Jean Lemale

LES POMPES À CHALEUR

2e édition

DUNOD

Photo de couverture : © rigamondis – Fotolia.com

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.



Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de 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.

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).

© Dunod, Paris, 2012, 2014
ISBN 978-2-10-071339-4

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

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

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

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

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 *by-pass* 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

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

1 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.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.