
CHALEUR DE LA TERRE

◆ Manifestations, origine

Les manifestations visibles de la chaleur de la Terre sont bien connues, ce sont les volcans, les geysers, les sources chaudes...

Au-delà de ces manifestations visibles, le sous-sol est caractérisé en tous lieux par une augmentation de la température en fonction de la profondeur. Ce phénomène est caractérisé par son gradient de température qui s'exprime en °C/100 m. Le gradient moyen en France est de l'ordre de 3,3 °C par 100 m, mais peut varier selon les sites, de 2°C/100m au pied des Pyrénées, à 10°C dans le Nord de l'Alsace. Dans les zones instables du globe (limites de plaques lithosphériques) le gradient peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées. L'origine de la chaleur de la Terre a deux origines, la dissipation de l'énergie dite primitive accumulée lors de la formation de la Terre et celle plus importante liée à la désintégration des éléments radioactifs contenus dans le sous-sol (U_{235} ; U_{238} , K_{40} , Th_{233}).

◆ Caractérisation des ressources

L'extraction de la chaleur dans le sous-sol peut se faire par prélèvement dans un aquifère ou par échange avec le sous-sol.

Un **aquifère** est une couche géologique poreuse ou fissurée contenant de l'eau dont la température sera d'autant plus élevée qu'elle sera prélevée à grande profondeur. La puissance thermique extractible sera fonction du couple débit température.

La ou il n'y a pas d'aquifère accessible, il est toujours possible de prélever de la chaleur par échange avec le sol par le biais d'un fluide caloporteur circulant dans un capteur en contact avec le sous-sol. L'efficacité de ces systèmes est liée non seulement à la température du sous-sol, mais également à ses propriétés physiques : chaleur spécifique et conductivité.

Lorsque la température extraite est insuffisante pour satisfaire les besoins des utilisateurs, le recours à une pompe à chaleur est nécessaire.

La pompe à chaleur permet de relever le niveau de température de la ressource moyennant une dépense d'énergie 3 à 5 fois inférieure à celle récupérée.

◆ Présentation des filières

Les filières géothermiques peuvent être classées en fonction des spécificités de la ressource, de leurs applications possibles et de leurs combinaisons. Une présentation simplifiée figure dans le tableau ci-dessous :

Filières	Profondeur (p)	Température	Gamme de puissance	Applications
Prélèvement d'eau par forages				
Aquifère peu profond	p<200m	12 - 15°C	100 - 800 kW*	BC - BT
Aquifère intermédiaire	200<p<600 m	15 - 40°C	500 - 4000 kW*	BC - BT
Aquifère profond	p> 1000m	40 - 80°C	4 - 12 MW	RdC
Prélèvement par échange				
Captage horizontal	0,6 - 1,5 m	0 -12°C	5 - 10 kW*	M.I
Sonde verticale	50 - 200 m	10 - 14°C	5 - 10 kW*	M.I
Champ de sondes	50 - 200 m	10 - 14°C	5n** - 10n kW*	B.C - BT
Fondations géothermiques				
	7 - 20 m	10 - 12°C		BC -BT
Puits canadien				
	1,5 - 2m	8 - 14°C		M.I - BC - BT

*Puissance sortie pompe à chaleur

** n : nombre de sondes

M.I : maison individuelle

B.C : Bâtiment collectif

BT : Bâtiment tertiaire

Rdc Réseau de chaleur

Les pompes à chaleur géothermiques concernent les filières s'appuyant sur des ressources « basse température », à savoir les aquifères peu profonds et l'ensemble des filières procédant par échange avec le sol.

TECHNIQUE

LA POMPE A CHALEUR

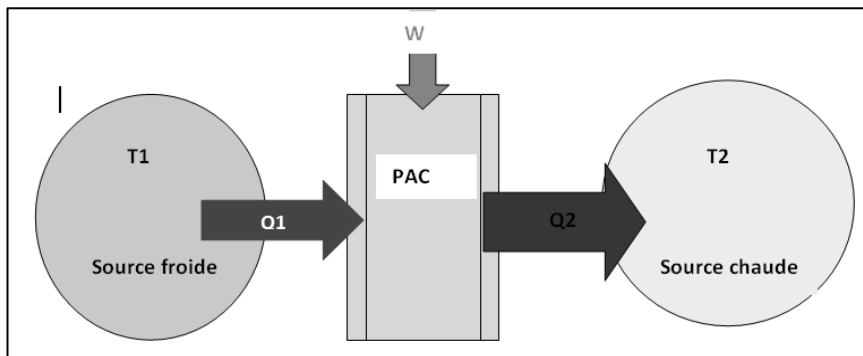
◆ Principes généraux

La pompe à chaleur est une machine thermodynamique fonctionnant entre une source froide et une source chaude.

En **mode chauffage** elle prélève de l'énergie (gratuite) au niveau de la source froide **Q1**, et la restitue au niveau de la source chaude **Q2** à un niveau de température plus élevé. Cette transformation se fait moyennant une dépense d'énergie **W** (généralement électrique).

La première relation s'écrit : **$Q2 = Q1 + W$**

La deuxième relation exprime la performance du système définie par son coefficient de performance **COP** qui est le rapport entre l'énergie récupérée à la source chaude et l'énergie dépensée : **$COP = Q2/W$**



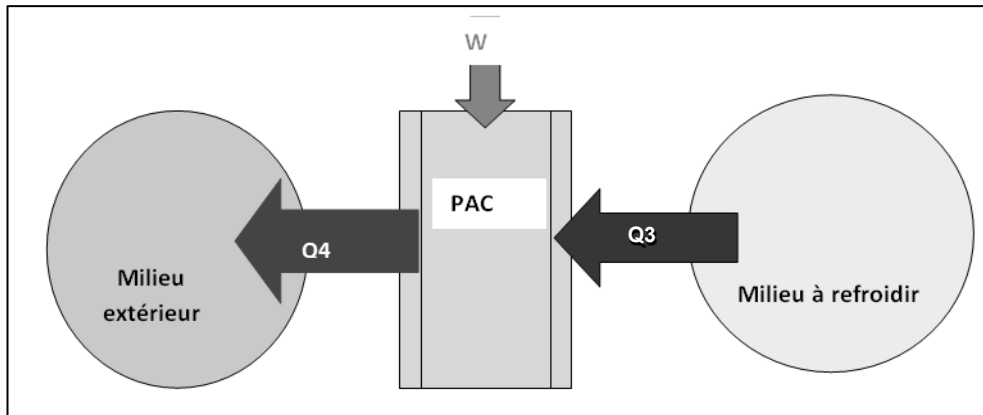
Le COP théorique selon le 2^{ème} principe de la thermodynamique est donné par la formule :

$$\text{COP théorique} = T2/(T2-T1)$$

Les températures T2 et T1 sont exprimées en Kelvin (K température exprimée en Kelvin = T°C +273 exprimée en °C)

En pratique le COP réel est inférieur au COP théorique car le cycle thermodynamique au sein de la pompe à chaleur n'est jamais parfait. L'expression du COP théorique met néanmoins en évidence l'importance de l'écart de température entre les deux sources. Plus l'écart sera faible, plus la performance sera élevée, c'est la raison pour laquelle, il est recommandé de privilégier le chauffage basse température.

En mode refroidissement, le système thermodynamique fonctionne en sens inverse. De la chaleur est prélevée dans le milieu à rafraîchir (source chaude) et évacuée au niveau de la source froide.



Dans cette configuration la chaleur évacuée au niveau de la source froide **Q4** est égale à **Q3** chaleur évacuée du milieu à rafraîchir, plus l'énergie **W** fournie au système : **Q4 = Q3 + W**

La performance d'un tel système est donnée par le coefficient d'efficacité frigorifique (**EER**) : **EER = Q3/W**

◆ Fonctionnement de la pompe à chaleur

Il existe deux grandes familles de pompes à chaleur : les pompes à chaleur à compression et les pompes à chaleur à absorption.

● POMPES A CHALEUR A COMPRESSION

La chaleur prélevée au niveau de l'environnement (air, sol, eau...) est captée par le fluide caloporteur (fluide frigorigène à faible point d'ébullition) au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température.

C'est au niveau du condenseur que la vapeur surchauffée transmet sa chaleur au milieu à chauffer. Le fluide toujours comprimé redevient liquide en se condensant. Le détendeur réduit la pression du fluide caloporteur.

La température de ce dernier s'abaisse fortement le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer.

Il est possible de visualiser les différentes phases du cycle thermodynamique sur un diagramme enthalpique (dit de Mollier). L'abscisse représente les variations d'enthalpie, l'axe des ordonnées représente les variations de pression.

Le segment 1-2 représente la compression du fluide.

Le segment 2-3 représente le palier de condensation, de 2 à 2' le fluide est toujours à l'état gazeux (désurchauffé) puis se condense jusqu'à être totalement transformé en liquide en (3).

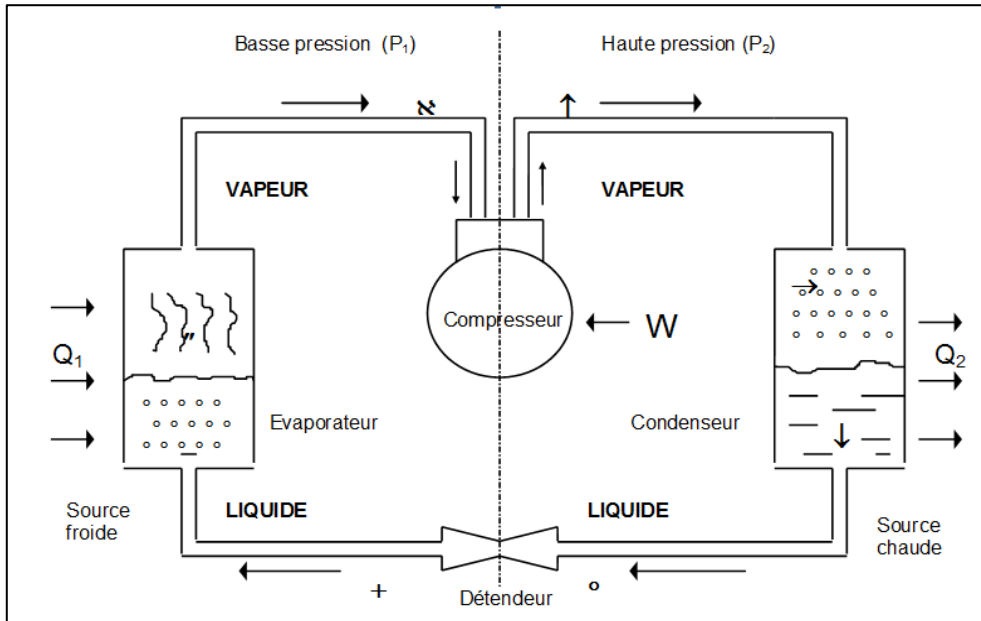


Schéma de principe d'une PAC à compression

Le segment 3-4 représente la détente isenthalpique

Le segment 4-1 est la phase d'évaporation

Le bilan énergétique du cycle peut être évalué en projetant les différents segments sur l'axe des abscisses :

H_1H_2 représente l'énergie W du compresseur

H_3H_1 représente l'énergie prélevée à la source froide

H_3H_2 représente l'énergie cédée à la source chaude

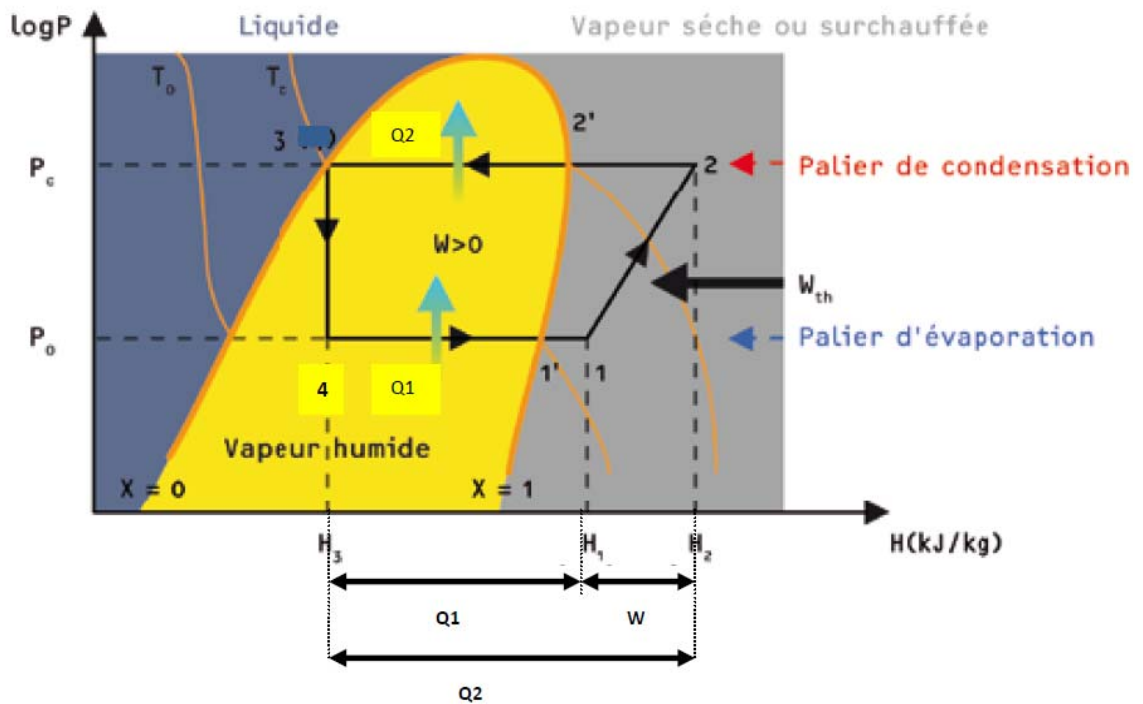


Diagramme de Mollier

Il existe plusieurs types de COP :

Le **COP constructeur** : il s'agit d'un COP instantané de la machine thermodynamique. Il représente le rapport entre la puissance délivrée par le condenseur et la puissance fournie par le compresseur. Il est défini dans des conditions de température entrée et sortie de la PAC bien identifiées par la norme européenne NF EN 14511.

Le **COP système** intègre en plus de l'énergie fournie par le compresseur, celle des auxiliaires permanents (circulateurs, pompes...)

Le **COP annuel** est en quelque sorte le rapport de l'énergie fournie par la PAC sur une année, par la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement du système pendant la même période. Il intègre bien les variations de performance sur l'année selon l'évolution de température des sources. C'est la prise en compte de ce COP qui permet d'établir un véritable bilan énergétique.

Eléments constitutifs d'une pompe à chaleur à compression

Le circuit des pompes à chaleur à compression est constitué des éléments principaux suivants :

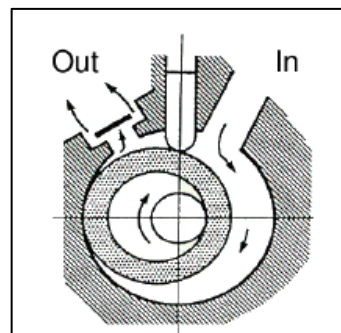
Le compresseur est l'organe essentiel de la pompe à chaleur, il peut être à pistons, à vis ou centrifuge selon la puissance nécessaire. Pour les petites puissances < 15 kW les compresseurs Scroll (compresseurs à spirales sans piston ni clapet) présentent un très bon rendement et sont de plus en plus utilisés. Ils sont composés de 2 spirales intercalées, l'une fixe, l'autre se déplace excentriquement sans tourner de sorte à emprisonner puis comprimer le fluide entre les spires.



Spirales compresseur Scroll

Pour les puissances plus importantes > 300 kW, on utilise des compresseurs à pistons, à vis ou centrifuge.

Le compresseur DC Twin Rotary est apparu plus récemment sur le marché. Il est composé de deux chambres de compression fixes. Un galet excentré est chargé de comprimer le fluide dans chaque chambre. Les deux galets sont fixés sur le même axe et sont diamétralement opposés. Ce compresseur offre également des performances intéressantes.



Compresseur DC Twin Rotary

Généralement le compresseur est entraîné par un moteur électrique. Il peut dans certains cas être entraîné par un moteur thermique, dans ce cas il y a possibilité de récupérer de la chaleur sur les gaz d'échappement et sur l'eau de refroidissement du moteur. Cette technologie présente un bilan en énergie primaire particulièrement intéressant. Elle est actuellement assez