

Introduction :

Utiliser l'énergie solaire directe ou stockée pour chauffer ou refroidir un bâtiment est une idée qui paraît d'une logique implacable. Le principe est simple et la technique est aujourd'hui fiable et éprouvée.

Non polluante et inépuisable à l'échelle humaine, l'énergie solaire permet de respecter l'environnement et de préserver la santé. Elle permet de préserver les ressources énergétiques, sans produire de déchets ni d'émissions polluantes, notamment du gaz carbonique.

Au-delà des enjeux environnementaux et de l'impact sur la production de gaz à effet de serre, le chauffage représente une part non négligeable de la facture énergétique d'un bâtiment, qui peut être réduite grâce à l'utilisation de l'énergie solaire.

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet traité. Nous abordons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil, pour ses applications dans le domaine du chauffage et de climatisation, ensuite nous décrivons les constituants de base de tels systèmes, et nous expliquerons aussi bien leurs fonctionnement et leurs technologies.

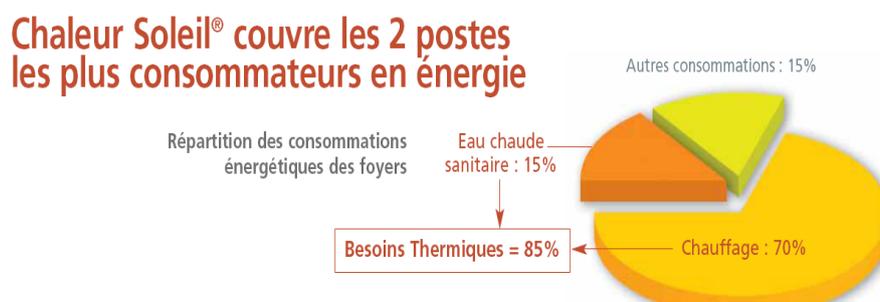


Figure I.1 : Répartitions des consommations énergétiques des foyers
[Source : chaleur_soleil.pdf].

1.1.Soleil source d'énergie :**1.1.1.Puissance et distribution spectrale d'un rayonnement solaire : [1]**

La puissance du rayonnement solaire résulte de la fusion de quatre noyaux d'hydrogène avec un noyau d'hélium. La perte massique totale est de 4.3 millions de tonnes par seconde qui libère une puissance de 3.845×10^{26} W. Cette énergie relâchée à une température extrêmement haute ($> 10^7$ K), est transférée par rayonnement et convection à l'extérieur de la photosphère.

Le rayonnement extraterrestre se développe principalement dans la photosphère, qui est composée de gaz non homogènes de faible densité. La photosphère se compose principalement de gaz fortement ionisés qui se recombinent continuellement avec les électrons libres et dont l'énergie cinétique est transférée dans un spectre continu de rayonnement.

La chromosphère, est une couche d'environ 2500 km d'épaisseur qui se compose essentiellement d'hydrogène et d'hélium, associé à la couche d'inversion, elles forment l'atmosphère du soleil.

La corona, plus lointaine dans le système solaire, est une couche de gaz beaucoup plus chaude que le chromosphère, Si le soleil est considéré comme un corps noir une température équivalente de rayonnement peut être calculé à partir de l'émittance M sur la base de la loi de Stefan–Boltzmann.

T_s : température du soleil [K]

A_s : surface totaux du soleil *comme* $(6.0874 \times 10^{18} \text{ km}^2)$.

σ : constante de Stefan–Boltzmann $5.67051 \times 10^{-8} [\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-4}]$

M : émittance $[\text{W.m}^{-2}]$

Φ : puissance totale rayonné dans l'espace.

$$M(T) = \frac{\Phi}{A_s} = \sigma T_s^4 = \frac{3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}}{6,0874 \cdot 10^{18} \text{ m}^2} = 63.11 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \Leftrightarrow T_s = \sqrt[4]{\frac{M}{\sigma}} = 5777 \text{ K} \quad (\text{I.1})$$

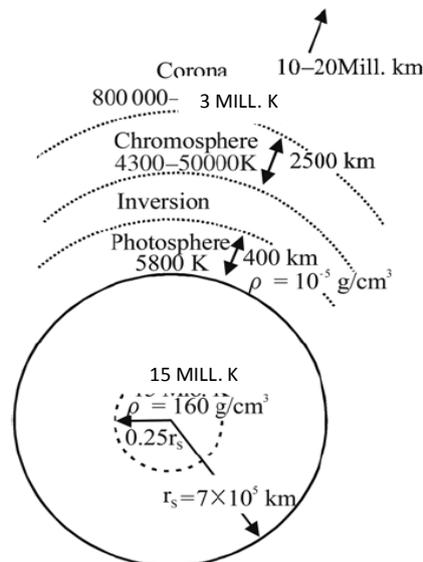


Figure I.2: Structure du soleil.

1.1.2. Le gisement solaire : [2]

Le soleil constitue une source d'énergie gratuite et non polluante, Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques.

Il produit à la lisière, mais en dehors de l'atmosphère terrestre, un éclairement énergétique à peu près constant et égal à $1\,370 \text{ W/m}^2$, appelé de ce fait : constante solaire I_{cs} .

Pour atteindre chaque point de la surface éclairable du globe terrestre, les rayons solaires traversent l'atmosphère qui absorbe une partie de l'énergie provenant du soleil par :

- Diffusion moléculaire (en particulier pour les radiations U.V.)
- Réflexion diffuse sur les aérosols atmosphériques (gouttelettes d'eau, poussières...)
- Absorption sélective par les gaz de l'atmosphère.

L'atténuation correspondante du rayonnement solaire dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, celle-ci dépendant à son tour de la latitude du lieu considéré et du temps.

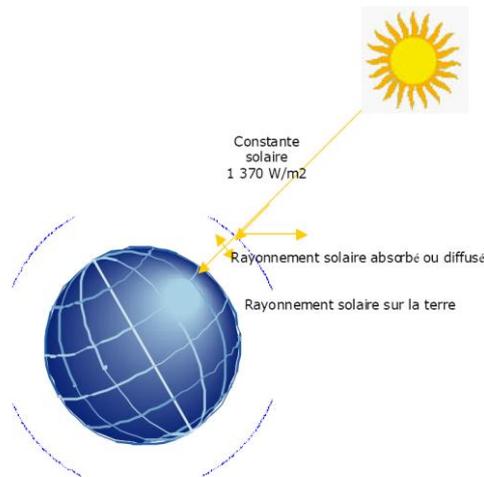


Figure I.3 : Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère.

Avant son arrivée dans l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est dirigé. Il se présente sous la forme d'un faisceau à peu près parallèle. Seule une partie de ce rayonnement direct traverse l'atmosphère et atteint le sol. Une autre partie du rayonnement est diffusée et répartie à peu près uniformément dans toutes les directions de l'espace.

Ce rayonnement diffus, lorsqu'il atteint le sol terrestre, semble ainsi provenir de l'ensemble des directions de la voûte céleste.

A la surface de la terre, le rayonnement solaire global est la somme des rayonnements :

- direct, ayant traversé l'atmosphère,
- diffus, en provenance de toutes les directions de la voûte céleste.

Une surface exposée reçoit ainsi du rayonnement direct et diffus, mais elle reçoit en plus une partie du rayonnement global réfléchi par les objets environnants, en particulier par le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé « albédo ».

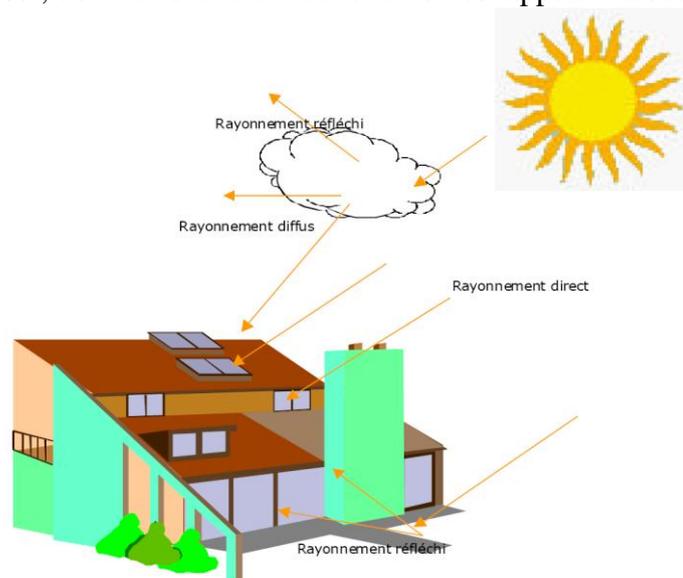


Figure I.4 : Le rayonnement solaire à la surface de la terre.

I.2. Constituants de base du système de stockage thermique:

Dans les systèmes solaires destinés au chauffage des bâtiments et des habitations, les systèmes les plus complets et qui peuvent couvrir les besoins de chauffage presque à 100 % sont les systèmes équipés d'un dispositif de stockage thermique.

Dans notre recherche bibliographique effectuée pour mettre à jour ce travail, nous avons remarqué qu'un certain nombre de composant bien précis se répète et dont la présence est indispensable. Autrement dit, dans toute installation les capteurs solaires, le ballon de stockage, la pompe à chaleur, et les capteurs enterrés sont des constituants de base omni présente pour une installation solaire avec stockage souterrain destiné pour le chauffage ou le refroidissement comme le montre les figures suivantes :

De ce fait on a jugé utile d'expliquer le rôle de chaque appareil dans l'installation, mais un intérêt spécial sera porté aux échangeurs verticaux enterrés qui sont l'outil de stockage thermique.

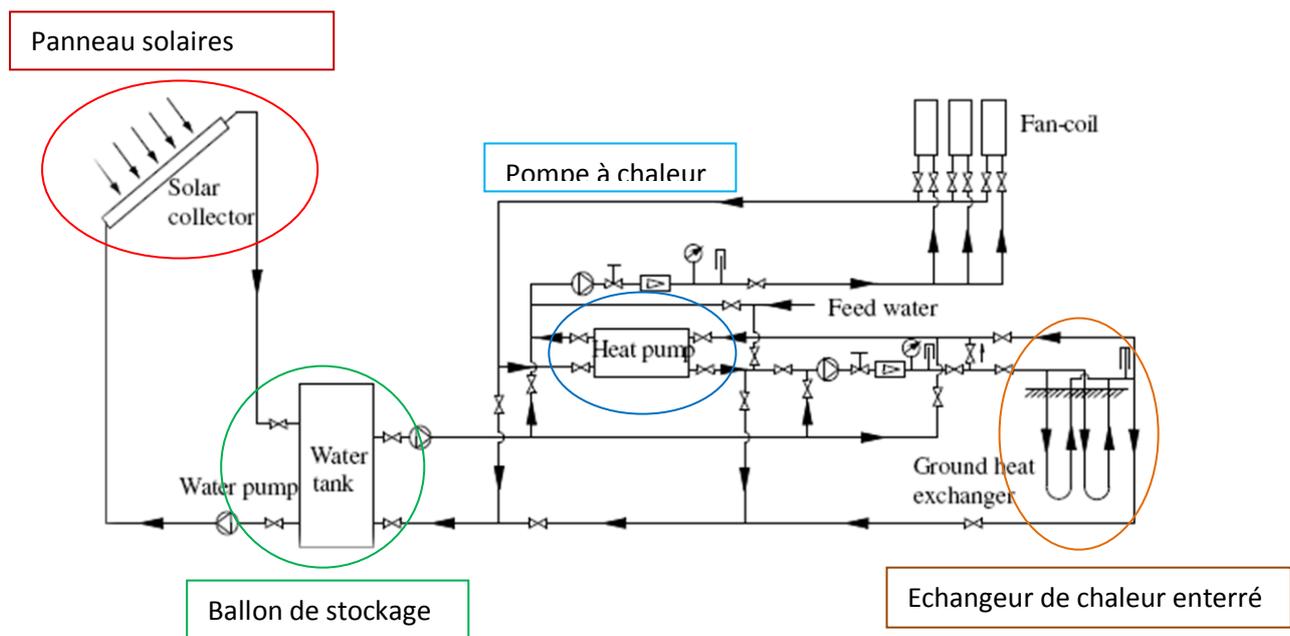


Figure I.5: Système solaire-géothermique expérimental multifonction couplé à une pompe à chaleur.

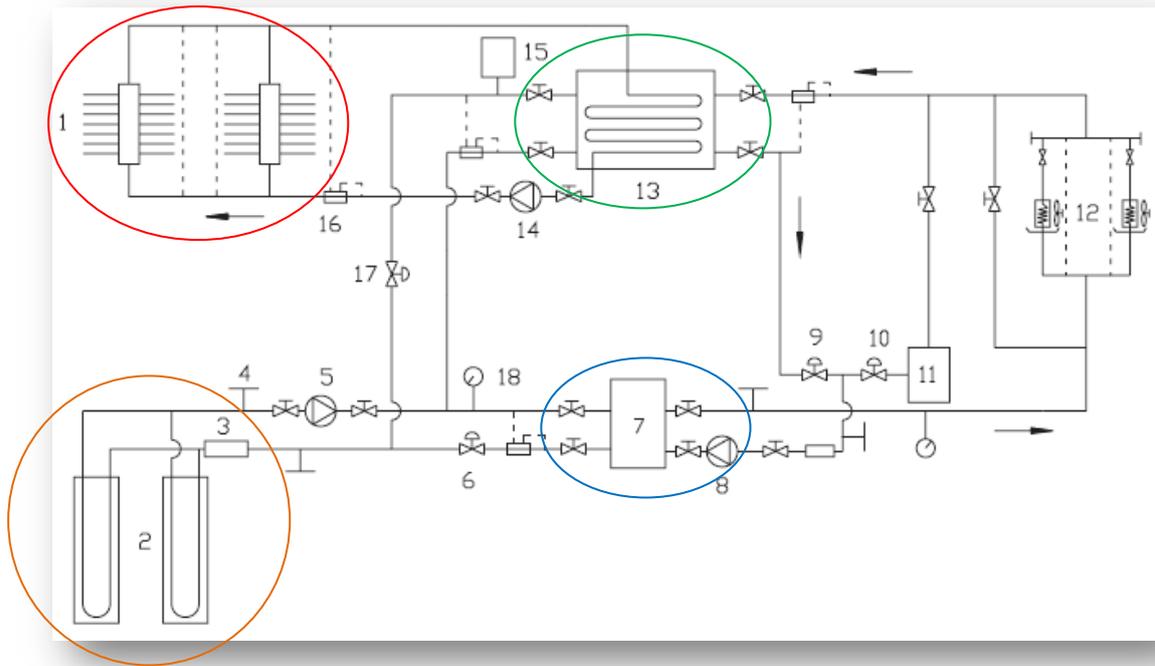


Figure I.6 : Principal diagramme d'une installation solaire-géothermique couplé a une pompe a chaleur.

1: capteurs solaires 2: échangeur de chaleur géothermique 3: filtre d'eau
 4: détecteur de température. 5: pompe de circulation (P1) 6: soupape (V1) 7: pompe a chaleur 8:
 pompe de circulation (P2) 9: soupape (V2) 10: soupape (V3) 11: ballon auxiliaire 12: système de
 chauffage 13: ballon de stockage. 14: pompe de circulation (P3) 15: ballon d'expansion 16:
 calorimètre 17: soupape (V4) 18: baromètre.

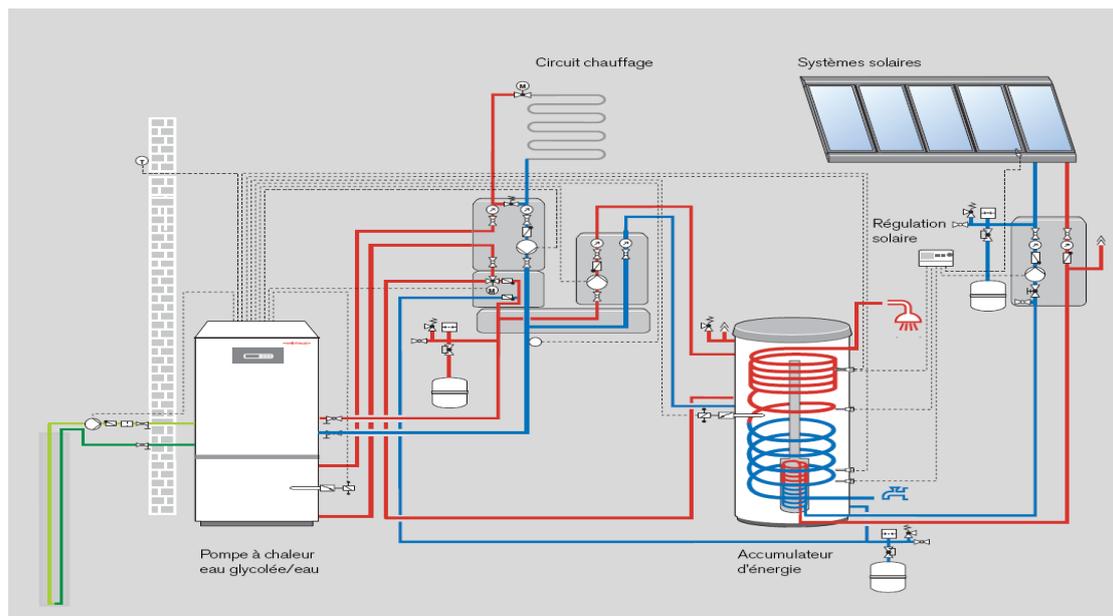


Figure I.7: Exemple d'installation solaire en combinaison avec une pompe à chaleur.

[10]

I.2.1. Capteurs solaires : [2]

Un capteur solaire effectue la conversion du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, en chaleur et permettent le transfert de cette énergie calorifique en la cédant à un fluide caloporteur, il est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur, les calories produites par absorption du rayonnement incident, et émet en s'échauffant un rayonnement thermique de plus grande longueur d'onde (Loi de Stefan-Boltzman).

Dans un capteur équipé d'une couverture transparente, le rayonnement thermique émis par l'absorbeur est absorbé par la couverture transparente qui s'échauffe et rayonne à son tour par les deux faces. En première approximation, on peut considérer qu'une moitié du rayonnement se disperse dans le milieu extérieur et que l'autre moitié, réémise vers l'absorbeur est à l'origine de l'effet de serre.

Les couvertures ont également pour rôle de limiter les pertes par convection, étant donné que les échanges thermiques entre deux plaques séparées par une lame d'air immobile, se font essentiellement par conduction et qu'il est connu que l'air immobile est un bon isolant thermique.

Cet effet d'isolation croît avec l'épaisseur de la lame d'air séparant les deux surfaces, tant que le phénomène de transfert reste conductif (2 à 3 cm d'épaisseur).

Au-delà, les effets de la convection naturelle viennent contrarier l'effet recherché.

Une autre méthode pour réduire les pertes du capteur est la réalisation, sur la surface de l'absorbeur, d'un revêtement sélectif, présentant un coefficient d'absorption le plus élevé possible pour les longueurs d'onde du spectre solaire (inférieures à 2,5 μm) tout en ayant une émissivité la plus faible possible dans le domaine de l'infrarouge correspondant au rayonnement de l'absorbeur (longueurs d'onde supérieures à 2,5 μm).

De tels revêtements sélectifs sont réalisés par dépôt chimique ou par traitement électrochimique de la surface absorbante.

Enfin les capteurs sous vide permettent de réduire les pertes par convection en plaçant l'absorbeur à l'intérieur d'une enceinte en verre dans laquelle un vide d'air a été fait.

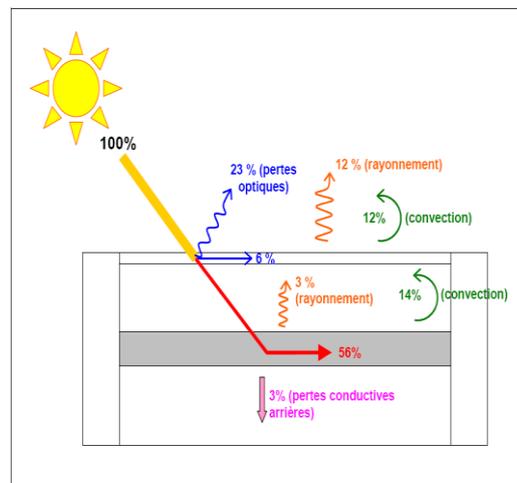


Figure I.8 : Bilan énergétique du capteur solaire.

1.2.2. Ballon de stockage : [3]

Le stockage de l'énergie solaire dans un ballon de stockage permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire. L'accumulation de l'énergie dans le stockage se traduit par une élévation de sa température.

Pour apprécier l'efficacité d'un système de stockage, il faut rappeler que le rendement d'un capteur dépend essentiellement de la température moyenne du fluide qui le traverse, donc de la température du fluide au retour du stockage. L'une des caractéristiques essentielles de l'aptitude à l'emploi du stockage sera de fournir, à l'entrée des capteurs, un fluide dont la température sera la plus basse possible.

Le transfert de chaleur des capteurs vers le ballon s'effectue de deux façons différentes :

- par circulation forcée avec une pompe commandée par un dispositif de régulation,
- par circulation naturelle ou thermosiphon.

Les systèmes fonctionnant par thermosiphon présentent l'avantage par rapport aux systèmes habituels avec circulateurs de ne nécessiter aucun dispositif de régulation des apports solaires, ni pompes de mise en circulation du fluide caloporteur.

Cependant, dans les faits, les installations en thermosiphon ne concernent généralement que certaines fabrications de chauffe-eau individuels et restent l'exception pour les installations collectives.

En raison des problèmes hydrauliques posés par les champs de capteurs de grandes dimensions, et des contraintes architecturales posées par la disposition des capteurs sous le stockage, la circulation du fluide caloporteur par thermosiphon est, sauf cas particulier, mal adaptée aux installations collectives.

1.2.2.1. Les échangeurs de chaleur : [3]

Il est nécessaire de protéger les équipements solaires contre les risques de gel. Dans la plupart des cas, les capteurs sont protégés par un fluide non gélif, ce qui implique la présence d'un échangeur.

On distingue deux catégories d'échangeurs :

- Les échangeurs intégrés au stockage.
- Les échangeurs extérieurs au stockage.

Dans le cas où l'échangeur est situé à l'extérieur du stockage, l'échange se fait de part et d'autre par convection forcée. Les surfaces d'échange sont en général réduites par rapport à un échangeur intégré.



Figure I.9 : Echangeur à plaques.



Figure I.10 : Echangeur intégré.

Dans tous les cas, l'efficacité d'un échangeur ne dépend pas de la température des fluides mais des caractéristiques géométriques de l'échangeur et des débits calorifiques.

Dans la pratique, l'efficacité des échangeurs est de l'ordre de 0,6 à 0,8. Notons que si l'efficacité d'un échangeur est médiocre, non seulement le transfert de chaleur sera faible, mais la température de retour du fluide dans le capteur sera élevée et le rendement du capteur sera diminué.

Lorsque l'échangeur est incorporé au stockage, il est disposé en partie basse du ballon.

Cette disposition permet, à condition que la surface d'échange soit suffisante, de réchauffer de manière homogène le volume d'eau baignant l'échangeur, tant que la température de celui-ci n'aura pas atteint à 3 ou 4 degrés près, la température de la partie supérieure du ballon.

A chaque introduction d'eau froide dans le stockage au moment des soutirages, on évite ainsi d'envoyer dans la partie haute du ballon, de l'eau insuffisamment réchauffée (Stratification des températures).

Cette disposition permet de plus, d'alimenter les capteurs solaires avec un fluide dont la température en sortie de l'échangeur est la plus faible possible compte tenu des conditions de soutirage et de la stratification des températures. En outre, elle permet de limiter les risques de pertes thermiques par circulation inverse dans les capteurs en cas de mauvais fonctionnement du clapet anti-retour.

1.2.2.2. Température de l'eau dans le ballon de stockage : [3]

L'échauffement de l'eau (en °C) suite au passage dans le chauffe-eau solaire individuel (CESI) est défini par :

$$\Delta T = \frac{Q}{1,16.V} \quad (I.2)$$

Où :

Q : est la production d'eau chaude sanitaire par le CESI en kWh (mesurée),
 V : est le volume d'eau chaude sanitaire produit par le CESI en m³ (mesurée),
 1.16 : est la capacité calorifique de l'eau en kWh.m⁻³.K⁻¹.

I.2.3. Les pompes à chaleur :I.2.3.1. Les principes de base du système thermodynamique [4] :

Une pompe à chaleur est un dispositif thermodynamique permettant de transférer la chaleur du milieu le plus froid (et donc le refroidir encore) vers le milieu le plus chaud (et donc le chauffer), alors que spontanément la chaleur se diffuse du plus chaud vers le plus froid jusqu'à égalité des températures. Mais le terme de « pompe à chaleur » (PAC) s'est surtout diffusé pour désigner des systèmes de chauffage domestique, popularisés avec la forte hausse du prix des combustibles dans les années 1970.

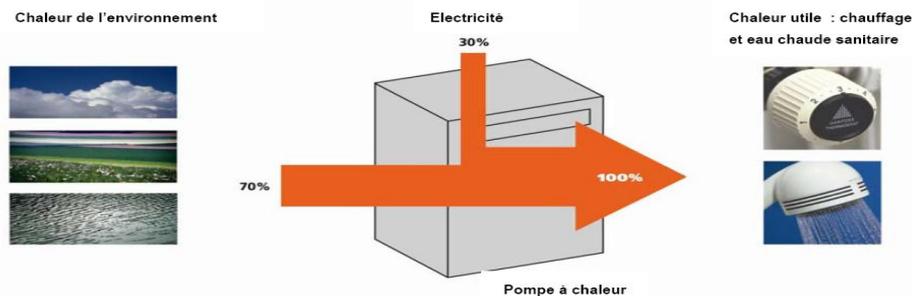


Figure I.11 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur avec les flux d'énergies.

Le principe de fonctionnement utilisé pour les PAC à compression de vapeur est identique à celui rencontré sur les systèmes de production frigorifique.

Dans le cas des PAC, l'énergie qui sera utilisée sera celle disponible du côté haute pression de l'installation, alors que dans les systèmes frigorifiques, nous cherchons à refroidir un milieu en lui prélevant de l'énergie du côté basse pression de l'installation.

Les éléments de base d'une pompe à chaleur sont :

- un **compresseur** ;
- un **condenseur** ;
- un **organe de détente** ;
- un **évaporateur**.

L'assemblage de ces composants se réalise comme indiqué sur la figure I.15

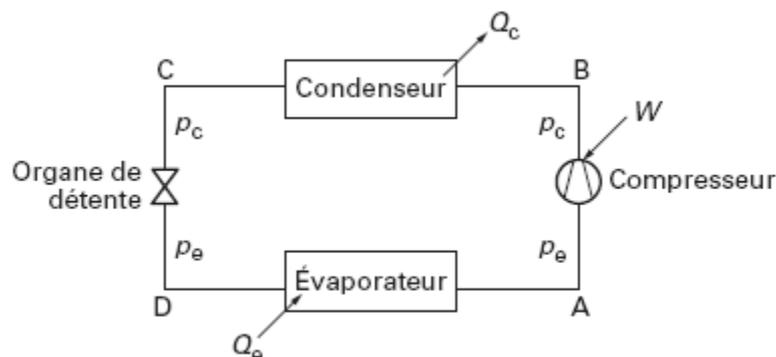


Figure I.12 : Schéma de principe d'une PAC à compression de vapeur.

Le transfert d'énergie entre la source froide (Q_e) et la source chaude (Q_c) de la PAC s'effectue par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène (ou calorigène) circulant en boucle fermée.

- Le compresseur aspire des vapeurs surchauffées (point A) de fluide frigorigène et les amène grâce à un apport de travail mécanique (W) de la pression d'évaporation (p_e) à la pression de condensation (p_c).
- Les gaz comprimés (point B) sont ensuite refroidis puis passent à l'état liquide au sein du condenseur. Le phénomène de condensation est réalisé par circulation sur le condenseur d'un fluide externe (air ou eau par exemple) qui va se réchauffer en prélevant l'énergie véhiculée par le fluide frigorigène.
- Le fluide frigorigène liquéfié (point C) est ensuite admis à l'organe de détente qui va abaisser sa pression de p_c à p_e .
- Le fluide à l'entrée de l'évaporateur (point D) est un mélange de liquide et de vapeur dont le titre massique (proportion massique de vapeur par unité de masse totale de fluide frigorigène) est variable en fonction du degré de sous-refroidissement du liquide et de la température d'évaporation.
- Le fluide externe sur l'évaporateur va se refroidir et céder l'énergie qu'il contient, en évaporant le fluide frigorigène jusqu'à le surchauffer pour qu'il soit ensuite aspiré par le compresseur (point A).

I.2.3.2. Représentation dans un diagramme de Mollier : [5]

Le parcours du fluide frigorigène décrit ci-dessus peut être représenté dans un diagramme de Mollier (figure I.13). Nous retrouvons les points A, B, C et D mentionnés précédemment.

Nous observons plus précisément la surchauffe des vapeurs avant leur entrée dans le compresseur (ligne A'A), la désurchauffe des vapeurs au refoulement du compresseur (ligne BB') et le sous-refroidissement du liquide (ligne C'C). Le point B'' correspond au cas où la compression du fluide frigorigène est réalisée de manière adiabatique réversible c'est-à-dire en suivant une courbe isentropique.

Afin de faciliter la compréhension, nous ne représentons pas sur le cycle thermodynamique les pertes de pression rencontrées réellement dans les installations.

Il est cependant nécessaire de tenir compte de celles-ci lors des cas concrets d'application.

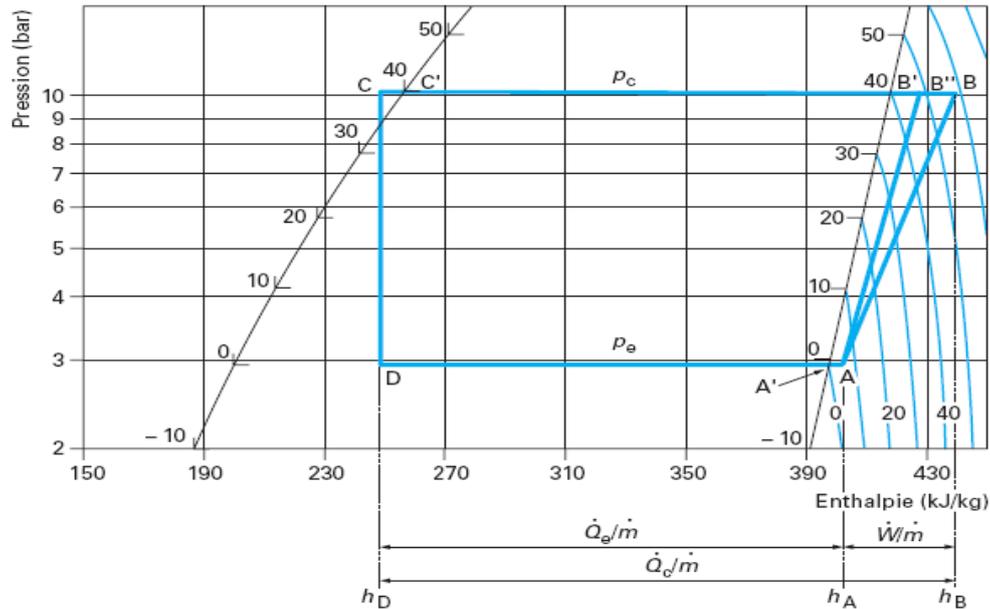


Figure I.13 : Représentation du cycle thermodynamique d'une PAC dans un diagramme de Mollier du R134a.

Par lecture directe des enthalpies massiques sur le diagramme de Mollier, il est aisé de déterminer les **puissances mises en jeu** au niveau de chacun des composants principaux en multipliant les écarts d'enthalpies par le débit massique de fluide frigorigène circulant dans la PAC :

$$Q_e \dot{=} \dot{m}(h_A - h_D) \quad (I.3)$$

$$\dot{W} = \dot{m}(h_B - h_A) \quad (I.4)$$

$$Q_c \dot{=} Q_e \dot{+} \dot{W} = \dot{m}(h_B - h_C) = \dot{m}(h_B - h_D) \quad (I.5)$$

Nous pouvons ainsi calculer le **coefficient de performance réel COP_{réel}** de la PAC qui vaut en première approximation :

$$COP_{réel} = \frac{Q_c}{\dot{W}} = \frac{(h_B - h_C)}{(h_B - h_A)} \quad (I.6)$$

La valeur obtenue par ce calcul tient compte uniquement des puissances transmises au fluide frigorigène. Or, la puissance mécanique du travail de compression transmise au fluide peut être inférieure à la puissance électrique absorbée par le compresseur en raison des pertes qui peuvent survenir : pertes par échauffement du moteur électrique, pertes de chaleur par les parois du compresseur...

Le COP obtenu est alors inférieur au COP_{réel} en considérant la puissance électrique absorbée par le compresseur.

Pour les PAC utilisant des compresseurs hermétiques ou semi-hermétiques (moteur + éléments de compression dans le flux de fluide frigorigène), la relation mentionnée ci-dessus s'applique car l'énergie générée par l'échauffement du moteur est transmise directement au fluide frigorigène qui circule autour de lui.

Le **COP théorique** ou COP du cycle idéal de Carnot est exprimé par la relation suivante :

$$COP_{théorique} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (I.7)$$

Avec T_2 température (en K) de la source chaude à l'entrée de l'échangeur de chaleur (condenseur), T_1 température (en K) de la source froide à l'entrée de l'échangeur de chaleur (évaporateur).

Le COPréel obtenu sur les machines thermodynamiques est bien inférieur au COPthéorique du cycle de Carnot en raison des différentes pertes énergétiques qui se produisent sur un cycle réel.

1.2.4. Source froide sur le sol : [6]

La chaleur terrestre est une source d'énergie durable pour la production de chaleur et d'électricité, qui ne dépend ni des conditions climatiques, ni de la saison ou du moment de la journée. La diversité des températures autorise une multitude de variantes d'utilisation. [10] sur la figure suivante on a entouré les applications qui nous intéressent par un carré Bleu, en fait ils sont choisis en fonction des profondeurs de leurs capteurs enterrés, allons de 5m à 150 m, cet intervalle de profondeur dans la terre se caractérise par une température constante allons de 10°C à 18° selon la position géographique du lieu (latitude, longitude), on parle dans ce cas de géothermie très basse énergie.

Alors l'utilisation de ces ressources géothermales dont la température est inférieure à 30 °C (cas des nappes superficielles ou nappes phréatiques et des nappes peu profondes), nécessite généralement l'emploi de pompes à chaleur, ce qui favorise le stockage de l'énergie, et leurs fonctionnements. [8]

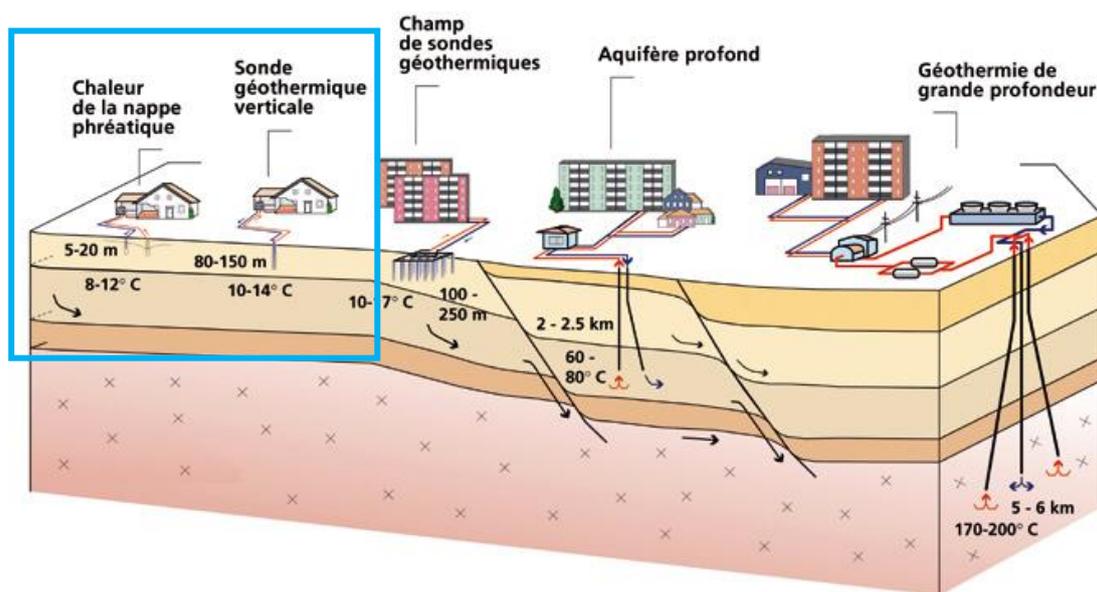


Figure I.14 : Les différentes applications de la chaleur géothermique.

Constat : le sol est une importante source de chaleur. La géothermie basse température vise à l'exploiter par l'intermédiaire de pompes à chaleur (PAC) pour le chauffage de bâtiments [5]

- Les PAC rehaussent la température naturelle du sol (environ 10°C) jusqu'à des valeurs de l'ordre de 45°C. Elles sont en général couplées à des émetteurs basses températures de type plancher chauffant afin d'avoir un coefficient de performance supérieur à 3. Elles peuvent également être réversibles (mode chaud ou mode froid) et ainsi être aussi utilisées pour le rafraîchissement des bâtiments en été.
- Deux types d'échangeurs enterrés : les échangeurs horizontaux et les échangeurs verticaux.

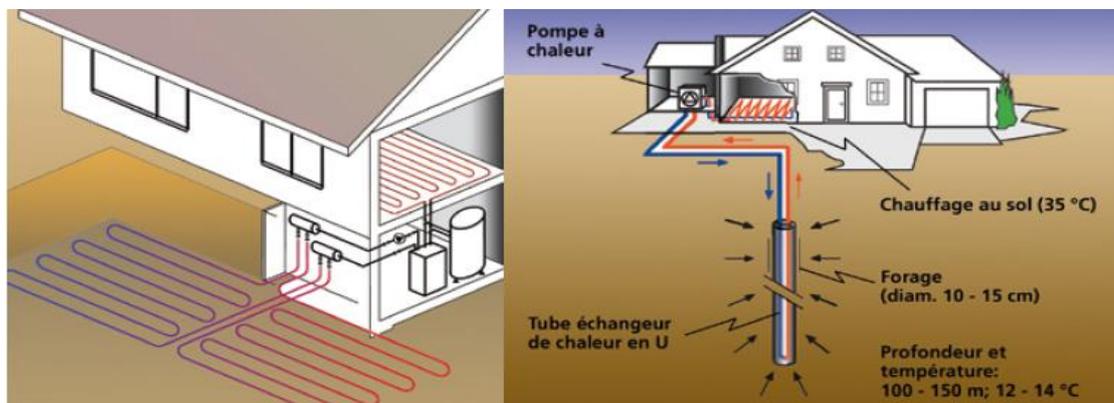


Figure I.15 : Des collecteurs horizontaux enterrés ou une sonde géothermique verticale, deux types de capteurs pour l'alimentation d'une pompe à chaleur dans une maison individuelle.

Le principal avantage du sol comme source d'énergie est la stabilité de sa température au cours de l'année. Il est vrai qu'à quelques mètres de profondeur, l'influence des conditions climatiques régnant en surface est pratiquement nulle. Cette stabilité confère à la PAC une relative constance dans ses performances (température d'évaporation stable) qui rend plus simple son dimensionnement. [9]

On cite souvent comme autre avantage la température relativement élevée du sol (de l'ordre de 5 à 6° C en période hivernale à 60 cm de profondeur) par rapport à celle de la température extérieure par grand froid. Il ne faut cependant pas perdre de vue le fait que la PAC puisant de l'énergie au sol, celui-ci se refroidit progressivement au cours du temps pendant la période de chauffe c'est dans ce contexte que la recharge du terrain par l'utilisation de panneaux thermique a son importance.

1.2.4.1.Principe de fonctionnement d'une PAC utilisant l'énergie du sol :

Dans le cas d'une PAC utilisant le sol, le fluide frigorigène s'évaporant à basse température et à basse pression prélève de l'énergie soit directement au sol grâce à un échangeur de chaleur enterré soit à un fluide secondaire (mélange eau-glycol la plupart du temps) qui dès lors se refroidit. Ce fluide secondaire est alors envoyé dans l'échangeur enterré dans lequel il prélève l'énergie du sol en se réchauffant avant d'être renvoyé dans l'évaporateur. Quel que soit le cas de figure, le fluide frigorigène

à l'état de vapeur à la sortie de l'évaporateur est comprimé et ensuite condensé (Lors de cette étape, l'énergie du fluide est transmise au bâtiment). [9]

Comme le montre la figure I.16, deux configurations principales d'échangeur enterré sont possibles : l'échangeur horizontal d'une part, l'échangeur vertical d'autre part.

Dans le cas de l'utilisation d'un échangeur vertical, on utilise systématiquement un fluide secondaire. L'évaporation directe du fluide frigorigène dans l'échangeur peut par contre être envisagée dans le cas de la configuration horizontale.

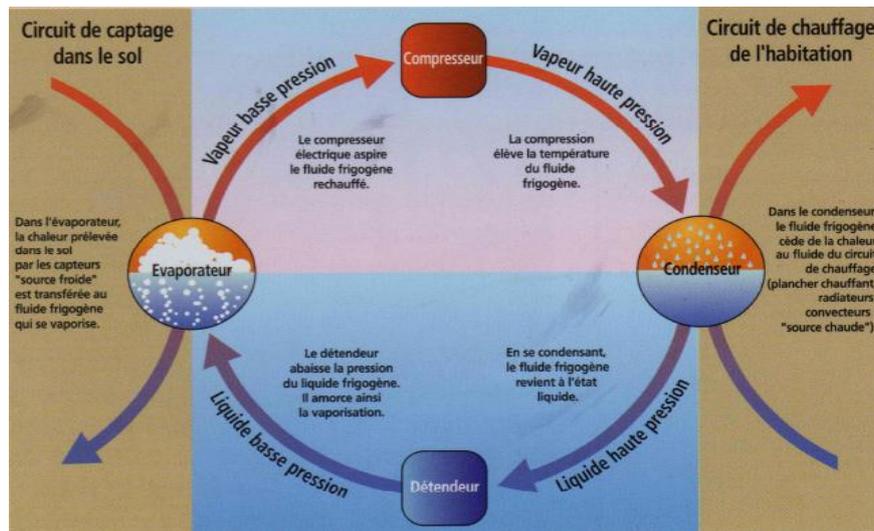


Figure I.16 : schéma générale d'une pompe à chaleur destinée au chauffage. [6]

1.3. Système combine de chauffage et de refroidissement : [10]

Alors que les sondes géothermiques représentent une technique idéale pour exploiter la chaleur terrestre à des fins de chauffage des maisons individuelles, elles comportent également de grands avantages pour les systèmes énergétiques des bâtiments plus importants. Ce qu'on appelle des « champs de sondes », c.-à-d. des ensembles de sondes verticales disposées les unes à côté des autres, permettent la réalisation d'un système combiné de chauffage en hiver et de refroidissement en été.

Des appareils de mesure et des modèles de calcul toujours plus performants permettent le dimensionnement de ces champs de sondes. La production combinée de chaleur et de froid améliore sensiblement leur rentabilité. Le transfert de la chaleur estivale au sous-sol ne nécessite plus, selon la charge thermique, qu'une pompe de circulation (free cooling); dans de nombreux cas, on peut se passer de machines frigorifiques.

1.4. Le dimensionnement des capteurs : un point-clé : [9]

Utiliser un échangeur enterré de faible dimension par rapport à la puissance thermique de la PAC aura comme conséquence le refroidissement progressif du fluide secondaire à l'évaporateur. Le sol n'arrivera en effet pas à réchauffer correctement ce fluide, vu la faible surface de contact. Il en résultera une chute progressive de la température d'évaporation et par suite une chute du COP et de la puissance thermique

(avec un risque de ne pas pouvoir atteindre la température de confort dans l'habitation). La température du fluide secondaire finira par se stabiliser car le flux de chaleur prélevé par l'évaporateur diminuera également, si bien que le sol pourra jouer son rôle de réchauffement du fluide. Quoi qu'il en soit, l'installation fonctionnera de manière inadéquate car ce point d'équilibre correspondra à une très basse température d'évaporation.

1.5. Les types de pompes à chaleur géothermiques : [6]

Celons le mode de raccordement entre les échangeurs géothermiques et la pompe à chaleur, on distingue trois types de pompes à chaleur :

- 1- les PAC à détente directe, il n'y a qu'un seul circuit : le fluide frigorigène circule en circuit fermé dans la pompe, les capteurs et les émetteurs de chaleur.
- 2- les PAC mixtes, il y a deux circuits : celui du fluide frigorigène des capteurs et de la pompe à chaleur et celui de l'eau chaude des émetteurs.
- 3- les PAC à fluides intermédiaires, il y a trois circuits : le circuit frigorifique de la pompe à chaleur, le circuit des capteurs ou circule de l'eau additionnée d'antigel et le circuit qui alimente en eau chaude les émetteurs.

PAC géothermiques			
Dénomination commerciale	Capteurs enterrés horizontaux	Capteurs enterrés verticaux	PAC sur eau de nappe
Eau glycolée/eau	PAC à fluides intermédiaires		
Eau/eau			PAC à fluides intermédiaires
Sol/sol	PAC à détente directe		
Sol/eau	PAC mixte		

Tableau I.1 : Dénomination commerciale des PAC géothermiques.

1.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les caractéristiques de l'énergie solaire, coté thermique, un aperçu a été donné sur chaque composant d'une installation solaire destiné au chauffage éventuellement le rafraîchissement des habitations, cela dans le but de la compréhension générale de leurs systèmes de fonctionnement.

Le sol, source de chaleur, possède l'avantage (sur l'eau et l'air, par exemple) de ne pas se déplacer, ce qui permet de l'utiliser également comme accumulateur de chaleur, soit comme réservoir tampon (par exemple, prélèvement de chaleur la nuit, restitution le jour), soit comme stock saisonnier, par prélèvement de chaleur en hiver pour le chauffage et recharge en été grâce au rafraîchissement des locaux.

Cette propriété d'accumuler de la chaleur permet de compléter l'apport de chaleur d'origine terrestre par des rejets de chaleur, provenant soit du rafraîchissement de locaux ou de processus industriels, soit de chaleur solaire inutilisable directement ou en surplus.

Cet apport de chaleur, rendue utilisable par ce stockage souterrain à basse température, contribue ainsi à augmenter la température du sol, réduisant ainsi la consommation d'énergie électrique nécessaire au captage et à la mise en température de la chaleur par la pompe à chaleur.

Ainsi dopée, cette installation aux échangeurs enterrés devient une source d'énergie encore plus renouvelable, qui peut se comparer avec d'autres nouvelles énergies renouvelables.