

# LES POMPES À CHALEUR

# CLIMA+CONFORT

## L'offre d'info des professionnels du génie climatique



44 newsletters  
par an

Accès à l'intégralité  
du site

8 numéros  
par an

Abonnez-vous sur [www.climaplusconfort.fr](http://www.climaplusconfort.fr) dès 82 € TTC

Clima+confort, une marque d'information

PYC ÉDITION

Jean Lemale

# LES POMPES À CHALEUR

2<sup>e</sup> édition

DUNOD

Photo de couverture : © rigamondis – Fotolia.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	---

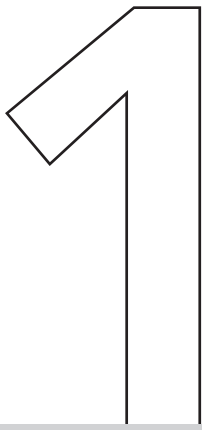


© Dunod, Paris, 2012, 2014  
ISBN 978-2-10-070782-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.





## Historique – contexte

La pompe à chaleur est fondée sur les principes de la thermodynamique découverts au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, que l'on doit aux travaux des scientifiques : Joule, Carnot et Lord Kelvin.



Figure 1.1 – Sadi Carnot (1796-1832)

Sadi Carnot est considéré comme le père de la **thermodynamique** moderne en introduisant le deuxième principe de la thermodynamique.

Les premières pompes à chaleur apparaissent au début du XX<sup>e</sup> siècle sous forme de machines frigorifiques à compression de fluide.

C'est surtout à partir de 1950 que se développent, en particulier aux États-Unis, les appareils de climatisation à la fois dans l'automobile, le bâtiment et pour certaines applications industrielles.

En France, les années 1950 sont marquées par l'équipement de la quasi-totalité des ménages de machines frigorifiques que sont nos réfrigérateurs, symboles du confort moderne pour l'hygiène alimentaire. Le réfrigérateur puise les calories dans sa propre enceinte pour y abaisser la température et rejette la chaleur puisée dans la pièce où il se trouve. À l'inverse, la pompe à chaleur puise des calories à l'extérieur et les restitue à l'intérieur de l'enceinte à chauffer.

La réversibilité des machines frigorifiques trouve des applications dans le secteur tertiaire. En 1963, lors de la construction de la maison de la Radio, une pompe à chaleur utilisant comme fluide frigorigène l'ammoniac est mise en place pour assurer à la fois les besoins de froid et de chaud de l'immeuble. Elle puise ses calories dans une nappe à 500 m de profondeur à une température de 27 °C.

Dans le secteur domestique, le développement des pompes à chaleur, en substitution ou complément des systèmes de chauffage traditionnels, est impulsé par les chocs pétroliers de 1973 et 1979. En 1980, le programme PERCHE (Pompes à chaleur en relève de chaudières existantes) est lancé sous l'égide d'EDF.

La pompe à chaleur prend le relais de la chaudière existante au fioul lorsque les conditions extérieures imposent l'arrêt de la pompe. Le marché appuyé par une publicité particulièrement incitative connaît un emballement qui sera de courte durée.

En effet, le marché est rapidement victime d'un certain nombre de dysfonctionnements liés au manque à la fois de fiabilité des matériels et de formation des installateurs.

Au cours des années 1990, le faible coût des énergies n'incite pas au développement de cette filière énergétique tant dans le secteur domestique que dans celui du tertiaire. Un redémarrage s'amorce au début des années 2000 avec l'apparition de matériels performants et de nouvelles technologies (capteurs enterrés). La pompe à chaleur est reconnue comme un vecteur de développement des énergies renouvelables. Les professionnels s'organisent avec la création en 2002 de l'AFPAC (Association française pour les pompes à chaleur), la création du label NFPAC et du qualificatif QUALIPAC pour les installateurs. Le crédit d'impôt pour les particuliers et le fonds chaleur pour les projets plus importants complètent le dispositif qui font de la pompe à chaleur une filière incontournable pour atteindre les objectifs définis dans le cadre du Grenelle de l'environnement.

Le Grenelle de l'environnement fixe des objectifs ambitieux pour les pompes à chaleur, environ 2 millions de résidences principales équipées en 2020. Pour les pompes à chaleur géothermiques, l'objectif est d'atteindre un parc de plus de **600 000 installations** d'ici à 2020.

Aujourd'hui, la pompe à chaleur est considérée comme l'un des moyens les plus économiques et écologiques pour assurer les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation applicables aussi bien à la rénovation qu'aux constructions neuves pour l'ensemble des secteurs du bâtiment. Les différentes technologies actuellement disponibles sur le marché s'adaptent dans des conditions satisfaisantes aux nouvelles réglementations thermiques.

Les pompes à chaleur avec COP élevé seront susceptibles de répondre aux exigences de la RT 2012 (voir les principaux éléments de la réglementation thermique (RT 2012) en annexe 1). C'est notamment le cas des PAC géothermiques et des chauffe-eau thermodynamiques pour l'eau chaude sanitaire. À noter que la part de l'ECS sera le premier poste de consommation pour ces nouvelles constructions.





# 2

## Généralités sur les pompes à chaleur

Pour satisfaire des besoins de chaleur, le premier réflexe est généralement d'utiliser la combustion de matières premières (pétrole, gaz, charbon, bois...). La combustion, outre le fait qu'elle contribue à l'épuisement de ressources limitées, s'effectue à une température élevée alors que la chaleur produite n'est en fait utilisée le plus souvent qu'à une température beaucoup plus basse.

La thermodynamique offre des possibilités pour satisfaire de manière rationnelle des besoins de chaleur à niveau modéré. La nature offre des quantités de chaleur considérables disponibles, souvent à des niveaux de température trop bas pour pouvoir être utilisés directement.

La pompe à chaleur, en appliquant les principes de la thermodynamique, va permettre de relever le niveau de température de ces ressources naturelles pour les rendre utilisables dans de nombreuses utilisations de la vie courante et en particulier, pour le chauffage des bâtiments.

Rappelons que les machines frigorifiques fonctionnent sur le même principe que les pompes à chaleur, mais l'effet recherché est différent.

Aujourd'hui se développent des machines thermodynamiques dont la finalité est de produire du chaud ou « réversibles », c'est-à-dire susceptibles d'assurer les deux fonctions chauffage et refroidissement.

## 2.1 Principes thermodynamiques

### 2.1.1 Premier principe

Le premier principe de la thermodynamique stipule que lors de toute transformation, il y a conservation de l'énergie.

Dans le cas des systèmes thermodynamiques fermés (*figure 2.1*), il s'énonce de la manière suivante :

« Au cours d'une transformation quelconque d'un système fermé, la variation de son énergie est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, sous forme de chaleur ( $Q$ ) et sous forme de travail ( $W$ ). »

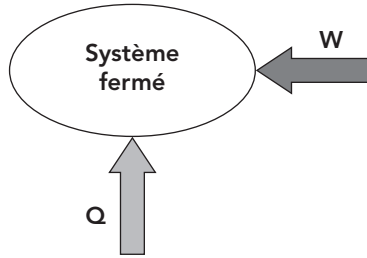


Figure 2.1 – Principe thermodynamique fermé

Dans un système cohérent d'unités, ce premier principe se traduit par la relation :  $W + Q = 0$

### 2.1.2 Deuxième principe

Le premier principe met en évidence la conservation des énergies mises en jeu dans un système. Le second principe permet de connaître l'évolution d'un système. En effet, on peut transformer en totalité du travail en chaleur, mais on ne peut pas toujours transformer de la chaleur en travail.

Lorsqu'un système évolue de manière cyclique entre 2 sources de chaleur, on caractérise une source froide à la température  $T_1$  et une source chaude à la température  $T_2$ . Les appellations « source froide » et « source chaude » sont des appellations relatives à un schéma déterminé. La température de la source chaude est toujours supérieure à la source froide.

Deux cas (*figures 2.2 et 2.3*) sont à considérer :

## Moteur thermique

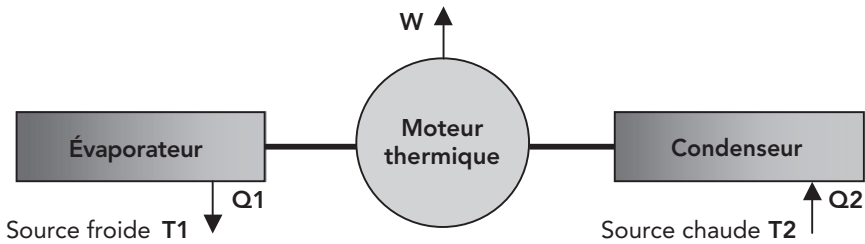


Figure 2.2

Le système reçoit de la chaleur  $Q_2$  de la source chaude et en restitue une partie à la source froide  $Q_1$  ( $Q_1 < Q_2$ ). La différence est transformée en travail  $W$ .

En application du premier principe, on peut écrire :

$$W + Q_1 + Q_2 = 0 *$$

\*Ce qui est reçu est compté positivement, ce qui est cédé négativement.

Soit en valeur absolue :

$$W = Q_2 - Q_1$$

## Pompe à chaleur (transfert de chaleur d'une source froide à une source chaude)

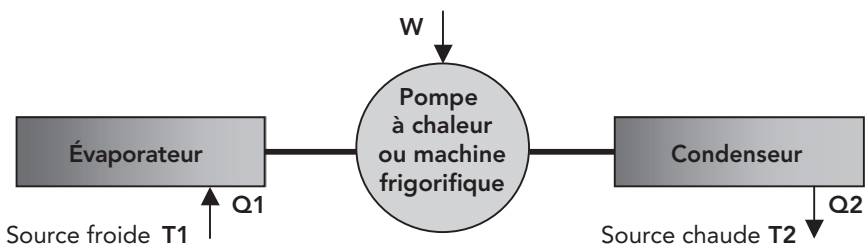


Figure 2.3

Le système reçoit de la chaleur  $Q_1$  de la source froide et du travail  $W$ . Il restitue de la chaleur  $Q_2$  à la source chaude.

En application du premier principe, on peut écrire :

$$W + Q_1 + Q_2 = 0 *$$

\*Ce qui est reçu est compté positivement, ce qui est cédé négativement.

Soit en valeur absolue :

$$Q_2 = Q_1 + W \text{ chaleur cédée}$$

$$Q_1 = Q_2 - W \text{ chaleur prélevée}$$

Le transfert de chaleur d'une source froide vers une source chaude ne se fait pas spontanément, mais avec une compensation représentée par l'énergie apportée au système sous forme mécanique (travail). À noter que les pompes à chaleur utilisant le principe d'absorption remplacent l'énergie mécanique par de l'énergie thermique (*chapitre 4*).

## 2.2 Applications à la production de chaud et de froid

Les principes thermodynamiques relatifs aux moteurs thermiques ne seront pas développés dans cet ouvrage. Cependant, pour certaines applications, l'énergie mécanique nécessaire au transfert d'énergie peut être fournie par un moteur thermique dont une partie de la chaleur destinée à la source froide pourra être récupérée en mode chauffage (*paragraphe 3.6*).

Le système thermodynamique fonctionnant entre 2 sources peut être utilisé pour satisfaire des besoins de refroidissement, de chauffage ou les deux à la fois.

### 2.2.1 Machine frigorifique

On ne produit pas du froid à proprement parler. En réalité, on enlève de la chaleur  $Q_1$  à la source froide qui est transférée à la source chaude. Il y a donc un abaissement de température à la source froide.

La quantité de chaleur  $Q_2$  transférée à la source chaude est supérieure à celle prélevée à la source froide. Un tel système produit plus de calories que de frigories à utiliser. L'enlèvement de chaleur de la source froide nécessite qu'elle puisse être évacuée au niveau de la source chaude.

### 2.2.2 Pompe à chaleur

Dans ce cas, on s'intéresse à la chaleur récupérée à partir de la source froide  $Q_1$ , à laquelle s'ajoute l'énergie mécanique  $W$  dégradée en chaleur, nécessaire au système.

### 2.2.3 Production simultanée de chaud et de froid

Dans ce cas, on utilise à la fois la chaleur reçue à la source chaude et le froid produit à la source froide. Cette application nécessite une configuration où l'on a simultanément besoin de chaud dans un endroit et de froid dans un autre. Cette application est connue sous le terme de thermofrigopompe (*chapitre 3.7*).

## 2.3 Cycle de Carnot inversé

Le cycle thermodynamique permettant le transfert de chaleur entre 2 sources sous l'effet d'un travail peut être représenté dans un diagramme entropique (*figure 2.4*).

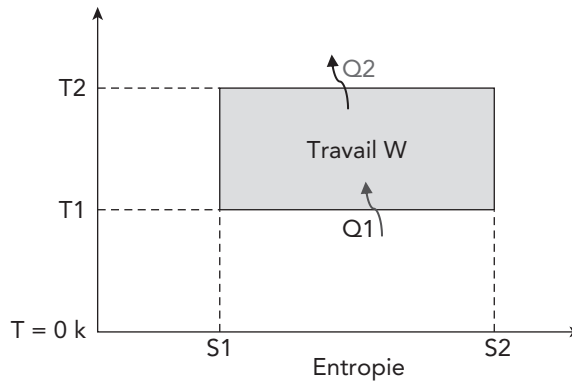


Figure 2.4 – Diagramme entropique

Pour évaluer les performances maximales, on considère un cycle réversible particulier formé de 2 évolutions isothermes et de 2 évolutions isentropiques.

L'utilisation du diagramme entropique permet d'évaluer les énergies mises en jeu aux différents stades de l'évolution. Les énergies sont représentées par les surfaces délimitées par les droites isothermes horizontales et les droites isentropiques.

La chaleur reçue de la source froide :

$$Q_1 = T_1 \times (S_2 - S_1)$$

La chaleur fournie à la source chaude :

$$Q_2 = T_2 \times (S_1 - S_2)$$

Travail dépensé :

$$W = (T_2 - T_1) \times (S_2 - S_1)$$

En mode production de chaud, on définit le coefficient de performance de la pompe à chaleur COP comme le rapport entre l'énergie récupérée par l'énergie dépensée :

$$\text{COP} = Q_2 / W$$

En application du deuxième principe, le COP théorique ou maximal est égal à :

$$\text{COP th} = T_2 / (T_2 - T_1)$$

ou

$$Q_2 / (Q_2 - Q_1)$$

avec  $T_2$  et  $T_1$  températures respectives de la source chaude et de la source froide sont exprimées en températures absolues exprimées en Kelvin (K).

En mode production de froid, on définit la performance de la machine frigorifique comme le rapport de l'énergie frigorifique fournie par l'énergie dépensée. Elle est désignée sous les termes de coefficient de performance frigorifique Cfr ou EER *Energy Efficiency Ratio* :

$$\text{EER} = Q_1 / W$$

En application du deuxième principe, l'EER ou Cfr théorique ou maximal est égal à :

$$T_1 / (T_2 - T_1) \text{ ou } Q_1 / (Q_2 - Q_1)$$

En mode de production de chaud et de froid simultanés, le coefficient de performance global idéal est égal à :

$$(T_2 + T_1) / (T_2 - T_1)$$

Dans la réalité, les performances des systèmes thermodynamiques sont inférieures aux valeurs théoriques définies par les formules ci-dessus. En effet, le cycle idéal n'est pas réalisable dans la mesure où les fluides utilisés dans les machines thermodynamiques ne sont pas parfaits et qu'il faut tenir compte des différentes pertes et échanges avec l'extérieur.

Les coefficients de performance réels se situent entre 40 et 60 % des valeurs théoriques.