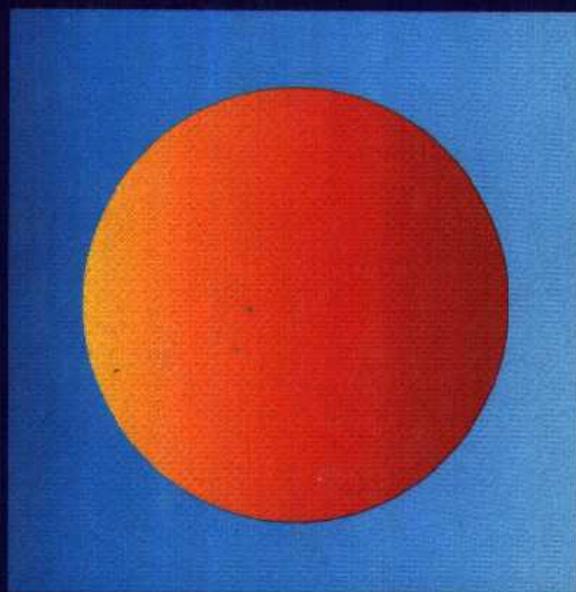


LE RECKNAGEL

RECKNAGEL - SPRENGER - HÖNEMANN

*Manuel
pratique du
génie climatique*



2^{ème} EDITION



pyc édition

LE RECKNAGEL

RECKNAGEL - SPRENGER - HÖNMANN

Manuel pratique du génie climatique

2 144 figures et 413 tableaux

Ouvrage publié sous le
patronage de l'A.I.C.V.F.
(Association des Ingénieurs
en Chauffage,
Conditionnement d'air,
et Ventilation de France).

*Traduit et adapté de l'allemand
par Jean-Louis CAUCHERNA*

2^{ème} EDITION



pyc édition

L'édition originale a été publiée sous le titre :
« Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik,
einschl. Brauchwasserbereitung und Kältetechnik »
63^e édition 1985

par Verlag R. Oldenbourg München Wien
© 1985 R. Oldenbourg Verlag GmbH, München

© 1986 PYC EDITION - PARIS

« Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit, ou ayants cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette reproduction ou représentation, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration ».

ISBN 2-85330-084-6

(Édition originale : ISBN 3-486-35913-4)

PRÉFACE À LA DEUXIÈME ÉDITION

Le succès acquis par la première édition française du Manuel pratique du génie climatique — universellement connu sous le nom de « Recknagel-Sprenger » — assure, à la présente réédition, une fraîcheur et une actualité inhabituelles en telle matière.

Effectivement, l'ouvrage a été révisé en tenant compte de trois éditions allemandes intermédiaires et des souhaits des utilisateurs. De plus, il a été complété par les thèmes du moment (pollution atmosphérique, biocombustibles, régulation électronique par microprocesseur, etc.) en veillant à ce que sa mise à jour soit intégrale. Depuis la dernière édition, par exemple, certains groupes de normes, refondus et étendus, sont incorporés. N'est-ce pas là une preuve de la vitalité du Génie Climatique ?

Unique en son genre par son ampleur et la rigueur des sujets traités, ce manuel constitue une inépuisable source de renseignements pour les thermiciens et pour tous ceux qui, participant de près ou de loin à l'acte de construire, doivent veiller à l'usage rationnel de l'une de nos plus grandes et plus instables richesses : l'énergie.

Véritable communauté d'intérêts, ce livre indispensable est de nature à resserrer les liens unissant la grande famille des professionnels de l'énergie et du génie climatique : cet aspect est fondamental pour l'A.I.C.V.F. qui se fait un devoir de lui apporter son soutien.



Louis VOILLOT

Président de l'Association des Ingénieurs
en Chauffage, Conditionnement d'Air
et Ventilation de France

Libre propos du Traducteur

A mon père,

*à MM. Lucien Jouen (Buderus France, Hautot/Mer) et
Heinrich Nickel (H. Nickel GmbH, Betzdorf)
qui m'ont mis sur la voie de la technique la plus passionnante,
parce qu'en évolution permanente, dans l'Art de Construire,*

A Johannes Emanuel (Heidelberg),

*à Frauke, Susanne et la famille Hebel (Kirchen an der Sieg)
qui m'ont accueilli et initié aux subtilités de leur langue.*

21 juin 1986 : j'inscris sur la 2781^e page du manuscrit ce point tout simple qui sera le dernier signe d'une fantastique aventure : la traduction - mise à jour et surtout l'adaptation de ce monument de la littérature technique : *Le Recknagel*. Moment solennel s'il en est où le film de deux années d'efforts, dont les 173 derniers jours non-stop, se déroule dans mon esprit à la vitesse de la lumière.

Qu'il est déjà loin ce jour tant attendu d'octobre 1984 où *M. Bénichou* me donna le signal du départ. Ô combien impatient, je m'élançais pour un dix mille mètres qui allait se révéler un véritable marathon. Et de fait, les embûches commencèrent rapidement, par exemple comment transposer certains calculs climatologiques de Berlin à Paris qui nécessitent la connaissance de relevés de températures horaires alors qu'on ne dispose en France que de données trihoraires, faut-il adapter au fur et à mesure les paragraphes concernant les problèmes de consommations (actuelle *Performance Énergétique*) en prenant le risque de n'être pas à jour ou de devoir tout refaire si les *Règles Th-C* tant attendues et discutées venaient à paraître, par quelle réalisation française équivalente peut-on remplacer la centrale chaleur-force à turbine à gaz de Sendling près de Munich, intéressante, certes, mais peu « parlante » pour le lecteur français ? Et puis, tout à coup, c'est la brusque chute des cours du pétrole en avril 1986 et ce sont tous les calculs de rentabilité qu'il faut refaire.

Le 21 juin, c'était aussi le jour de l'été, date tout indiquée pour se tourner vers l'avenir, oublier ses peines et ne plus penser qu'à tout ce qui a fait la joie du travail.

Tout d'abord son côté technique, car le Génie Climatique est à l'avant-garde du progrès tant par les matériels de pointe qu'il met en œuvre (je pense entre autres aux microprocesseurs avec lesquels le thermicien ne peut se familiariser qu'avec un minimum de connaissances en informatique et même avec la programmation pour modifier les algorithmes des optimiseurs, automates etc.) que par les réalisations grandioses qu'il autorise comme celles de la *Tour Maine-Montparnasse* ou de *Climadef* quand ce n'est pas des avant-premières mondiales comme la chaufferie à charbon à combustion en lit fluidisé de la *Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain* à Saint-Ouen. Quant au côté littéraire, il est non moins passionnant, car traduire c'est aussi éviter les pièges que seule l'expérience permet de déjouer et qui, parfois, peuvent être lourds de conséquences. Je garde toujours présent à l'esprit la remarque que *Noëlle Perez-Christiaens* fait dans son livre si précieux « Les yeux agents de dispersion ou d'intégration » (aux Éditions de l'*Institut B.K.S. Iyengar*, Paris) à propos de la traduction erronée des mots sanskrits « drishti » et « cakshus » qui a conduit des générations d'aspirants-yogis à pratiquer des exercices pouvant entraîner de graves troubles tant visuels qu'oculaires.

Construit patiemment de même qu'un immense puzzle, le *Manuel Pratique du Génie Climatique* doit beaucoup à tous les professionnels qui ont apporté leur pièce et à tous ceux qui, chez l'éditeur comme à l'imprimerie, ont travaillé dans l'ombre. Je voudrais également témoigner mes remerciements à *M. Pierre Bénichou*, Directeur Général de PYC Édition, pour la confiance qu'il m'a accordée. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Jean-Louis CAUCHEPIN

Nous remercions les bureaux d'études, entreprises, ministères et organismes divers suivants pour l'aide précieuse qu'ils ont bien voulu nous accorder.

- Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie (AFME), Paris.
- Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie (AFME), Caen (*MM. Bernard Bosquet et Maurice Gallis*).
- Agence pour la Qualité de l'Air (AQA), Paris.
- Agence Régionale d'Information Scientifique et Technique (ARIST), Caen (*Mme Sylvie Morel*).
- Ambassade de la République Fédérale d'Allemagne, Paris.
- Association Technique de l'Industrie du Gaz en France, Paris.
- Bibliothèque Scientifique de l'Université de Caen (*Mmes Elizabeth Pluchet et Jeanne Refleu*).
- Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn.
- Bureau d'Études CFERM, Paris (*M. Claude Le Bellac*).
- Bureau d'Études Michel Chatel, Bayeux.
- Centre d'Assistance Technique et de Documentation (CATED), Paris.
- Centre EdF-GdF d'Information du Bâtiment (CEGIBAT), Paris.
- Centre d'Études et de Recherches Économiques sur l'Énergie (CEREN), Paris.
- Centre d'Information sur les Utilisations de l'Électricité dans l'Industrie (CINELI), Paris.
- Centre Interprofessionnel Technique d'Étude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), Paris.
- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Paris.
- Chambre de Commerce et d'Industrie de Caen.
- Chambre Syndicale des Entrepreneurs du Bâtiment et des Travaux Publics du Calvados, Caen.
- Charbonnages de France, Direction de la Communication, Paris.
- Comité Scientifique et Technique des Industries du Chauffage, de la Ventilation et du Conditionnement d'Air (CoSTIC), Paris.
- Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), Paris.
- Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (CPCU), Paris (*M. A. Triboulet*).
- Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium, Hamburg (*Dr Fritz Kasten*).
- Dipl.-Ing. *Eberhard Sprenger*, Berlin.
- Dipl.-Ing. *Winfried Hönmann*, Stuttgart.
- Direction Départementale de l'Équipement, Caen (*Mlle Nicole Martinez, MM. Yves Giraud et Charles Mancini*).
- Direction du Gaz, de l'Électricité et du Charbon (DIGEC), Paris.
- Électricité de France, Direction de l'Équipement, Paris.
- Gaz de France, Direction Générale, Paris.
- Gaz de France, Direction des Études et Techniques Nouvelles, La Plaine-Saint-Denis.
- Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE), Paris, Caen.
- Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), Paris.
- Météorologie Nationale, Bureau des renseignements météorologiques, Paris.
- Ministère de l'Environnement, Direction de la Prévention des Pollutions, Paris.
- Ministère de l'Environnement et de la Qualité de la Vie, Neuilly-sur-Seine.
- Ministère de l'Industrie, Service Espac, Caen (*M. Jean-Paul Goguet*).
- Ministère du Redéploiement Industriel et du Commerce Extérieur, Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières, Paris.
- Ministère des Transports, Direction de la Météorologie, Service Météorologique Métropolitain, Le Bourget.
- Normes AFNOR, Caen (*MM. Charles Branchereau et Christian Gaultier*).
- Observatoire de l'Énergie, Paris.
- Organisme d'Information Technique de l'Industrie du Tube d'Acier (Soditube), Paris.
- Revue « Chauffage, Ventilation, Conditionnement d'Air », Paris (*Mlle Claudie Cabourdin*).
- Service d'Étude des Stratégies et des Statistiques Industrielles (SESSI), Paris.
- Syndicat National des Constructeurs de Matériel de Chauffage Central, Paris.
- Syndicat National des Industries de la Robinetterie, Paris.
- Technische Universität, Berlin (*Dr.-Ing. S. Aydinli*).
- Union des Chambres Syndicales de l'Industrie du Pétrole, Paris.
- Union Nationale du Génie Énergétique et Climatique, Paris.
- Union Syndicale des constructeurs de Matériel Aéraulique, Thermique, Thermodynamique et Frigorifique, Paris.

TABLE DES MATIÈRES

1. Données fondamentales du génie climatique	1
11. Données météorologiques	3
111. L'air	3
- 1. Air pur	3
- 2. Polluants	3
- 21. Gaz et vapeurs	3
- 22. Poussières	5
- 23. Germes	9
- 24. Noyaux de condensation	9
- 25. Législation	10
112. Température de l'air	10
- 1. Valeur moyenne de la température	10
- 2. Valeurs extrêmes de la température	12
- 3. Degrés-jours de chauffage	14
- 4. Degrés-jours de ventilation	15
- 5. Degrés-heures de refroidissement	16
113. Humidité de l'air	18
- 1. Désignations	18
- 2. Humidité moyenne	18
- 3. Grammes-heures d'humidification et de déshumidification	19
- 4. Valeurs extrêmes de l'humidité	21
- 5. Température et humidité	21
- 6. Teneur en eau à l'état d'équilibre	26
114. Rayonnement solaire	28
- 1. Constante solaire	28
- 2. Facteur de trouble	28
- 3. Rayonnement solaire direct sur une surface quelconque	30
- 4. Rayonnement solaire diffus	30
- 5. Rayonnement propre de l'atmosphère	31
- 6. Rayonnement solaire global	31
- 7. Vitrages et ensoleillement	36
- 8. Ensoleillement réel au cours de l'année	36
- 9. Énergie solaire et chauffage solaire	38
115. Vent	40
12. Équilibre physiologique de l'homme en ambiance artificielle	43
121. Métabolisme de l'organisme humain	43
122. Échanges thermiques de l'organisme	45
123. Conditions du confort thermique	47
- 1. Température de l'air ambiant	47
- 2. Température de paroi	49
- 3. Humidité de l'air	52
- 4. Mouvements de l'air	54
- 5. Habillement	55
- 6. Influences diverses	57
- 61. Teneur en poussières de l'air	57

- 62.	Gaz et vapeurs, odeurs	57
- 63.	Électricité atmosphérique	62
- 64.	Rayonnement radio-actif	63
- 65.	Bruit	64
- 66.	Éclairage	66
- 67.	Influences diverses	66
124.	Échelles de confort thermique	67
- 1.	Teneur en acide carbonique	67
- 2.	Température de la peau	68
- 3.	Catathermomètre	69
- 4.	Température effective	69
- 5.	Tête artificielle de Lutz	69
- 6.	Température résultante de Missenard	69
- 7.	Autres appareils de mesure	69
125.	Normes concernant les ambiances thermiques et les ambiances chaudes	71
- 1.	Norme expérimentale X 35-201	71
- 2.	Norme expérimentale X 35-202	71
- 3.	Norme expérimentale X 35-203	71
- 4.	Norme expérimentale X 35-204	72
13.	Thermodynamique	73
131.	Grandeurs fondamentales	73
- 1.	Systèmes d'unités	73
- 2.	Masse, force et poids	73
- 3.	Pression	73
- 4.	Masse volumique et poids volumique	74
- 5.	Température	75
- 6.	Chaleur, énergie et travail	76
- 7.	Changements d'état	76
- 8.	Dilatation des corps sous l'effet de la chaleur	77
- 9.	Principes de la thermodynamique	80
132.	Gaz	81
- 1.	Lois des gaz	81
- 2.	Équation des gaz parfaits	81
- 3.	État normal	82
- 4.	Mélanges de gaz	83
- 5.	Capacité thermique massique	83
- 6.	Énergie interne et enthalpie	84
- 7.	Entropie	84
- 8.	Changements d'état	85
- 9.	Cycle thermique	85
133.	Vapeur	86
- 1.	Vapeur d'eau saturée	86
- 2.	Vapeur d'eau humide	87
- 3.	Vapeur d'eau surchauffée	87
- 4.	Entropie de la vapeur d'eau	88
- 5.	Diagrammes T, s et h, s	89
- 6.	Point critique	89
- 7.	Équations d'état	90
- 8.	Vapeurs des autres fluides liquides	93
134.	L'air humide	93
- 1.	Généralités	93
- 2.	Humidité relative	93
- 3.	Humidité absolue	94
- 4.	Masse volumique	97
- 5.	Enthalpie	97
- 6.	Diagramme de l'air humide (psychrométrie)	98
- 61.	Considérations générales	98
- 62.	Construction du diagramme de l'air humide	98
- 63.	Exemple de lecture	99
- 7.	Changements d'état de l'air humide	99
- 71.	Mélange	99

- 72.	Chauffage	100
- 73.	Refroidissement	100
- 74.	Humidification	100
- 75.	Changement d'état adiabatique	101
- 76.	Déshumidification	101
135.	Transmission de la chaleur	102
- 1.	Conduction	102
- 2.	Convection	104
- 21.	Écoulement forcé	111
- 22.	Écoulement libre	114
- 23.	Fluides à l'ébullition	117
- 24.	Vapeur se condensant et eau	118
- 25.	Évaporation, transfert de matière	118
- 3.	Rayonnement	118
- 31.	Loi de Stefan-Boltzmann	118
- 32.	Loi de Kirchhoff	120
- 33.	Rayonnement mutuel de deux surfaces	120
- 34.	Rayonnement des gaz	120
- 35.	Coefficient de transmission thermique par rayonnement	120
- 36.	Facteur d'angle	121
- 4.	Transmission de chaleur d'un fluide à un autre fluide au travers d'une paroi	123
- 41.	Équation fondamentale	123
- 42.	Coefficient de transmission thermique K	123
- 43.	Écart logarithmique moyen	124
- 44.	Échanges de chaleur	124
- 45.	Couches d'air	127
- 5.	Diffusion de vapeur d'eau	128
136.	Combustibles	131
- 1.	Combustibles solides	131
- 2.	Combustibles liquides	136
- 21.	Classification	136
- 22.	Fuels-oils	137
- 3.	Combustibles gazeux	141
- 31.	Généralités	141
- 32.	Gaz de distillation	144
- 33.	Gaz de gazéification	145
- 34.	Gaz de raffineries	145
- 35.	Gaz naturels	146
- 4.	Biocombustibles	148
- 41.	Origine des biocombustibles	148
- 42.	Ressources	148
- 43.	Techniques de conversion et d'utilisation	148
137.	Combustion	152
- 1.	Généralités	151
- 2.	Pouvoir calorifique	152
- 3.	Air de combustion et gaz brûlés	153
- 31.	Combustibles solides et liquides	153
- 32.	Combustibles gazeux	154
- 33.	Valeurs approchées	155
- 34.	Masse volumique des gaz brûlés	155
- 35.	Capacité thermique massique des gaz brûlés	161
- 36.	Teneur en eau et point de rosée des fumées	161
- 4.	Température de combustion	162
- 5.	Analyse des gaz brûlés	164
- 51.	Combustion complète	164
- 52.	Combustion incomplète	165
- 53.	Diagrammes de combustion	165
- 6.	Température d'ignition et limite d'inflammabilité	167
138.	Machines thermiques	170
- 1.	Moteurs à combustion externe	170
- 11.	Machines à vapeur à pistons et turbines à vapeur	170
- 2.	Moteurs à combustion interne	173
- 21.	Moteurs à explosion	173
- 22.	Moteurs diesels	173
- 23.	Turbines à gaz	173

14. Mécanique des fluides	177
141. Écoulement sans frottements	177
- 1. Fluide idéal	177
- 2. Équation de continuité	177
- 3. Équation d'énergie	177
- 4. Écoulement annulaire	178
- 5. Écoulement irrotationnel	178
- 6. Théorème de la quantité de mouvement	179
- 7. Grille à aubes	179
- 8. Théorème du moment cinétique	180
142. Écoulement d'un orifice	180
143. Diaphragmes et tuyères	181
144. Pression critique	182
145. Enthalpie et vitesse	183
146. Détente adiabatique	183
147. Coefficient de perte de charge répartie	184
148. Pertes de charges singulières	187
149. Perte de charge totale	188
15. Acoustique élémentaire	193
151. Définitions générales	193
152. Caractéristiques du champ acoustique	193
153. Spectre acoustique et timbre	195
154. Évaluation des bruits	195
- 1. L'échelle des décibels	195
- 2. Intensité physiologique	197
- 3. Niveaux sonores pondérés	198
- 4. Courbes limites	198
155. Propagation du son	199
156. Isolement acoustique aux bruits aériens	200
- 1. Définition	200
- 2. Indice d'affaiblissement acoustique R	201
- 3. Courbes d'indice d'affaiblissement acoustique	201
- 4. Contrôles	201
- 5. Murs et plafonds à voile simple	202
- 6. Murs à voiles multiples	203
- 7. Planchers à voiles multiples	203
- 8. Portes et fenêtres	203
- 9. Parois composites	203
157. Isolement acoustique aux bruits solidiens	204
158. Absorption du son	204
159. Acoustique des grands volumes	205
16. Appareils de mesure	207
161. Généralités	207
162. Mesure des pressions	207
- 1. Généralités	207
- 2. Manomètres à tube en U	208
- 3. Pressiomètres à tore pendulaire	208
- 4. Pressiomètres à cloche et à flotteur	209
- 5. Manomètres à effet de ressort	209
- 6. Manomètres électriques	210
163. Mesure des températures	210
- 1. Généralités	210
- 2. Thermomètres à dilatation	211
- 3. Thermomètres à résistance électrique	213

- 4.	Thermocouples	215
- 5.	Pyromètres optiques	215
- 6.	Thermographie	215
- 7.	Autres appareils de mesure	215
164.	Mesure des débits-masses et des débits-volumes	216
- 1.	Réservoirs étalonnés transportables	216
- 2.	Débitmètres à bascule et à tambour	216
- 3.	Compteurs à gaz	216
- 4.	Compteurs volumétriques	217
- 5.	Compteurs à moulinet et compteurs-turbines	218
- 6.	Débitmètres à flotteur (rotamètres ou gyromètres)	220
- 7.	Organes déprimogènes (ajutages)	220
- 8.	Tubes de Pitot et de Prandl	222
- 9.	Autres appareils de mesure de vitesse	223
- 91.	Anémomètres à fil chaud et anémomètres thermiques	223
- 92.	Anémomètres à battant	224
- 93.	Vélocimètres laser	224
- 94.	Compteurs ultrasoniques de débit	225
- 95.	Compteurs électromagnétiques de débit	225
- 10.	Mesure des débits dans les conduits d'air	225
- 11.	Mesure des débits des bouches d'air	227
- 12.	Mesure d'une vitesse d'air ambiante	227
165.	Compteurs d'énergie thermique	229
- 1.	Réglementation	229
- 11.	Appareils de comptage	229
- 12.	Compteurs d'eau chaude sanitaire	229
- 13.	Répartiteurs de frais de chauffage	230
- 2.	Installations de chauffage	233
- 21.	Méthodes de mesure directes	233
- 22.	Méthodes de mesure indirectes	235
- 3.	Installations d'eau chaude sanitaire	237
166.	Mesure des niveaux	237
- 1.	Cas des réservoirs ouverts	237
- 2.	Cas des réservoirs sous pression	238
167.	Analyse des gaz brûlés	239
168.	Mesure de l'humidité	242
- 1.	Par absorption	242
- 2.	Méthode du point de rosée	242
- 3.	Hygromètres organiques	242
- 4.	Psychromètres	243
- 5.	Hygromètres à cellule hygroscopique	244
- 6.	Hygromètres à variation de couleur	245
- 7.	Hygromètres à éléments plastiques	245
- 8.	Hygromètres électrolytiques	245
- 9.	Hygromètres à capacité	245
169.	Appareils de mesure divers	245
- 1.	Catathermomètres	245
- 2.	Calorimètres	246
- 3.	Télémesures	246
- 4.	Potentiel d'hydrogène	247
- 5.	Opacimètre de Bacharach	247
- 6.	Mesure des bruits	248
- 7.	Dénombrement des aérosols	249
- 8.	Analyseurs de gaz	250
- 81.	Analyseurs à absorption dans l'infrarouge	250
- 82.	Analyseurs à ionisation	251
- 83.	Analyseurs à réaction et calorimétrie	251
- 84.	Analyseurs basés sur la mesure de la conductivité thermique	251
- 85.	Analyseurs magnétodynamiques	251
- 86.	Détecteurs à tubes réactifs	251
- 9.	Mesure de la radioactivité de l'air	251
- 10.	Conductivimètres	252

17. Techniques de régulation	253
171. Définitions	253
172. Connaissance de l'installation à régler	254
173. Équipement de réglage	258
174. Différents types de régulateurs	259
- 1. Régulateurs à action tout ou rien et à action flottante	259
- 2. Régulateurs à action proportionnelle	261
- 21. Régulateurs électriques	263
- 22. Régulateurs pneumatiques	264
- 3. Régulateurs à action intégrale	265
- 4. Régulateurs à action proportionnelle et intégrale	266
- 41. Régulateurs électriques	266
- 42. Régulateurs pneumatiques	267
- 5. Régulateurs électropneumatiques	267
175. Le microprocesseur au service de la régulation	268
176. Un exemple de régulateur à microprocesseur	271
18. L'énergie	273
181. Les sources d'énergie	273
- 1. Les combustibles fossiles	274
- 11. Les combustibles solides	274
- 12. Les combustibles liquides	275
- 13. Les combustibles gazeux	278
- 14. Les combustibles nucléaires	281
- 2. Les combustibles de transformation	282
- 21. Broyage	283
- 22. Briquetage	283
- 23. Gaz de distillation	283
- 24. Gaz de gazéification	283
- 25. Carbonisation à basse température	283
- 26. Transformation chimique	283
- 27. Gaz de craquage	283
- 3. Les énergies renouvelables	284
- 31. L'énergie du soleil	284
- 32. L'énergie du vent	286
- 33. L'énergie de la terre	286
- 34. L'énergie de la mer	287
- 35. L'énergie des rivières	287
- 36. L'énergie de la biomasse	288
- 4. Consommation d'énergie primaire et maîtrise de l'énergie	288
182. Utilisation de l'énergie	291
- 1. Centrales de production d'énergie mécanique ou électrique	291
- 11. Installations à moteur à combustion externe	291
- 12. Installations à moteur à combustion interne	293
- 13. Installations fonctionnant à l'énergie nucléaire	295
- 14. Production totale des centrales françaises	295
- 2. Installations de production d'énergie thermique à des fins de chauffage ..	295
- 3. Installations de production d'énergie pour fours industriels	296
- 4. Installations de production de chaleur-force	296
183. Les accumulateurs de chaleur	297
- 1. Réservoirs de stockage pour eau chaude sanitaire	297
- 2. Réservoirs de stockage pour eau chaude ou eau surchauffée	297
- 3. Stockage d'énergie en bassin d'eau	297
- 4. Stockage d'énergie en nappe aquifère	298
- 5. Réservoirs de stockage de vapeur	299
- 6. Stockage par chaleur latente	299
- 7. Autres types de stockage	301
184. Valorisation des rejets thermiques	301
- 1. Rejets thermiques sous forme de vapeur	301
- 2. Rejets thermiques sous forme de gaz brûlés	302
- 21. Production de vapeur	302
- 22. Production d'eau chaude	303

- 23.	Réchauffage d'air	304
- 24.	Organic-Rankine-Cycle	304
- 3.	Rejets thermiques sous forme d'eau chaude	305
- 4.	Installations à énergie totale	306
- 41.	Généralités	306
- 42.	Exemple d'installation à énergie totale	307
185.	Coût de l'énergie produite	308
- 1.	Coût du capital	308
- 2.	Coût du combustible	310
- 3.	Coût de la maintenance	311
- 4.	Frais divers	311
- 5.	Coût total de l'énergie produite	311
- 6.	Indice de consommation énergétique	311
- 7.	Rentabilité	312
- 71.	Durée de remboursement simple du capital	312
- 72.	Méthode des annuités	312
- 73.	Durée d'amortissement	313
- 74.	Méthode des économies escomptées	313
- 75.	Méthode du calcul dit dynamique	313
186.	Économies d'énergie	314
- 1.	Champ d'action	314
- 2.	Réglementation	316
- 21.	Isolation thermique	316
- 22.	Labels « Haute Performance Énergétique » et « Solaire »	316
- 23.	Renouvellement d'air	316
- 24.	Limitation de la température de chauffage	316
- 25.	Régulation des installations de chauffage	317
- 26.	Répartition des frais de chauffage	318
- 27.	Répartition des frais d'eau chaude sanitaire	318
- 28.	Travaux d'économies d'énergie	318
- 29.	Rendements minimaux des générateurs thermiques à combustion	319
- 30.	Équipement des installations thermiques	319
- 31.	Visite et examen des installations thermiques	319
- 32.	Contrats d'exploitation de chauffage et de climatisation	320
19.	Protection de l'environnement	321
191.	Origine de la pollution atmosphérique	321
192.	Effets physiologiques des émissions	324
193.	Réglementation anti-pollution	326
- 1.	Réglementation française	326
- 11.	Qualité des combustibles	326
- 12.	Indice de noircissement	327
- 13.	Indice pondéral	329
- 14.	Dispersion des gaz de combustion	329
- 15.	Équipement des générateurs	329
- 16.	Arrêt obligatoire des installations	330
- 17.	Témoins des mesures pondérales	330
- 2.	Réglementation européenne	330
- 21.	Directive du Conseil des Communautés Européennes du 15 juillet 1980	330
- 22.	Directive du Conseil des Communautés Européennes du 7 mars 1985	331
194.	Dispositions destinées à limiter les émissions	331
- 1.	Dispositions concernant le combustible	331
- 2.	Dispositions concernant la combustion	331
- 1.	Dispositions concernant les gaz brûlés	333
195.	Exemple de mesures anti-pollution	334

2. Chauffage	335
21. Généralités	337
211. Raison d'être de l'installation de chauffage	337
212. Historique du chauffage	337
213. Qualités d'un bon chauffage	339
214. Classification des installations de chauffage	340
215. Symboles du chauffage et des industries thermiques	340
22. Différents systèmes de chauffage	342
221. Chauffage ponctuel	342
- 1. Cheminées et poêles d'âtre	342
- 2. Poêles à carreaux de faïence	343
- 21. Généralités	343
- 22. Classification	343
- 23. Construction	344
- 24. Puissance calorifique	344
- 25. Cheminée	345
- 26. Poêles en céramique	345
- 3. Appareils de chauffage indépendants à combustible végétal ou minéral ..	346
- 4. Appareils de chauffage indépendants à combustible minéral solide	346
- 41. Généralités	346
- 42. Différents modèles	346
- 43. Construction	348
- 44. Régulation	348
- 45. Puissance calorifique	349
- 5. Gros poêles à combustible minéral solide	349
- 6. Poêles à carreaux de faïence pour air chaud	349
- 7. Appareils de chauffage indépendants à gaz	352
- 71. Généralités	352
- 72. Différents modèles	353
- 73. Dispositifs de sécurité	356
- 74. Dispositifs d'allumage	357
- 75. Dispositifs de régulation	358
- 76. Calcul	359
- 77. Consommation de gaz, branchement gaz, évacuation des gaz brûlés, entrées d'air neuf	361
- 78. Quel appareil choisir	365
- 79. Plan du DTU 61.1 « Installations de gaz »	365
- 8. Appareils de chauffage indépendants au fuel	367
- 9. Appareils de chauffage indépendants électriques	371
- 91. Généralités	371
- 92. Chauffage électrique direct	371
- 93. Chauffage électrique à accumulation	375
- 94. Chauffage bijonction	382
222. Chauffage central	382
- 1. Chauffage à eau chaude	382
- 11. Chauffage central par thermosiphon	383
- 12. Chauffage à eau chaude accélérée	384
- 13. Dispositifs de sécurité	392
- 14. Chauffage à eau chaude intégré dans les parois	399
- 15. Chauffage à eau chaude en alvéole technique gaz	411
- 16. Chauffage à eau chaude en cellule technique gaz	412
- 2. Chauffage à vapeur	412
- 21. Chauffage à vapeur basse pression ouvert	413
- 22. Chauffage à vapeur basse pression fermé	416
- 23. Chauffage à vapeur haute pression	416
- 24. Chauffage à vapeur sous vide	419
- 3. Chauffage aéraulique	421

- 31.	Chauffage à air chaud à circulation naturelle	422
- 32.	Chauffage à air chaud pulsé	422
- 33.	Chauffage par rayonnement à air surchauffé	430
- 34.	Chauffage à air chaud à gaz de type direct	430
223.	Chauffage urbain	430
- 1.	Chauffage urbain à eau chaude	435
- 11.	Généralités	435
- 12.	Production de chaleur	436
- 13.	Différents systèmes de distribution	437
- 14.	Températures aller et retour	439
- 15.	Pompes de circulation	440
- 16.	Réserve de chaleur	440
- 17.	Répartition des pressions dans le réseau	441
- 18.	Sous-stations	443
- 19.	Dispositifs de sécurité	445
- 2.	Chauffage urbain à eau surchauffée	446
- 21.	Généralités	446
- 22.	Production de chaleur	446
- 23.	Systèmes de canalisations	449
- 24.	Température aller et retour	451
- 25.	Pompes de circulation	451
- 26.	Volant thermique	451
- 27.	Répartition des pressions dans le réseau	451
- 28.	Sous-stations	452
- 29.	Dispositifs de sécurité	454
- 30.	Exemple de chauffage urbain à eau surchauffée	455
- 3.	Chauffage urbain à vapeur	459
- 31.	Généralités	459
- 32.	Production de vapeur	460
- 33.	Canalisations	460
- 34.	Répartition des pressions dans le réseau	460
- 35.	Retour des condensats	460
- 36.	Limitation des puissances	461
- 37.	Stockage de chaleur	462
- 38.	Sous-stations	462
- 39.	Dispositifs de sécurité	463
- 4.	Canalisations de chauffage urbain	464
- 41.	Différents types de pose	464
- 42.	Canalisations	468
- 43.	Calorifugeage	470
- 5.	Coût des installations de chauffage urbain	470
- 51.	Coût d'investissement	470
- 52.	Coût d'exploitation	471
- 6.	Tarification de la chaleur produite par une chaufferie urbaine	472
224.	Couplage chaleur-force	473
- 1.	Généralités	473
- 2.	Emplacement	474
- 3.	Centrales chaleur-force à turbines à vapeur	475
- 31.	Fonctionnement à contre-pression	475
- 32.	Fonctionnement en soutirage	476
- 4.	Centrales chaleur-force à turbines à gaz	477
- 5.	Centrales chaleur-force de type bloc	478
- 51.	Généralités	478
- 52.	Fonctionnement	478
- 53.	Bilan thermique	480
- 54.	Rentabilité	480
- 6.	Indice de production d'électricité	482
- 7.	Réseau de canalisations	483
- 8.	Courbes de charge	485
- 9.	Les installations chaleur-force en France	486
- 91.	Développement des réseaux de chaleur	486
- 92.	Les réalisations actuelles	486
- 93.	Projets divers	490

- 94.	Fourniture de chaleur par les centrales EDF	491
- 95.	Coût de revient de l'énergie thermique mise à disposition	492
225.	Formes particulières du chauffage	493
- 1.	La pompe à chaleur	493
- 11.	Généralités	493
- 12.	Fondements théoriques	494
- 13.	Principaux composants	496
- 14.	Sources de chaleur	498
- 15.	Consommation d'énergie	499
- 16.	Différents types de pompes à chaleur électriques	501
- 17.	Utilisation des pompes à chaleur électriques	505
- 18.	Pompes à chaleur à absorption	520
- 19.	Pompes à chaleur à moteur à gaz	523
- 20.	Labels « Perche », aides financières	529
- 2.	Le chauffage solaire	530
- 21.	Généralités	530
- 22.	Capteurs	531
- 23.	Rendement de conversion	532
- 25.	Rentabilité	534
- 3.	Le chauffage à partir des centrales thermiques	538
23.	Composants des installations de chauffage	542
231.	Chaudières sans préparation d'eau chaude sanitaire	542
- 1.	Généralités	542
- 2.	Chaudières à combustibles solides	543
- 21.	Chaudières à éléments en fonte	543
- 22.	Chaudières en acier	546
- 23.	Combustion et combustible	551
- 24.	Puissance thermique	553
- 25.	Dispositifs de sécurité	554
- 26.	Accessoires	554
- 27.	Chaufferie	554
- 28.	Cas particulier des chaudières transformables et polycombustibles	554
- 29.	Différents types de foyers	555
- 3.	Chaudières à gaz à brûleur atmosphérique	556
- 31.	Généralités	556
- 32.	Classification des chaudières à gaz	558
- 33.	Construction des chaudières à gaz	558
- 34.	Dispositifs de sécurité	574
- 35.	Régulation	575
- 36.	Cheminée	576
- 37.	Rendement des chaudières à gaz	577
- 38.	Ventilation	577
- 39.	Chaudières transformables et polycombustibles	577
- 4.	Chaudières à fuel ou à gaz à brûleur à air soufflé	577
- 41.	Généralités	577
- 42.	Fuels	578
- 43.	Chaudières	578
- 44.	Brûleur	592
- 45.	Caractéristiques thermiques des chaudières à fuel	592
- 5.	Chaudières spéciales	593
- 51.	Chaudières à tubes d'eau	593
- 52.	Générateurs instantanés de vapeur	593
- 53.	Chaudières à huiles thermiques	595
- 6.	Générateurs aérauliques	596
- 61.	Générateurs aérauliques pour combustibles solides	596
- 62.	Générateurs aérauliques à gaz	597
- 63.	Générateurs aérauliques à fuel	599
- 7.	Chaudières électriques	600
- 71.	Chaudières électriques utilisant de l'eau comme fluide accumulateur	601
- 72.	Chaudières électriques utilisant d'autres fluides accumulateurs	604
- 8.	Pertes de combustion et rendements	605
- 81.	Pertes par les gaz brûlés	605

- 82.	Pertes par les gaz non brûlés	606
- 83.	Pertes par les résidus combustibles	606
- 84.	Pertes par rayonnement et convection	606
- 85.	Rendement de chaudière	608
- 86.	Rendement annuel d'installation	608
- 87.	Chaudières et économies d'énergie	609
- 9.	Stockage du fuel	609
- 91.	Le matériel	609
- 92.	Les installations	614
- 93.	La réglementation	617
232.	Cheminées	618
- 1.	Généralités	621
- 2.	Construction des conduits de fumée	622
- 3.	Calcul des conduits de fumée	622
- 31.	Conduit de fumée à tirage naturel	622
- 32.	Conduit de fumée à tirage mécanique	625
- 33.	Conduit de fumée et réglementation anti-pollution	626
233.	Corps de chauffe	628
- 1.	Tubes lisses sans habillage	628
- 2.	Tubes à ailettes sans habillage	629
- 3.	Radiateurs panneaux	630
- 4.	Radiateurs à éléments	633
- 5.	Radiateurs haute pression	637
- 6.	Convecteurs	638
- 7.	Plinthes chauffantes	643
- 8.	Conversion des puissances thermiques	646
- 9.	L'équilibrage des corps de chauffe	647
234.	Tuyauteries	649
- 1.	Tubes en acier	649
- 11.	Principales caractéristiques	649
- 12.	Choix d'un tube	649
- 13.	Calcul de l'épaisseur d'un tube	652
- 14.	Assemblage des tubes	652
- 15.	Fixation des tuyauteries	656
- 2.	Tubes en cuivre	657
- 3.	Tubes en matière plastique	661
- 4.	Tubes de précision	663
- 5.	Procédé de gel des tuyauteries	663
235.	Robinetterie et accessoires	664
- 1.	Organes d'arrêt	664
- 2.	Régulateurs de pression	667
- 3.	Compensateurs de dilatation	670
- 4.	Purgeurs d'eau condensée	674
- 5.	Contrôleurs de purge	678
- 6.	Purgeurs d'air	678
- 7.	Accessoires divers	679
236.	Appareillage divers	681
- 1.	Pompes	681
- 11.	Généralités	681
- 12.	Puissance absorbée par la pompe	682
- 13.	Courbes caractéristiques	682
- 14.	Règles de similitude	684
- 15.	Régulation de la puissance d'une pompe	684
- 16.	Différents types de pompes	684
- 17.	Emplacement de la pompe sur l'aller ou le retour	687
- 18.	Pompes à jet d'eau	687
- 2.	Pompes entraînées par une petite turbine à vapeur	688
- 3.	Récupérateurs de condensats et régulateurs de niveau d'eau	690
- 31.	Dispositif de relevage mécanique	690
- 32.	Dispositif de relevage électrique	690
- 33.	Dispositif de relevage à vapeur	691
- 34.	Interrupteur de manque d'eau	691
- 35.	Évacuation des condensats sous vide	691