

# L'impact Environnemental de la Pompe à Chaleur Source Sol (Ground Source Heat Pump) et son rendement Énergétique

M.A.Boukli Hacene, N.E.Chabane Sari

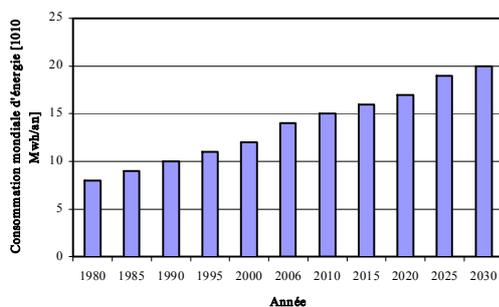
**Résumé**— Dans cet article il a été mis en exergue une méthode permettant le chauffage et le refroidissement naturel pour une régions à climat tempéré. Le mouvement d'air est généré à l'intérieur de l'espace par des conduites de chauffage/refroidissement souterraines. Une étude de faisabilité de la climatisation et du chauffage par un système de pompe à chaleur source sol (GSHP) en Algérie a été entreprise dans ce travail. Elle consiste en la modélisation de la température du sol à différentes profondeurs pour un sol argileux dans la wilaya de Tlemcen. Le modèle employé est développé à partir de l'équation instationnaire de la chaleur pour un milieu homogène, et utilise les températures ambiantes journalières durant une année représentative pour la localité considérée. Les résultats de l'étude ont montré la faisabilité du chauffage/refroidissement par GSHP dans la localité de Tlemcen et le type de sol considéré. La GSHP peut fournir un préchauffage important représentant entre 70 et 90 % de l'énergie de chauffage.

**Mots clés** — Confort thermique, énergie, économie, environnement.

## I. INTRODUCTION

Le but de notre travail est l'étude de la compatibilité d'un système de chauffage et de refroidissement très économe, ayant pour seule source la température du sol, sachant que cette dernière varie très peu durant toute l'année, et à une certaine profondeur, on va la trouvé constante, mais tout dépend aussi de la nature du sol étudié. Enfin, comme bilan énergétique et économique, un calcul du Coefficient de Performance sera envisagé

### I. 1. Situation Energétique globale :



**Figure I.1 :** Consommation globale d'énergie juste jusqu'en 2010 et projetée jusqu'en 2030 [1]

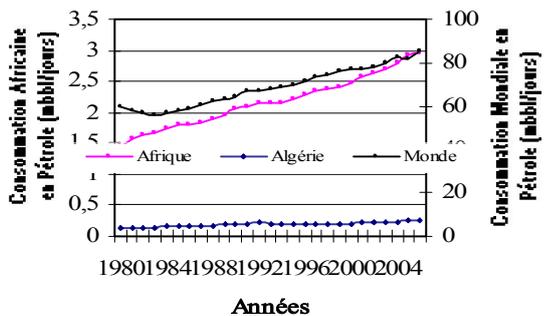
N.E.Chabane Sari, Unité de recherche Matériaux et Energies Renouvelables (U.R.M.E.R), Université Abou –Baker Belkaid B.p: 119 TLEMCEM 13000 ALGERIE Tel/Fax: 043. 21. 58. 90 & 89

Après que la revue statistique de British Petroleum ait prédit, en 2004, que l'Algérie deviendrait un pays importateur de pétrole dans 16 ans, l'expert international Nicolas Sarkis affirme que l'Algérie est le premier pays producteur qui risque de devenir un pays importateur de pétrole. « L'Algérie est le pays qui détient le plus faible taux de production et de réserves à l'Opep... De plus, nous remarquons que du fait de l'augmentation des besoins énergétiques internes, l'Algérie ne pourra pas exporter dans un proche avenir des quantités importantes de pétrole », indique M.Sarkis. [2]

Pour 2008, l'Algérie est classée en quatrième position (derrière l'Arabie Saoudite, l'Egypte et les Emirats arabes-unis), en ce qui concerne la consommation d'énergie (860 000 bep/j), selon la revue Pétrole et Gaz Arabes (PGA), éditée à Paris. [3]

Au sein de l'OPAEP, trois pays avaient en 2008 une consommation d'énergie supérieure ou égale à un million de bep/j. Il s'agissait de l'Arabie saoudite, de l'Egypte et des Emirats arabes unis, note PGA.

Le Pr Chemseddine Chitour, c'est depuis longtemps le sérieux, la compétence et la persévérance. Il dresse dans "L'EXPRESSION" le tableau des inconspicuités de la politique énergétique actuelle de l'Algérie. Il démontre que, si un redressement radical n'est pas opéré, la gestion irrationnelle et irresponsable des ressources nationales enfoncera irrémédiablement l'ensemble de la population d'ici l'horizon 2030 dans les malheurs de la faim, de la soif, du froid et d'une dépendance extérieure écrasante. Vision catastrophiste ? Non, indique le Pr Chitour, qui trace les solutions possibles, à condition que cette affaire de "quelques uns" devienne l'affaire de TOUS. On ne saurait mieux souligner l'importance de l'information véridique et des puissantes mobilisations, en un mot de l'approche démocratique pour imposer les voies de la raison et de l'efficacité. [4]



- Fi-  
gure I.2 : Consommation mondiale, africaine et algérienne en pétrole (données [5]) -

participé plus de 2 500 scientifiques de 130 pays [9], affirme que la probabilité que le réchauffement climatique depuis 1950 soit d'origine humaine est de plus de 90 % [10]. Ces conclusions ont été approuvées par plus de 40 sociétés scientifiques et académies des sciences, y compris l'ensemble des académies nationales des sciences des grands pays industrialisés.

Les projections des modèles climatiques présentés dans le dernier rapport du Giec, indiquent que la température de surface du globe est susceptible d'augmenter de 1,1 à 6,4 °C supplémentaires au cours du 21e siècle. Les différences entre les projections proviennent de l'utilisation de modèles ayant des sensibilités différentes pour les concentrations de gaz à effet de serre et utilisant différentes estimations pour les émissions futures. La plupart des études portent sur la période allant jusqu'à l'an 2100. Cependant, le réchauffement devrait se poursuivre au-delà de cette date même si les émissions s'arrêtent en raison de la grande capacité calorifique des océans et de la durée de vie du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Ce phénomène implique de fortes conséquences humaines et environnementales à moyen et long terme

Dans le monde, il y a une compréhension politique du réchauffement climatique, c'est le défi principal du monde pour les décennies à venir. Depuis que le réchauffement de la planète est lié à l'usage global d'énergie non renouvelable, il y a un fort besoin pour le développement de nouveaux systèmes d'énergies durables plus efficaces et basé sur les ressources des énergies renouvelables.

### I. 3. Les Principes du système GSHP:

La pompe à chaleur source sol (GSHP) puise la chaleur dans le sol par l'intermédiaire de capteurs qui sont des tubes enterrés.

Une pompe à chaleur typique exige seulement 100kWh de courant électrique pour transformer 200kWh de chaleur environnementale librement disponible en 300kWh de chaleur utile. Dans tous les cas, la chaleur utile dégagée sera plus grande que l'énergie primaire utilisée pour actionner la pompe elle-même. Les pompes à chaleur ont également un résultat relativement faible de rejet de CO<sub>2</sub> [11].

Il y a trois éléments importants dans une GSHP :

#### 1- La boucle au sol :

Ceci est composé des pipe disposées en longueurs et enterrées dans la terre, dans un forage ou un fossé horizontal. La pipe est habituellement un circuit fermé et elle est remplie de mélange d'eau et d'antigel, lesquels sont pompés autour de la pipe qui absorbe la chaleur du sol terre.

#### 2- Une pompe à chaleur :

Elle est constituée de 3 parties principales :

- Le vaporisateur (par exemple, la chose gribouilleuse dans la partie froide du frigidaire) prend la chaleur de l'eau dans la boucle au sol.

- Figure I.3: Production mondiale de Fuel [6]-

- Figure I.4: Variation du prix du Fuel entre la période 2003-2009 [7]-

## I. 2. Le réchauffement de la planète

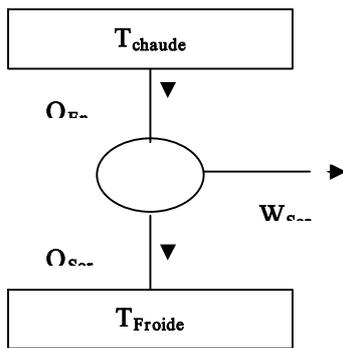
Le réchauffement climatique, également appelé réchauffement planétaire, ou réchauffement global [8], est un phénomène d'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, à l'échelle mondiale sur plusieurs années. Dans son acception commune, ce terme est appliqué à une tendance au réchauffement global mesuré pendant les dernières décennies du XX<sup>e</sup> siècle.

Un Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le GIEC, élabore un consensus scientifique sur cette question. Son dernier et quatrième rapport, auquel ont

- Le compresseur (c'est ce qui fait le bruit dans un réfrigérateur) déplace le réfrigérant autour de la pompe à chaleur et comprime le réfrigérant gazeux en une température nécessaire pour le circuit de distribution de la chaleur.
- Le condensateur (le compartiment chaud au fond du réfrigérateur) abandonne la chaleur à un réservoir d'eau chaude, qui alimente le système de distribution.

### 3 – Un système de distribution de chaleur :

Il consiste à avoir un chauffage en sous sol ou un radiateur pour chauffer l'espace et dans certains cas le stockage de l'eau pour l'approvisionnement en eau chaude.



- Figure I.5 : Diagramme d'un moteur thermique -

La boucle au sol peut être obtenues par :

- 1 - forage.
- 2 - fossé horizontal droit coûte moins qu'un forage, mais il a besoins en espace est plus grand
- 3 - Spirale horizontale (ou bobine allante) – besoin d'une tranchée d'approximativement 10m de longueur afin de fournir approximativement 1 kW de charge thermique.

La réfrigération est l'extraction artificielle de la chaleur d'une substance afin d'abaisser sa température. Principalement, la chaleur est extraite à partir des fluides tels que l'air et les liquides. Afin d'extraire la chaleur, une région froide doit être créée. Un certain nombre d'effets peuvent être employés :

- L'effet de Peltier (inverse des thermocouples).
- Réactions chimiques endothermiques.
- Vaporisation induite d'un liquide.

En termes thermo-dynamiques un réfrigérateur est l'inverse d'un moteur thermique c.-à-d., la chaleur peut être transférée à partir d'un réservoir froid vers un réservoir chaud par la dépense d'un travail (fig. I.6).

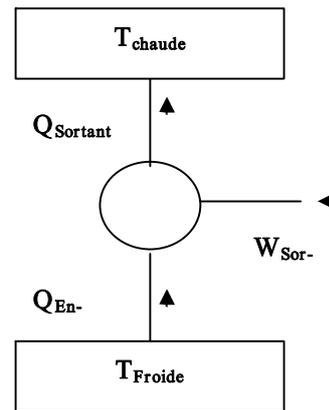
Le principe d'une pompe à chaleur n'est pas différent de celui d'un réfrigérateur.

Une pompe à chaleur est utilisée pour fournir la chaleur tandis qu'un réfrigérateur est utilisé pour obtenir le froid.

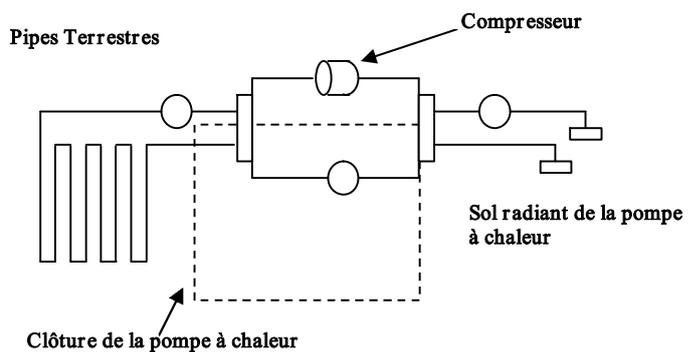
#### I.4. La vue technique du processus de pompe à chaleur :

La pompe à chaleur est un dispositif mécanique utilisé pour chauffer et refroidir, dont le principe est de déplacer la chaleur d'un milieu plus chaud vers un milieu plus froid.

Une GSHP emploie la terre pour chauffer la maison pendant l'hiver et la refroidir pendant l'été. Nous avons tous une pompe à chaleur dans le réfrigérateur d'une maison. Si nous mettons notre main derrière le réfrigérateur, nous sentons la chaleur qui a été enlevée de la nourriture. C'est le même principe qui est employé pour déplacer la chaleur vers la maison depuis la terre. La pompe à chaleur déplace la chaleur d'une source de basse température à une source à hautes températures. Le processus d'augmenter la basse température à plus de 100 °F (38 °C) et de la transférer à l'intérieur implique un cycle d'évaporation, de compression, de condensation et d'expansion. Un réfrigérant est employé comme milieu de transfert de chaleur, qui circule dans la pompe à chaleur (fig. I.5).



- Figure I.6 : Moteur thermique réservé (Réfrigérateur) -



- Figure I.7 : Cycle de la pompe à chaleur -

Les coûts d'installation de la GSHP varient selon la conception et l'application (soit entre 425 \$/Kw et 840 \$/Kw). Les systèmes GSHP ont le potentiel de réduire l'énergie refroidissante de 30% à 50% et de réduire l'énergie calorifique de 20% à 40% [12]. Les pompes à chaleur géothermiques tendent à être plus rentable que les systèmes conventionnels dans les applications suivantes :

- Dans la nouvelle construction où il est relativement facile d'incorporer cette technologie, ou pour remplacer un système existant en fin de vie.

- En climats caractérisés par les oscillations quotidiennes de la température, là où les hivers sont froids et les étés chauds, là où le coût d'électricité est plus élevé.
- Dans les secteurs où le gaz naturel est indisponible et plus coûteux que l'électricité.

### I.5. La technologie des pompes à chaleur source sol (GSHP) :

#### A- Le captage :

Les capteurs peuvent être installés horizontalement ou verticalement. Dans ce dernier cas, on parle aussi de sondes géothermiques.

- **Les capteurs horizontaux** : Il s'agit de tuyaux (en polyéthylène généralement) enterrés horizontalement à faible profondeur (de 0,6 m à 1,2 m) dans lesquels circule un fluide caloporteur. Les capteurs sont installés sur le terrain jouxtant le bâtiment.

#### - Figure 1. 8 : Représentation des capteurs horizontaux -

Ils nécessitent une surface de terrain relativement importante (entre 225 et 300 m<sup>2</sup> pour une maison de 150 m<sup>2</sup>). Pelouses, massifs et buissons peuvent cohabiter avec ce type de capteur. Par contre les arbres doivent s'en trouver à plus de 2 m, les réseaux enterrés non hydrauliques à 1,5 m, et les fondations, les puits, les fosses septiques et les évacuations à 3 m.

La longueur totale des tubes d'un capteur horizontal dépasse plusieurs centaines de mètres. Ils sont repliés en boucles distantes d'au moins 40 cm, pour éviter un prélèvement trop important de la chaleur du sol (risque de gel permanent du sol). [13]

À la profondeur à laquelle les capteurs sont installés, l'incidence du flux géothermal est inexistante. Les apports de chaleur sont effectués par l'énergie solaire et les infiltrations de pluie. C'est pourquoi le terrain doit être adapté :

- il doit être bien exposé au soleil,
- il ne peut être recouvert d'un revêtement en dur (terrasse, piscine, ...),
- si il est rocheux et peu favorable aux échanges thermiques, il faudra un lit de sable,
- si il est trop pentu, il faudra envisager un remblaiement.

Les capteurs horizontaux sont faciles d'installation et ont des coûts initiaux plus bas que les capteurs verticaux. Tou-

tefois, ils affichent des rendements inférieurs à cause des températures souterraines plus basses. Ils nécessitent par ailleurs une grande surface de terrain. [14]

- **Les capteurs verticaux**, Il s'agit d'une sonde verticale qui va puiser l'énergie contenue dans le sous-sol de la Terre. Un forage est effectué dans lequel est placé un capteur (tube en U, ou double U en polyéthylène) contenant un fluide caloporteur. Il est ensuite scellé par du ciment et de la bentonite. La profondeur du forage peut atteindre jusqu'à 200 m.

À 10 m de profondeur, la température du sol est pratiquement constante toute l'année et est voisine de 13°C. En descendant en profondeur, la température s'élève de 2 à 3°C tous les 100 m.

La puissance linéaire des capteurs verticaux est d'environ 50 W/m ; mais cela dépend de la conductivité thermique du terrain.

La quantité d'énergie utilisable d'une sonde géothermique profonde dépend de plusieurs paramètres :

- de la température atteinte dans le sous-sol, celle-ci est proportionnelle à la longueur de la sonde,
- des caractéristiques thermiques du sous-sol, notamment sa conductivité thermique,
- du type de construction de la sonde et de la colonne de production.

Les capteurs verticaux ont des coûts beaucoup plus élevés que les capteurs horizontaux, surplus essentiellement lié au forage. Cependant, ils ont besoin d'une surface de terrain plus faible.

#### - Figure 1. 9 : Représentation des capteurs verticaux -

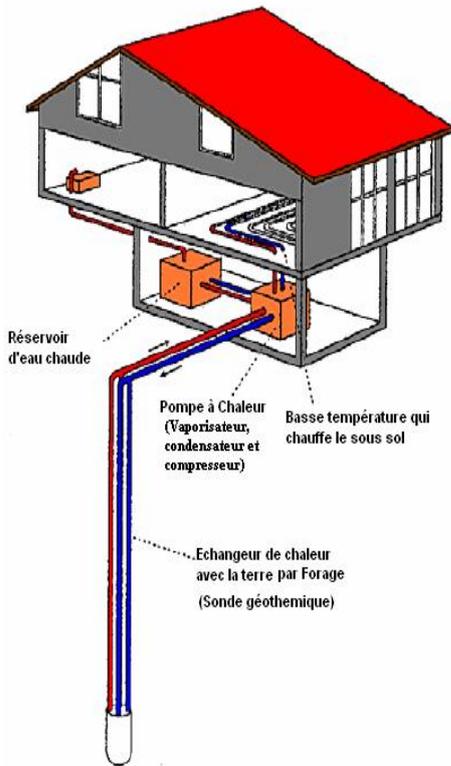


Figure I. 10 : Chauffage par GSHP -

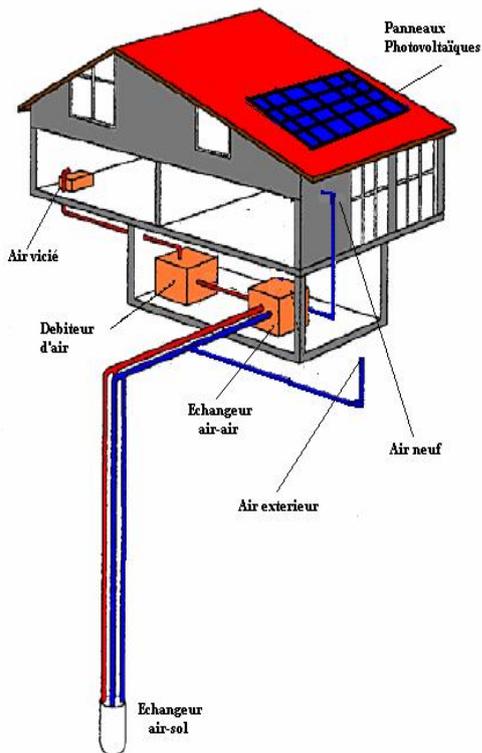
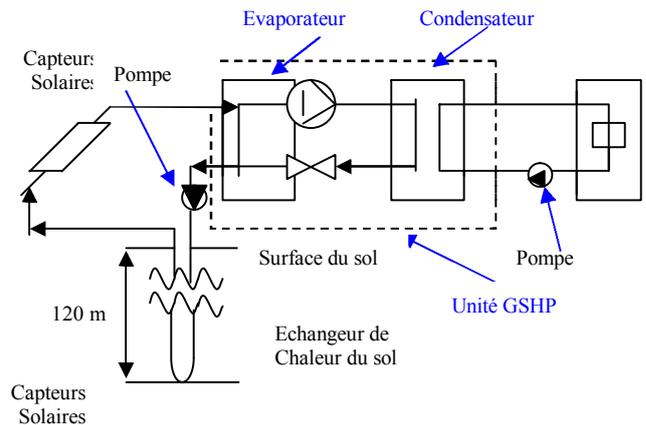


Figure I. 11 : Refroidissement par GSHP -

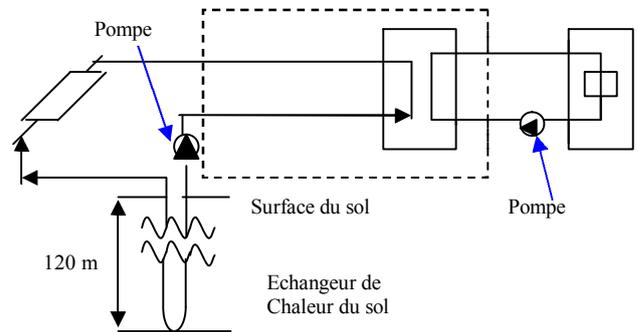
Pompe à chaleur

Unité de refroidissement

- Figure I.12 : Systèmes de chauffage et refroidissement par GSHP [15]-



- Cycle d'hiver -



- Cycle d'été -

- Figure I. 13 : Schéma du GSHP couplé avec des capteurs solaires -

## II. TEMPERATURE DU SOL:

La variation de la température ambiante de l'air  $T_a$ , journalière ou annuelle, pourrait être considérée comme une fonction sinusoïdale avec une fréquence angulaire  $\omega$  durant une période  $t_0$ . Mathématiquement, cette variation est décrite par:

$$T(t) = T_a + A_a \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t}{t_0}\right) \dots\dots\dots(1)$$

La température du sol à une profondeur z (m), avec une conductivité thermique λ (w/m, K) et la capacité calorifique volumétrique C (J/m<sup>3</sup>, K), oscille aussi selon sinusoidalement selon l'équation suivante [16, 17, 18]:

$$T(t, z) = T_a + A_a \cdot e^{-\frac{z}{d_0}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t}{t_0} - \frac{z}{d_0}\right) \dots\dots (2)$$

L'amplitude d'une variation de température à la surface du sol correspond généralement à l'amplitude d'une variation correspondante de la température de l'air. L'équation précédente, indique que l'amplitude diminue de façon exponentielle en fonction de l'éloignement de la surface, à un taux prescrit par le temps nécessaire à un cycle complet. Les températures du sol sont généralement constantes au cours de l'année pour des profondeurs supérieures à 5 et 6 m. La température moyenne annuelle du sol est presque constante avec la profondeur; elle augmente toutefois d'environ 1°C par 50 m à cause de la chaleur géothermique provenant du centre de la terre. [19]

Une inspection de l'expression de la température du sol {Eq. (2)} permet d'observer deux effets de la profondeur sur la température: un amortissement de l'amplitude de la variation et un déphasage des pics. Par exemple, l'amplitude est amortie au dixième de sa valeur pour une profondeur égale à 2,3 fois la profondeur de pénétration, d, de l'onde de chaleur dans le sol et on atteint une température constante (c'est-à-dire une variation inférieure à 0,1°C sur toute l'année) pour des profondeurs supérieures à 4,6 d

Le déphasage est bénéfique car il augmente la différence de température entre l'ambient et le sol. Le déphasage maximum, c'est-à-dire un déphasage égal à la moitié de l'année, est obtenu pour une profondeur de 3,14 d. Cependant, à cette profondeur l'amplitude de la variation de température est amortie à 4 % de sa valeur à la surface. Ce qui veut dire qu'on ne peut pas amplement en profiter du point de vue énergétique.

d<sub>0</sub> représente la profondeur de pénétration (m) de l'onde de chaleur dans le sol. Elle est donnée par:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot t_0}{C \cdot \pi}} \quad \text{ou} \quad d_0 = \sqrt{\frac{D_f \cdot t_0}{\pi}} \dots\dots\dots(3)$$

Donc, il suffit de connaître la diffusivité thermique du sol, D<sub>f</sub>, pour pouvoir évaluer la température du sol en fonction du temps et de la profondeur. La diffusivité D<sub>f</sub> dépend de la nature du sol. Différentes compositions de la couche externe du sous-sol Maghrébin on été examinées [20], pour obtenir par exemple :

| Composition | D <sub>f</sub> [m <sup>2</sup> /s] |
|-------------|------------------------------------|
| Calcaire    | 0.6939.10 <sup>-6</sup>            |

|                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| Gravier Sec         | 0.2666.10 <sup>-6</sup> |
| Gravier Saturé      | 0.75.10 <sup>-6</sup>   |
| Sable Sec           | 0.2758.10 <sup>-6</sup> |
| Sable Saturé        | 0.9230.10 <sup>-6</sup> |
| Argile/Limon Sec    | 0.3226.10 <sup>-6</sup> |
| Argile/Limon Saturé | 0.7083.10 <sup>-6</sup> |

**-Tableau II.1 :** Les différents conches du sol maghrébin [20]-

Généralement, l'amplitude de la température du sol A<sub>g</sub>, diminue avec la profondeur :

$$A_g = A_a \cdot e^{-\frac{z}{d_0}} \dots\dots\dots (4)$$

(A<sub>a</sub>): L'amplitude de la température de l'air of the soil temperature is half of the difference between the daytime maximum value and the nighttime minimum value

- T(t,z) La température du sol à une profondeur h de la surface (°C)
- T<sub>a</sub> La température ambiante moyenne (°C)
- A<sub>a</sub> L'amplitude de la température de l'air (°C)
- A<sub>g</sub> L'amplitude de la température du sol (°C)
- T<sub>0</sub> Le temps sur une année (s)
- t<sub>0</sub> La période de variation de la température (s), dans ce cas t<sub>0</sub>=24\*3600 s pour une Variation journalière, ou t<sub>0</sub>=8760\*24 pour une variation annuelle
- d<sub>0</sub> Profondeur de la pénétration (m)
- z La profondeur (m)
- λ La conductivité thermique (W/m.K)
- C Capacité calorifique volumétrique (J/m<sup>3</sup>.k)

La variation du temps φ, entre la température extérieure et celle du sol à une profondeur z :

$$\varphi = t_2 - t_1 = \frac{z}{2} \sqrt{\frac{C \cdot t_0}{\lambda \cdot \pi}} \dots\dots\dots (5)$$

En sachant les propriétés thermiques du sol, la profondeur z<sub>op</sub>, au moment ou la température est la plus basse quand la température de l'air est la plus haute et vice versa, peut être déterminé.

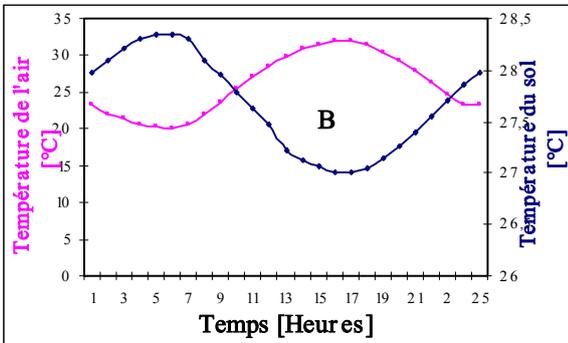
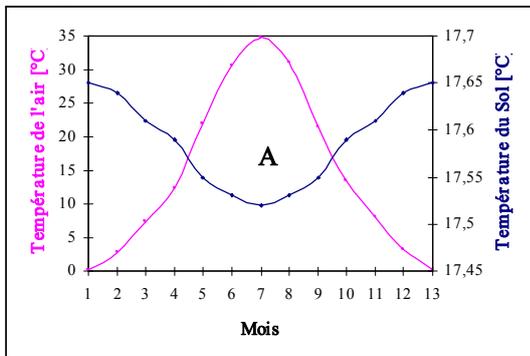
La profondeur optimale z<sub>op</sub> est définit comme étant la profondeur où la variation du temps est égale à t<sub>0</sub>/2, c.-à-d quand la température maximale extérieur est associée à la température minimale à z<sub>op</sub>, l'équation précédente donne :

$$\varphi = \frac{t_0}{2} = \frac{z_{op}}{2} \sqrt{\frac{C \cdot t_0}{\lambda \cdot \pi}} \Rightarrow z_{op} = \pi \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot t_0}{C \cdot \pi}} = \pi \cdot d_0 \dots\dots\dots (6)$$

L'amplitude de la température du sol ; à une profondeur z<sub>op</sub> devient :

$$A_g = A_a \cdot e^{-\pi} \Rightarrow \frac{A_g}{A_a} = 4.321\% \dots\dots\dots(7)$$

A partir de cette équation, nous concluons que l'amplitude de la température à la profondeur optimale  $z_{op}$  n'est pas une fonction des propriétés thermiques du sol, mais dépend de l'amplitude de la température à la surface du sol. La figure suivante, montre la différence entre température de l'air (c.-à-d. température de la surface du sol) et température du sol à la profondeur optimale pour le changement cyclique diurne et annuel de la température ambiante de l'air.  $0.6939 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  pour la ville de Tlemcen, car les terrains sont des calcaires à lithothamniées riches en coquilles de fossiles de type lumachellique d'âge Miocène post-nappes. Ces calcaires reposent sur des argiles à intercalations gréseuses d'âge Tortonien. [21]



**Figure II.1 et II.2 :** Variation de la température de l'air et celle du sol, pour  $D_f=0.6939 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  A : Pour une année entière.  $Z_{op}=8.305 \text{ m}$ ; B: durant une journée d'été.  $Z_{op}=0.434 \text{ m}$  -

Utilisant Eq. 2, la température du sol peut être calculée comme une fonction de profondeur et temps. La figure suivante montre la température souterraine comme fonction de la profondeur à différents temps de l'année.

En dessous d'une certaine profondeur, qui dépend des propriétés thermiques de la terre, les variations de la température saisonnières à surface du sol disparaissent et deviennent équivalentes à la température de l'air. Donc, à cette profondeur la température du sol est plus chaude que l'air pendant l'hiver et plus froide que l'air pendant l'été.

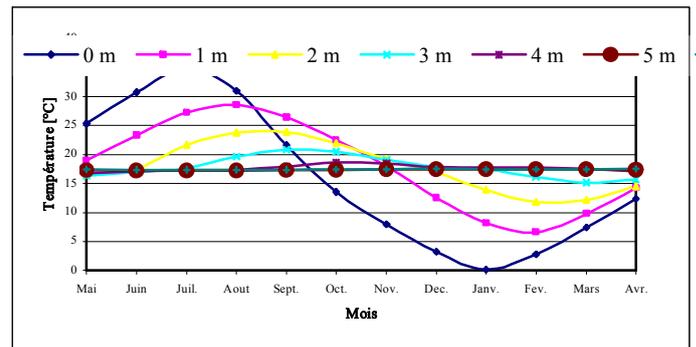
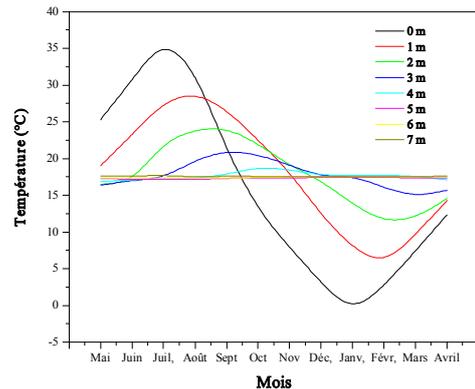
Donc, la chaleur qui est absorbée par la terre en été fournit une source de la chaleur libre en hiver. Dans un chemin semblable, le rhume hivernal entreposé pendant l'hiver fournit un évier de la chaleur libre l'été prochain.

Les systèmes de la pompe de la chaleur à captage au sol tapotent cette énergie libre pour les buts du chauffage et du refroidissement pour sauver énergie et environnement [18]. L'énergie thermique extraite est une ressource renouvelable parce que la variation de la température saisonnière res-

taure la température de surface du sol. L'effet de réchauffement de la planète, sur la température du sol, a été négligé dans analyse courante.

| Mois      | Profondeur de la pénétration (m) |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 0 m                              | 1 m   | 2 m   | 3 m   | 4 m   | 5 m   | 6 m   | 7 m   |
| Mai       | 25,31                            | 19    | 16,5  | 16,35 | 16,84 | 17,29 | 17,4  | 17,60 |
| Juin      | 30,73                            | 23,28 | 17,56 | 16,98 | 17,09 | 17,19 | 17,37 | 17,62 |
| Juillet   | 34,84                            | 27,23 | 21,63 | 17,66 | 17,23 | 17,16 | 17,31 | 17,65 |
| Août      | 30,98                            | 28,47 | 23,75 | 19,59 | 17,36 | 17,2  | 17,33 | 17,53 |
| Septembre | 21,55                            | 26,42 | 23,83 | 20,82 | 17,89 | 17,29 | 17,38 | 17,59 |
| Octobre   | 13,49                            | 22,47 | 21,9  | 20,42 | 18,61 | 17,38 | 17,42 | 17,56 |
| Novembre  | 7,96                             | 17,96 | 19,2  | 19,12 | 18,42 | 17,4  | 17,48 | 17,54 |
| Décembre  | 3,2                              | 12,55 | 16,86 | 17,79 | 17,83 | 17,41 | 17,49 | 17,56 |
| Janvier   | 0,21                             | 8,18  | 13,92 | 17,4  | 17,69 | 17,41 | 17,48 | 17,56 |
| Février   | 2,8                              | 6,53  | 11,81 | 16,09 | 17,69 | 17,41 | 17,48 | 17,56 |
| Mars      | 7,43                             | 9,73  | 12,17 | 15,12 | 17,53 | 17,4  | 17,48 | 17,57 |
| Avril     | 12,29                            | 14,28 | 14,53 | 15,67 | 17,09 | 17,39 | 17,56 | 17,59 |

**-Tableau II.2 :** Température du sol à différentes profondeurs-



**- Figure II.3 :** Profile de la température à travers le sol-

### III. THEORIE ET POTENTIEL DU GSHP AU MAGHREB:

Les systèmes de Chauffage/Refroidissement par captage au sol dépendent du fait que la température du sol en générale est égale la température moyenne annuelle de l'air à une certaine profondeur en dessous surface du sol.

D'après la thermodynamique, le coefficient de performance (COP) d'un cycle de la pompe à chaleur est influencé par les conditions du fonctionnement (condensation et températures d'évaporation). Le plus haut COP se produit quand le cycle opère à la limite Carnot, c.-à-d. la compression et le processus de l'expansion sont des isotropiques, et les processus d'échange de la chaleur sont isothermaux.

La Fig III.1 montre un cycle de pompe à chaleur typique qui travaille aux limites de Carnot. Dans ce cas, le COP est une fonction du haute température du réservoir de chaleur (HTR) et la basse température du réservoir de chaleur (LTR) [22]: Comme le, montre les Eq.8 et Eq.9, le COP dépend de HTR et LTR dans les deux modes : chauffage et refroidissement.

**Durant l’Hiver (Mode Chauffage) :**

$$COP_C = \frac{T_{Haute}}{T_{Haute} - T_{Basse}} \dots\dots\dots(8)$$

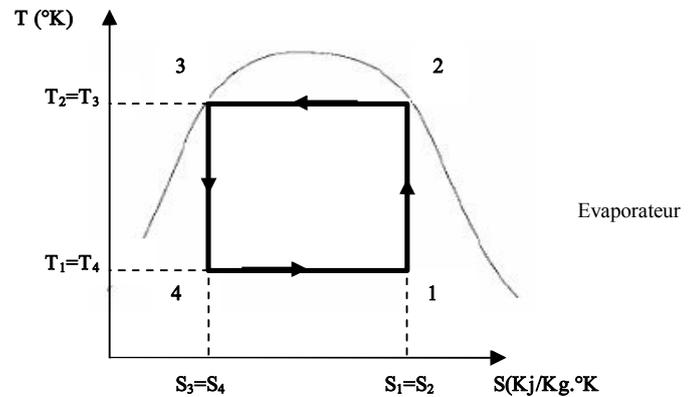
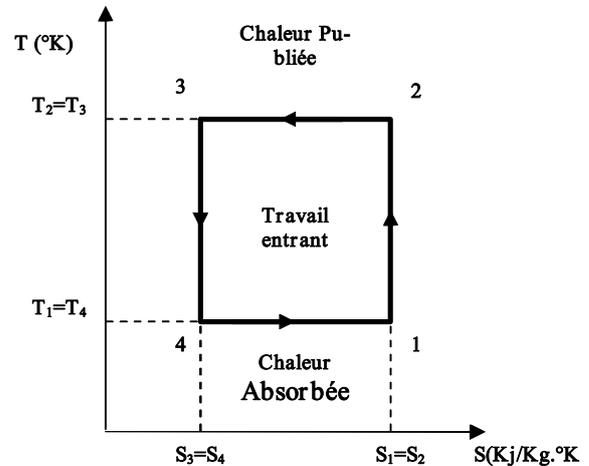
Ici, la  $T_{Haute}$ , représente la température de condensation, laquelle est fonction de température d’intérieur.  $T_{Basse}$ , représente la température d’évaporation, laquelle est proportionnelle à la température de la source de chaleur (air/sol). On donne que la température d’intérieur est stable,  $COP_C$  est une fonction de la  $T_{Basse}$ , c.-à-d. que le  $COP_C$  augmente avec  $T_{Basse}$  c.-à-d. la température de la source de chaleur (par exemple le sol, l’air... etc.).

**Durant l’été (Mode Refroidissement) :**

$$COP_R = \frac{T_{Basse}}{T_{Haute} - T_{Basse}} \dots\dots\dots(9)$$

Ici, la  $T_{Basse}$ , représente la température d’évaporation, laquelle est basse mais suit la température de l’intérieur.  $T_{Haute}$ , représente la température de condensation, laquelle est haute mais suit la température de la source de chaleur (air/sol). On donne que la température d’intérieur est stable,  $COP_R$  est une fonction de la  $T_{Haute}$ , c.-à-d. que le  $COP_R$  augmente avec la diminution de la  $T_{Haute}$  c.-à-d. la température de la source de chaleur (sol/air).

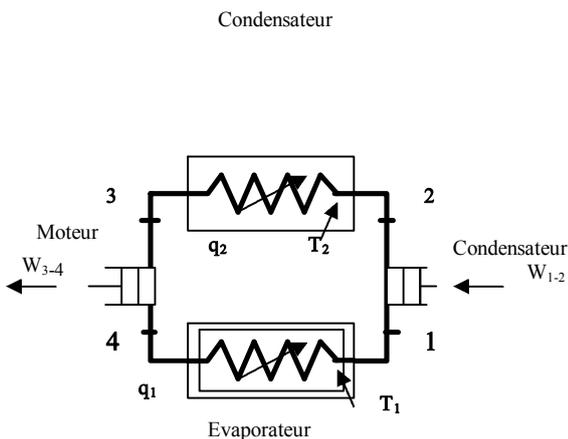
Depuis que la température du sol est égale à la température annuelle moyenne de l’air à une profondeur spécifique, la température du sol est plus froide que la température de l’air pendant l’été et plus chaud pendant l’hiver, voyez Fig.II.3. Par conséquent, les systèmes de pompe à chaleur à captage au sol (GSHP) sont fondamentalement plus efficaces que les systèmes de pompe à chaleur à source d’air (ASHP) [14,22]. La température moyenne du sol est relativement stable, ce qui veut dire que les systèmes GSHP, différemment aux ASHP, opèrent près de température optimale du dessin, de façon à opérer à une capacité relativement constante.



- **Figure III.1, III.2, III.3** : Cycle de Carnot de la pompe de la chaleur. (a) Schéma du diagramme (b) cycle du gaz; (c) cycle de la vapeur [23]-  
Cependant, dans le cas actuel, le COP d'un cycle de pompe à chaleur qui est fonction de beaucoup de facteurs, est défini comme la proportion entre la capacité délivrée et la capacité [22] du compresseur.

$$COP_R = \frac{Q_E}{W_{CP}} \quad COP_C = \frac{Q_C}{W_{CP}} \dots\dots\dots (10 \text{ et } 11)$$

Où  $Q_C$ ,  $Q_E$ , et  $W_{cp}$  représentent respectivement la capacité du chauffage, de refroidissement, et celle du compresseur. De la thermodynamique et depuis que les processus d'échange de chaleur se produisent sous pression constante (isobare) pendant que le processus de compression se produit sans échange de la chaleur (adiabatique), nous calculons les paramètres d'Eq.10 et Eq.11 qui utilisent l'enthalpie comme suit : fig III.2



$$Q_C = m(h_3 - h_4) \quad (12)$$

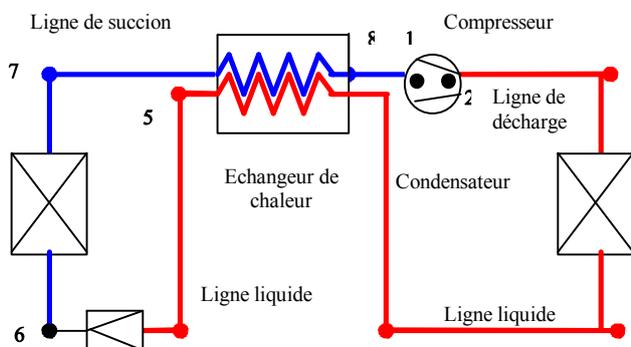
$$Q_E = m(h_7 - h_6) \quad (13)$$

$$W_{CP} = m(h_2 - h_1) \quad (14)$$

$h$  et  $m$  représentent l'enthalpie et taux du courant de la masse du réfrigérant.

Fig.III.2 montre le diagramme schématique du cycle de la pompe à chaleur et ses processus thermodynamiques sur le diagramme  $\ln(p)$ - $h$  et  $T$ - $S$ . Pour améliorer la performance du cycle d'échangeur de la chaleur a été ajouté entre la ligne de la succion et ligne liquide. Récemment, beaucoup de nouveaux chemins ont été suggérés pour améliorer le COP d'un cycle de la pompe de la chaleur. Plus de détails sont donnés par Wang (2001, Type. 9). [23]

Faire un jugement juste au sujet du potentiel de la GSHP comparant avec ASHP dans une région nous devrions comparer toujours le COP du GSHP ( $COP_G$ ) ceci est obtenu à la température sol avec  $COP$  d'ASHP ( $COP_A$ ) cela est obtenu à la température de l'air dans la région concernée. Cette comparaison a été faite en calculant le COP aux différentes températures de condensation pour le mode de refroidissement, et différentes températures d'évaporations pour le mode chauffage.



— ASHP, ..... GSHP Cycle de refroidissement,  
 ..... GSHP cycle de chauffage

- **Figure III.4 III.5 III.6:** Illustration de la pompe à chaleur et les processus thermodynamiques sur les diagrammes  $\ln(P)$ - $h$  et  $T$ - $S$  [24]-

D'après les calculs effectués auparavant, la température du sol de Tlemcen, Algérie, est  $17.5\text{ }^\circ\text{C}$ , pendant que la température de l'air varie de  $0$  à  $35\text{ }^\circ\text{C}$  durant une année.

Pendant ces calculs, les suppositions suivantes ont été faites:

1. pour l'unité interne de la pompe à chaleur, les différences de température entre d'intérieur et la température d'évaporation (processus refroidissant) et les différences de température entre d'intérieur et la température de condensation (processus chauffant) sont supposées  $15\text{ }^\circ\text{C}$
2. pour l'unité externe de la pompe à chaleur, parce que la chaleur spécifique d'eau est quatre fois plus grande que celle de l'air; aussi, le coefficient du transfert de l'échangeur de chaleur eau gaz est plus grand que celui de l'échangeur d'air gaz. En conséquence, la différence de la température a été supposée  $15\text{ }^\circ\text{C}$  dans le cas de l'usage de l'air comme source de chaleur, contre  $10\text{ }^\circ\text{C}$  pour le cas de l'usage de la terre comme source de chaleur.

Les résultats qui sont illustrés dans les figures III.7 et III.8 montrent que dans le climat algérien, les  $COP_R$  et  $COP_C$  du système GSHP sont de 130% et 88% plus grands que les valeurs correspondantes pour un système ASHP.

D'une autre expression, l'énergie exigé pour produire le même refroidissement ou la même réchauffement est 2.3 ou 1.88 chronomètre moins en utilisant la GSHP.

Les figures 29 et 30, montrent que le COP refroidissant est plus sensible aux changements de la température que le COP chauffant, c.-à-d. le changement de la température du condensateur dans une machine refroidissante a le plus grand effet sur COP que le changement de la température d'évaporation dans une machine chauffante.

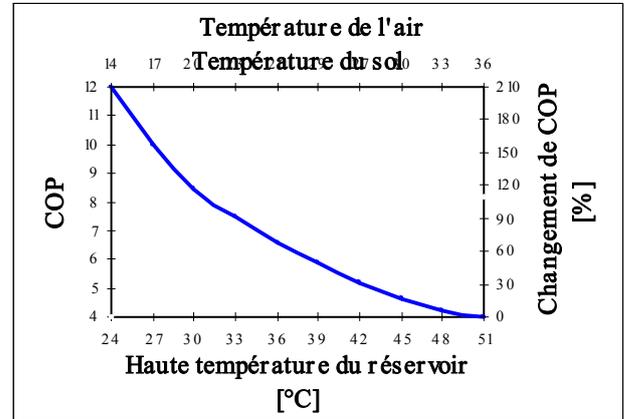
L'explication du diagramme Ln(p)-h:

- Pour la machine refroidissante, la décroissance de la température de condensation cause une baisse du taux de courant de masse réfrigérante depuis l'augmentation de l'effet refroidissant dans l'évaporateur, et la différence de l'enthalpie sur les deux côtés du compresseur. Ces deux résultats baissent le pouvoir de l'entrée du compresseur.

- Pour la machine chauffante, l'augmentation de la température d'évaporation cause une baisse de la différence de l'enthalpie sur les deux côtés du compresseur (impact positif). Simultanément, diminuer l'effet chauffant dans le condensateur cause l'augmentation du taux du courant de la masse réfrigérante (impact négatif). Augmenter le taux du courant réduit les avantages gagnés par la diminution de la différence de l'enthalpie sur les deux côtés du compresseur. Par conséquent, la capacité de l'entrée du compresseur est réduite lentement avec l'augmentation de la température d'évaporation.

Les Fig. III.7 et III.8 montrent que l'inclinaison de la ligne est grande à la basse température de la machine refroidissante, et à haute température de la machine chauffante. Donc, pour une machine refroidissante la température de condensation a le plus grand effet sur le COP à basse température. Par exemple, l'augmentation dans COP était 6.4% et 2.9% pour une baisse de la température de 1°C à la basse et haute température, respectivement. Pour une machine chauffante, le changement de la température d'évaporation a le plus grand effet sur le COP à haute température. L'augmentation dans COP était 3.8% et 1.9% pour une baisse de la température de 1 °C à la haute et basse température, respectivement.

En analysant le diagramme T-S dans la Fig.III.6 des avantages supplémentaires d'utilisation du GSHP sont conclus. En utilisant la terre comme source de chaleur (la ligne pointillée), la partie localisée de la ligne saturée qui contient des processus thermodynamiques irrévocables à droite apparemment sera plus petite. Cela veut dire le cycle de la pompe de la chaleur sera plus proche à un cycle réversible. La même chose se passe en utilisant la terre comme source de chaleur pour une machine chauffante. Dans cette considération, l'efficacité Carnot a été utilisée pour décrire comment l'efficacité d'un processus de réfrigération est en comparaison d'un processus de réfrigération idéal (Cycle de Carnot) aux mêmes niveaux de la température. Cette efficacité est calculée comme la proportion entre le COP réel (d'Eq.10 ou Eq.11), et le COP idéal (d'Eq.8 et Eq.9).



- Figure III.7 et III.8 : COP comme fonction de la Haute/Basse température du réservoir -

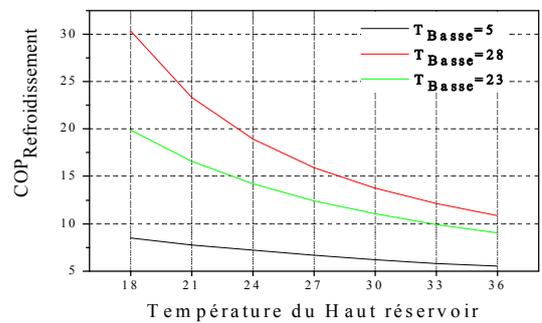
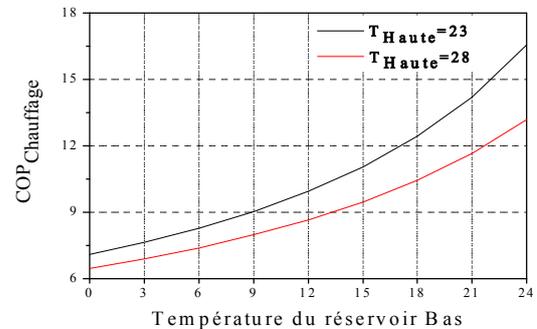
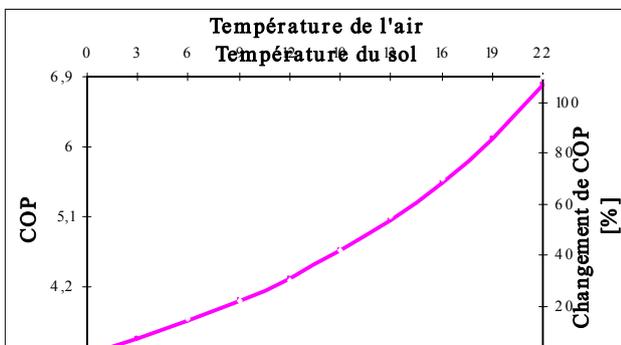


Figure III.7 et III.8 : COP comme fonction de la température du réservoir Haut/Bas, La  $T_{Haute}$  est supposée supérieur de 10°C que la HHR, pendant que  $T_{Basse}$  est de 10°C inférieur que la LHR



## VI. CONCLUSION

L'étude de faisabilité entreprise dans ce travail a montré que le chauffage et la climatisation par un système de pompe à chaleur source sol est possible pour la localité de Tlemcen et son types de sol considéré. Les meilleures pro-

fondeurs pour la climatisation et le chauffage étant assez proches, on peut envisager une seule installation pour les deux applications. Ce qui rend le préchauffage d'autant plus attrayant, car l'installation serait amortie par la climatisation et le préchauffage serait pratiquement gratuit.

Il a été observé qu'il existe une profondeur qui maximise le nombre de jour où un potentiel thermique important est disponible. Toutefois, l'optimisation technicoéconomique de la sélection de la profondeur ne pourra être fait que lorsque les choix de la technologie et du site sont faits, car la profondeur de l'installation influence son coût de deux façons. Tout d'abord le coût d'excavation croît avec la profondeur. Mais, en même temps le potentiel thermique augmente ce qui réduit la taille et le coût du système. De plus, le nombre de jours où ce potentiel thermique est maintenu dicte la rentabilité du système. Une étude technico-économique de la profondeur à utiliser, à travers des études de cas, pourrait former une extension et une suite de ce travail

## VII. REFERENCES

- [1] – Energy Information Administration. 2009-a. international Energy Outlook 2009. <http://www.eia.doe.gov/oiaw/ieo/world.html>.
- [2] – Nadja Bouaricha, De scandales en conjectures : Sonatrach, une affaire de sécurité nationale, le Quotidien El WATAN, 7 Février 2010
- [3] – R. E, *La consommation d'énergie dans les pays arabes L'Algérie à la 4e place , le quotidien La tribune*, 16-11-2009
- [4] - Pr chemseddin chitour , dures verites sur l'avenir energetique de l'algerie mardi 16 fevrier 2010
- [5] – United States Energy Information Administration.
- [6] – Data points from EIA, May 7, 2007.
- [7] – Energy Information Administration. 2009-c: <http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/wtotworldw.htm>.
- [8] [http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9chauffement\\_climatique](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9chauffement_climatique)
- [9] – The IPCC 4th Assessment Report is coming out A picture of climate change the current state of understanding , 2007, GIEC (IPCC en anglais). Consulté le 2008-07-30
- [10] – OMM, PNUE, Un rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat Changements Climatiques 2007, Rapport de synthèse p.49
- [11] – Allan ML, Philippacopoulos AJ. Ground water protection issues with geothermal heat pumps. Geothermal Resource Coun Trans 1999;23:101–5.
- [12] – Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie <http://www.ademe.fr>
- [13] – Laporthe S, Petit guide des pompes à chaleur géothermales, Développement Durable Environnement et Systèmes Energétiques, Mars 2004
- [14] – Diao N., Li Q, Fang Z. 2004. Heat Transfer in Ground Heat Exchangers with Groundwater Advection. International Journal of Thermal Sciences 2004; 43(12): 1203– 1211
- [15] – M. Grein, M. Kharseh, B. Nordell Large-scale Utilization of Renewable Energy Requires Energy Storage Int. Conf. for Renewable Energies and Sustainable Development (ICRESO\_07), Université Abou Bakr BELKAID – TLEMEN; Algeria May, 21- 24, 2007
- [16] - M. Grein, M. Kharseh, B. Nordell Large-scale Utilization of Renewable Energy Requires Energy Storage Int. Conf. for Renewable Energies and Sustainable Development (ICRESO\_07), Université Abou Bakr BELKAID – TLEMEN; Algeria May, 21- 24, 2007
- [17] - Massoud M. 2005. Engineering Thermofluids Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer. University of Maryland, USA.
- [18] - Al-Ajmi F., Loveday D.L., Hanby V.I. 2006. The Cooling Potential Of Earth–Air Heat Exchangers For Domestic Buildings In A Desert Climate. Building and Environment 2006; 41(3): 235–244
- [19] - Nordell B., Soderlund M. 1998. Solar Energy and Heat Storage. Luleå University of Technology
- [20] – M.S. Guellouz, G. Arfaoui. Potentiel de la géothermie de surface pour le chauffage et la climatisation en Tunisie, Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse (2008) 143 – 151
- [21] – Hassiba Stambouli-Meziane, La diversité floristique de la végétation psammophile de la région de Tlemcen (nord-ouest Algérie), Elsevier, C. R. Biologies 332 (2009) 711–719
- [22] – Ozgener O., Hepbasli A. 2007. Modeling And Performance Evaluation Of Ground Source (Geothermal) Heat Pump Systems. Energy and Buildings 2007; 39(1): 66-75
- [23] – Wang S.K. 2001. Handbook of Air Conditioning And Refrigeration, Second Edition. McGraw-Hill. New York.
- [24] – M. Kharseh, B. Nordell Reduction of Prime Energy Consumption in the Middle East by GSHP Systems, Licentiate Thesis, Renewable Energy Group Division of Architecture and Infrastructure Luleå University of Technology (LTU) SE-97187 Luleå, Sweden, September 2009.