



Les pompes à chaleur

Claude Acket

Résumé

Si de façon naturelle et selon les lois de la physique, la chaleur va du chaud vers le froid, l'utilisation d'une pompe à chaleur permet d'inverser le « courant » et de transférer de l'énergie thermique d'une zone dite froide en la refroidissant davantage vers une zone à chauffer. Ceci fait appel à une « machine » que l'on peut comparer à un réfrigérateur inversé, jouant sur les phénomènes d'évaporation et de condensation d'un fluide dit « frigorigène ».

L'efficacité d'une PAC se définit par le rapport de l'énergie « utile » (chaleur restituée) sur l'énergie fournie au compresseur et s'exprime par le coefficient de performance : le $COP = P_{th} / P_e$

P_{th} : puissance thermique délivrée à la zone à chauffer,

P_e : puissance électrique absorbée par le moteur.

Les lois de la thermodynamique donnent un coefficient de performance théorique maximum, dit de Carnot. Le facteur essentiel agissant sur le COP est la valeur de la température chaude. Plus elle sera basse, meilleur sera le COP, d'où l'intérêt évident des planchers chauffants modernes, qui permettent des températures au voisinage de 30/35 °C, plus basses que celles des radiateurs. Toutefois, ce choix n'est guère possible pour la majorité des rénovations. A un degré moindre, mais cependant significatif, la possibilité de disposer d'une source froide à la température la plus élevée possible est avantageuse, le mieux étant la nappe phréatique ou les possibilités offertes par des puits verticaux profonds de plus de 50 mètres. Il est clair que les PAC, désignées aérothermiques, fonctionnant à partir de l'air ambiant ont des COP intégrés sur toute la saison de chauffe plus faibles que les autres types de PAC. En outre leur COP peut s'écrouler à 1 lors des grands froids, mais ceci ne concerne qu'une fraction du temps et globalement cette solution facile à mettre en œuvre, surtout en rénovation et d'un coût d'investissement réduit, présente des avantages.

Différents types de PAC

Une PAC peut être destinée au chauffage seul, c'est le cas le plus courant à ce jour, à la production d'ECS (eau chaude sanitaire) seule, ou assurer les deux fonctions. Au point de vue terminologie, on distingue les PAC aérothermiques, dont la source d'énergie est l'air, et les PAC géothermiques, qui tirent leur énergie de la terre (en surface ou à faible profondeur de 100 à 200 mètres), des eaux souterraines ou superficielles (y compris la rivière, le lac, la mer). En fait le terme géothermie est discutable, car ce n'est pas la chaleur profonde de la terre qui intervient, mais celle issue du soleil emmagasinée et stockée dans la terre, ou les eaux.

Les coûts, aspects économiques et investissements

Pour une habitation individuelle, l'investissement peut aller de 9 000 € (air/air) à 22 000 € (sondes verticales). Chaque cas est particulier (distinction neuf/rénovation, remplacement ou non d'un matériel existant...), mais on peut retenir que sans aides, sur la base des coûts actuels des diverses sources d'énergie (gaz, fuel ou électricité), les retours sur investissement approchent les 20 ans. Cette durée devrait se réduire

avec l'accroissement certain à venir du coût des énergies (en comptant la part réduite d'électricité auto consommée par la PAC).

PAC perspectives

En France, il pourrait être retenu qu'en 2050, 10 millions de logements (individuels et équivalent logements du tertiaire) pourraient être équipés de PAC. La contribution thermique serait de 9,8 Mtep (114 TWh) dont 7 Mtep tirés du sol (c'est l'apport renouvelable) et 2,8 Mtep (32 TWh) apportés indirectement par l'énergie électrique.

Impact environnemental, rejets de gaz carbonique

L'intérêt vis-à-vis de rejets de CO₂ se mesure en comparaison avec un chauffage combustible fossile. A titre d'exemple, pour une habitation individuelle, la sélection d'une solution PAC au lieu de chaudière fossile donne des rejets de CO₂ réduits de 3,7 tonnes par an (cas du gaz) et 5,75 cas du fuel.

Avec les 10 millions de logements équipés indiqués ci-dessus, ce serait au moins 40 millions de tonnes de CO₂ qui ne seraient pas rejetés.

A) Généralités

En France 58 Mtep (673 TWh) d'énergie finale sont destinés au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) dans l'ensemble habitat et le tertiaire. Ceci représente 36 % du total de la consommation d'énergie finale, et donne lieu à des émissions annuelles d'environ 105 Millions de tonnes de gaz carbonique, soit 28 % de l'ensemble des rejets énergétiques français de ce gaz.

Réduire ces émissions, pour globalement atteindre le facteur 4, passera par une meilleure isolation des logements, mais aussi par le remplacement des combustibles fossiles par des sources non émettrices de rejets de gaz carbonique, dont les renouvelables et l'électricité, dans la mesure où son origine n'est pas ou que très peu fossile.

C'est dans ce cadre que les pompes à chaleur (PAC), en réduisant à service identique de chauffage la consommation d'électricité d'un facteur qui peut dépasser 3, ont leur place.

B) Un peu de physique, le cycle thermodynamique du fluide frigorigène

Si de façon naturelle et selon les lois de la physique, la chaleur va du chaud vers le froid, l'utilisation d'une pompe à chaleur permet d'inverser le « courant » et de transférer de l'énergie thermique d'une zone dite froide en la refroidissant davantage vers une zone à chauffer. Ceci fait appel à une « machine » que l'on peut comparer à un réfrigérateur inversé, jouant sur les phénomènes d'évaporation et de condensation d'un fluide dit « frigorigène ». Ce fluide est soumis au cycle de détente-compression, comme indiqué sur la figure 1, qui illustre le cas d'une installation à détente directe.

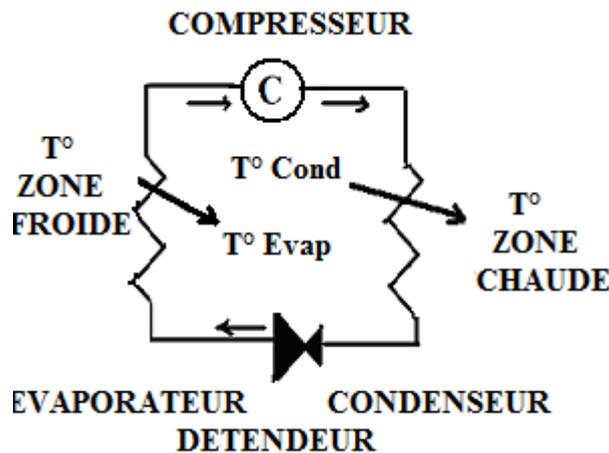


Figure 1, le circuit frigorigène d'une PAC

- Dans l'évaporateur, unité extérieure, le fluide calorifique passe de l'état mixte (liquide et un peu de gaz) à l'état de vapeur dite « sèche », en prenant de l'énergie au milieu ambiant (air ou terre ou eau), avec lequel il échange.
- Dans le compresseur, l'énergie mécanique, elle-même issue de l'énergie électrique du moteur, est transmise au gaz en le comprimant, avec une forte élévation de température.
- Dans le condenseur, le fluide se liquéfie à la température de saturation correspondant à la pression élevée. Il transfère de la chaleur vers la zone à chauffer, plus froide que lui.
- Dans le détendeur, le fluide passe de l'état liquide à haute pression à l'état mixte liquide/gaz à une pression basse.

Le fluide frigorigène :

Comme pour les réfrigérateurs les fluides du type CFC (chlorofluorocarbure), interdits pour leurs effets très nocifs sur la couche d'ozone, ont été dans une première étape remplacés par des hydrochlorofluorocarbures (HCFC), beaucoup moins nocifs pour l'ozone. Ces derniers, bien que non interdits, sont de plus en plus remplacés par des hydrofluorocarbures (HFC), considérés totalement inoffensifs vis-à-vis de l'ozone.

Rendement : le COP (Coefficient de Performance)

L'efficacité d'une PAC se définit par le rapport de l'énergie « utile » (chaleur restituée) sur l'énergie fournie au compresseur et s'exprime par $COP = P_{th} / P_e$

P_{th} : puissance thermique délivrée à la zone à chauffer,

P_e : puissance électrique absorbée par le moteur.

Les lois de la thermodynamique donnent un coefficient de performance théorique maximum, dit de Carnot, qui s'exprime par : $COP_{Carnot} = T_c + 273 / (T_c - T_f)$.

Les températures T_c (de condensation) et T_f (d'évaporation), exprimées en degrés Celsius, diffèrent des températures des zones externes chaude et froide, car il faut prendre en compte les écarts de températures entre fluides au sein des 2 échangeurs.

Le facteur essentiel agissant sur le COP est la valeur de la température chaude : plus elle sera basse, meilleur sera le COP. D'où l'intérêt évident des planchers chauffants modernes, qui permettent des températures au voisinage de 30/35 °C, plus basses que celles des radiateurs. Toutefois, ce choix n'est guère possible pour la majorité des rénovations. A un degré moindre, mais cependant significatif, la possibilité de disposer d'une source froide à la température la plus élevée possible est avantageuse, le mieux étant la nappe phréatique ou les possibilités offertes par des puits verticaux profonds de plus de 50 mètres.

Un exemple de calcul de COP théorique

Nous supposons une PAC alimentant un chauffage au sol par un circuit d'eau chaude à 35 °C et utilisant comme source froide une nappe phréatique à 10 °C.

- Nous retenons des écarts de températures internes de 15 °C entre cycle et sources, et donc les températures à prendre en compte dans la formule de Carnot sont de 50 °C pour T_c et - 5 °C pour T_f (et non pas 35 et 10, erreur souvent faite).

- Nous obtenons un COP de Carnot de 5,8.

- Toutes choses égales par ailleurs, mais en alimentant des radiateurs avec de l'eau à 60 °C, le COP s'abaisse à 4,3 (diminution de 26 % du COP). Par contre, si nous alimentons le même chauffage au sol à 35 °C, mais à partir d'une source froide à 0 °C (cas du sol à faible profondeur), le COP devient 4,9 (baisse de 15 % du COP).

Pour obtenir le COP réel, il faut prendre en compte également les rendements des machines tournantes (moteur et compresseur) et le fait que le cycle idéal de Carnot n'est jamais suivi. Un COP fabricant contractuel, issu d'essais, sera donné pour des conditions spécifiques de températures des zones chaude et froide. Ce peut être le couple 7-35 (7 °C de température extérieure et 35 °C de température d'eau chaude). Mais ce peuvent être d'autres couples de températures, comme : 0-35, 0-60, 7-35. Des abaques ou des tableaux fournis par le fabricant permettent d'estimer la variation du COP lorsqu'on s'écarte des conditions contractuelles.

Le COP réel sera donc toujours inférieur au COP théorique de Carnot.

C) Différents types de PAC

Une PAC peut être destinée au chauffage seul, c'est le cas le plus courant à ce jour, à la production d'ECS seule, ou assurer les deux fonctions. Elle peut en outre être réversible et produire du froid en été.

Au point de vue terminologie, on distingue les PAC aérothermiques, dont la source d'énergie est issue de l'air, et les PAC géothermiques, qui tirent leur énergie de la terre (en surface ou à faible profondeur de 100 à 200 mètres), des eaux sous terraines (nappes phréatiques), ou d'eaux superficielles (lacs, mer). En fait le terme géothermie est en grande partie discutable, car ce n'est pas la chaleur profonde de la terre qui intervient, mais celle issue du soleil emmagasinée et stockée dans la terre. Ainsi le terme géosolaire est également utilisé pour désigner les PAC à capteurs enterrés horizontaux.

La distinction entre les différents types de PAC se fait aussi sur le choix des fluides utilisés pour le transfert de chaleur en amont ou en aval du circuit fermé de fluide frigorigène, avec des combinaisons comme : air/air, air/eau, eau/ eau...Nous ne pouvons présenter toutes les variantes possibles de PAC et nous nous limiterons aux plus courantes.

Les PAC eau/eau sur nappe ou équivalent.

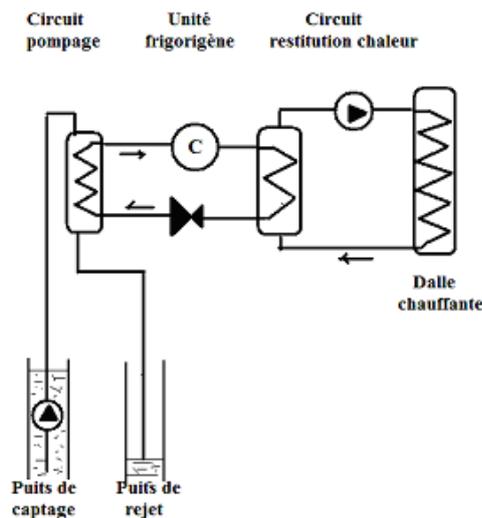


Figure 2 : Scéma d'une PAC eau/eau sur nappe phréatique

L'eau pompée dans la nappe phréatique y est renvoyée, mais en une zone distincte éloignée.

Ces PAC assurent les meilleures performances. La température de la nappe phréatique variant peu dans l'année, le COP se maintient à des valeurs élevées indépendamment des besoins de chauffage. Ces PAC se développent surtout dans le secteur tertiaire. La seule restriction peut venir de la saturation de l'utilisation d'une nappe, cas typique des concentrations tertiaires de bureaux et surfaces commerciales en un même lieu.

Dans le cas d'une dalle chauffante basse température (vers 30°C) et d'une température d'eau zone froide entre 7 et 10 °C, le COP peut atteindre ou dépasser 5. Mais si le chauffage passe par des radiateurs fonctionnant à températures plus élevées le COP peut se réduire à 3,5.

Cet avantage de COP élevé et peu variable, même s'il peut être moindre, existe en utilisant d'autres sources d'eau adaptées (y compris la mer) dont les températures ne descendent pas beaucoup en hiver. Encore faut-il aller pomper cette eau et ceci peut limiter l'extension.

Les PAC eau/eau à capteurs enterrés horizontaux

C'est ce type de PAC qui s'est le plus développé ces dernières années pour les constructions neuves. Il diffère du précédent par l'utilisation de la terre en surface comme zone dite froide d'où la chaleur sera extraite. Le circuit de pompage chaleur est constitué d'un réseau de tubes enterrés, dans lesquels circule un mélange d'eau et d'antigel. Le réseau est installé, à une profondeur

d'environ 70 cm, sur un plan horizontal d'une surface de l'ordre de 1,5 à 2 fois la surface à chauffer. Cette profondeur est choisie pour que la terre agisse comme un accumulateur de chaleur qui se rechargera par l'énergie solaire directe, par la conduction des terres et par les écoulements d'eau une fois l'hiver passé ou même en plein hiver pendant les périodes de redoux. Comme les températures de sol à 70 cm de profondeur baissent un peu en cours d'hiver, il faut faire référence à un COP moyen, qui sera de l'ordre de 20 % plus faible que dans le cas idéal de la nappe vue ci-dessus (ex : le COP de 5 passe à 4).

Les PAC à capteurs enterrés verticaux

Ce nouveau type de pompe à chaleur est très proche du précédent. La seule différence consiste en la mise en place de sondes verticales implantées dans un forage d'une profondeur de 50 à plus de 200 m. La sonde est constituée de deux tubes d'échange en U, dans lesquelles circule l'eau glycolée. Le vide entre les tubes d'échange et le sol est comblé avec un mélange de ciment et d'argile qui sert de joint thermique. Plus coûteuses que les capteurs horizontaux, elles occupent moins de surface au sol et ont un COP supérieur, proche de celui des PAC sur nappe.

Les PAC aérothermiques.

Oublions totalement la terre, il n'y a plus aucun lien, même indirect, entre ces PAC aérothermiques et la géothermie. Le seul rapport avec la géothermie est l'utilisation de la même technologie de base : la pompe à chaleur. Le circuit intermédiaire de la zone froide sera réalisé par un important brassage forcé d'air qui viendra lécher les tubes d'échange, dans lesquels circule le fluide frigorigène. Le circuit intermédiaire de la zone chaude peut être un circuit d'eau (dalle ou radiateurs), donnant la combinaison air/eau. Il peut aussi être de l'air (air/air), le chauffage de la maison étant assuré par de l'air chaud pulsé.

Mais comme la température de l'air peut descendre largement sous zéro, le COP momentané peut s'écrouler lorsque les besoins de chauffe sont maxima. A ceci s'ajoute les conséquences du givrage abaissant encore les performances. Dans les climats rigoureux et même en partie tempérés un appoint de chauffage s'impose (électrique intégré ou poêle à bois). Une solution très valable en rénovation est d'intégrer le circuit PAC à une installation de chauffage central classique existante, si celle-ci est encore en bon état. La PAC air est seule en opération la majorité du temps et la chaudière prend exceptionnellement la relève les jours de grands froids.

D) PAC. Aspects économiques et investissements

Globalement, la profession annonce pour les PAC/air des coûts compris entre 60 et 90 € TTC par m² à chauffer, et entre 80 et 185 € TTC par m² à chauffer pour les PAC eau/eau.

A titre de repère donnons quelques exemples de coût sur la base de l'année 2008 :

- PAC capteurs horizontaux, maison de 184 m², investissement : 13 800 €, soit environ 75 €/ m²
- PAC sonde verticale, maison de 195 m²; investissement : 22 000 € TTC, soit environ 130 €/ m²
- PAC Air/eau, maison de 160 m² ; investissement : 10 000 € TTC, soit environ 65 €/ m².
- PAC Air/air, maison de 165 m² ; investissement 9 000 € TTC, soit environ 55 €/ m².

Chaque cas mérite un bilan spécifique et il ne faudrait pas tirer de ce qui suit des règles générales. Toutefois, pour fixer des ordres de grandeur et à titre purement indicatif, examinons le cas de la maison de 184 m² bien isolée, avec des pertes thermiques annuelles de 100 kWh/m², soit un besoin de chauffage de 18 400 kWh/an.

Avec un COP de 4,2 le gain de consommation est de 14 000 kWh par an. En se basant sur une durée de vie de l'investissement de 20 ans et un taux d'indexation de 4 %, le coût des travaux se ramène à 0,07 €/kWh économisé soit 834 **€/tep économisée**.

Nota :

- Fin 2011 le fuel domestique valait 1 060 €/tep (0,9 € le litre) l'opération PAC est rentable hors subventions. Par contre le gaz domestique valait 608 €/tep (5,24 c€/kWh) et l'opération PAC n'est pas rentable. Mais il suffit d'une augmentation du prix du gaz de 40 % pour la rendre rentable.

E) PAC et gains sur les rejets de gaz carbonique

Poursuivons l'examen de l'exemple cité ci-dessus d'une maison de 184 m² bien isolée et consommant 18 400 kWh/an pour le chauffage. Si le chauffage est au gaz, les rejets de gaz carbonique annuels sont de 4,7 tonnes. Aux 4 400 kWh de consommation d'électricité peuvent être associée en France environ 0,35 tonne de rejets de gaz carbonique, soit un bilan global en faveur des PAC de plus de 4 tonnes par an par installation.

F) PAC ? avenir, vue globale

- Pour la France, le marché des PAC est en forte expansion, aussi il est considéré qu'en 2050, 10 millions de logements (individuels et équivalent logements du tertiaire) pourraient être équipés de PAC. La contribution thermique serait de 9,8 Mtep (114 TWh) dont 7 Mtep tirés du sol (c'est l'apport renouvelable) et 2,8 (32 TWh) apportés indirectement par l'énergie électrique.

Les rejets de gaz carbonique seraient réduits de 40 millions de tonnes.

- Des évolutions voisines ou même plus prononcées par habitant (Suède, Suisse) sont notées dans tous les pays développés et globalement au milieu du siècle les pompes à chaleur pourraient « tirées » 300 à 400 Mtep de la nature.