

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 dès 82 € TTC

Clima+confort, une marque d'information

PYC ÉDITION

Jean Lemale

LES POMPES À CHALEUR

2^e 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^{er} 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.

Table des matières

Chapitre 1 : Historique – contexte	1
Chapitre 2 : Généralités sur les pompes à chaleur	5
2.1 Principes thermodynamiques	5
2.2 Applications à la production de chaud et de froid	8
2.3 Cycle de Carnot inversé	9
2.4 Familles de pompes à chaleur	11
Chapitre 3 : Pompe à chaleur à compression	13
3.1 Principe de fonctionnement	13
3.2 Diagramme de Mollier	14
3.3 Coefficients de performance	17
3.4 Éléments constitutifs d'une PAC à compression	21
3.5 Les fluides frigorigènes	32
3.6 Pompe à chaleur réversible	36
3.7 Thermofrigopompe	37
3.8 Pompes à chaleur haute température	40
Chapitre 4 : Pompes à chaleur à absorption	43
4.1 Principe de fonctionnement	43
4.2 Exemples de réalisation	45
4.3 Comparaison : pompe à chaleur à compression et pompe à chaleur à absorption	47
4.4 Performances de l'absorption pour différentes utilisations	48

Chapitre 5 : Détermination des besoins énergétiques	49
5.1 Évolution des consommations énergétiques	49
5.2 Détermination des besoins de chauffage	50
5.3 Consommation eau chaude sanitaire	57
5.4 Détermination des besoins pour climatisation (besoins de froid)	60
Chapitre 6 : Systèmes d'émission de chauffage et/ou de rafraîchissement	63
6.1 Émission en mode hydraulique	63
6.2 Émission en mode aéraulique	70
Chapitre 7 : Présentation des sources	79
7.1 Air	79
7.2 Eau	80
7.3 Échange avec le sol	86
7.4 Les fondations géothermiques	91
7.5 Capteurs solaires	91
Chapitre 8 : Pompe à chaleur air extérieur	93
8.1 Présentation	93
8.2 Phénomènes de givrage	97
8.3 Tube aérotherme	98
8.4 Systèmes de distribution	99
Chapitre 9 : Pompe à chaleur sur aquifère	101
9.1 Contexte	101
9.2 Caractéristiques des aquifères	102
Chapitre 10 : Capteurs horizontaux	119
10.1 Les PAC à détente directe	119
10.2 Les PAC à fluides intermédiaires (eau glycolée-eau)	120
10.3 Les PAC mixtes (sol-eau)	121
10.4 Mise en œuvre des capteurs	121

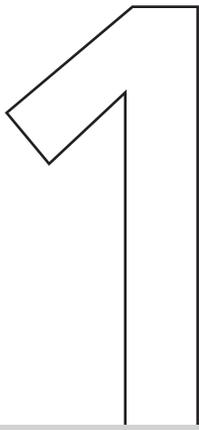
10.5 Dimensionnement	127
Chapitre 11 : Capteurs verticaux ou sondes géothermiques	131
11.1 Maisons individuelles	132
11.2 Test de réponse thermique	137
11.3 Bilan des consommations d'électricité d'un pavillon équipé de sondes	140
11.4 Champs de sondes géothermiques	144
Chapitre 12 : Autres systèmes de captage par échange avec le sol	149
12.1 Corbeilles géothermiques	149
12.2 Échangeurs de type Slinky	152
Chapitre 13 : Fondations géothermiques ou thermoactives	153
13.1 Principe de fonctionnement	153
13.2 Recommandations simplifiées (pour avant-projet)	155
Chapitre 14 : Applications spécifiques	157
14.1 Maisons individuelles	157
14.2 Chauffe-eau thermodynamique	159
14.3 Systèmes combinés	160
14.4 Lotissement de pavillons individuels	166
14.5 Immeubles collectifs (chauffage)	166
14.6 Aménagement de ZAC – éco-quartiers	168
14.7 Systèmes de distribution de chaleur à partir de PAC sur aquifère peu profonds	169
14.8 Exemple d'aménagement d'une ZAC (commune du département des Hauts-de-Seine)	172
14.9 Immeubles tertiaires	176
14.10 Cultures sous serres	177

Chapitre 15 : Pompes à chaleur associées à un réseau de chaleur géothermique	179
15.1 Système avec PAC assistée par échangeur et évaporateur indirect	180
15.2 Système indirect avec possibilité de <i>by-pass</i> de la PAC et de l'échangeur géothermique	181
15.3 Système avec montage parallèle entre le condenseur de la PAC et la branche contenant l'évaporateur et l'échangeur géothermique	181
15.4 Montage des pompes à chaleur	182
Chapitre 16 : Exemples de réalisation	185
16.1 Aéroport de Zürich (Dock Midfield)	185
16.2 Champ de sondes à l'ENSTA Paris Tech (91 Palaiseau)	186
16.3 Opération de géothermie à Blagnac	188
16.4 Chauffage climatisation maison de la radio (PAC sur aquifère)	189
16.5 Centre de maintenance des tramways de Tours (fondations géothermiques)	191
16.6 Résidence Saint-Georges 78 Limay (fondations géothermiques)	193
16.7 La Seyne-sur-Mer (PAC sur eau de mer)	194
16.8 Système de récupération de chaleur sur les eaux grises d'un restaurant d'entreprise (Cergy Pontoise)	195
16.9 Récupération de la chaleur des eaux grises d'un immeuble collectif à Ermont (95)	196
Chapitre 17 : Bilans énergie primaire et environnemental	199
17.1 Bilan énergie primaire pour une maison individuelle	199
17.2 Bilan environnemental	200
Chapitre 18 : Montage d'un projet de pompe à chaleur	203
18.1 Différentes phases du montage d'un projet PAC	203
18.2 Cahier des charges étude de faisabilité (exemple PAC sur aquifère)	204

Bibliographie	209
Glossaire	211

ANNEXES

1. Réglementation	221
Réglementation thermique 2012 (éléments principaux)	221
Exigences de résultats en termes de performance énergétique globale	222
2. La garantie AQUAPAC	229
3. Certifications	233
Marque NF PAC	233
Appellation Qualité « QUALIPAC »	234
QUALIFORAGE	234
4. Principes légaux	237
Textes et documents de référence	237
Normes	237
Index	239



Historique – contexte

La pompe à chaleur est fondée sur les principes de la thermodynamique découverts au cours du XIX^e 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^e 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). »

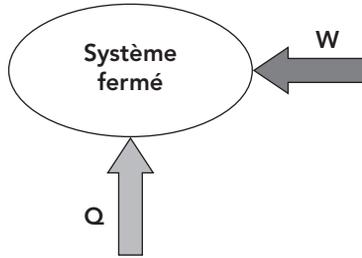


Figure 2.1 – Principe thermodynamique fermé

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

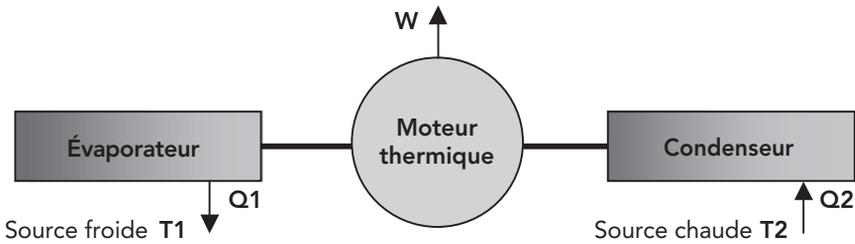


Figure 2.2

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)

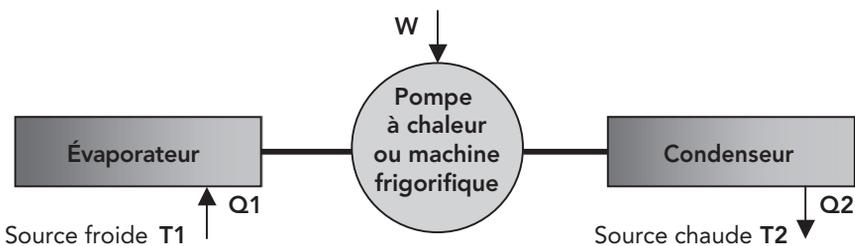


Figure 2.3

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 frigorifiques 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*).

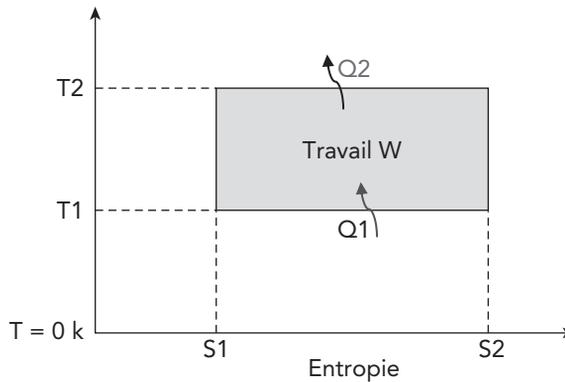


Figure 2.4 – Diagramme entropique

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.