gaine.



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 a 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

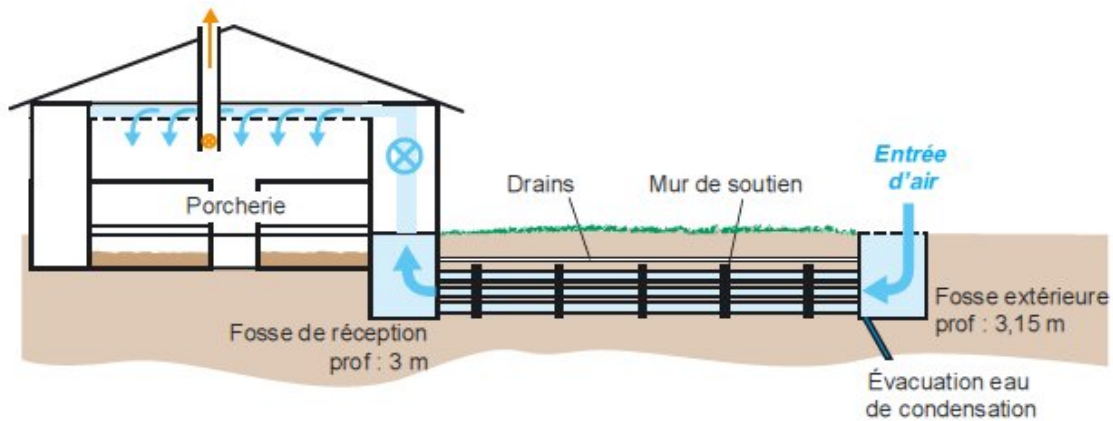
Le travail de recherche présenté par David BARTOLOMEU [4] en 2005 est consacré au dimensionnement d'un tel système pour optimiser ses performances qui sont analysées tout au long de l'année en distinguant les saisons hivernales et estivales. L'analyse a été basée sur de méthodologie d'évaluation et étude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



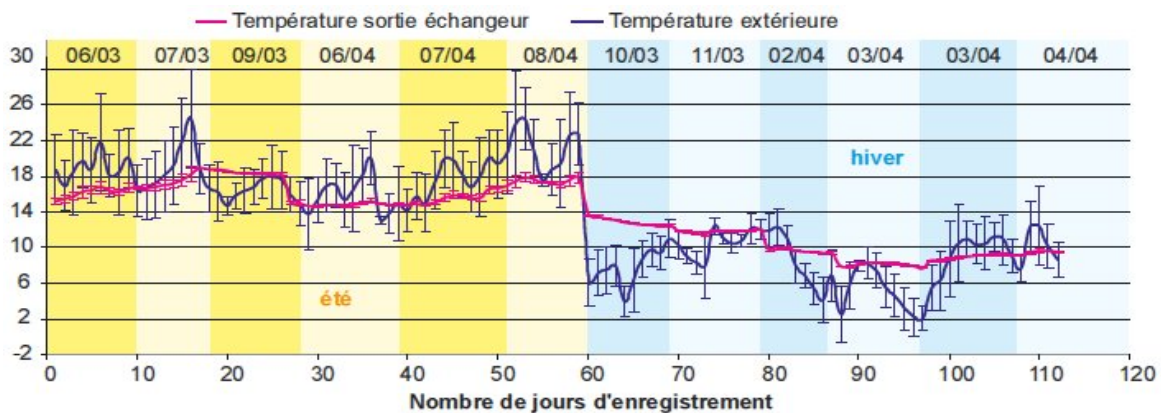
[ ] é

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

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

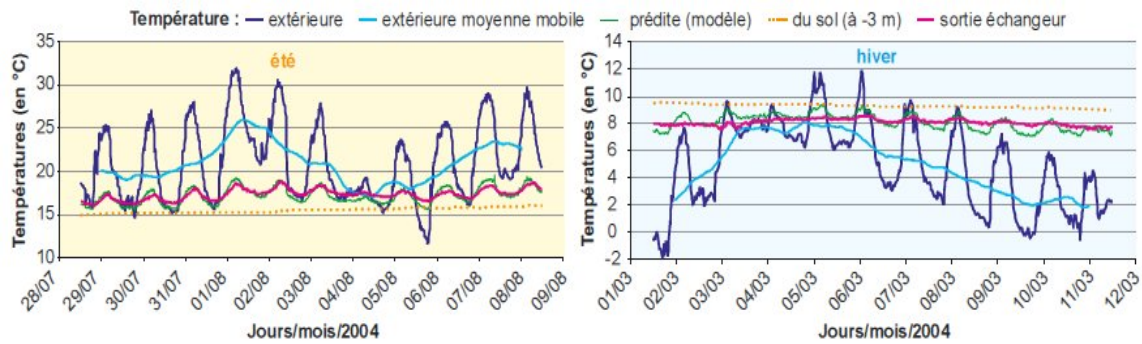
**Les résultats obtenus**

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 :

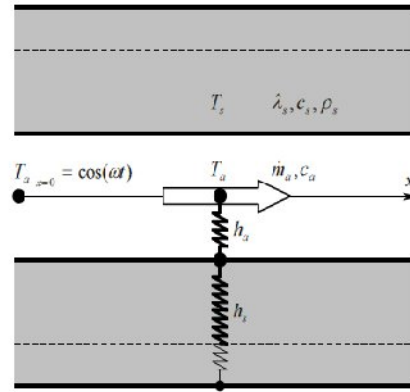
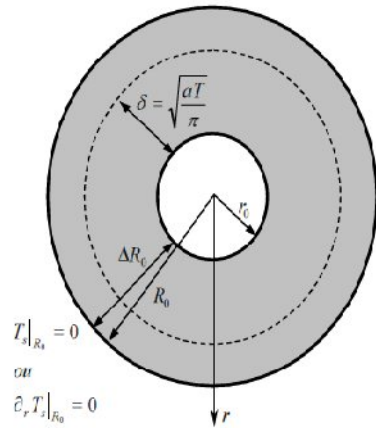
$$( \theta ) = \theta_0 \cdot e^{-\frac{h}{\lambda} \cdot x} \cdot \left( \cos(\omega t) - \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{x}{\omega} \cdot \sin(\omega t) \right) \dots \dots \dots (I.8) [5]$$

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

: Surface d'échange... .. [ ]

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

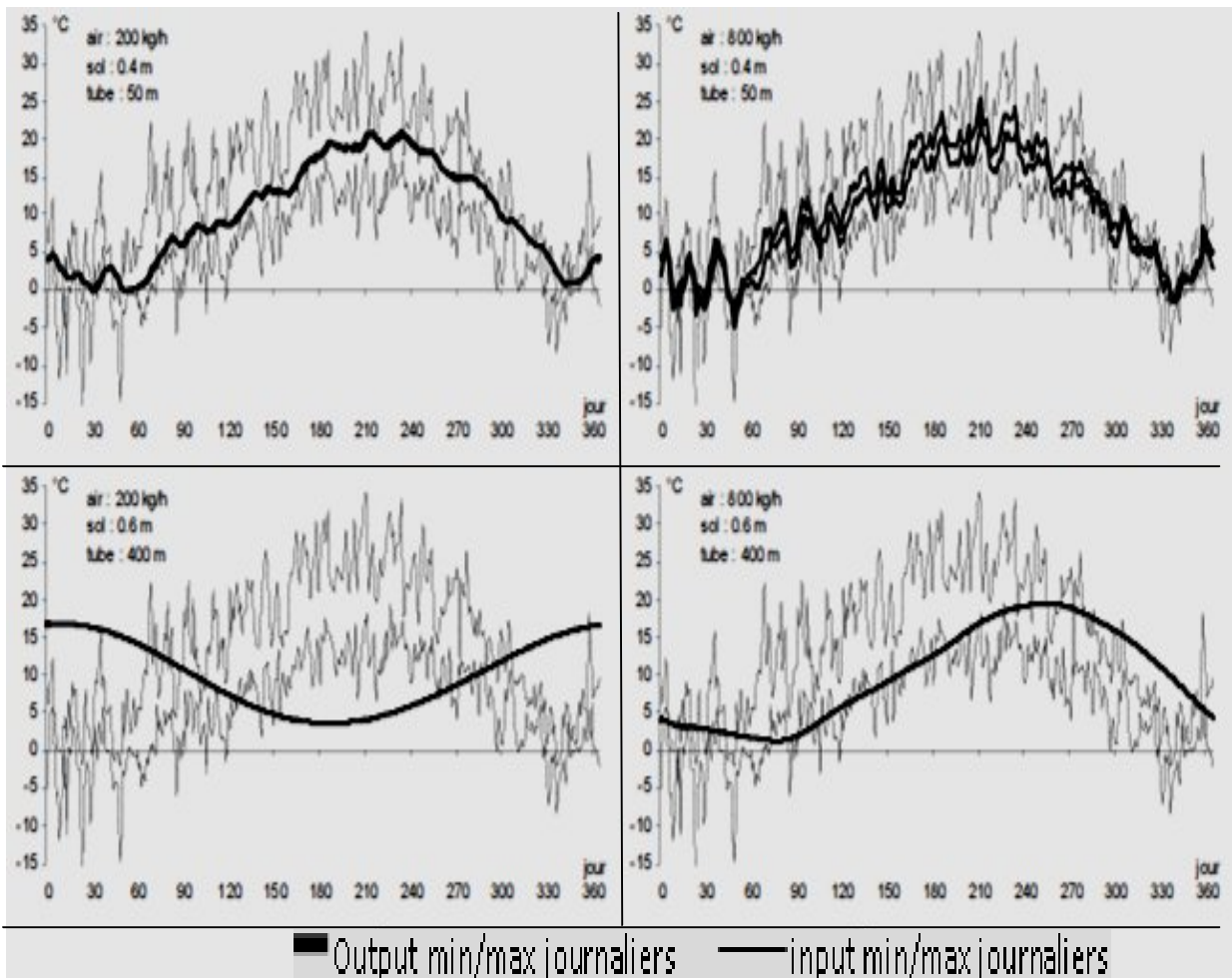
: Le temps nécessaire au flux d'air pour parcourir la distance x. .... [ ]



... 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.

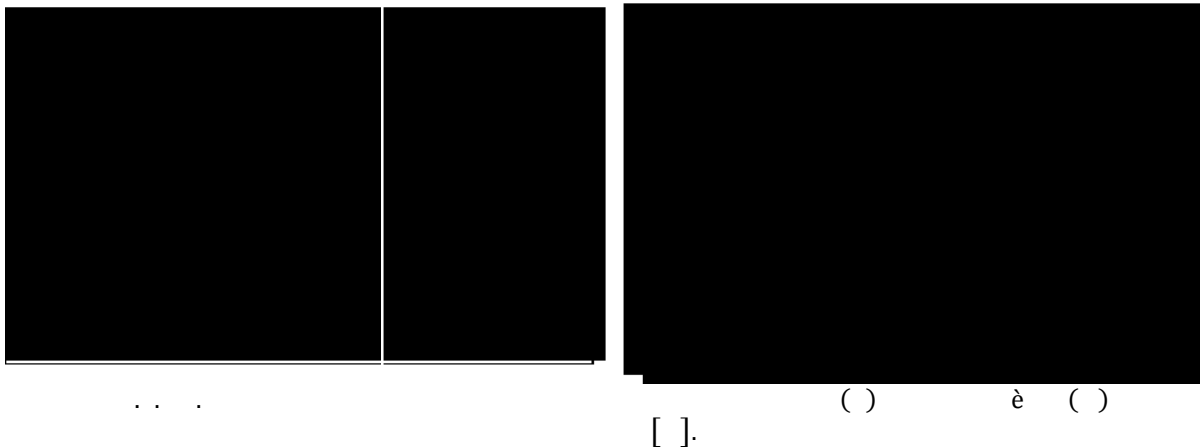
### Les paramètres influençant sur les dimensionnements d'un puits canadien[6]

#### 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 :



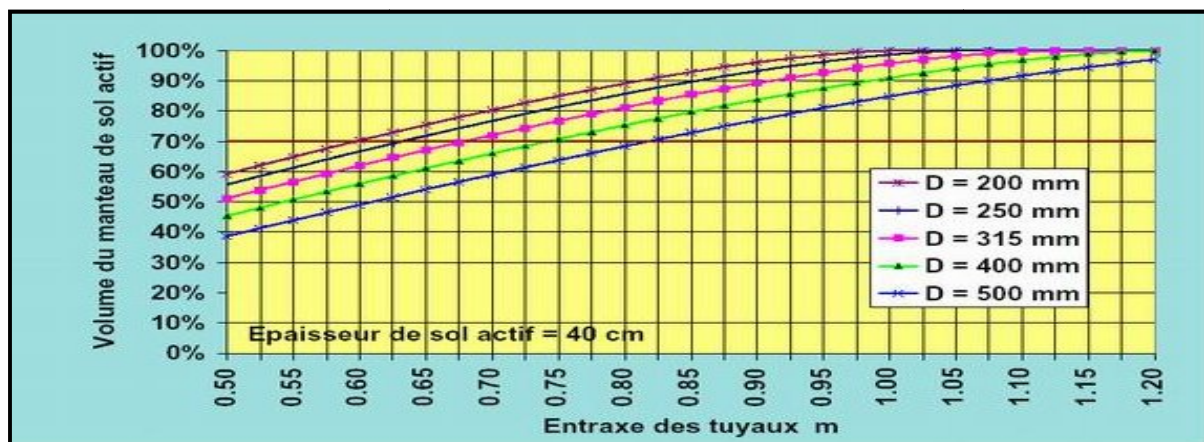
Débit par conduite [m <sup>3</sup> /h]	Diamètre 100 mm	Diamètre 150 mm	Diamètre 200 mm	Diamètre 250 mm	Diamètre 300 mm
100	10,6	11,7	13,3		
200	11,3	12,7	14,3	15,9	17,2
300		13,1	15,1	17,2	19
400		13,7	15,9	17,7	20,4
500		14,1	16,4	19	21,6
600		14,7	16,9	19,8	22,5
700			17,7	20,2	23,6
800			18,3	21	24,6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



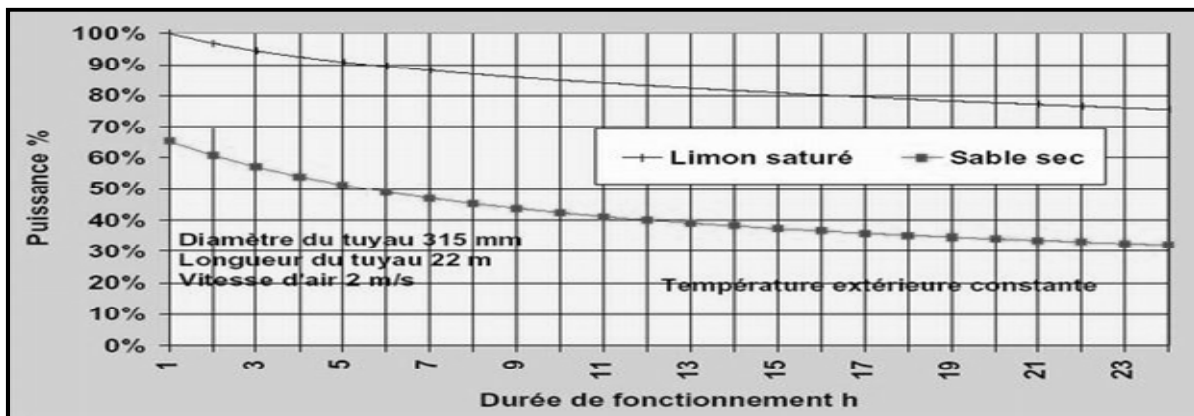
é è ( ) [6]

#### 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.