

SOMMAIRE

Préface	11
Chapitre 1 : GÉNÉRALITÉS	13
1.1 RAPPELS DE THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE	13
1.1.1 Principe de la conservation de l'énergie	
1.1.2 Sources des divers types de PAC	
1.1.3 Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur	
1.2 DÉPERDITIONS ET BESOINS THERMIQUES	15
1.2.1 Température extérieure de base hiver	
1.2.2 Coefficient U de transmission thermique d'une paroi	
1.2.3 Déperditions thermiques des parois	
1.2.4 Pertes supplémentaires dues aux éléments chauffants	
1.2.5 Déperditions par renouvellement d'air	
Infiltrations	
Renouvellement d'air naturel	
Renouvellement d'air mécanique	
1.2.6 Déperditions thermiques	
Déperditions thermiques globales et réelles	
Les points principaux à contrôler lors de la construction	
1.2.7 Coefficient G de déperditions volumiques	
1.2.8 Besoins thermiques	
1.3 AIR HUMIDE	24
1.3.1 Présentation du diagramme psychrométrique	
1.3.2 Chauffage de l'air	
1.3.3 Refroidissement de l'air	
1.4 RÉGLEMENTATION	30
1.4.1 Réglementation thermique et normes associées	
1.4.2 Réglementation concernant l'environnement	
Réglementation sur les fluides frigorigènes	
Réglementation "Déchets et Equipements Electriques et Electroniques"	
Norme ROHS	
1.4.3 Normes et DTU sur la ventilation, le chauffage central et la plomberie	
1.4.4 Réglementation sur les forages	
1.5 DÉFINITION ET HISTORIQUE	33
1.5.1 Qu'est-ce qu'une pompe à chaleur ?	
Analogie hydraulique	
Analogie avec un réfrigérateur ménager	
1.5.2 Historique	
Naissance des pompes à chaleur	
Evolution en France	

1.6	PRINCIPE DE LA POMPE À CHALEUR	36
1.6.1	Fonctionnement des systèmes non réversibles	
	Compresseur	
	Condenseur	
	Organe de détente	
	Evaporateur	
1.6.2	Fonctionnement des systèmes réversibles	
	Fonctionnement en chauffage	
	Fonctionnement en refroidissement	
1.6.3	Différences entre pompe à chaleur et climatiseur	
	Choix des composants	
	Durée annuelle de fonctionnement des compresseurs	
	Conditions de fonctionnement	
	Différences technologiques entre une pompe à chaleur et un climatiseur	
1.7	COEFFICIENTS (au pluriel !) DE PERFORMANCE (COP)	41
1.7.1	COP théorique des sources ϵ_{ths}	
1.7.2	COP théorique du cycle ϵ_{thc}	
1.7.3	COP du groupe moto-compresseur ϵ_c	
1.7.4	COP global de la PAC ϵ_p	
1.7.5	COP global de l'installation ϵ_i	
1.7.6	COP moyen annuel du compresseur ϵ_{ac}	
1.7.7	COP global moyen annuel de la PAC ϵ_{ap}	
1.7.8	COP saisonnier ou COP annuel de l'installation ϵ_{ai}	
1.7.9	Conclusion sur l'utilisation des différents COP	
1.8	ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DES POMPES À CHALEUR	52
1.8.1	Couche d'ozone	
	Qu'est-ce que la couche d'ozone ?	
	Le chlore et la couche d'ozone	
	Le PDO des fluides frigorigènes	
1.8.2	Effet de serre	
	Effet de serre direct (ESD)	
	Effet de serre indirect (ESI)	
	Effet de serre global (ESG)	
1.8.3	Confinement des fluides frigorigènes	
1.8.4	La pompe à chaleur, une championne contre l'effet de serre	
Chapitre 2 : TECHNOLOGIE		59
2.1	LES COMPRESSEURS	59
2.1.1	Compresseurs volumétriques, type hermétique à pistons	
2.1.2	Compresseurs volumétriques, type semi-hermétique à pistons	
2.1.3	Compresseurs volumétriques, type ouvert à pistons	
2.1.4	Compresseurs volumétriques, type hermétique spiro-orbital (Scroll)	
2.1.5	Compresseurs volumétriques, type à vis	
2.1.6	Compresseurs centrifuges	
2.2	LES CONDENSEURS	70
2.2.1	Rôle des condenseurs	
2.2.2	Echanges de chaleur dans un condenseur	
2.2.3	Condenseurs à air	

2.2.4	Condenseurs à eau Condenseur à serpentin Condenseur à tubes coaxiaux Condenseur à plaques brasées Condenseur multitubulaire	
2.3	LES ÉVAPORATEURS	74
2.3.1	Rôle des évaporateurs	
2.3.2	Echanges thermiques dans un évaporateur	
2.3.3	Évaporateurs à air Les tubes Les ailettes Condensation et givrage des évaporateurs à air Echanges thermiques dans un évaporateur à air	
2.3.4	Évaporateurs à eau Évaporateur coaxial en spirale Évaporateur à plaques brasées Évaporateur immergé Évaporateur multitubulaire	
2.4	LES ORGANES DE DÉTENTE	80
2.4.1	Rôle des organes de détente	
2.4.2	Capillaire de détente	
2.4.3	Orifice calibré	
2.4.4	Régleur manuel	
2.4.5	Détendeurs thermostatiques Détendeur thermostatique à égalisation interne de pression Détendeur thermostatique à égalisation externe de pression	
2.4.6	Détendeur électronique	
2.4.7	Détendeurs à flotteur Détendeur à flotteur haute pression Détendeur à flotteur basse pression	
2.4.8	Contrôleurs de niveau Contrôleur de niveau magnétique Contrôleur de niveau à bulbe chauffé	
2.5	APPAREILS FRIGORIFIQUES ANNEXES	85
2.5.1	Vanne d'inversion de cycle	
2.5.2	Bouteille anti-coups de liquide	
2.5.3	Echangeur de chaleur	
2.5.4	Séparateur d'huile	
2.5.5	Filtre déshydrateur	
2.5.6	Voyant liquide	
2.5.7	Vanne solénoïde	
2.5.8	Vanne à pression constante	
2.5.9	Vanne d'injection de gaz chauds	
2.5.10	Vanne de décharge	
2.5.11	Bouteille de liquide	
2.5.12	Organes de sécurité et de contrôle	
2.5.13	Clapets de retenue	
2.5.14	Résistance de carter	
2.6	FLUIDES FRIGORIGÈNES	93
2.6.1	Critères de choix	
2.6.2	Les "nouveaux" fluides frigorigènes Des mélanges et des corps purs	

2.7	LES AUXILIAIRES	95
2.7.1	Qu'appelle-t-on auxiliaires ? Les auxiliaires permanents Les auxiliaires non permanents	
2.8	RÉGULATEURS DE TEMPÉRATURE	96
2.8.1	Définition	
2.8.2	Influence des retards de réponse sur le choix du régulateur	
2.8.3	Installation du thermostat (ou de la sonde thermostatique) dans le local à chauffer	
2.8.4	Thermostats	
2.8.5	Thermostats avec compensation par la température de soufflage	
2.8.6	Régulateurs électroniques	
2.9	RÉGULATION DE LA PUISSANCE DES POMPES À CHALEUR	99
2.9.1	Réglage par “tout ou rien”	
2.9.2	Réglage par “tout ou peu”	
2.9.3	Variation de la vitesse de rotation du compresseur	
2.9.4	Mise hors service des cylindres	
2.9.5	Inversion du sens de rotation éliminant la moitié des cylindres	
2.9.6	Obturation des soupapes d'aspiration	
2.9.7	Aubes de prérotation à l'aspiration	
2.9.8	Tiroir mobile	
Chapitre 3 : APPROCHE DU CHOIX D'UN SYSTÈME EN FONCTION DES SOURCES		103
3.1	SOURCES FROIDES ET SOURCES CHAUDES	103
3.1.1	Sources froides	
3.1.2	Sources chaudes	
3.1.3	Température des sources	
3.2	CHOISIR LA SOURCE FROIDE	107
3.2.1	Air extérieur	
3.2.2	Air extrait	
3.2.3	Eau de nappes aquifères	
3.2.4	Capteurs enterrés et capteurs géothermiques	
3.2.5	Capteurs atmosphériques	
3.3	CHOISIR LA SOURCE CHAUDE, C'EST CHOISIR SON CHAUFFAGE	109
3.3.1	Plancher chauffant, chape et dalle pleine	
3.3.2	Radiateurs à eau chaude	
3.3.3	Ventiloconvecteurs	
3.3.4	Centrale d'air	
3.4	CHOIX D'UN SYSTÈME DE PAC EN FONCTION DE SON INCIDENCE SUR L'EFFET DE SERRE	113
3.4.1	Qu'est-ce qui agit sur l'effet de serre dans une installation de pompe à chaleur ?	
3.4.2	Incidence de la technologie de la pompe à chaleur	
3.4.3	Incidence des besoins énergétiques	
3.4.4	Incidence de la qualité de la pompe à chaleur	

- 3.4.5 Incidence du fluide frigorigène
 - Le choix du fluide frigorigène a une action sur l'effet de serre direct
 - Les fluides frigorigènes utilisés en pratique
 - Quantité de fluide frigorigène du circuit
 - Propension à fuir
- 3.4.6 Impact sur l'effet de serre des systèmes de pompe à chaleur

Chapitre 4 : LES SYSTÈMES DE PAC POUR MAISON INDIVIDUELLE..... 119

4.1	POMPE À CHALEUR AIR EXTRAIT/AIR.....	119
4.2	POMPES À CHALEUR AIR EXTÉRIEUR/AIR.....	121
4.3	POMPES À CHALEUR AIR EXTRAIT/EAU.....	122
4.4	POMPES À CHALEUR AIR EXTÉRIEUR/EAU.....	125
4.4.1	Principe de fonctionnement	
4.4.2	Application à la maison existante	
4.4.3	Pompe à chaleur air extérieur/eau. Système base + appoint	
4.4.4	Pompe à chaleur air extérieur/eau en relèvement de chaudière	
4.5	POMPE À CHALEUR EAU/EAU.....	137
4.5.1	Principe de fonctionnement <ul style="list-style-type: none"> PAC sur nappe aquifère PAC sur eau de rivière 	
4.5.2	Recommandations <ul style="list-style-type: none"> Eau de nappe et eau de surface 	
4.6	POMPES À CHALEUR EAU GLYCOLÉE/EAU À CAPTEURS ENTERRÉS.....	139
4.6.1	Principe de fonctionnement <ul style="list-style-type: none"> Capteurs horizontaux Capteurs verticaux 	
4.6.2	Recommandations	
4.7	POMPE À CHALEUR SOL/SOL À CAPTEURS ENTERRÉS, À DÉTENTE DIRECTE.....	146
4.7.1	Principe de fonctionnement	
4.7.2	Emission thermique des tubes	
4.7.3	Les règles minimales de conception et d'installation	
4.7.4	Recommandations	
4.7.5	Procédé de désurchauffe et de régulation sans baisse de rendement	
4.8	POMPES À CHALEUR SOL/EAU À CAPTEURS ENTERRÉS, À DÉTENTE DIRECTE.....	151
4.8.1	Principe de fonctionnement	
4.8.2	Les règles minimales de conception et d'installation	
4.8.3	Recommandations	
4.9	CHAUFFE-EAU THERMODYNAMIQUES.....	152
4.9.1	Chauffe-eau sur air extrait <ul style="list-style-type: none"> Principe de fonctionnement Régulation 	
4.9.2	Chauffe-eau sur air ambiant	
4.9.3	Chauffe-eau à capteur enterré à détente directe	

- 4.9.4 Chauffe-eau à capteur enterré à eau glycolée
- 4.9.5 Chauffe-eau à capteur atmosphérique

Chapitre 5 : ÉTUDE DE L'INSTALLATION159

5.1 CALCUL DES DÉPERDITIONS THERMIQUES D'UN HABITAT NEUF159

5.2 ESTIMATION DES DÉPERDITIONS THERMIQUES D'UN HABITAT EXISTANT159

5.3 DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME DE POMPE À CHALEUR163

- 5.3.1 Dimensionnement de la PAC
- 5.3.2 Optimum énergétique
- 5.3.3 Dimensionnement de l'appoint éventuel
- 5.3.4 Dimensionnement du ballon tampon sur le circuit de chauffage
- 5.3.5 Expansion des circuits hydrauliques
- 5.3.6 Ventilation des locaux

5.4 CALCUL DES CONSOMMATIONS170

- 5.4.1 Méthode des fréquences cumulées
- 5.4.2 Incidence du dégivrage
- 5.4.3 Incidence de l'inertie thermique de l'émetteur et de la charge partielle
- 5.4.4 Incidence du niveau de température de l'émetteur

5.5 DIMENSIONNEMENT D'UN PLANCHER CHAUFFANT-RAFRAÎCHISSANT196

- 5.5.1 Conception du plancher chauffant
 - Isolation du sol
 - Tubes chauffants
- 5.5.2 Dimensionnement
 - Températures limites du plancher chauffant
 - Emission thermique des tubes
 - Circuits et collecteurs
- 5.5.3 Spécificité du plancher rafraîchissant
 - Analyse du phénomène de condensation
 - Réaction du plancher rafraîchissant
 - Risque de condensation sur le sol

5.6 ACOUSTIQUE201

- 5.6.1 Performances acoustiques de la PAC
- 5.6.2 Le bruit
 - Bruit intérieur
 - Bruit de voisinage
- 5.6.3 Installation de la PAC à l'intérieur des locaux
 - Réseaux d'air
 - Réseaux d'eau
- 5.6.4 Installation de la PAC à l'extérieur des locaux

Chapitre 6 : MISE EN ŒUVRE DE L'INSTALLATION205

6.1 MISE EN ŒUVRE DE LA SOURCE FROIDE205

- 6.1.1 Captage sur eau de nappe

6.1.2	Mise en œuvre de capteurs enterrés horizontaux à eau glycolée/eau Zone de captage Mise en eau des circuits du capteur à eau glycolée Remplissage en eau, puis en antigel, puis brassage Remplissage en mélange eau + antigel Remblaiement	
6.1.3	Mise en œuvre des sondes géothermiques verticales	
6.1.4	Mise en œuvre des capteurs enterrés à détente directe	
6.1.5	Mise en œuvre des réseaux d'air extrait	
6.1.6	Mise en œuvre des réseaux d'air extérieur	
6.2	MISE EN ŒUVRE DE LA SOURCE CHAUDE	215
6.2.1	Mise en œuvre d'un plancher chauffant-rafraîchissant à eau Plancher chauffant seul Enrobage Plancher rafraîchissant Régulation	
6.2.2	Mise en œuvre des unités terminales à eau	
6.2.3	Mise en œuvre des réseaux d'air chaud	
6.2.4	Mise en œuvre du condenseur d'une PAC sol/sol	
6.3	MISE EN ŒUVRE DE LA PAC	221
6.3.1	Mise en œuvre du générateur thermodynamique Pompe à chaleur installée dans le volume chauffé Pompe à chaleur installée en local technique Pompe à chaleur installée à l'extérieur	
6.3.2	Mise en eau et purge du circuit de chauffage	
6.3.3	Dégazage des circuits Air, d'où viens-tu ? Conséquences de la présence d'air Comment coincer la bulle ?	
6.3.4	Tirage au vide, charge en fluide frigorigène Rôle du tirage au vide Procédure de tirage au vide Charge en fluide	
6.4	MISE EN ŒUVRE DES CHAUFFE-EAU THERMODYNAMIQUES	229
6.4.1	Chauffe-eau sur air extrait	
6.4.2	Chauffe-eau géothermique	
6.4.3	Chauffe-eau à capteur atmosphérique	
6.5	CONTRÔLES DE FIN DE CHANTIER ET MISE EN SERVICE	231
	Exemple de fiche de contrôle qualité	
	Exemple de fiche de mise en service	
Chapitre 7 : GARANTIE, CONTRÔLES ET MAINTENANCE		235
7.1	OUTILLAGE SPECIAL POMPE À CHALEUR	235
7.1.1	Outillage "frigorigène"	
7.1.2	Outillage "hydraulique" et "aéraulique"	
7.1.3	Outillage divers	
7.1.4	Appareils de mesures	

7.2	QUALITÉ ET CERTIFICATION	236
7.2.1	Certification des matériels Label PROMOTELEC Label NF Certification EUROVENT	
7.2.2	Formation et certification des bureaux d'études	
7.2.3	Formation et certification des installateurs Solutions hydrauliques Solutions aérauliques Intervention sur le circuit frigorifique des pompes à chaleur	
7.2.4	Charte européenne de qualité Charte européenne garantissant la qualité Garantie de performances et de qualité environnementale Liste de constructeurs	
7.3	CRITÈRES DE BON FONCTIONNEMENT	242
7.4	DIAGNOSTIQUER UNE INSTALLATION DE POMPE À CHALEUR	242
7.4.1	Etre attentif à l'utilisation avant d'agir	
7.4.2	"Ecouter"	
7.4.3	"Observer"	
7.4.4	"Toucher" Evaluation des températures inférieures à 30 °C Evaluation des températures comprises entre 32 °C et 50 °C Evaluation des températures comprises entre 50 °C et 90 °C	
7.5	PANNES, DIAGNOSTIC ET REMÈDES	245
7.5.1	La pompe à chaleur est-elle réellement en panne ?	
7.5.2	La pompe à chaleur ne démarre pas	
7.5.3	Le compresseur s'arrête fréquemment	
7.5.4	Le compresseur est bruyant	
7.5.5	La pompe à chaleur ne semble pas assez puissante	
7.5.6	La pression d'évaporation est trop basse	
7.5.7	La pression de condensation est trop élevée	
7.5.8	La pression d'évaporation est trop élevée	
7.5.9	La pression de condensation est trop basse	
7.5.10	L'inversion de cycle ne s'effectue pas	
7.5.11	La puissance absorbée par le compresseur est trop élevée	
7.5.12	La puissance absorbée par le compresseur est trop faible	
7.5.13	Anomalies et remèdes concernant les chauffe-eau thermodynamiques	
7.6	MAINTENANCE	254
7.6.1	Le contrat d'entretien	
7.6.2	Maintenance préventive	
7.6.3	Entretien courant	
7.6.4	Contrôle annuel du confinement	
7.6.5	Dépannage	
7.7	GARANTIE	255
7.7.1	Garantie des installations	
7.7.2	Garantie des consommations Les bonnes déperditions thermiques Et si on ne se chauffait pas à 20 °C ?	
	BIBLIOGRAPHIE	259

PRÉFACE

Le changement climatique à venir est un phénomène qui n'est plus guère contesté. Ses effets néfastes sont de mieux en mieux connus et son ampleur peut encore être limitée si des mesures adéquates sont prises dès aujourd'hui : pour la France, il s'agit de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre (GES) avant 2050. Dans le secteur du bâtiment, cela signifie :

- ▷ réduire la part des énergies fossiles de 70 à 17,5 Mtep
- ▷ réduire les GES de 120 MteCO₂ à 30 MteCO₂

Concrètement, il faudra réhabiliter avant 2050 30 millions de logements en réduisant leur consommation d'énergies fossiles d'un facteur 3,5 à 4 en moyenne et construire 10 à 15 millions de logements neufs les plus performants possible, facteur 7 à 8 en moyenne pour la majorité d'entre eux.

La loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique a intégré cet objectif et propose, notamment, d'augmenter la part des énergies renouvelables dans le bilan national de 6 % en 2005 à 10 % en 2010. Pour la chaleur renouvelable, il s'agit d'augmenter la production de plus de 5 millions de tonnes équivalent pétrole. Il ne s'agit là que d'une première inflexion de notre politique énergétique. L'Union Européenne nous en propose une seconde, depuis le 9 mars 2007, avec l'objectif "3 x 20 %" : 20 % de réduction d'émissions de GES, 20 % d'économie d'énergie et 20 % de part des renouvelables dans le bilan européen.

La réhabilitation à très grande échelle du parc des bâtiments existants et la réalisation de bâtiments à très faible consommation énergétique, voire à énergie positive ne pourra se faire que s'il existe des offres de produits très performants et une parfaite mise en œuvre pour l'obtention des performances visées.

Les pompes à chaleur (PAC) valorisent des énergies issues du soleil ou de la terre dès lors qu'elles ont un coefficient de performance suffisant. Leur utilisation émet très peu de gaz à effet de serre. Depuis le début du nouveau millénaire, le marché français se développe très rapidement. Les PAC sont appelées à jouer un rôle essentiel dans les défis qui attendent le secteur du bâtiment, avec à la clé, un énorme gisement d'emplois nouveaux, d'un degré élevé de qualification. La condition d'une réussite pérenne de ce développement est que des équipements très performants soient conçus et mis en œuvre par des personnels très compétents. L'ADEME se félicite à cet égard du premier pas qui vient d'être accompli par les professionnels avec la création de la norme NF PAC, concernant les équipements, et de la Charte de Qualité Qualipac, concernant les installateurs. Ils pourront certainement aller encore plus loin pour qu'un jour les usagers soient à même de connaître avec une grande confiance les performances réelles et les coûts d'exploitation de matériels qui doivent fonctionner pendant 15 ans au moins.

Le présent ouvrage de Jacques Bernier contribue de façon éclatante à la construction de compétences professionnelles et sera, à n'en pas douter, le livre de référence pour la décennie à venir.

Jean-Louis BAL
*Directeur des énergies renouvelables,
des réseaux et des marchés énergétiques de l'ADEME*