

DEDICACE

Avec l'aide de Dieu tout puissant,
J'ai pu achever ce modeste travail que je dédie :
À mes parents, mafamille, mes amis
Et à tous ceux qui sont chers

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et le miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à présenter mes vifs remerciements à Monsieur KHERRIS Sahraoui maître de conférences pour l'honneur qu'il m'a accordé de proposer ce projet de fin d'étude et de m'avoir encadré et prodigué ses précieux conseils durant toute la période de réalisation de cette présente étude.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

A ma famille et mes amis qui par leurs prières et leurs encouragements, j'ai pu surmonter tous les obstacles.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Introduction générale.....	09
Chapitre1 : Recherche bibliographie.....	10
Introduction	11
1.1 Généralités.....	11
1.2 Les différents types de l'énergie géothermique	11
1.2.1 La géothermie à très basse énergie.....	11
1.2.2 La géothermie a basse énergie	11
1.2.3 La géothermie a moyenne énergie	11
1.2.4 La géothermie a haute énergie.....	11
1.3 Capteur géothermique	12
1.4 Classification des capteurs géothermique	12
1.4.1 Système d'échange avec la nappe.....	12
1.4.1.1 À boucle fermée	12
1.4.1.2 À boucles ouverte	13
1.4.2 Système d'échange avec le sol	13
1.4.2.1 Capteur géothermique horizontal	13
1.4.2.2 Capteur géothermique verticales	14
1.5 Potentiel de l'énergie géothermique	15
1.6 Pompe à chaleur (PAC).....	16
1.7 Classifications des pompes à chaleurs.....	17
1.7.1 Les pompes à chaleurs aérothermies.....	17
1.7.1.1 Avantages.....	17
1.7.1.2 Inconvénients	18
1.7.1.3 Pompe à chaleur air/air.....	18
1.7.1.4 Pompe à chaleur eau/air	18
1.7.2 La pompe à chaleur géothermique	19

1.7.2.1 Avantages.....	19
1.7.2.2 Inconvénients	19
1.7.2.3 Pompes à chaleur sol/air.....	19
1.7.2.4 Pompe à chaleur eau/eau.....	20
1.7.2.5 Pompe à chaleur sol/eau	21
1.8 La puissance en fonction de la nature de sol	21
1.9 Potentiel solaire en Algérie.....	22
1.10 Capteur solaire plan	22
1.10.1 Fluide caloporteur.....	23
1.11 Synthèse bibliographique	23
1.12 Principe de fonctionnement du système.....	27
Conclusion	28
Chapitre 2 : modélisations mathématiques	29
Introduction.....	30
2.1 Modélisation d'une pompe à chaleur	30
2.1.1 Établissement du bilan énergétique.....	31
2.1.2 Bilan des échanges de chaleur et de travail	31
2.1.2.1 La chaleur absorbée par évaporateur.....	31
2.1.2.2 La chaleur dégagée au condenseur.....	31
2.1.2.3 Travail mécanique de compression	31
2.1.2.4 Détente isenthalpique	31
2.1.2.5 Coefficient de performance.....	31
2.2 Rappel de l'énergie solaire	32
2.2.1 Déclinaison soleil	32
2.2.2 Angle horaire de soleil (ϖ).....	32
2.2.3 Hauteur du Soleil	32

2.2.4 L'azimut du soleil.....	33
2.2.5 Modèle de Perrin de Brichambaut.....	33
2.2.6 Expression du coefficient global de transfert de chaleur.....	34
2.2.7 Coefficient de transfert de chaleur par convection.....	34
2.2.8 Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement	34
2.2.9 Transfert de chaleur par convection.....	35
2.2.10 Transfert de chaleur par rayonnement	35
2.2.11 Coefficient global de transfert de chaleur	35
2.2.12 Rendement d'un capteur.....	35
2.2.13 Quantité de chaleur	36
2.3 Modélisation d'un capteur géothermique.....	36
2.3.1 Détermination de la température à la surface de sol	36
2.3.2 Détermination de la température sol à une profondeur donnée.....	36
2.3.3 La méthode calculant la résistance thermique du sol.....	37
2.3.4 Longueur de capteur géothermique.....	37
2.3.5 Calcul du débit de l'eau.....	38
2.3.6 Calcul de la résistance totale.....	38
2.3.7 Détermination du coefficient de transfert de chaleur.....	39
2.3.8 La surface d'un capteur géothermique.....	39
2.4 Etablissement du bilan énergétique du cycle	40
2.4.1 La pompe à chaleur.....	40
2.4.1.1 Bilan énergétique d'évaporateur	40
2.4.1.2 Bilan énergétique du compresseur.....	40
2.4.1.3 Bilan énergétique du condenseur.....	41
2.4.1.4 Bilan énergétique du detendeur.....	41
2.4.1.5 Bilan global de la pompe à chaleur.....	41

2.4.2 Bilan énergétique du capteur solaire.....	41
2.4.3 Bilan énergétique du capteur géothermique	41
2.4.4 Bilan énergétique d'un réservoir de stockage.....	42
2.4.5 Bilan énergétique des pompes	42
2.4.6 Efficacité de l'échangeur de chaleur	42
2.4.7 Coefficient de performance du système	42
2.4.8 Rendement caractéristique	43
Conclusion	43
Chapitre 03 résultats et discussions	44
Introduction.....	45
3.1 Etude de cas déperdition thermique	45
3.2 Organigramme.....	47
3.3 Le bilan thermique de la maison	48
3.3.1 Chambre 01	48
3.3.1.1 Déperditions calorifiques par le toit	48
3.3.1.2 Déperdition calorifique à travers les murs extérieurs	48
3.3.1.3 Déperdition à travers le vitrage	48
3.3.1.4 Déperdition par les bords	48
3.3.1.5 Déperditions par le plancher bas	48
3.3.1.6 Déperditions totales de la chambre 01	49
3.3.2 Chambre 02	49
3.3.2 .1Déperditions par le toit	49
3.3.2 .2 Déperdition calorifique à travers les murs extérieurs	49
3.3.2.3 Déperdition à travers le vitrage	49
3.3.2.4 Déperdition par les bords	49
3.3.2.5 Déperditions par le plancher bas.....	49

3.3.2.6 Déperditions totales de la chambre 02.....	50
3.3.3 Hall	50
3.3.3.1 Déperditions par le toit	50
3.3.3.2 Déperdition calorifique à travers les murs extérieurs	50
3.3.3.3 Déperdition à travers le vitrage	50
3.3.3.4 Déperdition par les bords	50
3.3.3.5 Déperditions par le plancher bas.....	51
3.3.3.6 Déperditions totales de Hall	51
3.3.4 Séjour	51
3.3.4.1 Déperditions par le toit	51
3.3.4.2 Déperdition calorifique à travers les murs extérieurs	51
3.3.4.3 Déperdition à travers le vitrage	51
3.3.4.4 Déperdition par les bords	51
3.3.4.5 Déperditions par le plancher bas	52
3.3.4.6 Déperditions totales de séjour	52
3.4 Résultats et discussions.....	52
Conclusion.....	57
Conclusion générale	58
Rechercher bibliographie.....	60
Liste des figures.....	62
Liste des tableaux.....	64
Annexe 01	65
Annexe 02.....	67
Résumé.....	68
ملخص.....	68
Abstract.....	68

Nomenclature

ϖ	Angle horaire [°]
A	Azimet
Cp	Chaleur spécifique [J/kg. °C]
COP	Coefficient de performance
δ	Déclinaison soleil [°]
Eg	Eclairement solaire global [W/m ²]
\dot{m}	Débit massique [kg/s]
W	Travail [W]
K	Coefficient globale de transfert de chaleur [W/m ² . K]
L	Langueur [m]
T	Température [K]
R	Résistance [m ² . K/ W]
\dot{Q}	Puissance [W]
λ	Conductivité thermique [W/m. °C]
S	Surface [m ²]
η	Rendement
ε	Efficacité

Indice

Com	Compresseur
Con	Condenseur
C	Capteur
Evp	Évaporateur
E	Entré, eau
Pac	Pompe à chaleur
g	Géothermique
S	Solaire, sortie, stocke
Sys	Système

Introduction générale

Épargner une énergie suffisante et moins chère est un dispositif majeur pour le développement de la nation ; d'une part, d'autre part la dégradation de l'environnement due à l'utilisation des énergies fossiles et nucléaire implique une série d'effets indésirables qui sont intolérables pour la protection environnementale ; et aussi, prenant en considération la flambée des prix des énergies fossiles dans les dernières années posent un sérieux problème sur l'échelle globale qui prend de l'ampleur et s'accroît au cours du temps.

L'utilisation des énergies renouvelables ce n'est pas du tout de nouvelle chose, ont été la possibilité primordiale pour la régénération de l'énergie et cela a changé uniquement avec la révolution industrielle et la naissance des énergies fossiles.

En effet, la source la plus prometteuse d'énergie pour l'Algérie est l'énergie solaire en raison de son climat. Par conséquent, l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage des bâtiments est une solution de rechange et d'avenir très importante pour l'économie algérienne.

Outre, les pompes à chaleurs géothermique constituent un moyen de chauffage qui permet de récupérer de la chaleur et sont devenues un moyen de chauffage conventionnel, à condition de disposer sur le lieu de leurs utilisations d'une source froide de chaleur abondante et gratuite et à niveau de température acceptable.

L'objectif de ce présent travail porte sur une étude et analyse thermodynamique d'une pompe à chaleur géothermique assistée par l'énergie solaire.

Outre de l'introduction et la conclusion, le corps du présent travail s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre traite des généralités sur le thème abordé en passant en revue par une recherche bibliographique sur l'énergie géothermique, le potentiel solaire dans l'Algérie, les capteurs solaires et les installations de chauffage hybride géothermique-solaire.

Le deuxième chapitre concerne une étude sur les paramètres intervenant dans la modélisation du système proposé à savoir l'établissement des bilans énergétiques pour les trois sous-systèmes : la pompe à chaleur, le capteur géothermique et le panneau solaire.

Quant au troisième chapitre, une présentation détaillée des résultats obtenus et leurs discussions a été effectuée.

Chapitre 01

Étude et recherche

Bibliographique

Introduction

Le présent chapitre a pour but de traiter des généralités sur le thème abordé en passant en revue par une recherche bibliographique sur l'énergie géothermique, le potentiel solaire dans l'Algérie, les capteurs solaires et les installations de chauffage hybride géothermique-solaire.

1.1 Généralités

La géothermie est un mot grec composé de deux mots : « **géo** » c'est-à-dire la terre et « **thermie** » c'est à dire la chaleur. Dans le domaine du chauffage, on peut considérer deux techniques spécifiques de la géothermie :

- La géothermie se rapportant au captage de la chaleur du sol pour des faibles profondeurs. Cette technique est adaptée au pavillonnaire et au petit résidentiel.
- La géothermie se rapportant au captage de la chaleur issue de nappes phréatiques. Ces nappes étant généralement à des grandes profondeurs. Cette technique est adaptée au grand résidentiel (généralement plusieurs milliers de logements).

1.2 Les différents types de l'énergie géothermique

1.2.1 La géothermie à très basse énergie

C'est une géothermie sert au chauffage individuel pour des faibles profondeurs de 30 à 120 mètres, elle concerne généralement les aquifères. La température des sources est de l'ordre de 10 à 30°C.

1.2.2 La géothermie à basse énergie

Appelée basse enthalpie ou basse température où les sources sont des nappes profondes situées entre descentaines et des milliers de mètres. Elles ont une température comprise entre 30 et 100°C, le niveau de la chaleur est idéal pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire.

1.2.3 La géothermie à moyenne énergie

Appelée moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide avec une température jusqu'à 150°C pour produire de l'électricité. Elle se trouve dans les zones convenables à la géothermie à haute énergie, mais elle a une profondeur inférieure à 1000 m. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2000 à 4000 mètres.

1.2.4 La géothermie à haute énergie

La géothermie à haute énergie a destiné pour l'exploitation des gisements profonds ayant des températures élevées et supérieures à 150°C en général. L'électricité est produite au moyen de la

vapeur géothermie. Des travaux de forage sont obligatoires pour atteindre les réservoirs de chaleur qui sont situés généralement à plus de 1500 mètres de profondeur.

1.3 Capteur géothermique

C'est un échangeur de chaleur constituée des tubes en polyéthylène ou en cuivre gainé, ces tubes étant enterré dans le sol, donc le capteur n'est pas exposé à la corrosion comme il contrarie les compressions du sol. Il capte la chaleur du sol pour la transmettre à une pompe à chaleur de chauffage

1.4 Classification des capteurs géothermique

1.4.1 Système d'échange avec la nappe

Le système de captage sur la nappe phréatique consiste à récupérer les calories contenues dans l'eau. Il utilise une énergie stable quelles que soient les conditions climatiques extérieures. En effet, à partir d'une profondeur de 10 m, la température de l'eau des nappes phréatiques ne varie que très légèrement (10 °C en moyenne).

1.4.1.1 À boucle fermée

Les pompes à chaleur sur nappes puisent la chaleur contenue dans l'eau : nappes phréatiques (où la température de l'eau est constante entre 7 et 12 °C), rivière ou lac. Elles nécessitent deux forages pouvant atteindre chacun plusieurs dizaines ou centaines de mètres de profondeur. Ce type d'installation permet de fournir le chauffage et le rafraîchissement aux bâtiments collectifs ou tertiaires pour des nappes situant à faible profondeur ou aux maisons individuelles.

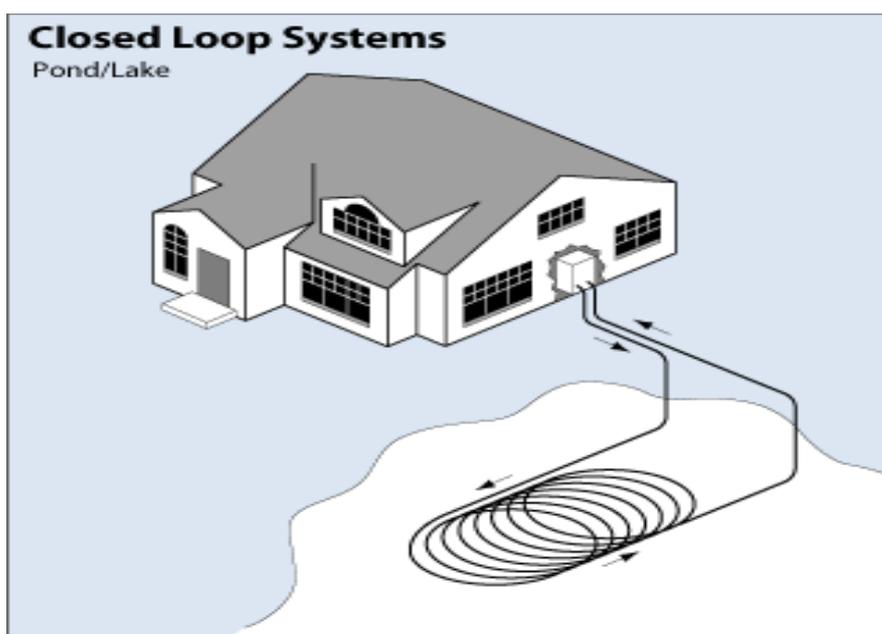


Fig.1 -Système d'échange avec la nappe à boucle fermée [1]

1.4.1.2 À boucles ouverte

Les circuits ouverts utilisent l'eau souterraine d'un puits classique comme source de chaleur. La thermopompe y puise l'eau et en extrait la chaleur au moyen d'un échangeur thermique. L'eau est ensuite retournée dans un puits de rejet. La composition de l'eau devrait être analysée pour s'assurer qu'elle n'obstruera pas la thermopompe.

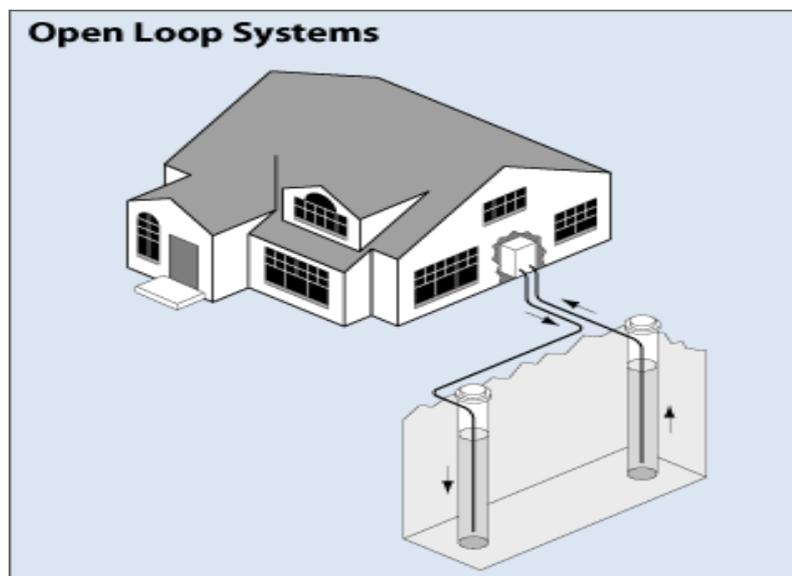


Fig.2 -Système d'échange avec la nappe à boucles ouverte [1]

1.4.2 Système d'échange avec le sol

Ce système est le résultat d'emplacement d'un capteur géothermique à boucle fermée et en contact direct avec le sol. Les circuits fermés sont les plus courants. Sous l'action d'une pompe située à l'intérieur de la maison, le liquide circule dans la boucle et dans la thermopompe, qui puise la chaleur dans le sol l'hiver et l'y évacue l'été. Dans un circuit fermé, le fluide est captif à l'intérieur de la boucle et de la thermopompe. Il existe deux principaux types de configurations de circuits fermés : verticale et horizontale. La configuration verticale est la plus couramment utilisée, car elle ne nécessite que très peu d'espace.

1.4.2.1 Capteur géothermique horizontal

Les capteurs horizontaux sont répartis et enterrés à faible profondeur (de 0,6 à 1,2 m). Selon la technologie employée, de l'eau glycolée ou le fluide frigorigène de la pompe à chaleur circule en circuit fermé à l'intérieur de ces capteurs. La surface de capteurs nécessaire représentera environ 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer. Pour une maison de 150 m², les capteurs occuperont donc entre 225 et 300 m² du jardin.

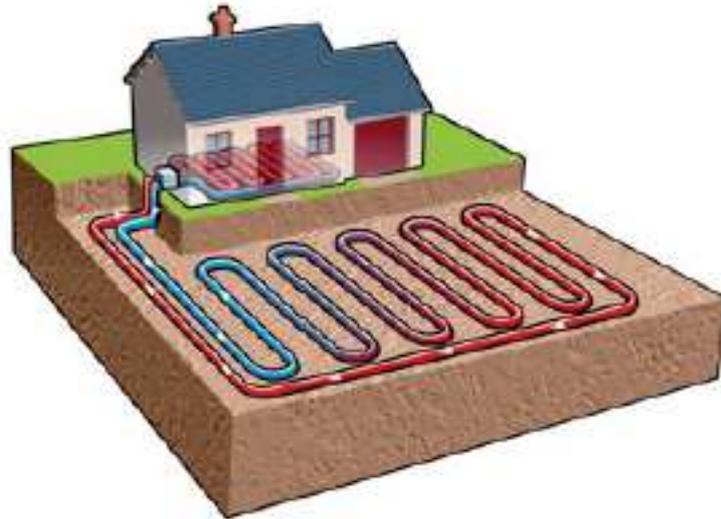


Fig.3 -Capteur géothermique horizontal. [2]

1.4.2.2 Capteur géothermique verticales

Les sondes ou capteurs verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment. La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres où la température est stable tout au long de l'année. L'eau glycolée est circulée dans un circuit fermé. Pour chauffer une maison de 120 m² habitable, une sonde géothermique de 100 m de profondeur est suffisante.

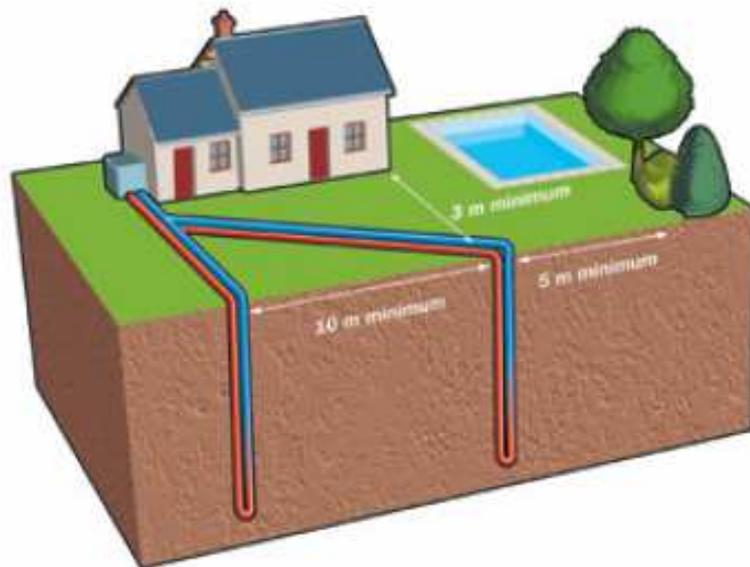


Fig.4 -Sondes géothermiques verticales. [2]

1.5 Potentiel de l'énergie géothermique

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique permet de tracer une carte géothermique préliminaire. Plus de deux cent sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays (voire fig. 05). Un tiers environ (33%) d'entre elles ou les températures sont supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra. Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient qui dépasse les 5°C/100m. [3]

- ❖ Zone de Relizane et Mascara
- ❖ Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa
- ❖ Zone de Guelma et Djebel El Onk

Les différentes régions géothermiques avec moyenne températures :

- ❖ 65°C dans la région de l'Ouest
- ❖ 80°C dans la région Centre,
- ❖ 94°C pour la région de l'Est.
- ❖ 50°C en moyenne dans le Sud.

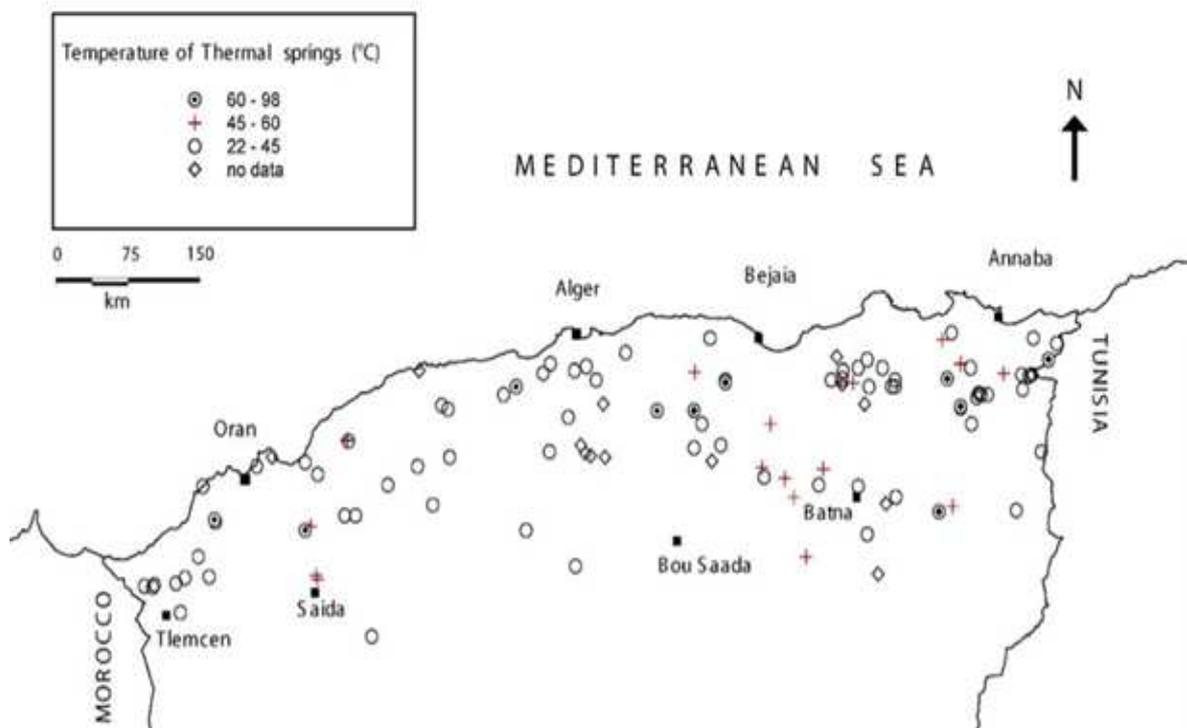


Fig.5 -Potentiel de l'énergie géothermique en Algérie [4]

1.6 Pompe à chaleur (PAC)

C'est un appareil permettant de transférer de la chaleur d'un milieu à basse température vers un milieu à plus haute température, alors que la chaleur se diffuse naturellement d'un milieu chaud vers un milieu plus froid d'après la seconde loi de thermodynamique. Le schéma du circuit interne de la PAC est illustré voir la figure (06), alors que le cycle thermodynamique correspondant est montré dans le diagramme pression-enthalpie (P-h) voir la figure (07).

Une PAC possède quatre composantes principales, soit l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur. Un fluide frigorigène (appelé aussi réfrigérant) circule dans le circuit fermé de la PAC. Le fluide frigorigène gagne de la chaleur à l'évaporateur et il s'évapore, puis il est comprimé dans le compresseur. Il perd ensuite sa chaleur au condenseur et passe ainsi à l'état liquide, ensuite subit une détente dans le détendeur qui en abaisse sa pression et sa température.

Le R-134a est utilisé comme un fluide frigorigène c'est ($\text{CH}_2\text{F} - \text{CF}_3$) qui a remplacé le R-12 en froid domestique et en climatisation automobile. Ce sont des molécules composées de carbone, de fluor et d'hydrogène. Elles ne contiennent pas de chlore et donc ne participent pas à la destruction de la couche d'ozone, leurs avantages dans le chauffage est de faire fonctionner les pompes à chaleur à haute température (généralement jusqu'à $65\text{ }^\circ\text{C}$).

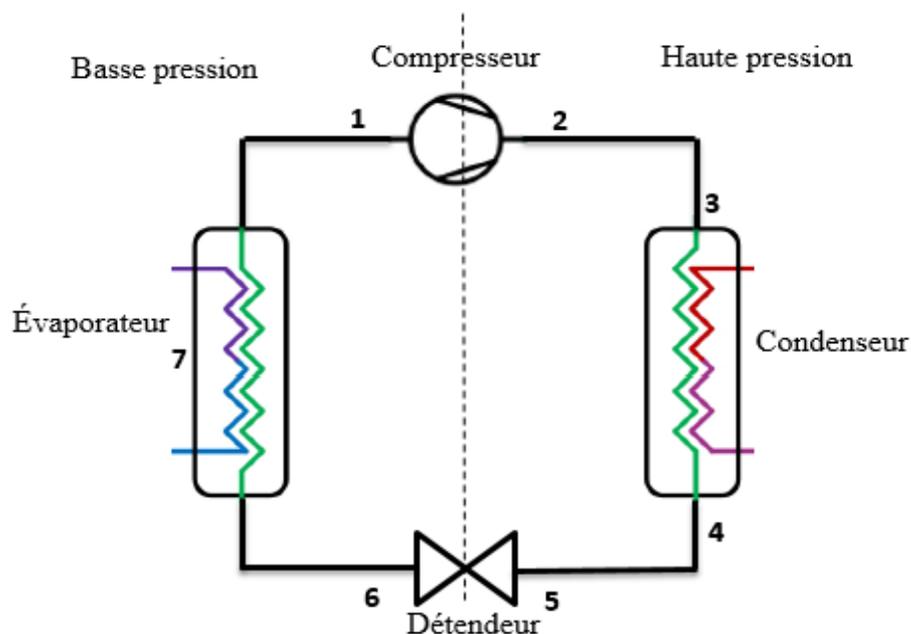


Fig.6-Schéma du circuit interne d'une pompe à chaleur.

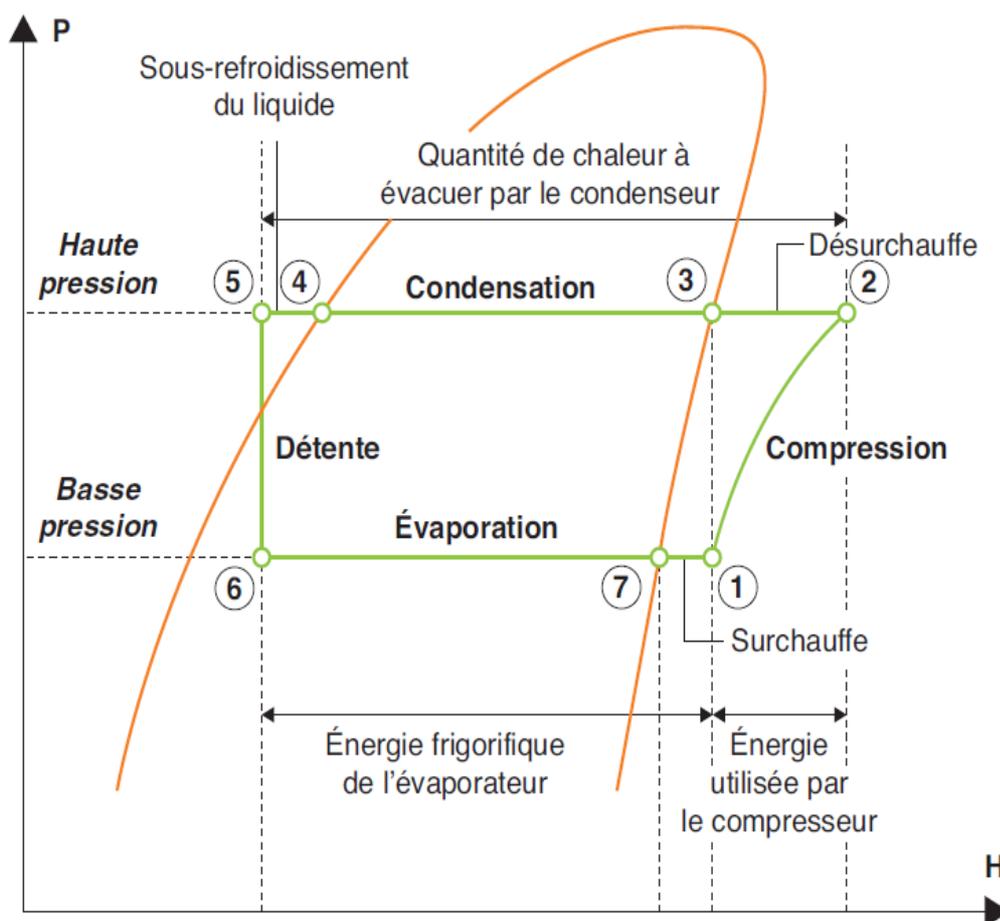


Fig.7-Diagramme de Mollier (P-h) d'une pompe à chaleur [5].

1.7 Classifications des pompes à chaleurs

1.7.1 Les pompes à chaleurs aérothermies

Ce type des pompes est capable de fonctionner jusqu'à des températures extérieures de -25°C , ces pompes à chaleur font face aux conditions hivernales les plus rudes, et permettent de couvrir jusqu'à 100% des besoins des logements. Cette source de chaleur est facilement exploitable, sans capteurs importants ou coûteux à installer et sans autorisation préalable.

1.7.1.1 Avantages

- Système simple d'utilisation et installation
- Investissement réduit
- Adaptation possible à un réseau de chauffage central existant
- Système réversible : chauffe ou refroidit selon les besoins.

1.7.1.2 Inconvénients

- En dessous de 3°C à l'extérieur, le système devient moins efficace. Elle est plutôt conseillée dans les zones à climat doux comme les zones côtières.
- Il est nécessaire de compléter par un chauffage d'appoint.
- Problèmes de bruit de la pompe

Dans les pompes à chaleur aérothermiques en distinguant les combinaisons suivantes :

1.7.1.3 Pompe à chaleur air/air

Ces pompes à chaleur sont simples à installer. L'effet calorifique de ces machines devenant faible avec les basses températures extérieures, elles sont équipées d'un système de dégivrage. [6]

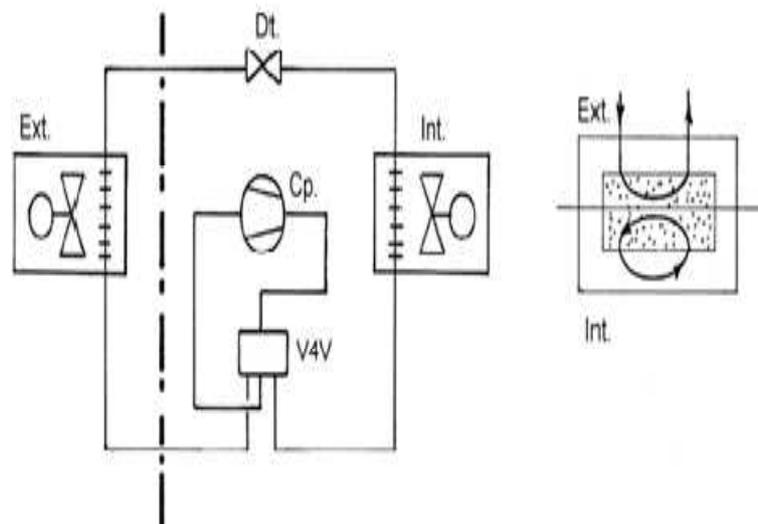


Fig.8-Schéma de principe d'une pompe à chaleur air / air réversible. [6]

1.7.1.4 Pompe à chaleur eau/air

Ces machines peuvent être l'association de l'unité extérieure d'un split avec plancher chauffant ou des pompes à chaleur monobloc qui ne demande pas de haute température. Elles sont plus coûteuses à l'installation, par contre leur coefficient de performance énergétique est bon et relativement stable. Elles comportent un évaporateur à air et un condenseur à eau, une régulation est nécessaire sur la température extérieure afin d'optimiser le fonctionnement de l'évaporateur et limiter le dégivrage.

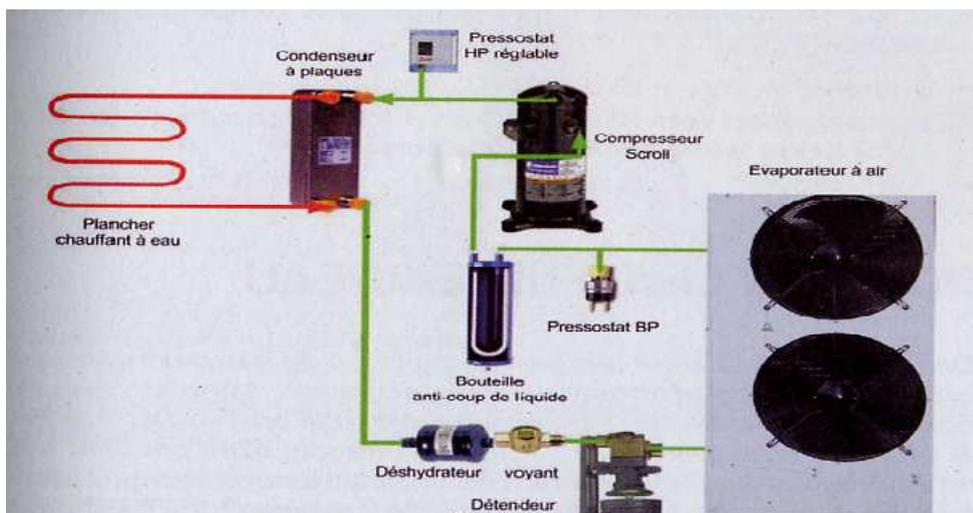


Fig.9-Schéma de principe d'une pompe à chaleur réversible eau/air. [5]

1.7.2 La pompe à chaleur géothermique

La pompe à chaleur géothermique prélève l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou de rafraîchissement. C'est un système de chauffage composé de capteurs enterrés à l'extérieur de la maison.

1.7.2.1 Avantages

- Une bonne performance : elles peuvent fonctionner en autonomie sans chauffage d'appoint, même dans un climat froid
- Energie fiable et stable dans le temps
- Bonne rapidité de chauffe
- Les pompes à chaleur sol/sol ou sol/eau sont relativement simple et donc moins couteuses
- Il n'y a pas besoin d'espace de stockage d'un combustible
- Il n'y a pas de rejet, donc pas besoin d'un conduit d'évacuation.

1.7.2.2 Inconvénients

- La pompe à chaleur horizontaux nécessite une surface disponible dans votre espace vert de 1,5 à 2 fois la surface de votre bâtiment.
- Les pompes à capteurs verticaux nécessitent un forage et donc un surcout
- Compatible uniquement avec radiateur basse température et/ ou plancher chauffant.

Dans les pompes à chaleurs géothermiques en distinguant les combinaisons suivantes :

1.7.2.3 Pompes à chaleur sol/air

Lorsqu'on souhaite un chauffage thermodynamique tout l'hiver et qu'on ne dispose pas d'eau, la source chaude qui reste efficace et disponible est le sol. Les pompes à chaleur sol – air sont

relativement coûteuses à l'installation. Elles présentent l'avantage de conserver un coefficient de performance énergétique relativement correct en hiver.[6]

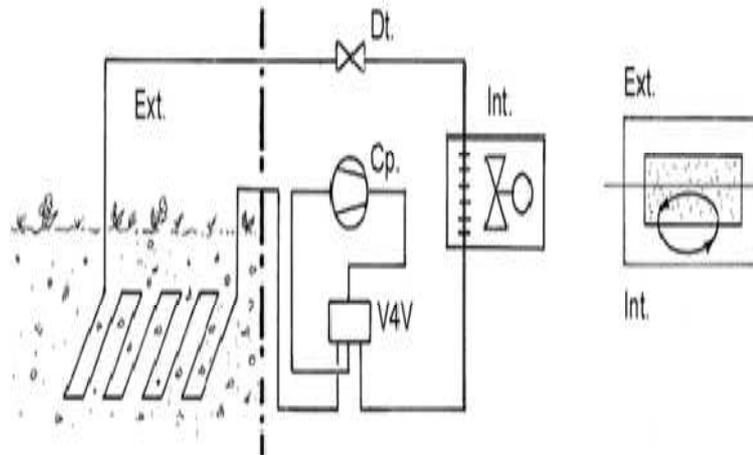


Fig. 10 -Schéma de principe d'une pompe à chaleur réversible sol/air. [6]

1.7.2.4 Pompe à chaleur eau/eau

Le condenseur et l'évaporateur sont à l'usage de pompes à chaleur sur eau de puits ou de nappe phréatiques, elles présentent des bons coefficients de performance énergétique, elles permettent le stockage d'eau glacée (fluide frigoporteur) ou d'eau chaude (fluide caloporteur). Avec ce type de machine, des fabricants garantissent des effets calorifiques de 5 pour une nappe phréatique à 10 °C et une température de départ de 35 °C.

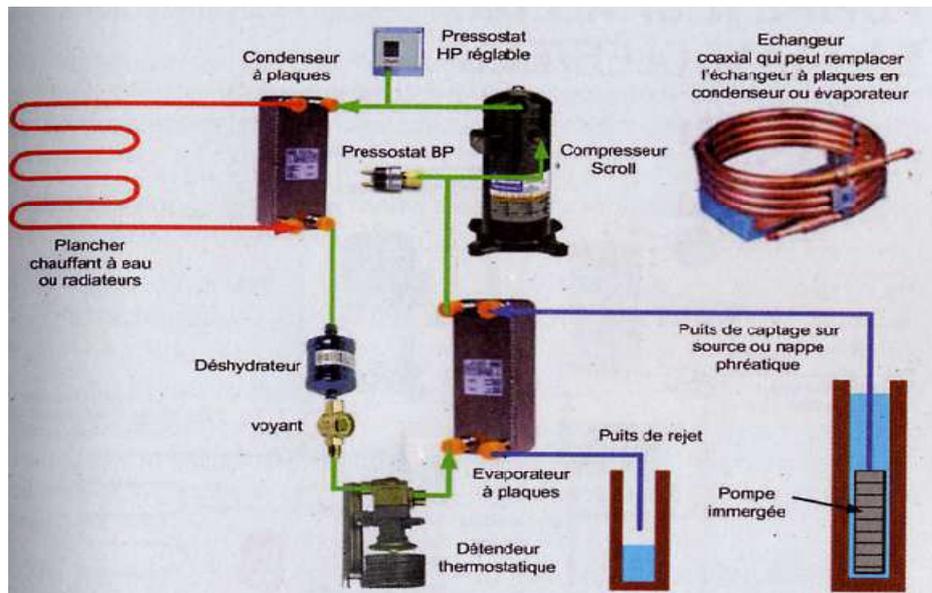


Fig.11-Schéma de principe d'une pompe à chaleur eau/eau réversible. [5]

1.7.2.5 Pompe à chaleur sol/eau

Dans ce cas l'évaporateur est un échangeur sol/frigorigène et le condenseur est un échangeur frigorigène/sol. Le sol est un bon accumulateur de chaleur puisque les températures qui y règnent tout au long de l'année sont relativement constantes : de 7 à 13 °C à 2 m de profondeur. Des capteurs enterrés dans lesquels circule de l'eau glycolée prélèvent la chaleur du sol et le véhiculent vers l'évaporateur de la pompe à chaleur.

Le point de fonctionnement habituel est indépendant de la température extérieure, cela veut dire que la température du sol a une faible influence sur le fonctionnement même dans les zones froides. La température d'évaporation est vers -5 à -8°C selon la nature du terrain, et celle de condensation est vers 35 à 40 °C en plancher chauffant, et de 45 à 55°C selon la surface des radiateurs.

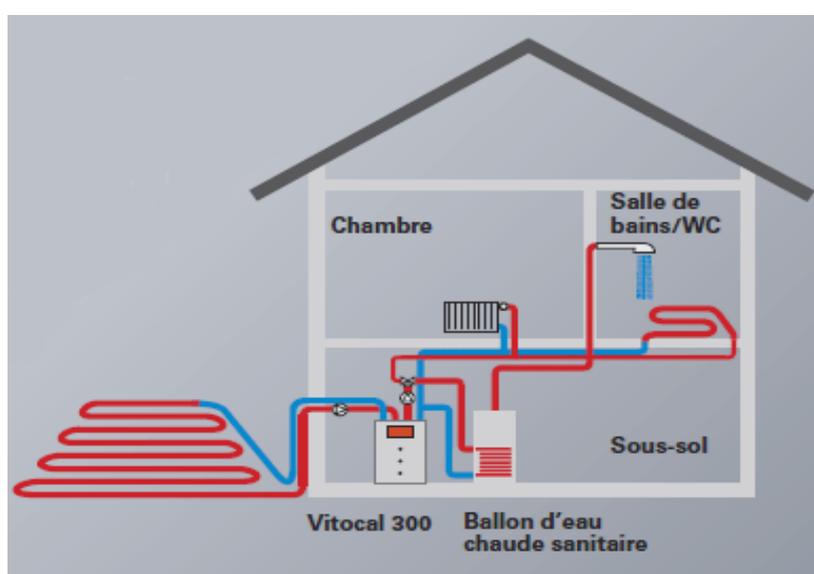


Fig.12-Schéma de principe d'une installation sol/eau. [6]

1.8 La puissance en fonction de la nature de sol

Tableau 1 - Puissances disponibles en fonction de la nature de sol. [6]

Différents types de sol	Puissances
Sol sablonneux sec	10 à 15 W / m ²
Sol sablonneux humide	15 à 20 W / m ² .
Sol argileux sec	20 à 25 W / m ² .
Sol argileux humide	25 à 30 W / m ² .
Sol aquifère	30 à 35 W / m ²

1.9 Potentiel solaire en Algérie

Le potentiel solaire est exprimé par les sommes annuelles du rayonnement solaire global sur un plan horizontal (en kilowattheures par mètre carré et par an "kWh/m²/an"). La qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde. L'Algérie reçoit près de 3000 heures d'ensoleillement par an et une irradiation variant entre 4 et 7 kWh/m²/jour. La figure suivante présente la globale irradiation horizontale en Algérie.

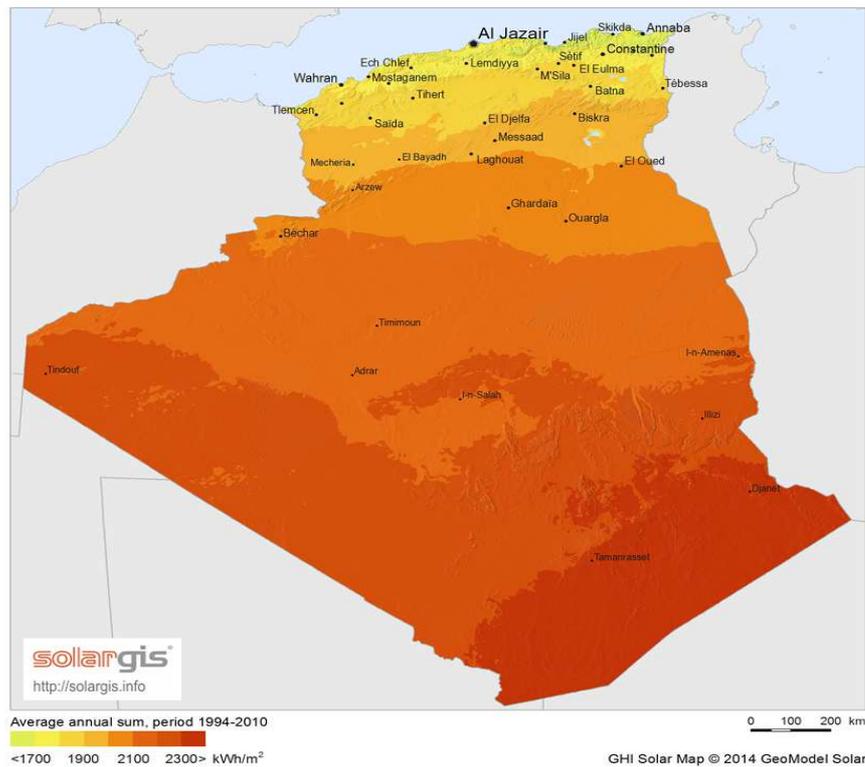


Fig.13-Globale irradiation horizontale en Algérie [7]

1.10 Capteur solaire plan

Le rôle d'un capteur solaire thermique à eau est de transformer le rayonnement solaire qui est reçu en énergie calorifique utilisable. Le rayonnement solaire passe à travers la couverture transparente, et arrive sur l'absorbeur. Celui-ci s'échauffe, et transmet de l'énergie thermique par convection à l'eau qui circule dans les conduits, et réémet du rayonnement thermique vers l'extérieur. L'isolant permet de réduire les pertes thermiques du capteur. La figure suivante représente un capteur solaire plan

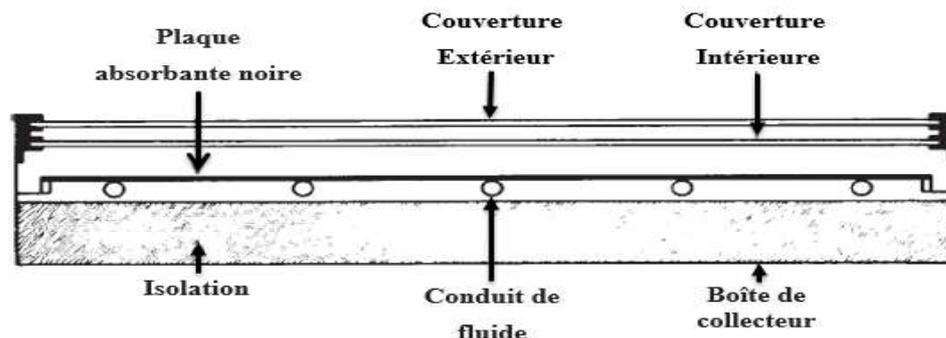


Fig.14-capteur solaire plan [8]

Le capteur solaire plan se comporte essentiellement les éléments suivants :

- Une plaque opaque qui absorbe le rayonnement solaire et le transmette au fluide caloporteur.
- Une isolation thermique arrière est latérale.
- Une couverture transparente généralement en verre, simple ou double

1.10.1 Fluide caloporteur

Un fluide caloporteur ou calorporteur utilisé dans le circuit primaire de capteur solaire pour véhiculer la chaleur cédée par l'absorbeur, plusieurs fluides peuvent être utilisés mais ils doivent satisfaire à des certaines conditions :

- ❖ Grande capacité calorifique.
- ❖ Faible viscosité.
- ❖ Coefficient de transfert thermique élevé.
- ❖ Haute point de d'ébullition est bas point de congélation.

L'eau est un excellent fluide caloporteur à cause de sa chaleur massique mais le risque de gel pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas haute température pose des problèmes. Ainsi que la couche de tartre dans les conduits diminue la quantité de chaleur échangée. L'utilisation de l'eau glycolée pour éviter ce problème. C'est une eau normale de réseau à laquelle on a ajouté un pourcentage de glycol, par exemple 20% afin que cette eau ne puisse geler, même si elle est stagnante pendant la circulation dans un réseau de chauffage passant par l'extérieur.

1.11 Synthèse bibliographique

Dans le monde, il existe différentes sources d'énergies utilisables afin de pouvoir répondre aux nombreuses demandes de la population mondiale, qui elle, augmente de jours en jours. Ces demandes énergétiques concernent les transports, la climatisation ainsi que le chauffage etc... Par définition, un système de chauffage est un appareil ou un groupe d'appareils utilisés pour augmenter la température

dans une maison. Plusieurs sources d'énergie peuvent être utilisées dans ce système, notamment : l'énergie solaire, l'énergie géothermique le gaz, le bois et le mazout.

Dans ce travail on présente une étude sur un système de chauffage domestique hybride solaire-géothermique. En ce qui concerne le secteur de la fourniture de chaleur ce qui peut être réalisé en utilisant des capteurs solaires thermiques ou les systèmes de pompes à chaleur avec sondes géothermiques. Au cours des dernières années, le solaire thermique et les systèmes géothermiques ont généralement été installés séparément. Maintenant, des propositions de plus en plus pour la combinaison de ces deux technologies sont examinées, les deux peuvent aussi bénéficier l'un et l'autre.

Actuellement plusieurs recherches sont faites pour développer ces systèmes. Dans ce qui suit certains travaux de recherches réalisées seront cités :

S. Bernard et al [9] ont présenté un projet appelé GEOSOL a été installé dans une résidence privée de 180 m² en 2004. Cette installation est suivie expérimentalement à long terme pour analyser le comportement énergétique de l'installation à tout moment de l'année. Un système combiné pompe à chaleur géothermique et capteur solaire thermique a été défini et simulé numériquement par le logiciel TRNSYS. Ils ont déterminé les meilleures configurations du processus de GEOSOL en termes d'exécution d'énergie, économiques et environnementales.

M. Farzin et al [10] ont effectué une étude pour examiner la viabilité des systèmes hybride solaire pompe à chaleur géothermique. Ils ont déterminé la relation entre la surface de capteur solaire et de la longueur de l'échangeur géothermique. Ils ont montré que le rapport de réduction entre la longueur d'échangeur et l'aire de capteur solaire est de 4,7 m/m², et pour réduire la longueur de capteur de 32m la surface des capteurs solaires doivent être égale à 6.81m². Ils ont démontré aussi que le stockage d'énergie thermique solaire dans le sol pourrait réduire une grande quantité de chaleur pour le capteur géothermique. Ils ont fait une combinaison de trois capteurs solaires thermiques avec une surface totale de 6.81m² au système géothermique qui réduira la longueur d'échangeur de chaleur de 222 m à 188 m.

K. Wonseok et al. [11] ont présenté un système de chauffage hybride solaire-géothermique, ils ont montré que l'élévation de la température de fonctionnement de la pompe à chaleur de 40 C à 48 C cause un accroissement de 19.9% du rapport de la pression dans le compresseur, ainsi que pour une variance entre 11-19°C de la température de la source géothermique le rapport diminue de 3 à 2.5. Et l'augmentation de leur travail de 4.5 KW jusqu'à 5.3 KW, puis ils ont constaté que l'accroissement du rayonnement solaire de 1 à 20 MJ /m² provoque une augmentation de 48 % pour la chaleur de collecteur et la chaleur de collecteur maximal devient 47,8 kWh. Finalement, si la température

intérieure de la maison augmente de 18 °C à 26 °C la charge thermique de chauffage croit de 70% et la fraction solaire est réduite de 11,4% à 5,8 % en raison de l'augmentation de la charge de chauffage.

A. Marco et al. [12] ont présenté un travail pour évaluer le potentiel d'une centrale hybride solaire-géothermique basée sur le cycle organique de Rankine (ORC), ils ont calculé les dimensions des composants d'ORC, en suite ils ont fait une simulation pour estimer la production annuelle utilisant un modèle solaire détaillé sur le terrain avec des efficacités moyennes de 8.5 – 9.4 %, enfin ils ont démontré que le concept hybride solaire-géothermique pourrait représenter une bonne occasion pour la production d'électricité, au même temps augmentant l'attraction de plusieurs sources géothermiques.

Z. Cheng et al. [13] avaient étudié la conception d'une centrale hybride solaire-géothermique pour la production d'électricité dans l'Australie, ils ont conclu que le rendement de puissance net croit avec l'augmentation de radiation solaire et la température géothermique du réservoir, ensuite ils ont démontré que la puissance produite par la centrale hybride était moins coûteuse par rapport au centrale solaire (plus moins de 145 \$/MW h) et un coût actualisé de l'électricité s'est avérée environ 23% moins que la géothermique (c.-à-d. 225 \$/MW h) .enfin ils ont conclu qu'une centrale hybride solaire-géothermique a des grands potentiels, avec les avantages économiques notables, pour les conditions géologiques et climatiques australiennes uniques.

Y. Li et al. [14] ont présenté un système de chauffage hybride solaire-géothermique proposé au Shanghai. Ils ont utilisé logiciel TRNSYS pour la simulation, ils ont montré que la performance des systèmes est strictement liée à la taille de stockage. Pour cela ils ont utilisé un grand nombre de forages à faible distance. Ils ont constaté que le mode de chauffage direct solaire peut couvrir 37% de la charge. L'échangeur de chaleur directe couvrir 25% de la charge, la pompe à chaleur géothermique est utilisée pour équilibrer l'écart dans l'extraction et l'éjection de la chaleur. Puis ils ont conclu que le COP d'un système de PAC géothermique avec de capteur solaire plus ou moins supérieur a seul sans capteur solaire de 4.5 et 4.2 respectivement.

T. Duccio et al. [15] avaient étudié deux systèmes de cogénération (ORC) simple et double étages, alimentés par ressource géothermique et l'énergie solaire. Ils ont calculé les performances de ces systèmes et les comparées avec trois fluides différents : R134a, R236fa, R245fa. Ils ont obtenu que le R245fa a des meilleures performances en termes exergetique et d'efficacité de cycle, en fin ils ont constaté que la mise en page de pression unique traditionnelle avec double étages a une meilleure performance que la solution à double pression.

G. Emmi et al. [16] ont évalué le comportement thermique des pompes à chaleur géothermiques de source dans des climats froids. Ils ont proposé une solution pour résoudre le problème de diminution de la température du sol par l'utilisation des collecteurs thermiques solaires pour stabiliser ou augmenter graduellement la température du sol au moyen de ces systèmes. Ils ont analysé le système d'un bâtiment résidentiel de multi-planchers avec 12 appartements de 88 m² dans trois zones climatiques, ils ont fait la simulation à l'aide du logiciel TRNSYS, ils ont montré que l'efficacité de la pompe à chaleur atteignant jusqu'à une augmentation de 30% à Montréal, et une réduction du COP égale à 80% à Bolzano et à Montréal et 70% à Stockholm.

M. Wagner et al. [17] ont examiné la conception d'une centrale thermique hybride solaire-géothermique. Ils ont utilisé l'énergie géothermique pour chauffer l'eau d'alimentation dans un cycle d'alimentation de vapeur Rankine classique déployée par une centrale solaire, Ils ont constaté que l'énergie géothermique représente environ 11% de l'apport thermique annuel à la centrale thermique. Ainsi que la source géothermique permet d'augmenter la puissance de la centrale d'environ 8% par rapport à une centrale solaire autonome, l'énergie géothermique est convertie en électricité avec un rendement de 1,7 à 2,5 fois plus élevée en utilisant la même ressource géothermique.

F. Daniele et al. [18] ont présenté une analyse thermo-économique d'un nouveau micro-cogénération système d'organique de Rankine alimentée par deux sources d'énergie renouvelables solaire et géothermique à basse température, ce système utilise un champ solaire constitué que par des capteurs solaires sous vide, ils ont réalisé par une seule turbine avec des fluides frigorigènes R134a, R236fa et R245fa, le système est dimensionné dans la base des données météorologiques d'une ville dans le centre de l'Italie en trois mois différents janvier, mars et juillet, ils ont démontré à partir d'une analyse thermo-économique que R245fa permet le prix le plus bas de la production d'électricité et le plus bas coût global de la centrale de cogénération.

O. Ozgener et al. [19] ont présenté une étude expérimentale sur une pompe à chaleur géothermique assistée par l'énergie solaire, Ce système a été conçu et installé dans l'Institut de l'énergie solaire, Université Ege, Izmir, ils ont utilisé un échangeur de chaleur de la forme U avec une profondeur de 50 m et un diamètre de 32mm. Ils ont constaté que le taux d'extraction de la chaleur du sol se trouve être, en moyenne, 57,78 W/m. Ainsi que la température d'entrée d'eau varie de 8,2 à 16,2 °C, avec une valeur moyenne de 14 °C. L'air de l'échangeur de chaleur a une température journalière maximale de 31,05°C et 14,54 °C pendant la nuit, ils ont conclu que le coefficient de performance de système de chauffage est d'environ 1.70 à la fin d'une journée nuageuse, alors qu'il est d'environ 2.60 à la fin de la journée ensoleillée.

1.12 Principe de fonctionnement du système de chauffage hybride solaire – géothermique

Le schéma principal de système de chauffage hybride solaire- géothermique est illustré sur la figure 15, et par suit le principe de fonctionnement de système proposé :

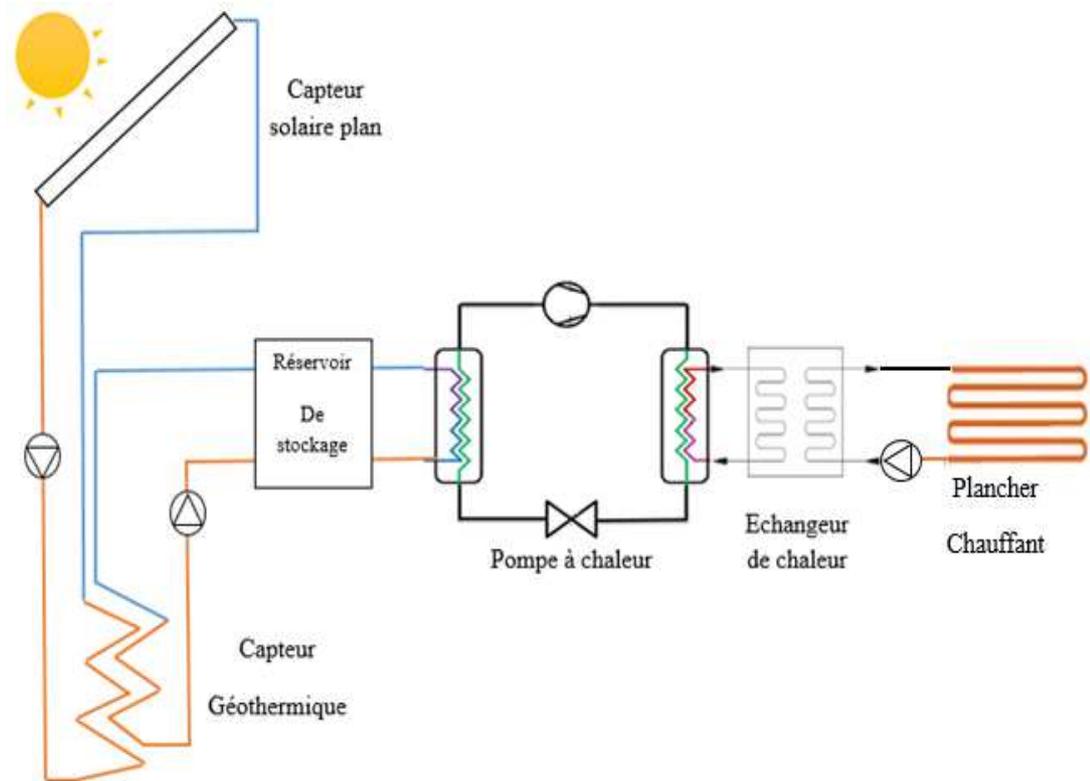


Fig. 15 -Système de chauffage hybride solaire – géothermique proposé

Le rayonnement solaire passe à travers la couverture transparente, et arrive sur l'absorbeur. Celui-ci s'échauffe, et transmet de l'énergie thermique par convection vers le fluide caloporteur, ce dernier sera chauffé et injecté par une pompe vers un échangeur installé au niveau du sol pour chauffer la source géothermique.

Le circuit du système d'une pompe à chaleur géothermique est parcouru par un fluide caloporteur qui récupère les calories du sol afin de les transmettre à la pompe à chaleur. Cette dernière utilise un fluide frigorigène pour transmettre les calories récupérées dans le sol à l'eau du système de chauffage. Ce fonctionnement se compose de quatre phases :

En première phase le fluide frigorigène à l'état liquide, récupère les calories transmises par le sol via le liquide caloporteur. La température du fluide augmente grâce à la quantité de chaleur captée. Le fluide se transforme alors en gaz, il s'évapore,

En deuxième phase le compresseur, alimenté par un moteur électrique, aspire et compresse le fluide frigorigène. A la fin de cette phase, le fluide à l'état vapeur est chaud et sous haute pression,

En troisième phase la condensation du fluide frigorigène, alors à l'état de vapeur à haute pression permet de dégager une quantité de chaleur alors le fluide repasse à l'état liquide, elle est récupérée par un plancher chauffant installé au niveau de la maison,

En fin le détendeur fait chuter la pression du fluide frigorigène et prépare le fluide liquide avant la phase d'évaporation.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fondement théorique et les travaux de recherches réalisées dans ce domaine. Cette partie d'étude nous a permis d'avoir une idée sur les différentes liaisons reliant les divers paramètres. Donc l'étude sur les paramètres intervenant dans la modélisation du système proposé à savoir l'établissement des bilans énergétiques pour les trois sous-systèmes, cette partie fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 02

Modélisations mathématiques

Introduction

Cette partie du mémoire est consacrée à la présentation d'un modèle mathématique sur la pompe à chaleur, étude d'un capteur solaire plan, et la détermination les caractéristique d'un capteur géothermique.

2.1 Modélisation d'une pompe à chaleur

La figure qui suit montre la variation de la pression en fonction de l'enthalpie pour un cycle d'une pompe à chaleur. On utilise R134a comme un fluide frigorigène, (voire l'annexe 01) pour calculer les de propriétés thermodynamiques du fluide. [20]

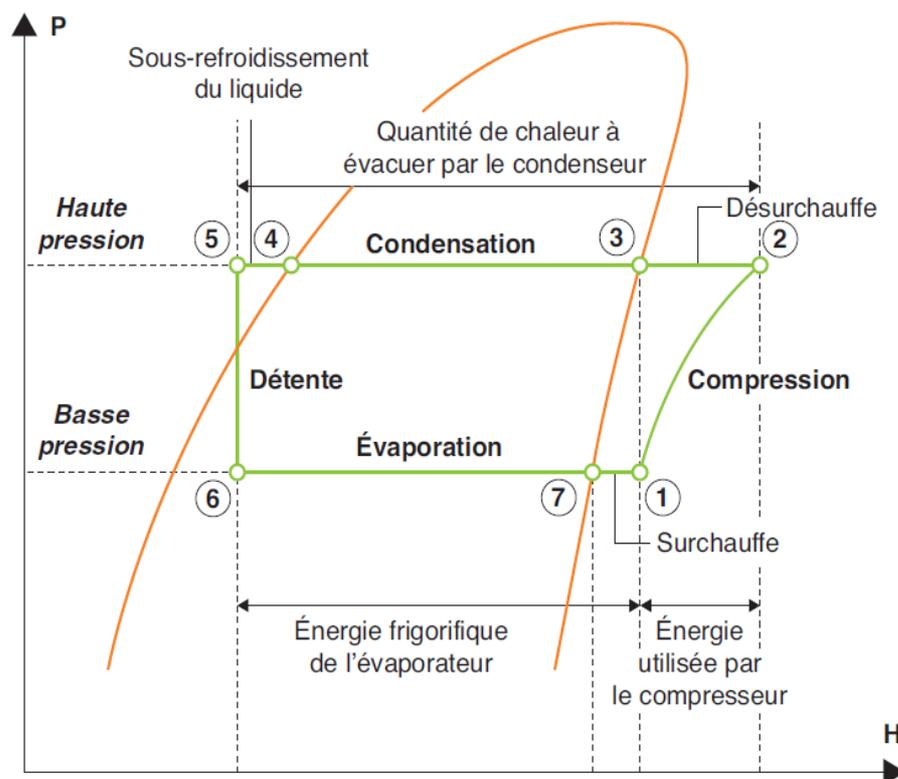


Fig.16 - Diagramme enthalpie du cycle réel d'une PAC [5]

1-2 : puissance absorbée par le compresseur (compression)

2-3 : désurchauffe

3-4 : condensation ou évacuation de la chaleur

4-5 : un sous-refroidissement du liquide

5-6 : une détente

6-7 : évaporation (absorption de la chaleur)

7-1 : une surchauffe.

2.1.1 Établissement du bilan énergétique

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_{réf} \quad 01$$

$$\dot{Q}_{con} = \dot{W}_{com} + \dot{Q}_{evp} \quad 02$$

2.1.2 Bilan des échanges de chaleur et de travail

2.1.2.1 La chaleur absorbée par évaporateur

$$Q_{evp} = h_1 - h_6 \quad 03$$

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{m}_{réf} \cdot (h_1 - h_6) \quad 04$$

2.1.2.2 La chaleur dégagée au condenseur

$$Q_{con} = h_5 - h_2 \quad 05$$

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_{réf} \cdot (h_5 - h_2) \quad 06$$

2.1.2.3 Travail mécanique de compression

$$W_{com} = h_2 - h_1 \quad 07$$

$$\dot{W}_{com} = \dot{m}_{réf} \cdot (h_2 - h_1) \quad 08$$

$$\dot{W}_{réel} = \frac{\dot{W}_{com}}{\eta_{isent}} \quad 09$$

2.1.2.4 Détente isenthalpique

$$H_5 = h_6 \text{ Ou } \Delta h = 0 \quad 10$$

2.1.2.5 Coefficient de performance

Le COP d'une pompe à chaleur c'est le rapport de la quantité d'énergie produite sur l'énergie mécanique consommé

$$COP = \frac{|\dot{Q}_{con}|}{\dot{W}_{réel}} = \frac{(h_2 - h_5)}{(h_2 - h_1)} \quad 11$$

$$COP_c = \frac{T_c}{T_c - T_e} = \frac{1}{1 - \frac{T_e}{T_c}} \quad 12$$

2.2 Rappel de l'énergie solaire

2.2.1 Déclinaison soleil

La déclinaison soleil δ (degrés) c'est l'angle entre la direction du Soleil par rapport au plan équatorial de la Terre. Calcule par l'expression suivant :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[(0.986) \cdot (j-81) \cdot \frac{\pi}{180} \right] \quad 13$$

Où :

J : est le numéro du jour

$$TSL = 12 - (\omega_0/15) \quad 14$$

$$TSC = 12 + (\omega_0/15) \quad 15$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\frac{\pi}{180} \cdot \arccos \left[-\tan \left(\frac{L \cdot \pi}{180} \right) \cdot \tan \left(\frac{\delta \cdot \pi}{180} \right) \right]} \quad 16$$

2.2.2 Angle horaire de soleil (ϖ)

L'angle horaire w (degrés) est l'angle entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et du plan vertical du lieu et définit la vraie heure solaire. L'angle de l'horaire est calculé par l'équation suivante :

$$\varpi = (TSV-12) \cdot 15 \quad 17$$

Où :

TSV c'est le temps de soleil vrai

2.2.3 Hauteur du soleil

La hauteur du soleil (h) est l'angle entre les deux plans horizontaux avec la direction du soleil, et il est calculé par la formule suivante :

$$\sin(h) = \left(\cos \left(L \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \cos \left(\delta \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \cos \left(\varpi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right) + \left(\sin \left(L \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \sin \left(\delta \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right) \quad 18$$

$$h = \frac{1}{\left(\frac{\pi}{180} \cdot \arcsin [\sin(h)] \right)} \quad 19$$

2.2.4 L'azimut du soleil

L'azimut du soleil est l'angle du plan horizontal, en étant la projection de la direction de Soleil avec le sud. Il est en fonction de la déclinaison solaire (δ), hauteur du Soleil (h) et de l'angle horaire (w), peut être calculée par la formule suivante :

$$a = \frac{1}{\frac{\pi}{180} \cdot \arcsin \left[\frac{\cos(\delta \cdot \frac{\pi}{180}) \cdot \sin(w \cdot \frac{\pi}{180})}{\cos(h \cdot \frac{\pi}{180})} \right]} \quad 20$$

$$\gamma = -a \quad 21$$

$$\cos(\theta) = \left(\cos(h \cdot \frac{\pi}{180}) \cdot \cos(\delta \cdot \frac{\pi}{180}) \cdot \sin(L \cdot \frac{\pi}{180}) \right) + \left(\sin(h \cdot \frac{\pi}{180}) \cdot \cos(L \cdot \frac{\pi}{180}) \right) \quad 22$$

$$\theta = \frac{1}{\frac{\pi}{180} \cdot \arccos[\cos(\theta)]} \quad 23$$

Avec :

L : la valeur de latitude du lieu

2.2.5 Modèle de Perrin de Brichambaut

Tout rayonnement incident sur la terre va être décomposé en plusieurs rayonnements. Ces dernières varient en fonction de la hauteur du soleil, de l'angle d'incidence, et de l'état climatique. La modélisation théorique des irradiations solaires est très compliquée due aux variations climatiques. La méthode empirique de Perrin Brichambaut a donné de bons résultats pour l'estimation de l'énergie reçue par un capteur d'orientation quelconque.[21]

Eclairement diffus reçus par une surface horizontale est défini par équation suivante :

$$D_h = 125 \cdot \left(\sin(h \cdot \frac{\pi}{180}) \right)^{0.4} \quad 24$$

Eclairement globale reçus par une surface horizontale est donnée par la relation suivante :

$$G_h = 1080 \cdot \left(\sin(h \cdot \frac{\pi}{180}) \right)^{1.22} \quad 25$$

La puissance du rayonnement direct est donnée par la relation suivant :

$$E_s = 1230 \cdot \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot e^{\frac{-1}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{180}(h+2)\right)}} \quad 26$$

La puissance du rayonnement diffus est donnée par la relation suivant :

$$E_d = \left(0,5 \cdot D_h \cdot \left[1 + \cos\left(\beta \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right]\right) + \left(0,5 \cdot A \cdot G_h \cdot \left[1 - \cos\left(\beta \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right]\right) \quad 27$$

A : c'est l'Albédo

$$E_g = E_s + E_d \quad 28$$

2.2.6 Expression du coefficient global de transfert de chaleur

Coefficient de transfert de chaleur par convection et par rayonnement h_{c1} et h_{r1} sont calculés à l'aide des expressions suivantes :

2.2.7 Coefficient de transfert de chaleur par convection

$$h_{c1} = \frac{Nu \cdot \lambda}{b} \quad 29$$

2.2.8 Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement

$$h_{r1} = \frac{\sigma \cdot \left[(T_p)^2 + (T_c)^2 \right] \cdot \left[(T_p) + (T_c) \right]}{\left[\frac{1}{sp} + \frac{1}{sc} - 1 \right]} \quad 30$$

Avec :

$sp = 0.95$: Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement.

$sc = 0.83$: Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement.

$$Gr = \frac{(\rho^2 \cdot G \cdot \Delta T \cdot b^3 \cdot \beta)}{\mu^2} \quad 31$$

$$Nu = \left[0.06 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot (90 - \beta) \right] \cdot Gr^{0.33} \quad 32$$

La résistance thermique équivalente égale :

$$R_1 = \frac{1}{(h_{c1} + h_{r1})} \quad 33$$

Coefficient de transfert de chaleur par convection et par rayonnement h_{c2} et h_{r2} sont calculés à l'aide des expressions suivantes :

2.2.9 Transfert de chaleur par convection :

Coefficient de transfert de chaleur par convection due au vent donné par l'équation suivante :

$$h_{c2} = 5,7 + (3,8 \cdot v) \quad 34$$

2.2.10 Transfert de chaleur par rayonnement :

$$h_{r2} = \frac{sc \cdot \sigma \cdot [(T_c)^4 - (T_{inf})^4]}{(T_c - T_a)} \quad 35$$

La résistance thermique égale :

$$R_2 = \frac{1}{(h_{c2} + h_{r2})} \quad 36$$

La résistance thermique d'un isolant dépend de la conductivité thermique (λ exprimée en $W/m^2 \cdot K$) du matériau isolant et de son épaisseur (e exprimée en m).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad 37$$

$$K_2 = \frac{\lambda}{e} \quad 38$$

2.2.11 Coefficient global de transfert de chaleur

$$K = K_1 + K_2 \quad 39$$

$$K_1 = \frac{1}{(R_1 + R_2)} \quad 40$$

2.2.12 Rendement d'un capteur

$$\eta = \eta_0 - \frac{K \cdot (T_p - T_a)}{E_g} \quad 41$$

2.2.13 Quantité de chaleur

$$Q_s = \eta \cdot A \cdot E_g \quad 42$$

2.3 Modélisation d'un capteur géothermique

2.3.1 Détermination de la température à la surface de sol

La modélisation des fluctuations de température à la surface du sol à l'aide du modèle de M.S. Guellouz et al[22] est donnée par la relation suivant :

$$T(t) = T_{moy} + A \cdot \cos[\omega \cdot (t - t_0)] \quad 43$$

Où :

ω : Fréquence angulaire égale à 0.0172 rad/jour, ce qui correspond à une période de 365 jours.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{\tau_s} \quad \text{Avec : } \tau_s = 365 \text{ alors } \omega = 0.0172 [\text{rad} / \text{jour}]$$

T_{moy} : Température moyenne annuelle.

A : Amplitude de la variation de température

$$A = \frac{(T_{s.\max} - T_{s.\min})}{2} \quad 44$$

t_0 : Jour de l'année où la température maximale

t : Jour où on demande de mesurer la température

2.3.2 Détermination de la température du sol à une profondeur donnée

$$T(z, t) = T_{moy} + A \cdot e^{\left(\frac{-z}{d}\right)} \cdot \cos\left[\omega \cdot (t - t_0) - \frac{z}{d}\right] \quad 45$$

Où :

z : Profondeur en dessous de la surface du sol

d : Profondeur de pénétration (m) de l'onde de chaleur dans le sol donnée par la relation suivante :

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot a_{sol}}{\omega}} \quad 46$$

a_{sol} : Diffusivité thermique de sol [m^2/s] calculé par la relation suivante :

$$a_{sol} = \frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol} \cdot C_{p.sol}} \quad 47$$

λ_{sol} : Conductivité thermique de sol [$W/m \cdot ^\circ C$]

ρ_{sol} : Masse volumique de sol [Kg/m^3]

$C_{p.sol}$: la chaleur spécifique de sol [$J/kg \cdot ^\circ C$]

2.3.3 La méthode calculant la résistance thermique du sol

2.3.4 Longueur de capteur géothermique

$$L = (\dot{m}_e \cdot C_{p.e} \cdot R_t) \cdot \ln \left[\frac{T_{e.e} - T_s}{T_{e.s} - T_s} \right] \quad 48$$

\dot{m}_e : Le débit de l'eau à l'intérieur de l'échangeur [Kg/s]

$C_{p.e}$: La chaleur spécifique de l'eau [$J/kg \cdot ^\circ C$]

R_t : la résistance totale [$m^2 \cdot K/W$]

$T_{e.e}$: La température d'entrée de l'eau [$^\circ C$]

$T_{e.s}$: La température de sortie de l'eau [$^\circ C$]

T_s : La température du sol [$^\circ C$]

2.3.5 Calcul du débit de l'eau

$$\dot{m}_e = \frac{Q}{C_{pe} \cdot (T_{es} - T_{ee})} \quad 49$$

Où :

Q : La puissance thermique de la maison [W]

2.3.6 Calcul de la résistance totale

$$R_t = R_{fluide} + R_{tube} + R_{sol} \quad 50$$

Avec :

$$R_{fluide} = \frac{1}{\pi \cdot D_{int} \cdot h} \quad 51$$

D_{int} : Le diamètre intérieur de la conduite de capteur géothermique[m]

h : Coefficient de transfert de chaleur

$$R_{tube} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{tube}} \quad 52$$

Avec :

D_{ext} : Le diamètre extérieur de la conduite de capteur géothermique

D_{int} : Le diamètre intérieur de la conduite de capteur géothermique

λ_{tube} : La conductivité thermique de conduite

$$R_{sol} = \frac{1}{S \cdot \lambda_{sol}} \quad 53$$

Avec :

S : La surface d'un capteur géothermique

2.3.7 Détermination du coefficient de transfert de chaleur

$$h = \frac{N_u \cdot \lambda_e}{D_{int}} \quad 54$$

Où :

λ_e : La conductivité thermique d'eau (w/m.k).

N_u : Nombre de Nusselt

$$Nu = 0.023 \cdot \left(\frac{\rho_e \cdot v_e \cdot D_{int}}{\mu_e} \right)^{0.8} \cdot (Pr)^{0.3} \quad 55$$

μ_e : La viscosité dynamique d'eau (kg/m.s).

v_e : La vitesse de l'eau

$$v_e = \frac{4 \cdot \dot{m}_e}{\rho_e \cdot \pi \cdot D_{int}} \quad 56$$

Pr : Nombre de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu_e \cdot C_{p,e}}{\lambda_e} \quad 57$$

2.3.8 La surface d'un capteur géothermique

$$S = \frac{2 \cdot \pi}{Ln \left[\frac{2 \cdot z}{D_{ext}} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot z}{D_{ext}} \right)^2 - 1} \right]} \quad 58$$

2.4 Etablissement du bilan énergétique du cycle

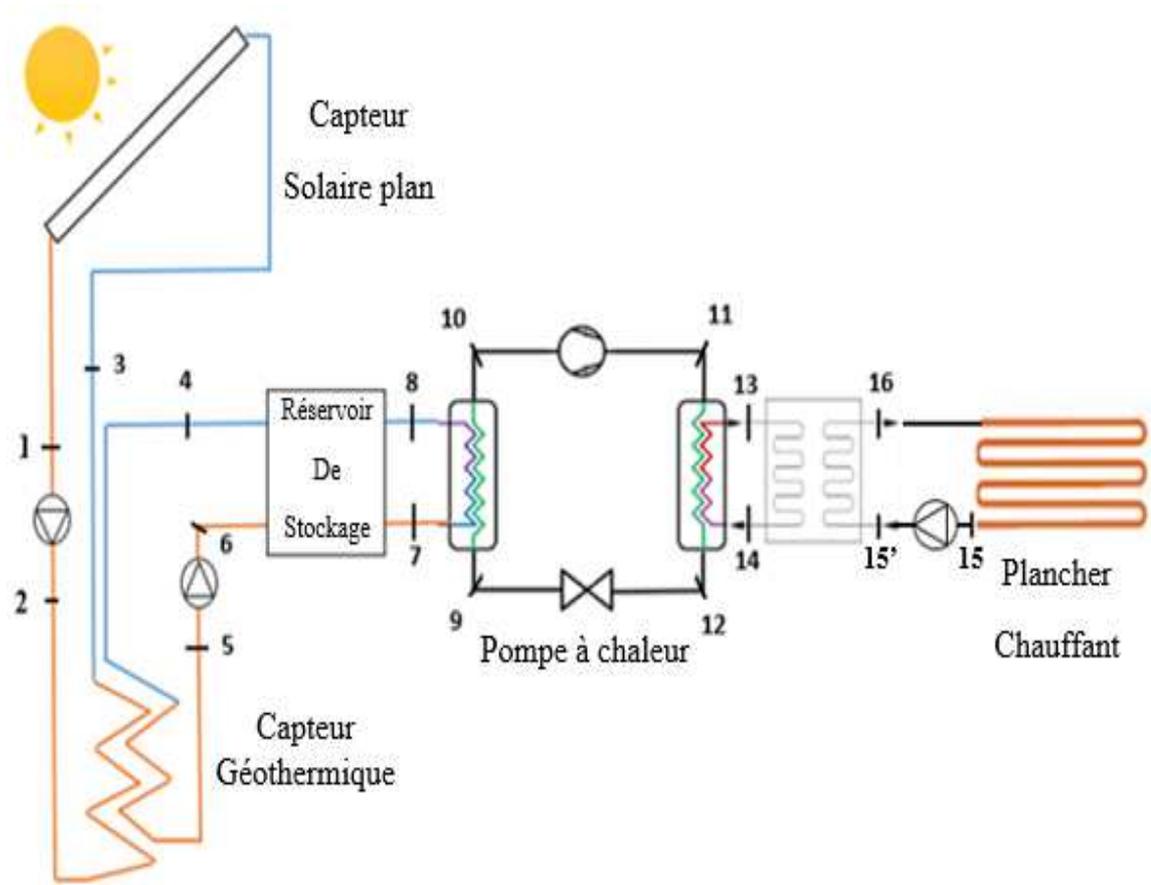


Fig.17 - schéma principal du fonctionnement d'un système de chauffage

2.4.1 La pompe à chaleur

2.4.1.1 Bilan énergétique d'évaporateur

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_9 = \dot{m}_{réf} \quad 59$$

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{m}_{réf} \cdot (h_{10} - h_9) \quad 60$$

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{m}_{f.st} \cdot C_{p_{f.st}} \cdot (T_7 - T_8) \quad 61$$

2.4.1.2 Bilan énergétique du compresseur

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{réf} \quad 62$$

$$\dot{W}_{com} = \frac{\dot{m}_{réf} \cdot (h_{11} - h_{10})}{\eta_{isent}} \quad 63$$

2.4.1.3 Bilan énergétique du condenseur

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{réf} \quad 64$$

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} = \dot{m}_e \quad 65$$

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_{réf} \cdot (h_{12} - h_{11}) \quad 66$$

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_e \cdot Cp_e \cdot (T_{13} - T_{14}) \quad 67$$

2.4.1.4 Bilan énergétique du detendeur

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{réf} \quad 68$$

$$h_{12} = h_9 \quad 69$$

2.4.1.5 Bilan global de la pompe à chaleur

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{réf} \quad 70$$

$$\dot{Q}_{con} = \dot{W}_{com} + \dot{Q}_{evp} \quad 71$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{W}_{com}} \quad 72$$

2.4.2 Bilan énergétique du capteur solaire

$$\dot{Q}_u + \dot{Q}_{pert} - \dot{Q}_{abs} = 0 \quad 73$$

$$\dot{Q}_{abs} = I \cdot (\alpha \cdot \tau) \cdot A_c \quad 74$$

$$\dot{Q}_{pert} = A_c \cdot K_{cap} \cdot (T_p - T_{amb}) \quad 75$$

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{pert} \quad 76$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_e \cdot Cp_e \cdot (T_1 - T_3) \quad 77$$

2.4.3 Bilan énergétique du capteur géothermique

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_e \quad 78$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_e \cdot Cp_e \cdot (T_6 - T_4) \quad 79$$

$$\varepsilon = \frac{T_{e.s} - T_{e.e}}{T_{sol} - T_{e.e}} \quad 80$$

$$T_{e,s} = (T_{sol} - T_{ee}) e^{\frac{-\lambda.L}{\dot{m}_e.Cp_e}} + T_{sol} \quad 81$$

2.4.4 Bilan énergétique d'un reservoir de stockage

$$\dot{Q}_{pert} = A_c . K_{resv} . (T_{resv} - T_{amb}) \quad 82$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_e . Cp_e . (T_6 - T_4) \quad 83$$

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{m}_{ref} . (h_{10} - h_9) \quad 84$$

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{Q}_g - \dot{Q}_{pert} \quad 85$$

2.4.5 Bilan énergétique des pompes

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad 86$$

$$\dot{W}_{p1} = \dot{m}_1 . (h_2 - h_1) \quad 87$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad 88$$

$$\dot{W}_{p2} = \dot{m}_5 . (h_6 - h_5) \quad 89$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{15'} \quad 90$$

$$\dot{W}_{p3} = \dot{m}_{15'} . (h_{15'} - h_{15}) \quad 91$$

2.4.6 Efficacité de l'échangeur de chaleur

$$\mathcal{E} = \frac{T_{13} - T_{14}}{T_{13} - T_{15'}} \quad 92$$

2.4.7 Coefficient de performance du système

Le coefficient de performance globale du système de chauffage (COP_{sys}), qui est le rapport de la puissance du condenseur au total des consommations du travail du compresseur et les pompes de la circulation, donné par la relation suivante :

$$COP_{sys} = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{W}_{com} + \sum \dot{W}_p} \quad 93$$

2.4.8 Rendement caractéristique

On définit un autre paramètre qui est le rapport de deux sources renouvelables sur la puissance de condensation est donner par les relations suivantes :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_g}{\dot{Q}_{con}} \quad 94$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_{con}} \quad 95$$

Conclusion

Dans ce chapitre on a effectué unemodélisation mathématique d'une pompe à chaleur et déterminer leur COP, et présente la méthode empirique de Perrin Brechambaut pour calculer l'éclairement solaire global, le rendement d'un capteur solaire, en suite une modélisation des fluctuations de température du sol, et d'un capteur géothermique, en fin l'établissement du bilan global du cycle.

Chapitre 3

Résultats et

Discussions

Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'étude de cas, avec un calcul détaillé sur le bilan thermique d'un maison F3, ainsi qu'une présentation et discussions sur différents résultats obtenus dans ce travail.

3.1 Etude de cas déperdition thermique

L'appartement étudié est situé au rez-de-chaussée. Cet appartement a une superficie de 68,66 m², avec deux chambres, séjour, hall, cuisine et cour.

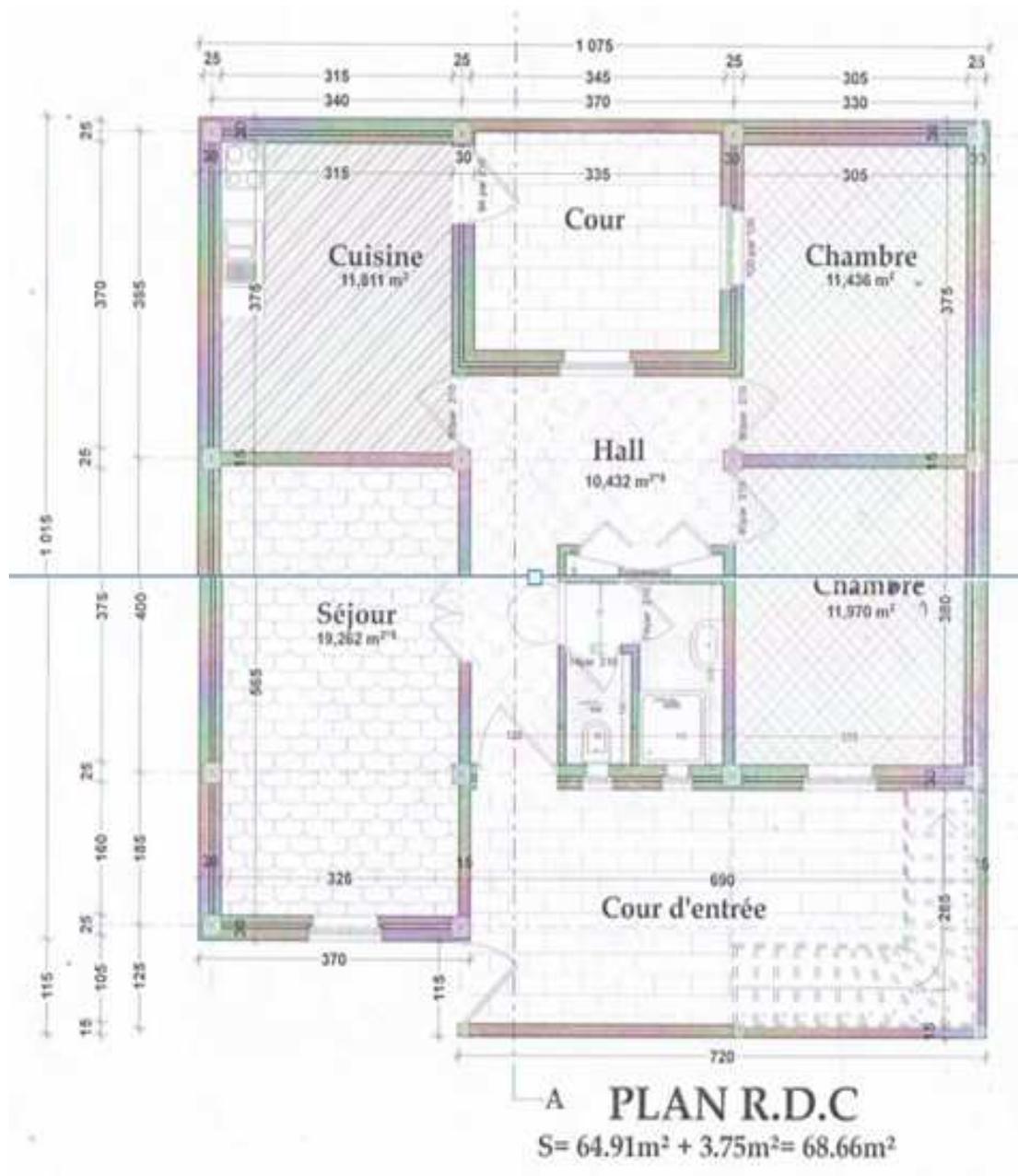


Fig.18 - Plan d'un maison F3

Tableau 2 - matériaux de construction des murs extérieurs

Compositions	e [m]	λ [W/m. °C]
Enduit de plâtre	0.015	0.35
Brique creuse	0.15	0.55
Lame d'air	0.05	0.025
Brique creuse	0.10	0.55
Mortier en ciment	0.015	1.15

Tableau 3 - matériaux de construction plafond (toiture)

Compositions	e [m]	λ [W/m. °C]
Gravillon roulé	0.020	1.050
Multicouche	0.010	0.017
Forme de pente	0.030	1.150
Dalle de béton	0.040	1.750
Corps creux	0.160	1.720
Enduit en plâtre	0.015	0.350

Tableau 4 - matériaux de construction plancher bas (sol)

Compositions	e [m]	λ [W/m. °C]
Carrelage	0.02	1.05
Mortier de pose	0.02	1.15
Béton	0.16	1.75
Pierre dure	0.10	2.40
Sol compacte	0.05	0.101

Ouvertures

Les fenêtres (métalliques) : $K = 5.8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Les portes (bois) : $K = 5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Tableau 5 - Valeurs des résistances superficielles

Indication des parois et sens du flux	Parois extérieures			Parois intérieure		
	$\frac{1}{h_i}$	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i}$	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$
Parois vertical	0.11	0.06	0.17	0.12	0.12	0.24
Parois horizontales Flux ascendant (toit)	0.09	0.05	0.14	0.10	0.10	0.20
Parois horizontales Flux descendant (sol)	0.17	0.05	0.22	0.17	0.17	0.34

3.2 Organigramme

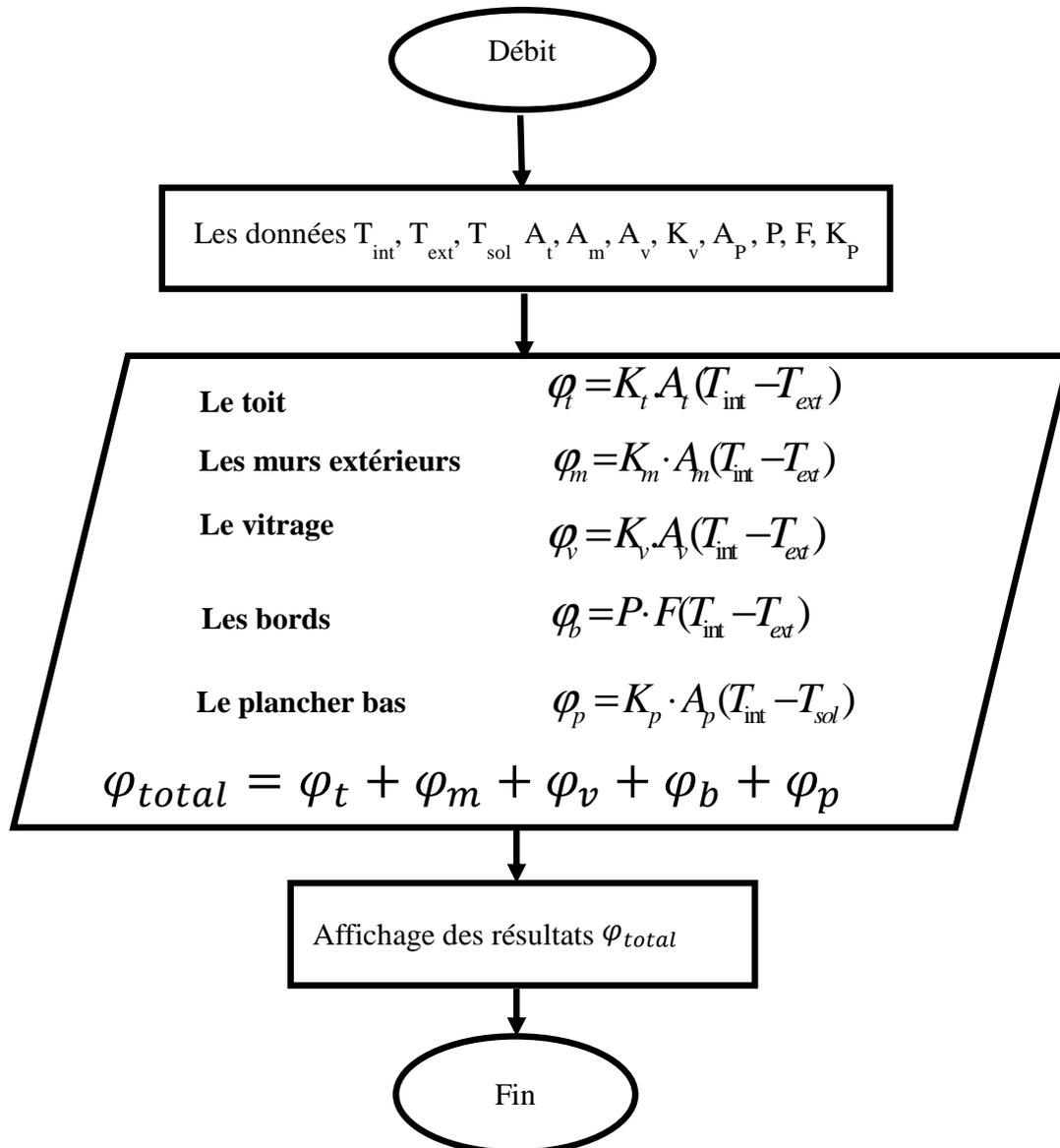


Fig.19 - Organigramme du calcul des pertitions thermique totale.

3.3 Le bilan thermique de la maison

La méthode de calcul du bilan thermique global de la maison est trouvée dans l'annexe (02).

3.3.1 Chambre 01

3.3.1.1 Déperditions calorifiques par le toit

$$K_t = 1,1 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$A_t = 11,970 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{int}} = 20 \text{ °C} \quad T_{\text{ext}} = 4 \text{ °C}$$

$$\varphi_t = 1,1 \cdot 11,97 \cdot (20 - 4)$$

$$\varphi_t = 210,672 \text{ w}$$

3.3.1.2 Déperdition calorifique à travers les murs extérieurs

$$K_m = 0,37 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$A_{m1} = 11,4 \text{ m}^2$$

$$A_{m2} = 8,45 \text{ m}^2$$

$$\varphi_m = (11,4 + 8,45) \cdot 0,37 \cdot 16 = 117,51 \text{ W}$$

3.3.1.3 Déperdition à travers le vitrage

$$A_v = 1 \text{ m}^2$$

$$K_v = 5,8 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$\varphi_v = 92,8 \text{ W}$$

3.3.1.4 Déperdition par les bords

$$P = 3,80 + 3,15 = 6,95 \text{ m}$$

$$F = 0,2$$

$$\varphi_b = 22,24 \text{ W}$$

3.3.1.5 Déperditions par le plancher bas

$$K_p = 1,16 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$A_p = 11,970 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{int}} = 20 \text{ °C} \quad T_{\text{sol}} = 10 \text{ °C}$$

$$\varphi_p = 138,852 \text{ W}$$

3.3.1.6 Déperditions totales de la chambre 01

$$\varphi_{\text{chambre1}} = 582,07 \text{ W}$$

3.3.2 Chambre 02

3.3.2 .1 Déperditions par le toit

$$A_t = 11,436 \text{ m}^2$$

$$K_t = 1,1 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{ °C]}$$

$$\varphi_t = 201,27 \text{ W}$$

3.3.2 .2Déperdition calorifique à travers les murs extérieurs

$$K_m = 0,37 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{ °C]}$$

$$A_{m1} = 11,25 \text{ m}^2$$

$$A_{m2} = 9,15 \text{ m}^2$$

$$A_{m3} = (2,85 \cdot 3) - 1 = 7,55 \text{ m}^2$$

$$\varphi_m = 165,46 \text{ W}$$

3.3.2.3Déperdition à travers le vitrage

$$A_v = 1 \text{ m}^2$$

$$K_v = 5,8 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{ °C]}$$

$$\varphi_v = 92,8 \text{ W}$$

3.3.2.4 Déperdition par les bords

$$P = 3,75 + 3,05 + 2,85 = 9,65 \text{ m}$$

$$F = 0,2$$

$$\varphi_b = 30,88 \text{ W}$$

3.3.2.5Déperditions par le plancher bas

$$K_p = 1,16 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{ °C]}$$

$$A_p = 11,436 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{int}} = 20 \text{ °C} \quad T_{\text{sol}} = 10 \text{ °C}$$

$$\varphi_p = 132,65 \text{ W}$$

3.3.2.6 Déperditions totales de la chambre 02

$$\varphi_{\text{chambre2}} = 623,06 \text{ W}$$

3.3.3 Hall

3.3.3.1 Déperditions par le toit

$$A_t = 10,432 \text{ m}^2$$

$$K_t = 1,1 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$\varphi_t = 183,60 \text{ W}$$

3.3.3.2 Déperdition calorifique à travers les murs extérieurs

$$K_m = 0,37 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$A_m = (3,70 \cdot 3) - 1 = 10,1 \text{ m}^2$$

$$\varphi_m = 59,79 \text{ W}$$

3.3.3.3 Déperdition à travers le vitrage

$$A_{\text{fe}} = 1 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{por}} = 1,2 \cdot 3 = 3,6 \text{ m}^2$$

$$K_{\text{fe}} = 5,8 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$K_{\text{po}} = 5 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$\varphi_v = 92,8 + 288 = 380,8 \text{ W}$$

3.3.3.4 Déperdition par les bords

$$P = 3,70 \text{ m}$$

$$F = 0,2$$

$$\varphi_b = 3,70 \cdot 0,2 \cdot 16 = 11,84 \text{ W}$$

3.3.3.5 Déperditions par le plancher bas

$$K_p = 1,16 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$A_p = 10,432 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{int}} = 20 \text{ °C} \quad T_{\text{sol}} = 10 \text{ °C}$$

$$\varphi_p = 121,01 \text{ W}$$

3.3.3.6 Déperditions totales de Hall

$$\varphi_{\text{Hall}} = 757,04 \text{ W}$$

3.3.4 Séjour

3.3.4.1 Déperditions par le toit

$$A_t = 19,262 \text{ m}^2$$

$$K_t = 1,1 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$\varphi_t = 339,01 \text{ W}$$

3.3.4.2 Déperdition calorifique à travers les murs extérieurs

$$K_m = 0,37 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$A_{m1} = 16,95 \text{ m}^2$$

$$A_{m2} = 8,75 \text{ m}^2$$

$$A_{m3} = 7,55 \text{ m}^2$$

$$K_{m3} = 1,78 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$\varphi_m = 152,14 + 158,06 = 310,2 \text{ W}$$

3.3.4.3 Déperdition à travers le vitrage

$$A_v = 1 \text{ m}^2$$

$$K_v = 5,8 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$\varphi_v = 92,8 \text{ W}$$

3.3.4.4 Déperdition par les bords

$$P = 5,65 + 3,25 + 1,85 = 10,75 \text{ m}$$

$$F = 0,2$$

$$\varphi_b = 34,4 \text{ W}$$

3.3.4.5 Déperditions par le plancher bas

$$K_p = 1,16 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

$$A_p = 19,262 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{int}} = 20 \text{ °C} \quad T_{\text{sol}} = 10 \text{ °C}$$

$$\varphi_p = 223,43 \text{ W}$$

3.3.4.6 Déperditions totales de séjour

$$\varphi_{\text{Séjour}} = 993,84 \text{ W}$$

La puissance totale de la maison

$$\varphi_{\text{maison}} = 2956,01 \text{ W}$$

3.4 Résultats et discussions

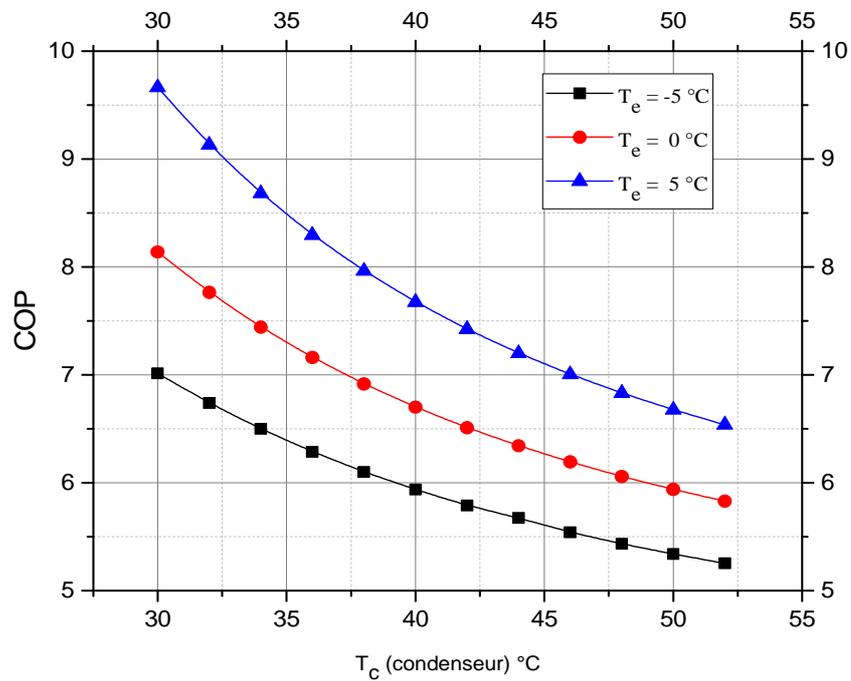


Fig.20 -Variation de $\text{COP}_{\text{réel}}$ d'une pompe à chaleur en fonction de T de condenseur

La figure 19 représente une variation du COP en fonction de la température de condensation T_c , pour différentes valeurs de la température évaporateur T_e (-5, 0, 5 °C). On constate que le COP décroît avec l'augmentation de T_c cette diminution de COP est justifié par l'élévation de la haute pression.

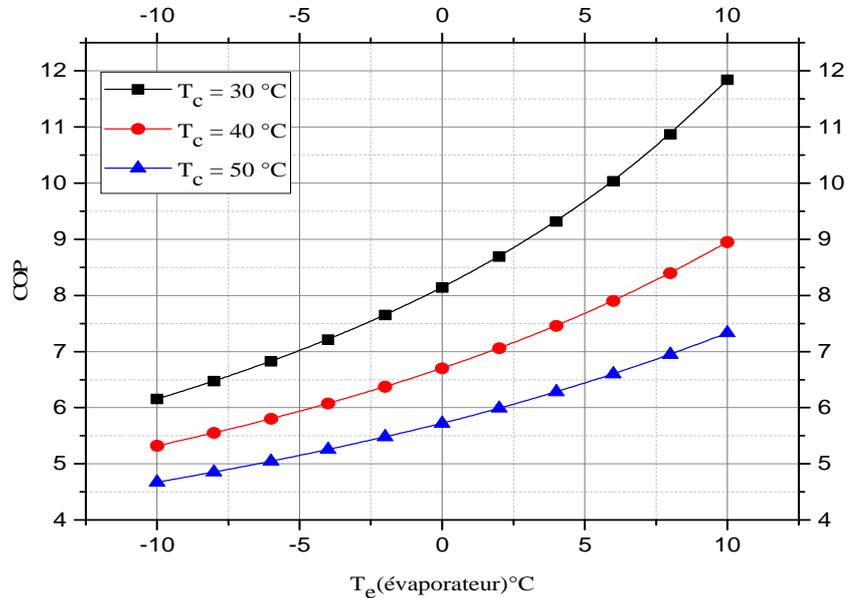


Fig.21 -Variation de $COP_{réel}$ d'une pompe à chaleur en fonction de Température d'évaporateur

La figure 20 montre la variation du COP en fonction de la température T_e pour différentes valeurs de la température de condenseur T_c (30, 40 et 50 °C). La croissance de Température d'évaporateur fait augmenter le COP, cette augmentation est expliquée par l'élévation de la basse pression.

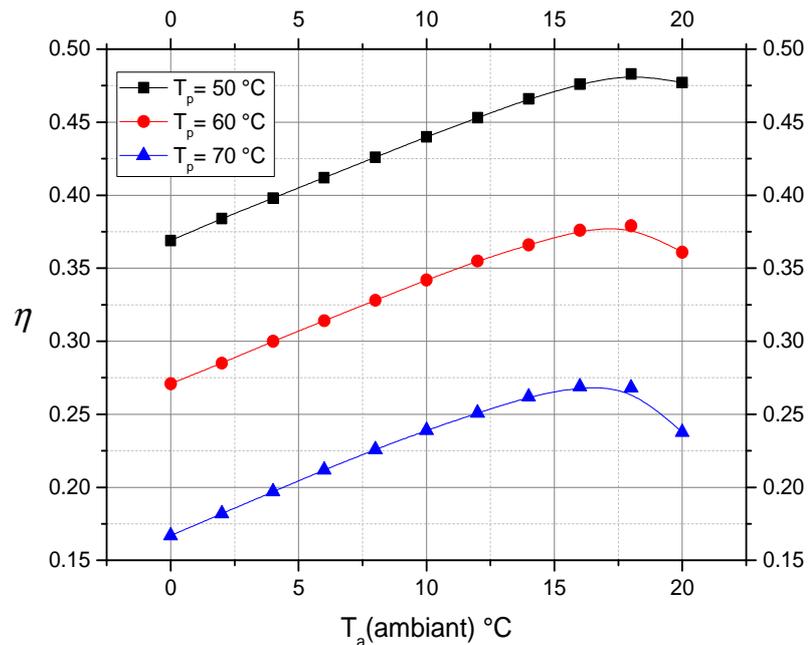


Fig.22 -Variation du rendement d'un capteur solaire plan en fonction de $T_{ambiant}$

La figure 21 présente la variation du rendement du capteur solaire plan en fonction de la température ambiante, on constate que l'augmentation de T_a faite augmenté le rendement de capteur, par contre on remarque que la croissant de température de parois absorbant faite diminué le rendement.

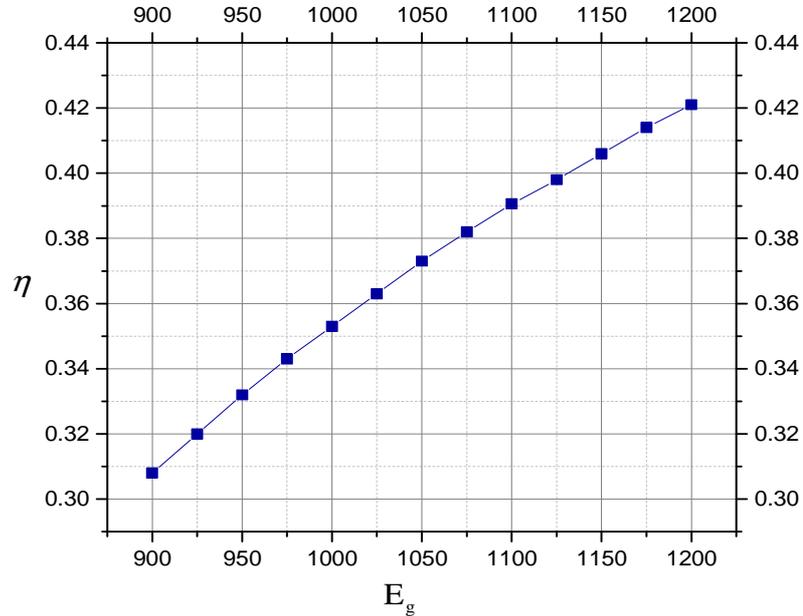


Fig.23 -Variation du rendement d'un capteur solaire plan en fonction de l'éclairement global solaire

La figure 22montre la variation de rendement d'un capteur solaire plan en fonction de l'éclairement global solaire. On remarque que l'accroissement du rendement est proportionnel avec l'augmentation de l'éclairement solaire global E_g .

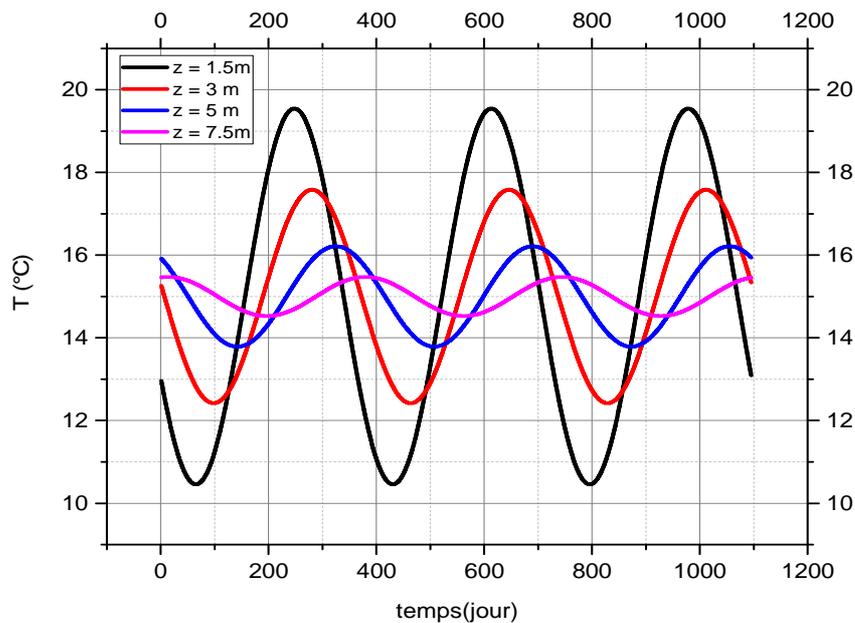


Fig. 24 – variation de température de sol en fonction temps pour différentes profondeurs.

La figure 23 montre la variation de la température du sol en fonction des jours de l'année pour différentes profondeurs. Il est clair que la température du sol suit une variation sinusoïdale. On constate qu'en pénétrant au sol la température diminue. La température du sol n'a plus la forme d'une sinusoïde et se stabilise autour d'une certaine valeur pour des valeurs plus élevées de profondeur.

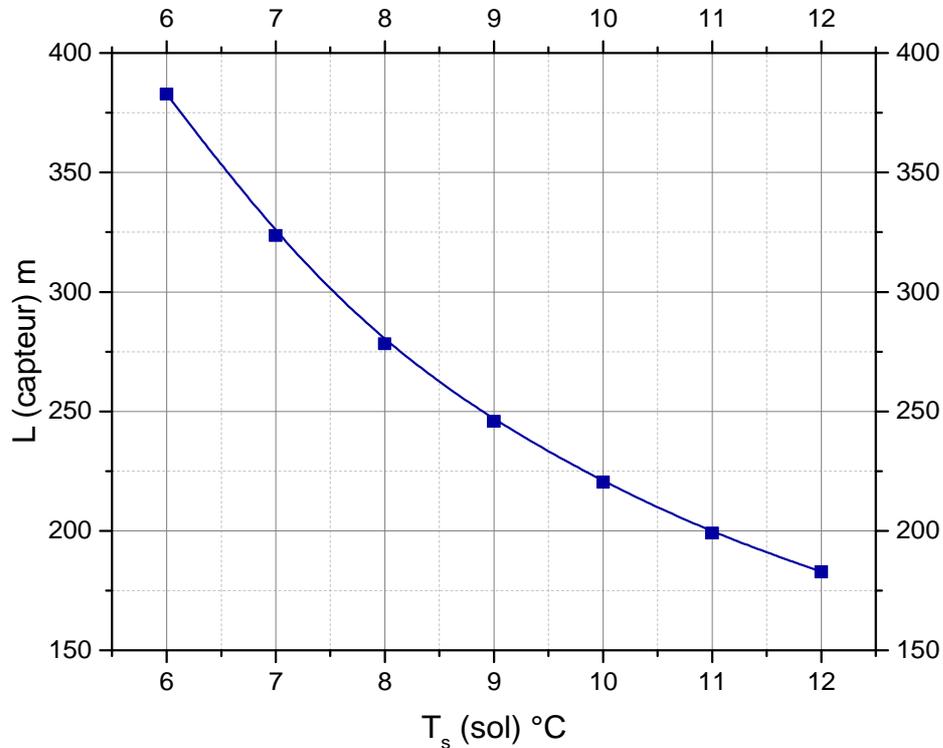


Fig. 25 – variation de la longueur de capteur en fonction de température de sol

La figure 24 représente la variation de la longueur du capteur géothermique en fonction de la variation de la température du sol. On remarque que l'augmentation de la température de sol fait diminuer la longueur de la tuyauterie de capteur.

Lorsque la température du sol est élevée, cela signifie qu'il contient une enthalpie plus importante, donc l'extraction de la chaleur demande un échangeur de chaleur de surface réduit.

Pour voir l'influence de la puissance produite par le capteur solaire sur la charge totale de chauffage, deux périodes sont choisies pour le calcul, estivale (20 juin) et hivernale (17 janvier).

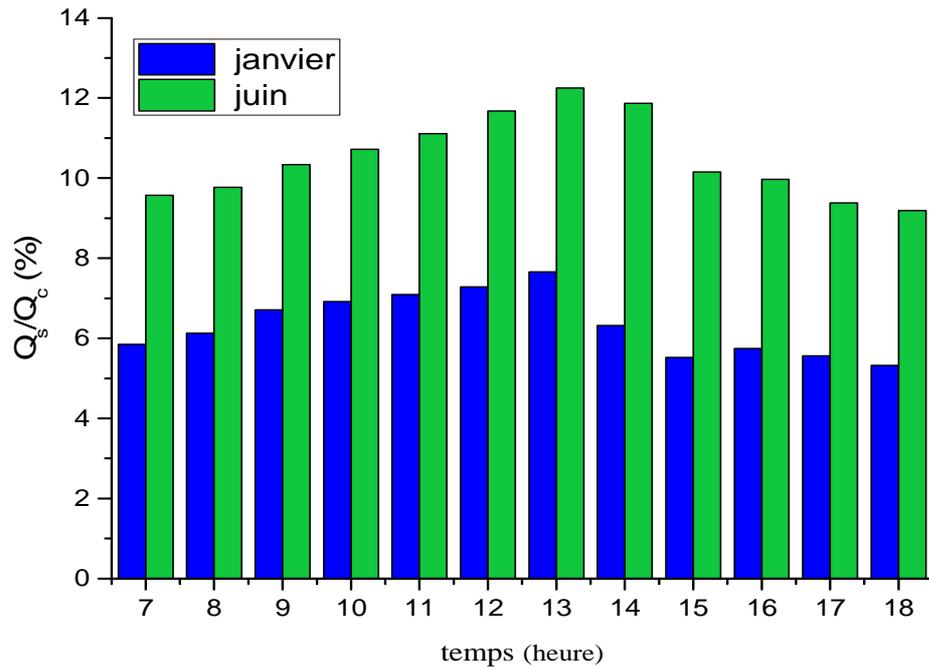


Fig.26 - Variation du rendement caractéristique solaire en fonction du temps.

La figure 25 montre que le rendement caractéristique est une fonction gaussienne avec la variation du temps, due aux puissances captées par le capteur, on remarque que le système puise une moyenne de 10,48% pour la période estivale et 6,34% pour la période hivernale.

Pour voir l'influence de la puissance extrait du capteur géothermique sur la charge totale du chauffage, des jours sont choisies pendant l'année pour le calcul.

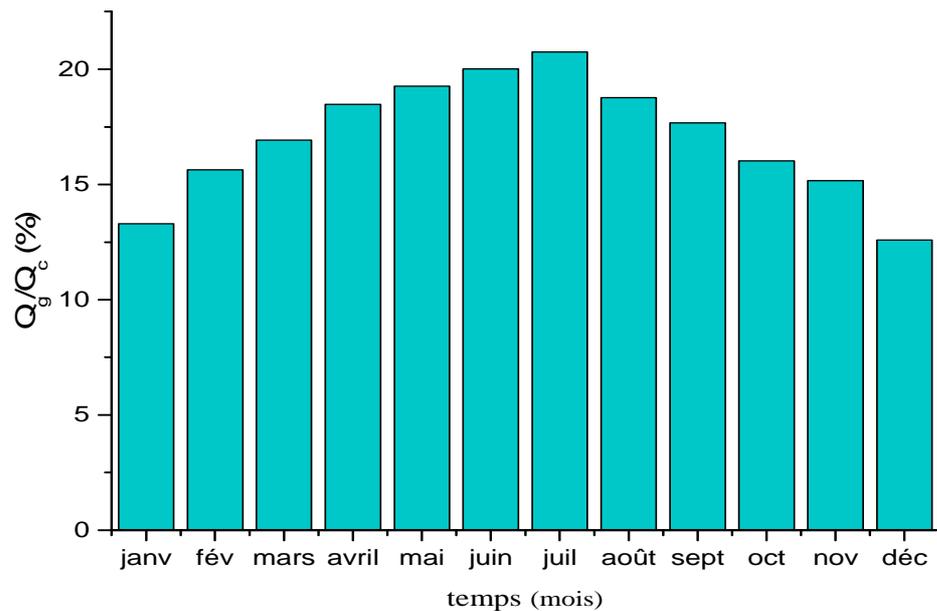


Fig.27 - la variation du rendement caractéristique géothermique en fonction du temps.

La figure 26 illustre la variation du rendement caractéristique géothermique en fonction du temps (mois), on remarque que la variation est une fonction gaussienne avec les différentes périodes due à la puissance extrait du sol, on remarque que le système accorde avec un taux de 17,04 % pendant l'année.

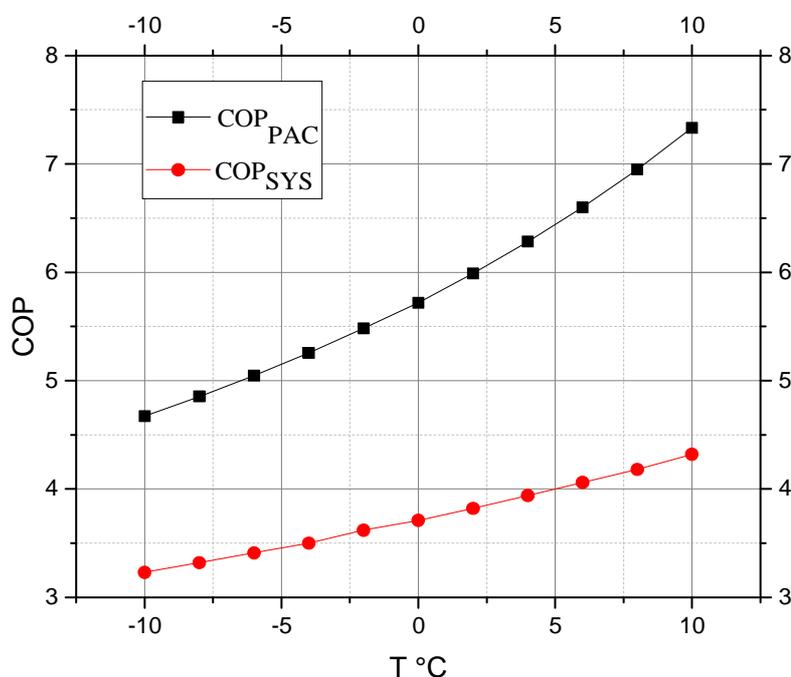


Fig 28 – variation du COP_{PAC} et COP_{sys} en fonction du temperature

La figure 27 illustre la variation du coefficient de performance de la pompe à chaleur et du système en fonction de la température. On remarque l'accroissement de COP_{PAC} et COP_{sys} est proportionnel avec l'augmentation de la température, et l'un avec l'autre. Ainsi que COP_{PAC} allant de 4 à 7, et 3 jusqu'à 4 pour le COP_{sys}.

Conclusion

Les résultats montrent que le coefficient de performance croît avec l'augmentation de la température de l'évaporateur et diminue avec l'augmentation de la température du condenseur. Le croisement global d'irradiation solaire fait augmenter le rendement d'un capteur solaire plan, l'augmentation de la température du sol diminue la longueur du capteur géothermique, les rendements caractéristiques solaire et géothermique estimés à 6,35 % et 17,04 % respectivement.

Conclusion générale

Dans ce présent travail, les performances thermique d'un système de chauffage domestique par une pompe à chaleur géothermique (eau/sol) assistée par énergie solaire ont été analysées et simulées pour un appartement F3 à la localité de Tissemsilt. Les performances du système sont obtenues principalement de l'épuisement de la chaleur du sol via l'échangeur de chaleur enfoui dans le sol, et puisque on puise les calories d'une façon continue à partir du sol, cela va diminuer la température du sol autour du capteur d'où la genèse du gel et la possibilité de destruction du capteur, la déformation du sol...etc.

En effet, l'intégration d'un réseau de tuyauterie dans le sol chauffé par un capteur solaire, intercalant le réseau de tuyauterie du capteur géothermique est la solution proposée pour remédier à cet inconvénient. De plus, ces systèmes devraient permettre de répondre aux besoins de chauffage, tout en assurant un niveau de confort satisfaisant et une utilisation en toutes circonstances.

A l'issue du travail effectué, les conclusions suivantes peuvent être établies :

- L'élaboration d'un code de calcul qui permet de déterminer les performances thermodynamiques du système en question tel que le capteur géothermique, le capteur solaire plan et la pompe à chaleur ;
- L'augmentation de la surface du panneau solaire favorise l'amélioration des performances de la pompe à chaleur, mais provoque la diminution de l'efficacité du capteur, donc un compromis doit être maintenue entre la surface de captage et le volume de stockage ;
- Un coefficient de performance saisonnier supérieur à 3 et des rendements caractéristiques solaire et géothermique estimé à 6,35 % et 17,04 % respectivement, montrent que ces systèmes peuvent économiser de l'énergie conventionnelle et peut être compétitifs avec les systèmes de chauffage traditionnel ;
- Le coefficient de performance de la pompe à chaleur est proportionnel à la croissance de la température d'évaporation et inversement proportionnel à la décroissance de la température de condensation ;
- L'augmentation de la température du sol provoque une diminution de la longueur du capteur géothermique.
- Pour ce type d'application, les capteurs solaires thermiques pourraient contribuer à réduire la surface occupée par le capteur géothermique et donc le coût d'investissement tout en garantissant la régénération de la température du sol.

En perspectives, il serait intéressant de poursuivre ce travail sur les axes suivants :

- Utilisation des cellules photovoltaïques pour alimenter le compresseur.
- Réalisation du système de chauffage hybride.
- Utilisation d'autres configurations de système couplant capteur solaire et pompes à chaleur.

Enfin, nous souhaitons que cette étude soit un outil de travail utile pour les futures promotions.

Bibliographie

- [1] <http://energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps>, Date de la dernière consultation du site 15/05/2016 ;
- [2] lagéothermie une source d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement, syndicat des énergies renouvelables sur site
http://www.enr.fr/userfiles/files/Kit%20de%20communication/2010104945_SERGothermie20100607LD.pdf,
 Date de la dernière consultation du site 30/05/2016 ;
- [3] <http://www.mem-algeria.org/fr/enr/pot.htm>, Date de la dernière consultation du site 08/05/2016 ;
- [4] Diaf, S., 2014. R & D dans le domaine des énergies renouvelables en Algérie, Centre de Développement des Energies Renouvelables pg18 ;
- [5] Hoceini, G. dimensionnement d'un système de chauffage par pompe à chaleur géothermique mémoire de master, Université de Bechar 2012
- [6] Desmons, j., 2012. Aide-mémoire Génie climatique 4^{ème} édition, page 259- 264 ;
- [7] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarGIS-Solar-map-Algeria-en.png> consulté le 12/05/2016
- [8] Eric, W., Lemmon, Mark, O., McLinden, Steven, G., Penoncello, 2011. Solar Energy Use, chapter 35, in: ASHRAE Handbook HVAC Applications, pp. 497 - 526;
- [9] Valentin, T., Bernard. S., Gilbert. A., 2006. Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors, Applied Thermal Engineering 1750 – 1755;
- [10] Farzin, M., Alan, S., Wey, L., 2009. COMBINED SOLAR THERMAL AND GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM, Building Simulation July 27-30, 2009;
- [11] Wonseok, K., Jongmin, C., Honghyun, C., 2012. Performance analysis of hybrid solar-geothermal CO2 heat pump system for residential heating, Renewable Energy 50 (2013) 596– 604;
- [12] Marco, A., Luca. X., Matteo, R., Ennio, M., 2010. Technical and economic analysis of a solar-geothermal hybrid plant based on an Organic Rankine Cycle, Geothermics 40 (2011) 58–68;
- [13] Cheng, Z., Elham, D., Behdad, M., 2013. An in-depth assessment of hybrid solar-geothermal power generation, Energy Conversion and Management 74 (2013) 88–101;
- [14] Hanne, A., Yong, L., 2015. Modelling the heating of the Green Energy Lab in Shanghai by the geothermal heat pump combined with the solar thermal energy and ground energy storage, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Energy Procedia 70 (2015) 155 – 162;
- [15] Duccio, T., Giampaolo, M., Daniele, F., 2012. Thermodynamic analysis of two micro CHP systems operating with geothermal and solar energy, Applied Energy 97 (2012) 609–617;
- [16] Giuseppe, E., Angelo, Z., Michele, C., Antonio, G., 2015. Solar Assisted Ground Source Heat Pump in Cold Climates, Energy Procedia 82 (2015) 623 – 629;

- [17] Craig, T., Guandong, Z., Micheal, W., Tom, W., Daniel, W., 2014. Geothermal/ Solar Hybrid Designs: Use of Geothermal Energy for CSP Feed Water Heating, Geothermal Resources Council Annual Meeting October 2014;
- [18] Duccio, T., Daniele, F., 2013. Thermo-economic assessment of a micro CHP system fuelled by geothermal and solar energy, *Energy* 58 (2013) 45 – 51;
- [19] Onder, O., Arif, H., 2005. Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study, *Building and Environment* 40 (2005) 1040–1050;
- [20] Diaf, D., Malek, A., 2007. Simulation des propriétés thermodynamiques du fluide R134a, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°1 (2007) 101 – 108 ;
- [21] Bekkouche, S., Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, mémoire Doctorat en Physique l'université abou-bakr belkaïd – Tlemcen
- [22] Guellouz, M.S., Arfaoui, G., 2008. Potentiel de la géothermie de surface pour le chauffage et la climatisation en Tunisie, *Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse* (2008) 143 – 151 ;

Liste des figures

Fig.1 -Système d'échange avec la nappe à boucle fermée.....	12
Fig.2 -Système d'échange avec la nappe à boucles ouverte.....	13
Fig.3 -Capteur géothermique horizontal.....	14
Fig.4 -Sondes géothermiques verticales.	14
Fig.5 -Potentiel de l'énergie géothermique en Algérie	15
Fig.6 -schéma du circuit interne d'une pompe à chaleur.....	16
Fig.7 -Diagramme de Mollier (P-h) d'une pompe à chaleur	17
Fig.8 -Schéma de principe d'une pompe à chaleur air / air réversible.	18
Fig.9 -Schéma de principe d'une pompe à chaleur réversible eau/air.	19
Fig. 10 -Schéma de principe d'une pompe à chaleur réversible sol/air.	20
Fig.11 -Schéma de principe d'une pompe à chaleur eau/eau réversible.....	20
Fig.12 -Schéma de principe d'une installation sol/eau.....	21
Fig.13 -globale irradiation horizontale en Algérie	22
Fig.14 -capteur solaire plan	23
Fig.15 -Système de chauffage hybride solaire – géothermique.....	27
Fig.16 -Diagramme enthalpie du cycle réel d'une PAC.....	30
Fig.17 -schema principale du fonctionnement d'un système de chauffage.....	40
Fig.18 -plan d'un maison F3	45
Fig.19 - Organigramme du calcul des pertitions thermique totale.....	47
Fig.20 -Variation de COP d'une pompe à chaleur en fonction de T de condenseur.....	52
Fig.21 -Variation de COP d'une pompe à chaleur en fonction de Température d'évaporateur	53
Fig.22 -Variation du rendement d'un capteur solaire plan en fonction de T ambiant	53
Fig.23 -Variation du rendement d'un capteur solaire plan en fonction de l'éclairement global solaire	54

Fig. 24 – variation de température de sol en fonction temps pour différentes profondeurs.....	54
Fig. 25 – variation de la longueur de capteur en fonction de température de sol.....	55
Fig.26 - Variation du rendement caractéristique solaire en fonction du temps.....	56
Fig.27 - la variation du rendement caractéristique géothermique en fonction du temps.	56
Fig 28 – variation du COP_{PAC} et COP_{sys} en fonction du temperature	57

Liste des tableaux

Tableau 1 - Puissances disponibles en fonction de la nature de sol.....	21
Tableau 2 - matériaux de construction les murs extérieurs.....	46
Tableau 3 - matériaux de construction plafond (toiture).....	46
Tableau 4 - matériaux de construction plancher bas (sol).....	46
Tableau 5 - Valeurs des résistances superficielles.....	47

Annexe 01

Les propriétés thermodynamiques du fluide R-134a D. Diaf et A. Malek [18]

❖ Pression de saturation

$$P = P_1.T_s^4 + P_2.T_s^3 + P_3.T_s^2 + P_4.T_s + P_5$$

Avec :

$$P_1 = 2.12766 \cdot 10^{-8}; P_2 = 8.9522 \cdot 10^{-8}; P_3 = 0.00147189; P_4 = 0.106194; P_5 = 2.93554$$

❖ L'enthalpie de la phase liquide

$$H_{Liq} = h_{L1}.T_s^4 + h_{L2}.T_s^3 + h_{L3}.T_s^2 + h_{L4}.T_s + h_{L5}$$

Avec :

$$h_{L1} = 1.4331 \cdot 10^{-7}; h_{L2} = -1.86962 \cdot 10^{-6}; h_{L3} = 1.9844 \cdot 10^{-3}; h_{L4} = 1.30623; h_{L5} = 200.041$$

❖ L'enthalpie de la phase vapeur saturée

$$H_{vap} = h_{v1}.T_s^3 + h_{v2}.T_s^2 + h_{v3}.T_s + h_{v4}$$

Avec :

$$h_{v1} = -1.70029 \cdot 10^{-5}; h_{v2} = -0.844368 \cdot 10^{-3}; h_{v3} = 0.588189; h_{v4} = 396.476$$

❖ L'enthalpie de la phase de vapeur surchauffée

$$H = A.T^2 + B.T + C$$

On calcul les constantes A, B et C de l'expression de l'enthalpie de la phase vapeur surchauffée en fonction de température de saturation (- 40 C à 90 C).

$$A = A_1.T_s^3 + A_2.T_s^2 + A_3.T_s + A_4$$

$$B = B_1.T_s^3 + B_2.T_s^2 + B_3.T_s + B_4$$

$$C = C_1.T_s^3 + C_2.T_s^2 + C_3.T_s + C_4$$

Et les constantes données sur le tableau suivant :

Tableau.1 Coefficients calculés de l'équation du L'enthalpie de la phase de vapeur surchauffée

A	B	C
$A_1 = - 2.25 \cdot 10^{-9}$	$B_1 = 1.3 \cdot 10^{-6}$	$C_1 = - 0.000147$
$A_2 = - 1.49 \cdot 10^{-7}$	$B_2 = 3.5 \cdot 10^{-5}$	$C_2 = - 0.003073$
$A_3 = - 1.3 \cdot 10^{-5}$	$B_3 = 2.44 \cdot 10^{-3}$	$C_3 = - 0.17755$
$A_4 = 0.477 \cdot 10^{-3}$	$B_4 = 0.917412$	$C_4 = 395.399$

Annexe 02

Déperditions calorifiques par le toit

$$\varphi_t = K_t \cdot A_t (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

φ_t : Flux de chaleur [W].

K_t : Coefficient global de transmission de la chaleur [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]

A_t : Surface du toit [m^2].

T_{int} : Température intérieure du local [$^\circ\text{C}$].

T_{ext} : Température extérieure [$^\circ\text{C}$].

Déperditions calorifiques à travers les murs extérieurs

$$\varphi_m = K_m \cdot A_m (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

A_m : Surface du mur en [m^2].

K_m : Coefficient global de transmission de la chaleur du mur [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$].

Déperditions à travers le vitrage

$$\varphi_v = K_v \cdot A_v (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

A_v : Surface des vitres [m^2].

K_v : Coefficient global de transmission de la chaleur du vitrage [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]

Déperditions calorifiques par les bords

$$\varphi_b = P \cdot F (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

F : Coefficient de perte de chaleur de la dalle $F = 0.2$.

P : Périmètre du local en contact avec l'extérieur en [m].

Déperditions calorifiques par le plancher bas

$$\varphi_p = K_p \cdot A_p (T_{\text{int}} - T_{\text{sol}})$$

A_p : Surface du plancher en [m^2].

K_p : Coefficient de transmission de chaleur globale.

T_{sol} : Température de sol = 10°C .

Résumé

La source la plus prometteuse d'énergie pour l'Algérie est l'énergie solaire en raison de son climat. Par conséquent, l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage des bâtiments est une solution de rechange et d'avenir très importante pour l'économie algérienne. Le présent travail porte sur une étude et analyse thermodynamique d'un système de chauffage domestique à source d'énergie hybride. Une modélisation mathématique d'une pompe à chaleur géothermique assistée par énergie solaire a été présentée. Les performances thermiques du système proposé ont été analysées et simulées pour un appartement F3. Les résultats obtenus, un coefficient de performance saisonnier supérieur à 4 et un rendement caractéristique solaire et géothermique estimé à 6,35 % et 17,04 % respectivement, montrent que ces systèmes peuvent économiser de l'énergie conventionnelle et peut être compétitifs avec les systèmes de chauffage traditionnel.

Mots clés

Système de chauffage, énergie solaire, énergie géothermique, pompe à chaleur, capteur, coefficient de performance.

ملخص

مصدر الطاقة الواعدة للجزائر هو الطاقة الشمسية بسبب مناخها . ولذلك، فإن استخدام الطاقة الشمسية كنظام لتدفئة المباني يمثل بديلا مهما جدا و فرصة للاقتصاد الجزائري .

يتناول هذا العمل دراسة تحليلية حرارية نظام التدفئة يعمل بالطاقة الهجينة . وقدمت النمذجة الرياضية لمضخة الحرارة الجوفية بمساعدة الطاقة الشمسية . تم تحليل الأداء الحراري للنظام المقترح و محاكاة لشقة F3 . النتائج المتحصل عليها تبين ان معامل الأداء الموسمية أكبر من 4 و أداء الطاقة الشمسية والطاقة الحرارية الأرضية بمعدل يقدر ب 6.35 % و 17.04 % على التوالي ، وتبين أن هذه الأنظمة يمكن توفير الطاقة التقليدية ، ويمكن أن تتنافس مع أنظمة التدفئة التقليدية

كلمات مفتاحية

نظام تدفئة منزلي، الطاقة الشمسية، الطاقة الارضية، المضخة الحرارية، اللاقط، معامل الاداء

Abstract

The most promising source of energy for Algeria is the solar energy because of its climate. Consequently, the use of the solar energy for the heating of buildings is an alternative solution and a future one which is very important for the Algerian economy. The current work deals with a study and thermodynamic analysis of a domestic heating system hybrid energy source. A mathematical modelling of a geothermal heat pump assisted by solar energy was presented. The thermal performances of the proposed system were analyzed and simulated for an apartment F3. The results, a coefficient of seasonal performance greater than 4 and a characteristic performance solar and geothermal estimated at 6.35% and 17.04% respectively, show that these systems can save conventional energy and be competitive with traditional heatingsystems.

Keyword

Heat pump, solar energy, geothermal energy, domestic heating system, coefficient of performance, captor.