

Table des matières

Nomenclature	ix
Avant propos	xiii
Objectif de l'ouvrage	xiii
Limites des approches classiques	xiv
Démarche de modélisation retenue	xv
Structure de l'ouvrage, contenu du deuxième tome	xviii
Références	xxii
1 Introduction : des technologies en pleine mutation	1
1.1 Limitation des ressources fossiles et contraintes géopolitiques	3
1.2 Impact environnemental local et global de l'énergie	6
1.2.1 <i>Augmentation de l'effet de serre planétaire</i>	6
1.2.2 <i>Diminution de la couche d'ozone</i>	9
1.2.3 <i>Pluies acides et pollution urbaine</i>	9
1.3 Transfert de technologie en provenance d'autres secteurs	11
1.4 L'innovation technologique, clé du futur énergétique	14
1.5 Références	16
2 Turbomoteurs à combustion interne	19
2.1 Turbines à gaz	19
2.1.1 <i>Principes de fonctionnement</i>	19
2.1.2 <i>Exemples de turbines à gaz</i>	21
2.1.2.1 Turbines à gaz industrielles	21
2.1.2.2 Turbines à gaz dérivées de l'aviation	21
2.1.3 <i>Principales contraintes technologiques</i>	22
2.1.3.1 Chambre de combustion	22
2.1.3.2 Premiers étages de détente	24
2.1.4 <i>Cycles de base</i>	25
2.1.4.1 Cycle à gaz parfait sans irréversibilités	26
2.1.4.2 Cycle à gaz parfait avec irréversibilités	28
2.1.4.3 Modélisation avec Thermoptim	30
2.1.4.4 Bilans énergétique et exergetique	31
2.1.5 <i>Améliorations du cycle</i>	34
2.1.5.1 Cycle à régénération	34
2.1.5.2 Cycle à refroidissement intermédiaire	38
2.1.5.3 Cycle à combustion séquentielle	38
2.1.5.4 Cycle à refroid. intermédiaire, comb. séquentielle et régénération	39
2.1.5.5 Cycle à injection de vapeur	40
2.1.5.6 Turbine à gaz réfrigérée	40
2.1.6 <i>Configurations mécaniques</i>	41
2.1.6.1 Turbine à un seul arbre	43

2.1.6.2 Turbine à deux arbres	45
2.1.7 Emissions de polluants	46
2.1.8 Perspectives d'évolution des turbines à gaz	47
2.2 Propulseurs aéronautiques	48
2.2.1 Turboréacteurs et turbopropulseurs	48
2.2.1.1 Principes de fonctionnement	48
2.2.1.2 Fonctionnement au point fixe	51
2.2.1.3 Fonctionnement en vol	52
2.2.1.4 Turboréacteurs à double flux	56
2.2.1.5 Postcombustion	57
2.2.1.6 Performances des turboréacteurs	58
2.2.1.7 Turbopropulseurs	58
2.2.1.8 Protection des aubages	59
2.2.1.9 Modélisation avec Thermoptim d'un turboréacteur à simple flux	61
2.2.1.10 Mise en place d'une classe externe de "pilotage" des calculs	65
2.2.1.11 Modélisation avec Thermoptim d'un turboréacteur à double flux	66
2.2.2 Moteurs à réaction sans machine tournante	67
2.2.2.1 Statoréacteurs	67
2.2.2.2 Fusées	68
2.3 Références	73
3 Moteurs à piston à combustion interne	75
3.1 Mode général de fonctionnement	76
3.1.1 Cycles à quatre et à deux temps	79
3.1.2 Modes de refroidissement	81
3.1.3 Evolutions des moteurs automobiles	81
3.2 Analyse des cycles théoriques des moteurs alternatifs	82
3.2.1 Cycle idéal de Beau de Rochas	83
3.2.2 Cycle diesel	85
3.2.3 Cycle mixte	85
3.2.4 Cycles théoriques associés	88
3.3 Courbes caractéristiques des moteurs à piston	89
3.3.1 Performances effectives, PME et facteur de puissance	90
3.3.2 Influence de la vitesse de rotation	90
3.3.3 Performances indiquées, PMI	92
3.3.3.1 Coefficient de remplissage	93
3.3.3.2 Détermination de la pression moyenne indiquée	93
3.3.3.3 Détermination expérimentale du rendement indiqué	94
3.3.3.4 Rendement de forme	95
3.3.4 Performances effectives, PME	95
3.3.4.1 Pertes par pompage	95
3.3.4.2 Pertes par frottement	96
3.3.5 Consommation spécifique d'un moteur	96
3.4 Moteurs à essence	99
3.4.1 Limites de détonation et indice d'octane	99
3.4.2 Renforcement de la turbulence	100

3.4.3 Formation du mélange combustible, carburateurs, systèmes d'injection électronique	101
3.4.3.1 Carburateurs	102
3.4.3.2 Injection électronique	104
3.4.4 Cycles réels des moteurs à essence	105
3.4.4.1 Ecart entre les cycles réels et théoriques	105
3.4.4.2 Anomalies de combustion	107
3.4.4.3 Performances des moteurs à essence	108
3.4.5 Perspectives d'évolution des moteurs à essence	108
3.4.5.1 Injection directe essence	108
3.4.5.2 Moteurs à gaz	109
3.5 Moteurs diesel	110
3.5.1 Conditions de l'allumage par compression	110
3.5.2 Délais d'inflammation et de combustion	111
3.5.3 Taux d'utilisation de l'air	113
3.5.4 Fatigues mécaniques et thermiques	114
3.5.5 Refroidissement des parois	115
3.5.6 Combustibles brûlés dans les moteurs diesel	115
3.5.7 Cycles réels des moteurs diesel	115
3.5.8 Perspectives d'évolution des moteurs diesel	117
3.5.8.1 Injection directe pour moteurs automobiles	117
3.5.8.2 Evolution des gros moteurs diesel	119
3.6 Dimensionnement des moteurs alternatifs	120
3.7 Suralimentation	121
3.7.1 Généralités	121
3.7.2 Principes de base	122
3.7.3 Conditions d'autonomie d'un turbocompresseur	124
3.7.4 Adaptation du turbocompresseur au moteur	124
3.7.5 Conclusions sur la suralimentation	126
3.8 Contrôle des moteurs et des émissions de polluants	126
3.8.1 Emissions de polluants : mécanismes en jeu	126
3.8.2 Optimisation de la combustion	128
3.8.2.1 Optimisation de la conception des moteurs	128
3.8.2.2 Evolution des systèmes de carburation	128
3.8.2.3 Adaptation de l'allumage	129
3.8.2.4 Contrôle du moteur	130
3.8.3 Dispositifs d'épuration catalytique	131
3.8.4 Cas des moteurs diesel	135
3.8.4.1 Emissions de polluants gazeux	136
3.8.4.2 Emissions de particules	137
3.9 Evolutions technologiques	137
3.9.1 Moteurs automobiles	137
3.9.1.1 Injection directe diesel	137
3.9.1.2 Injection directe essence	138
3.9.1.3 Développements communs	139
3.9.2 Gros moteurs à gaz et diesel	140
3.9.2.1 Moteurs à gaz	140

3.9.2.1 Moteurs diesel lourds	141
3.10 Références	142
4 Moteurs Stirling	143
4.1 principe de fonctionnement	144
4.2 Entraînement des pistons	146
4.3 Analyse thermodynamique des moteurs Stirling	147
4.3.1 Cycle théorique	147
4.3.2 Cycle de Stirling idéal	148
4.3.3 Cycle de Stirling paraisotherme	150
4.4 Influence de la pression	151
4.5 Choix du fluide de travail	152
4.6 Echangeurs de chaleur	153
4.6.1 Refroidisseur	153
4.6.2 Régénérateur	153
4.6.3 Chaudière	153
4.7 Caractéristiques d'un moteur Stirling	154
4.8 Modèle Thermoptim simplifié d'un moteur Stirling	155
4.9 Références	157
5 Installations à vapeur (généralités)	159
5.1 Introduction	159
5.2 Enthalpie et exergie de la vapeur	160
5.3 Configuration générale des installations à vapeur	160
5.4 Dégazage de l'eau	162
5.4.1 Dégazage chimique	162
5.4.2 Dégazage thermique	162
5.5 Purges de déconcentration	163
5.6 Chaudières et générateurs de vapeur	164
5.6.1 Chaudières	164
5.6.2 Générateurs de vapeur	167
5.6.3 Fonctionnement du vaporiseur	168
5.6.4 Optimisation du niveau de pression	169
5.7 Turbines à vapeur	169
5.7.1 Différents types de turbines à vapeur	170
5.7.2 Fonctionnement en régime non nominal	171
5.7.2.1 Réglage à pression fixe	172
5.7.2.2 Réglage à pression glissante	173
5.7.3 Dégradation du rendement de détente en fonction du titre en vapeur	174
5.7.4 Réglage de la température par désurchauffe	174
5.8 Condenseurs, tours de refroidissement	174
5.8.1 Principe de fonctionnement des tours de refroidissement	175
5.8.2 Modèle phénoménologique	176
5.8.3 Modèles de comportement	179
5.8.3.1 Modèle de Merkel	179
5.8.3.2 Calculateur du Cooling Technology Institute	180
5.8.3.3 Analogies avec des échangeurs	182

5.8.3.4 Méthode du Recknagel	183
5.8.4 <i>Modélisation d'une tour de refroidissement à contact direct dans Thermoptim</i>	185
5.9 Références	186
6 Cycles classiques de production d'électricité à vapeur	187
6.1 Cycles des centrales classiques à flamme	187
6.1.1 <i>Cycle de base de Hirn ou de Rankine avec surchauffe</i>	187
6.1.1.1 Description du cycle	188
6.1.1.2 Modélisation du cycle	189
6.1.2 <i>Bilans énergétique et exergetique</i>	191
6.1.3 <i>Limites thermodynamiques du cycle de Hirn simple</i>	193
6.1.4 <i>Cycle avec resurchauffe</i>	194
6.1.5 <i>Cycle avec prélèvements</i>	194
6.1.6 <i>Cycles supercritiques</i>	197
6.1.7 <i>Cycles binaires</i>	199
6.2 Technologie des centrales à flamme	200
6.2.1 <i>Contraintes technologiques générales</i>	201
6.2.2 <i>Les principales filières des centrales à charbon</i>	202
6.2.2.1 Centrales à fioul ou à charbon pulvérisé (FP ou CP)	202
6.2.2.2 Centrales à lit fluidisé circulant (LFC)	203
6.2.2.3 Centrales à lit fluidisé sous pression (PFBC)	204
6.2.2.4 Centrales à gazéification de charbon intégrée à cycle combiné (IGCC)	204
6.2.3 <i>Emissions de polluants</i>	205
6.3 Cycles des centrales nucléaires	206
6.3.1 <i>Circuit primaire</i>	207
6.3.2 <i>Générateur de vapeur</i>	209
6.3.3 <i>Circuit secondaire</i>	209
6.3.4 <i>Evolution de la filière REP</i>	212
6.4 Références	214
7 Centrales à cycle combiné	215
7.1 Cycle combiné sans postcombustion	216
7.1.1 <i>Performances globales</i>	216
7.1.2 <i>Rendement et puissance réduites</i>	217
7.2 Cycle combiné avec postcombustion	217
7.3 Optimisation des cycles combinés	218
7.4 Variantes de cycles de turbine à gaz et combinés	223
7.5 Cycle combiné diesel	223
7.6 Conclusions et perspectives	223
7.7 Références	224
8 Cogénération et trigénération	225
8.1 Indicateurs de performances	226
8.2 Chaudières et turbines à vapeur	227
8.3 Moteurs à combustion interne	228
8.3.1 <i>Moteurs alternatifs</i>	229

8.3.2 Turbines à gaz	230
8.4 Critères de choix	232
8.5 Exemples d'installations industrielles	233
8.5.1 Cogénération par micro-turbine à gaz	233
8.5.2 Cogénération industrielle par turbine à gaz	234
8.5.2.1 Description de l'installation	235
8.5.2.2 Cas de fonctionnement	236
8.5.2.3 Modélisation dans Thermoptim	237
8.6 Trigénération	238
8.6.1 Centrale de production de froid et de chauffage pour hypermarché	239
8.6.2 Trigénération par micro-turbine à gaz et cycle à absorption	240
8.6.2.1 Résultats du modèle	241
8.6.2.2 Conception du composant externe	242
8.6.2.3 Modèle thermodynamique	244
8.7 Références	246
9 Cycles de réfrigération à compression, pompes à chaleur	247
9.1 Principe de fonctionnement	247
9.2 Problématique actuelle	248
9.2.1 Arrêt de la production des CFC	248
9.2.2 Fluides de substitution	249
9.2.2.1 Dérivés halogénés de transition	249
9.2.2.2 Dérivés halogénés à ODP nul	250
9.2.2.3 Fluides à ODP nul et faible GWP	250
9.2.2.4 Mélanges	250
9.3 Cycle de base	251
9.3.1 Principe de fonctionnement	251
9.3.1.1 Description du cycle	251
9.3.1.2 Modélisation du cycle	252
9.3.2 Bilans énergétique et exergétique	254
9.4 Cycle à surchauffe et sous-refroidissement	256
9.4.1 Cycle monoétagé sans échangeur	256
9.4.2 Cycle monoétagé avec échangeur	257
9.5 Cycles bi-étagés	257
9.5.1 Cycle à compression biétagée avec refroidissement intermédiaire	258
9.5.2 Cycles à compression et détente étagées	261
9.6 Cycles spéciaux	265
9.6.1 Cycles en cascade	265
9.6.2 Cycles utilisant les mélanges	266
9.6.3 Cycles utilisant les éjecteurs	268
9.6.3.1 Cycles sans compresseur	269
9.6.3.2 Cycles avec compresseur	272
9.6.4 Cycles inverses de Brayton	275
9.7 Pompes à chaleur	276
9.7.1 Cycle de base	278
9.7.2 Bilan exergétique	278
9.8 Aspects technologiques	279

9.8.1 Propriétés souhaitables pour les fluides	279
9.8.2 Applications des fluides	281
9.8.3 Compresseurs frigorifiques	281
9.8.4 Détendeurs	286
9.8.5 Echangeurs	286
9.8.6 Organes annexes	286
9.8.7 Vitesse variable	286
9.9 Références	287
10 Cycles de réfrigération à absorption liquide	289
10.1 Introduction	289
10.2 Etude d'un cycle à absorption NH ₃ -H ₂ O	290
10.3 Modelisation dans Thermoptim d'un cycle à absorption libr-h ₂ o	296
10.4 Références	297
11 Climatisation	299
11.1 Eléments de base d'une installation de climatisation	299
11.2 Exemples de cycles	312
11.2.1 Climatisation d'été	302
11.2.2 Climatisation d'hiver	303
11.3 Références	305
12 Optimisation par intégration systémique	307
12.1 Principes de base	308
12.1.1 Notion de pincement	308
12.1.2 Intégration d'un système thermique complexe	309
12.1.2.1 Tracé de la courbe composite	310
12.1.2.2 Représentation exergétique de la courbe composite	311
12.2 Conception des réseaux d'échangeurs	313
12.3 Minimisation du pincement	314
12.3.1 Mise en œuvre de l'algorithme	315
12.3.1.1 Décalage des températures	315
12.3.1.2 Recherche des intervalles de température	316
12.3.1.3 Etablissement des bilans enthalpiques	316
12.3.1.4 Détermination de l'appoint minimum	317
12.3.2 Etablissement des courbes composites non décalées	318
12.3.3 Tracé de la courbe des écarts des facteurs de Carnot (CEFC)	319
12.3.4 Appariement des fluides échangeurs	320
12.3.4.1 Procédure générale	320
12.3.4.2 Etude de la zone endothermique	322
12.3.4.3 Etude de la zone exothermique	325
12.3.5 Machines thermiques et intégration thermique	326
12.3.5.1 Placement des pompes à chaleur	327
12.3.5.2 Placement des moteurs thermiques, cogénération	327
12.4 Optimisation par analyse des irréversibilités	327
12.4.1 Irréversibilités de composants et irréversibilités systémiques	327
12.4.2 Méthode d'optimisation	331

12.5 Mise en œuvre dans ThermoOptim	333
<i>12.5.1 principes</i>	333
<i>12.5.2 Ecran d'optimisation</i>	335
12.5.2.1 Table des fluides	336
12.5.2.2 Intervalles	336
12.5.2.3 Blocs d'échange	337
12.5.2.4 Menus d'optimisation	339
12.6 Exemple d'application	340
<i>12.6.1 Détermination des débits des circuits HP et BP</i>	341
<i>12.6.2 Appariement des fluides dans les échangeurs de chaleur</i>	342
12.7 Références	349