

## Table des matières

<b>Nomenclature</b>	<b>ix</b>
<b>Introduction générale à la nouvelle édition</b>	<b>xiii</b>
Les ressources numériques du portail Thermoptim-UNIT	xiii
Objectifs poursuivis dans ce livre	xv
Un outil de travail à plusieurs niveaux	xvi
Structure du livre	xvii
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Une double démarche de modélisation systémique-analytique	1
1.1.1 <i>Phénomènes physiques prenant place dans une turbine à gaz</i>	1
1.1.2 <i>Les technologies énergétiques : des assemblages de composants</i>	2
1.1.3 <i>Généralités sur les modèles numériques</i>	4
1.2 Mise en œuvre pratique de la double démarche systémique-analytique	6
1.3 Démarche méthodologique	7
1.3.1 <i>Modélisation systémique : le système général</i>	8
1.3.2 <i>Analyse-système des technologies énergétiques</i>	10
1.3.3 <i>Modélisation des composants</i>	10
1.3.4 <i>Les types primitifs de Thermoptim</i>	12
1.3.4.1 Propriétés thermodynamiques des corps	13
1.3.4.2 Etat d'une masse fluide : les points	13
1.3.4.3 Transformations	14
1.3.4.4 Nœuds	14
1.3.4.5 Echangeurs	15
1.3.4.6 Composants de l'éditeur de schémas	15
1.3.4.7 Projets	17
1.3.5 <i>Atouts de Thermoptim</i>	17
1.4 Références	18
<b>2 Bases de thermodynamique</b>	<b>19</b>
2.1 Notions fondamentales, définitions	20
2.1.1 <i>Systèmes ouverts et fermés</i>	20
2.1.2 <i>Etat d'un système, grandeurs intensives et extensives</i>	21
2.1.3 <i>Phase, corps purs, mélanges</i>	22
2.1.4 <i>Equilibre, transformation réversible</i>	23
2.1.5 <i>Température</i>	23
2.1.6 <i>Notations</i>	23
2.2 Echanges d'énergie au cours d'une transformation	24
2.2.1 <i>Travail <math>\delta W</math> des forces externes sur un système fermé</i>	24
2.2.2 <i>Transferts de chaleur</i>	26
2.3 Premier principe de la thermodynamique	27
2.3.1 <i>Définition de l'énergie interne <math>u</math> (systèmes fermés)</i>	27

2.3.2	<i>Application à une masse fluide</i>	28
2.3.3	<i>Travail fourni, travail utile <math>\tau</math></i>	29
2.3.3.1	<i>Démonstration</i>	30
2.3.3.2	<i>Cas particulier d'une transformation réversible</i>	31
2.3.4	<i>Travail utile et enthalpie (systèmes ouverts)</i>	31
2.3.5	<i>Etablissement des bilans enthalpiques</i>	32
2.3.6	<i>Application aux processus industriels</i>	33
2.4	<i>Deuxième principe de la thermodynamique</i>	34
2.4.1	<i>Définition de l'entropie</i>	35
2.4.2	<i>Irréversibilités</i>	36
2.4.2.1	<i>Irréversibilités mécaniques</i>	37
2.4.2.2	<i>Irréversibilités par hétérogénéité de température</i>	38
2.4.3	<i>Efficacité de Carnot des machines thermiques</i>	38
2.4.4	<i>Relations fondamentales pour une phase</i>	40
2.4.5	<i>Potentiels thermodynamiques</i>	40
2.4.5.1	<i>Energie libre et enthalpie libre</i>	41
2.4.5.2	<i>Relations d'équilibre pour les réactions chimiques</i>	41
2.5	<i>Exergie</i>	42
2.5.1	<i>Système monotherme ouvert en régime permanent</i>	43
2.5.2	<i>Système ouvert multitherme en régime permanent</i>	44
2.5.3	<i>Application à une machine ditherme réversible</i>	45
2.5.4	<i>Cas particulier : échanges thermiques sans production de travail</i>	45
2.5.5	<i>Rendement exergetique</i>	46
2.6	<i>Représentation des propriétés des corps</i>	46
2.6.1	<i>Phases solide, liquide, gazeuse</i>	46
2.6.2	<i>Gaz parfaits et idéaux</i>	48
2.6.2.1	<i>Equation d'état des gaz idéaux</i>	48
2.6.2.2	<i>Détermination pratique de l'état d'un gaz parfait</i>	50
2.6.2.3	<i>Détermination pratique de l'état d'un gaz idéal</i>	50
2.6.2.4	<i>Equation des isentropiques</i>	52
2.6.3	<i>Mélanges de gaz idéaux</i>	53
2.6.3.1	<i>Fractions molaires et fractions massiques</i>	53
2.6.3.2	<i>Loi de Dalton des gaz idéaux</i>	53
2.6.3.3	<i>Propriétés énergétiques des mélanges de gaz idéaux</i>	54
2.6.4	<i>Les liquides et les solides</i>	55
2.6.5	<i>Equilibre liquide - vapeur d'un corps pur</i>	56
2.6.5.1	<i>Loi de pression saturante</i>	56
2.6.5.2	<i>Titre en vapeur</i>	57
2.6.5.3	<i>Enthalpie de vaporisation</i>	57
2.6.5.4	<i>Calcul des propriétés d'un corps pur à l'état diphasique</i>	58
2.6.6	<i>Représentations des fluides réels</i>	58
2.6.6.1	<i>Diagrammes thermodynamiques des corps purs</i>	59
2.6.6.2	<i>Equations des fluides réels</i>	71
2.6.6.3	<i>Tables thermodynamiques</i>	74
2.6.6.4	<i>Equations d'état retenues dans thermoptim</i>	74
2.6.7	<i>Mélanges humides</i>	78
2.6.7.1	<i>Définitions et conventions</i>	78

2.6.7.2 Principes de calcul	79
2.6.7.3 Principales relations	80
2.6.7.4 Températures utilisées pour les mélanges humides	82
2.6.7.5 Diagrammes des mélanges humides	83
2.6.8 <i>Mélanges de fluides réels</i>	85
2.6.8.1 Phénomènes physiques mis en jeu	85
2.6.8.2 Principes de calcul des mélanges de vapeurs	87
2.6.8.3 Diagrammes des fluides frigorigènes à glissement de température	89
2.6.8.4 Diagrammes utilisés pour les cycles de réfrigération à absorption	95
2.7 Références	100
<b>3 Présentation de Thermoptim</b>	<b>103</b>
3.1 Généralités	103
3.1.1 <i>Les applets d'initiation</i>	104
3.1.2 <i>Les diagrammes interactifs</i>	105
3.1.3 <i>Les cinq environnements de travail de thermoptim</i>	107
3.2 Editeur de schémas	109
3.2.1 <i>Présentation de l'éditeur</i>	109
3.2.2 <i>Propriétés des composants graphiques</i>	109
3.2.2.1 Editeur de propriétés	109
3.2.2.2 Placement d'un composant	110
3.2.2.3 Connexions entre les composants	111
3.2.3 <i>Liaisons entre le simulateur et le schéma</i>	112
3.2.3.1 Création et mise à jour des éléments du simulateur	112
3.2.3.2 Création d'un schéma à partir du simulateur	113
3.2.3.3 Connexions entre deux nœuds	114
3.3 Environnement de simulation	114
3.3.1 <i>Ecran principal</i>	114
3.3.2 <i>Principaux menus</i>	115
3.3.3 <i>Exportation des résultats sous forme de fichier texte</i>	116
3.3.4 <i>Ecran de définition et d'évaluation des points</i>	117
3.3.4.1 Systèmes ouverts	117
3.3.4.2 Systèmes fermés	119
3.3.5 <i>Calcul des propriétés humides d'un point</i>	120
3.3.5.1 Représentation par un mélange humide	120
3.3.5.2 Calcul des caractéristiques humides	121
3.3.5.3 Imposer l'humidité relative	121
3.3.5.4 Représentation par un gaz sec	122
3.3.6 <i>Ecrans des nœuds</i>	123
3.3.6.1 Mélangeur	123
3.3.6.2 Diviseur	123
3.3.6.3 Séparateur (ou sécheur)	124
3.4 Extension de Thermoptim par des classes externes	125
3.4.1 <i>Mécanisme d'extension de Thermoptim par ajout de classes externes</i>	125
3.4.2 <i>Implémentation logicielle</i>	126
3.4.3 <i>Visualisation des classes externes disponibles</i>	128
3.4.4 <i>Représentation d'un composant externe dans l'éditeur de schémas</i>	128

3.4.5	<i>Chargement d'une classe externe</i>	128
3.4.6	<i>Réalisation pratique d'une classe externe</i>	128
<b>4</b>	<b>Composants et transformations élémentaires</b>	<b>131</b>
4.1	Compressions	131
4.1.1	<i>Thermodynamique de la compression</i>	132
4.1.2	<i>Compressions de référence</i>	132
4.1.2.1	Compression isotherme réversible	132
4.1.2.2	Compression adiabatique réversible	133
4.1.3	<i>Compressions réelles</i>	133
4.1.3.1	Adiabatique réelle	133
4.1.3.2	Polytropique de la compression adiabatique	134
4.1.3.3	Polytropique de la compression non adiabatique	138
4.1.4	<i>Compressions étagées</i>	141
4.1.5	<i>Calcul d'une compression dans Thermoptim</i>	142
4.2	Compresseurs volumétriques	144
4.2.1	<i>Compresseur à pistons</i>	145
4.2.1.1	Bilan énergétique théorique	146
4.2.1.2	Cycle réel du compresseur à pistons	146
4.2.1.3	Détermination du travail par cycle	147
4.2.1.4	Rendement volumétrique $\lambda$	148
4.2.1.5	Rendement de compression $\eta$	149
4.2.1.6	Calcul pratique d'un compresseur à pistons	149
4.2.2	<i>Compresseurs hélicoïdaux</i>	150
4.2.2.1	Rendement de compression	151
4.2.2.2	Rendement volumétrique	153
4.2.3	<i>Critères de choix entre les compresseurs volumétriques</i>	153
4.3	Turbocompresseurs	154
4.3.1	<i>Généralités</i>	154
4.3.2	<i>Thermodynamique des écoulements permanents</i>	155
4.3.2.1	Fluide compressible parfait en régime permanent	155
4.3.2.2	Fluide compressible visqueux en régime permanent	156
4.3.2.3	Écoulements adiabatiques	157
4.3.2.4	Variations de la pression et de la vitesse du fluide dans un compresseur	159
4.3.3	<i>Performances et similitude des turbomachines</i>	162
4.3.3.1	Caractéristiques des turbocompresseurs	164
4.3.3.2	Pompage des turbocompresseurs	166
4.3.4	<i>Calcul pratique d'un turbocompresseur</i>	168
4.3.5	<i>Pompes et ventilateurs</i>	169
4.4	Comparaison entre les divers types de compresseurs	170
4.4.1	<i>Comparaison des turbocompresseurs et compresseurs volumétriques</i>	170
4.4.2	<i>Comparaison entre les turbocompresseurs</i>	172
4.5	Détentes	172
4.5.1	<i>Thermodynamique de la détente</i>	172
4.5.1.1	Détente irréversible	172
4.5.1.2	Détente polytropique	173
4.5.1.3	Calcul d'une polytropique réchauffée pour un système ouvert	173

4.5.2 Calcul d'une détente dans <i>Thermoptim</i>	174
4.5.3 Turbines	174
4.5.4 Caractéristiques des turbines	174
4.5.5 Degré de réaction d'un étage	176
4.6 Combustions	177
4.6.1 Phénomènes de combustion, mécanismes de base	178
4.6.1.1 Réactions complètes, dissociation	178
4.6.1.2 Combustion des mélanges combustibles gazeux	179
4.6.1.3 Combustion des combustibles liquides	181
4.6.1.4 Thermodynamique de la combustion à l'équilibre	182
4.6.1.5 Eléments de cinétique chimique	184
4.6.1.6 Température de figeage	185
4.6.2 Etude des combustions complètes	186
4.6.2.1 Composition de l'air	186
4.6.2.2 Composition du combustible	186
4.6.2.3 Combustion stœchiométrique	187
4.6.2.4 Combustion non stœchiométrique	188
4.6.3 Etude des combustions incomplètes	189
4.6.3.1 Mécanismes de formation des imbrûlés	189
4.6.3.2 Composition des fumées sans suies ni hydrocarbures imbrûlés	191
4.6.3.3 Composition des fumées avec suie et sans CO ni HC	196
4.6.3.4 Composition des fumées sans suies et avec CO et HC	197
4.6.3.5 Analyses des fumées	197
4.6.4 Propriétés énergétiques des réactions de combustion	198
4.6.4.1 Propriétés thermodynamiques des espèces en réaction	198
4.6.4.2 Enthalpies de formation	199
4.6.4.3 Entropies de référence	200
4.6.4.4 Chaleurs de réaction	200
4.6.4.5 Pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur	201
4.6.4.6 Température adiabatique de flamme	202
4.6.4.7 Combustion dans les chaudières	203
4.6.4.8 Rendement de combustion	206
4.6.5 Emissions de polluants gazeux	207
4.6.6 Calcul des combustions dans <i>Thermoptim</i>	209
4.6.6.1 Déclaration du combustible	209
4.6.6.2 Systèmes ouverts et systèmes fermés	211
4.6.6.3 Caractéristiques de la combustion	211
4.6.6.4 Options de calcul	212
4.6.6.5 Cas particulier d'un mélange combustible seul	213
4.6.7 Aspects technologiques	213
4.6.7.1 Chambres de combustion	213
4.6.7.2 Chaudières	214
4.7 Laminages ou flash	215
4.8 Transformations humides	216
4.8.1 Ecrans des transfos humides	217
4.8.2 Mélangeurs humides	218
4.8.2.1 Principe et équations mises en jeu	218

4.8.2.2 Calcul d'un mélange dans Thermoptim	219
4.8.3 <i>Chauffage d'un mélange humide</i>	220
4.8.3.1 Principe et équations mises en jeu	220
4.8.3.2 Calcul d'un chauffage dans Thermoptim	221
4.8.4 <i>Refroidissement d'un mélange humide</i>	221
4.8.4.1 Principe et équations mises en jeu	221
4.8.4.2 Calcul d'un refroidissement dans Thermoptim	222
4.8.5 <i>humidification d'un gaz</i>	223
4.8.5.1 Principe et équations mises en jeu	223
4.8.5.2 Calcul d'une humidification dans Thermoptim	225
4.8.6 <i>Déshumidification d'un mélange par dessiccation</i>	226
4.8.6.1 Principe et équations mises en jeu	226
4.8.6.2 Calcul d'une dessiccation dans Thermoptim	226
4.8.7 <i>Détermination des conditions de soufflage</i>	227
4.8.7.1 Principe et équations mises en jeu	227
4.8.7.2 Calcul des conditions de soufflage dans Thermoptim	228
4.9 Exemples de composants représentés par des classes externes	228
4.9.1 <i>Tuyères</i>	229
4.9.1.1 Thermodynamique de la tuyère adiabatique	229
4.9.1.2 Calcul des sections de la tuyère	231
4.9.1.3 Conception du composant externe	231
4.9.2 <i>Diffuseurs</i>	232
4.9.2.1 Thermodynamique du diffuseur adiabatique	233
4.9.2.2 Rapport des pressions de stagnation	234
4.9.2.3 Conception du composant externe	234
4.9.3 <i>Ejecteurs</i>	236
4.9.3.1 Thermodynamique d'un éjecteur	237
4.9.3.2 Mise en équations	238
4.10 Références	240
<b>5 Echangeurs de chaleur</b>	<b>243</b>
5.1 Principes de fonctionnement d'un échangeur	243
5.1.1 <i>Flux de chaleur échangé</i>	244
5.1.2 <i>Coefficient d'échange thermique <math>u</math></i>	245
5.1.3 <i>Efficacité des ailettes</i>	246
5.1.4 <i>Valeurs des coefficients de convection <math>h</math></i>	247
5.2 Modèles phénoménologiques pour le calcul des échangeurs	247
5.2.1 <i>Méthode du nombre d'unités de transfert</i>	248
5.2.2 <i>Relations entre <math>\varepsilon</math> et NUT</i>	250
5.2.2.1 Echangeur à contre-courant	250
5.2.2.2 Echangeur à co-courant	251
5.2.2.3 Echangeurs à courants croisés	251
5.2.2.4 Echangeurs à tubes et calandre	253
5.2.3 <i>Formulation matricielle</i>	254
5.2.4 <i>Assemblages d'échangeurs</i>	256
5.2.4.1 Assemblages en série	256
5.2.4.2 Assemblage en série-parallèle	258

5.2.5 Lien avec la méthode de l'écart moyen logarithmique	259
5.2.6 Pincement d'un échangeur	259
5.3 Calcul des échangeurs dans ThermoOptim	260
5.3.1 Transfos "échange"	261
5.3.2 Création d'un échangeur dans l'éditeur de schémas	261
5.3.3 Ecran des échangeurs	262
5.3.4 Dimensionnement des échangeurs simples	263
5.3.5 Liquide générique	264
5.3.6 Résolution des échangeurs en régime non nominal	264
5.3.7 Thermocoupleurs	266
5.4 Aspects technologiques	269
5.4.1 Echangeurs tubulaires	269
5.4.1.1 Echangeurs à tubes et calandre	269
5.4.1.2 Echangeurs à ailettes	270
5.4.2 Echangeurs à plaques	270
5.4.3 Autres types d'échangeurs	270
5.5 Récapitulatif	271
5.6 Références	272
<b>6 Exemples d'applications</b>	<b>273</b>
6.1 Cycle de centrale électrique à vapeur	273
6.1.1 Principe de la machine et données du problème	273
6.1.2 Création du schéma	274
6.1.3 Création des éléments du simulateur	277
6.1.4 Paramétrage des points	279
6.1.5 Paramétrage des transfos	279
6.1.6 Tracé du cycle sur diagramme thermodynamique	281
6.1.7 Dimensionnement du condenseur	283
6.1.8 Améliorations du cycle	286
6.1.8.1 Cycle avec resurchauffe	286
6.1.8.2 Cycle avec prélèvement	287
6.1.9 Modification du modèle	288
6.2 Cycle de réfrigération mono-étagé à compression	289
6.2.1 Principe de la machine et données du problème	289
6.2.2 Création du schéma	290
6.2.3 Création des éléments du simulateur	293
6.2.4 Paramétrage des points	295
6.2.5 Paramétrage des transfos	295
6.3 Cycle de turbine à gaz	297
6.3.1 Principe de la machine et données du problème	297
6.3.2 Création du schéma	298
6.3.3 Création des éléments du simulateur	300
6.3.4 Paramétrage des points	301
6.3.5 Paramétrage des transfos	302
6.4 Installation de conditionnement d'air	305
6.4.1 Principe de l'installation et données du problème	305
6.4.2 Conditions de soufflage	306

6.4.3 <i>Propriétés du mélange (air extérieur / air recyclé)</i>	308
6.4.4 <i>Traitement de l'air</i>	309
6.4.5 <i>Représentation sur diagramme psychrométrique</i>	310
<b>7 Généralités sur les cycles, bilans énergétiques et exergetiques</b>	<b>313</b>
7.1 Généralités sur les cycles, notations	313
7.1.1 <i>Cycles moteurs</i>	313
7.1.2 <i>Cycles récepteurs</i>	314
7.1.3 <i>Cycle de Carnot</i>	314
7.1.4 <i>Cycles avec régénération</i>	315
7.1.5 <i>Cycles théoriques et réels</i>	315
7.1.6 <i>Notions de rendement ou d'efficacité</i>	316
7.2 Bilans énergétiques et exergetiques	317
7.2.1 <i>Bilans énergétiques</i>	318
7.2.2 <i>Bilans exergetiques</i>	318
7.2.3 <i>Mise en œuvre pratique : calculs avec tableur</i>	319
7.2.4 <i>Bilans exergetiques des cycles complexes</i>	323
7.3 Structures productives	324
7.3.1 <i>Etablissement d'une structure productive</i>	324
7.3.2 <i>Relation entre le schéma et la structure productive</i>	324
7.3.3 <i>Implémentation dans Thermoptim</i>	327
7.3.4 <i>Automatisation de la création de la structure productive</i>	328
7.3.4.1 <i>Création du schéma</i>	328
7.3.4.2 <i>Paramétrage des UPD</i>	329
7.3.5 <i>Exemples</i>	332
7.3.5.1 <i>Exemple d'un cycle à vapeur</i>	332
7.3.5.2 <i>Exemple d'un cycle de réfrigération</i>	335
7.3.5.3 <i>Exemple de la turbine à gaz utilisée en cogénération</i>	338
7.3.6 <i>Conclusion</i>	339
7.4 Références	340
<b>Annexe 1 : Tableaux</b>	<b>341</b>