

**Thermodynamique
et optimisation énergétique
des systèmes et procédés**

Chez le même éditeur

Phénomènes de transfert en génie des procédés

C. Gourdon, A. Liné, 2^e édition, à paraître

Modélisation en génie des procédés par analyse dimensionnelle

G. Delaplace, K. Loubière, F. Ducept, R. Jeantet, 2014

Thermodynamique optimale en dimensions physiques finies

M. Feidt, 2013

Introduction au génie des procédés. Applications et développements

D. Ronze (coord.), 2013

Commande des procédés

J.-P. CORRIOU, 3^e édition, 2012

Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique.

Aspects théoriques et pratiques

H. Fauduet, 2^e édition, 2012

Le génie des procédés et l'entreprise.

Projets industriels et management du changement

J.-P. Dal Pont (dir.), 2011

Thermodynamique des systèmes fluides et des machines thermiques.

Principes, modèles et applications

J.-P. Fohr, 2010

Introduction au génie des procédés

D. Ronze (coord.), 2008

Méthodes de génie des procédés. Étude de cas

A. Bergel, J. Bertrand (dir.), 2004

Thermodynamique et optimisation énergétique des systèmes et procédés

Michel Feidt

Direction éditoriale : Fabienne Roulleaux
Édition : Laurence Sourdillon
Fabrication : Estelle Perez
Couverture : Isabelle Godenèche
Composition : Desk

Avant-propos

Lorsque le livre a été proposé pour la première fois (1987)¹, il avait, au moins en langue française, une certaine originalité et rendait compte d'une préoccupation nouvelle associée aux deux crises pétrolières successives.

La présente édition prouve que l'actualité du thème énergétique perdure, même si on doit noter une évolution marquée visant à un couplage fort dans la relation à l'environnement : l'optimisation des systèmes et procédés se fait en relation étroite avec l'environnement et l'économie.

Malgré cette ouverture, l'objectif premier du livre reste de permettre aux lecteurs d'acquérir les notions indispensables en vue de modéliser, simuler et optimiser des systèmes ou procédés énergétiques. La thermodynamique phénoménologique est l'outil privilégié pour se faire, tant du point de vue fondamental (physicien) qu'applicatif (ingénieur).

L'ouvrage se compose de 3 parties.

La première partie (7 chapitres) aborde l'ensemble des *notions relatives à la thermodynamique* en insistant sur les concepts de base et le vocabulaire spécifique (second principe de la thermodynamique (chapitre 4) et ses conséquences : analyse thermodynamique des dégradations d'énergie (chapitre 6)). Les chapitres 3 et 7 concernent quant à eux des aspects plus classiques, généralement bien connus de l'ingénieur (cycles thermodynamiques et diagrammes, à la base de toute application aux systèmes et procédés (chapitre 7)).

La deuxième partie (3 chapitres) rapporte de façon non exhaustive des concepts et méthodes d'études des systèmes et procédés, en vue de leur optimisation qui revêt deux formes privilégiées :

1. L'édition de 1987 a été suivie d'une nouvelle édition en 1996. Ce présent ouvrage s'inscrit dans la continuité de ce projet.

- *l'optimisation statique* qui est utile pour la mise en place d'une configuration initiale optimale relative le plus souvent au régime nominal de fonctionnement de l'installation ;
- *l'optimisation dynamique* plus complexe de mise en œuvre, mais permettant le suivi en temps réel du système ou procédé. Quand on sait l'importance croissante que prennent le *contrôle* et la *régulation* dans le monde industriel, on conçoit l'importance de la caractérisation et de la maîtrise des régimes transitoires (instationnaires) des systèmes et procédés.

Depuis la première édition, une classe d'optimisation utilisant les méthodes méthaheuristiques s'est développée. Ce nouveau thème est abordé dans l'ouvrage, même s'il nous apparaît que ceci constitue plus une amélioration de solution, qu'une optimisation au sens mathématique du terme.

Ainsi, le chapitre 8 sur la théorie des modèles et de la valeur, reconsidère la notion de critère en la généralisant (typiquement la notion de rendements en thermodynamique). Le chapitre 9 développe la gradation modélisation-simulation-réduction de modèle-identification de paramètres constituant les prémices à l'optimisation considérée au chapitre 10.

La troisième partie, à travers des exemples choisis, illustre de façon non exhaustive les développements précédents, selon une approche de la thermodynamique scientifique et technique. Les applications retenues proviennent des domaines suivants : combustion, transfert de chaleur, production de froid, pompes à chaleur, valorisation de l'énergie thermique.

Notons que la transition énergétique amène à reconsidérer l'utilisation des énergies renouvelables et des chaleurs fatales. Une ouverture en ce sens est proposée tout au long de l'ouvrage et tout particulièrement dans le chapitre 14 qui fait le lien entre les énergies renouvelables et le stockage d'énergie.

L'ouvrage résulte d'une longue expérience d'enseignement et de recherche à l'Université de Lorraine. De nombreux exemples proviennent de problèmes rencontrés par l'auteur, plus particulièrement dans les domaines industriels, thermique de l'habitat, mais aussi dans l'étude des pompes à chaleur et des moteurs. Dans tous ces cas, les contacts avec de grands organismes tels qu'EDF, ADEME, CNES, ANR, ou des industriels ont fourni matière à développement.

De ce fait, l'ouvrage s'adresse aux techniciens et ingénieurs devant concevoir, adapter ou suivre des procédés et systèmes mettant en jeu l'énergie sous toutes ses formes. Cette édition intègre des développements récents relatifs à nos recherches et des recherches complémentaires aux nôtres, en particulier dans le sens d'une meilleure intégration des systèmes et procédés.

L'auteur tient à remercier tous les étudiants avec lesquels il a eu de nombreuses discussions et échanges, comme les collègues ayant de l'intérêt pour la discipline. Van Long Le a été un acteur privilégié dans la mise en forme et la relecture de cette édition ; qu'il en soit profondément remercié. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec lui.

Table des matières

Avant-propos	V
--------------------	---

Partie 1

Thermodynamique phénoménologique

Chapitre 1

L'énergie	3
1. Introduction	3
2. Historique	3
3. Définition et formes de l'énergie	4
3.1. Énergie mécanique	4
3.2. Énergie électrique	5
3.3. Énergie magnétique	5
3.4. Énergie chimique	5
3.5. Énergie radiative	5
3.6. Énergie nucléaire	6
3.7. Énergie calorifique ou thermique	6
4. Conversion de l'énergie	6
4.1. Un exemple	6
4.2. Principaux modes de conversion	7
5. Transfert d'énergie	8
5.1. Énergies flux – Énergies fossiles	8
5.2. Transfert d'énergie stationnaire ou instationnaire	9
6. Expressions du travail	9
6.1. Définition du travail	9
6.2. Convention thermodynamique	10
6.3. Expression différentielle d'un travail mécanique	10

6.4.	Expression différentielle d'un travail électrique	11
6.5.	Expression différentielle d'un travail magnétique	13
6.6.	Expression différentielle d'un travail chimique	13
7.	Quantité de chaleur	14
7.1.	Définition d'une quantité de chaleur	14
7.2.	Notion de calorimétrie	14
7.3.	Capacité calorifique – Chaleur spécifique	15
7.4.	Transfert de la chaleur	16
8.	Conclusion	17

Chapitre 2

Vocabulaire de l'énergéticien	19
1. Introduction	19
2. Système thermodynamique	19
2.1. Définition d'un système thermodynamique	19
2.2. Volume élémentaire représentatif	20
2.3. Frontière d'un système thermodynamique	20
2.4. Classification des systèmes thermodynamiques	21
3. État d'un système thermodynamique	22
3.1. Propriétés physiques et chimiques en un point	22
3.2. Variation des propriétés	25
3.3. État d'équilibre d'un système	26
4. Variables d'état	28
4.1. Définition des variables d'état	28
4.2. Propriétés des variables d'état	29
5. Équations d'état	30
5.1. Définition	30
5.2. Équation d'état d'un corps pur	31
5.3. Quelques équations d'état de systèmes thermodynamiques simples	33
6. Conclusion	36

Chapitre 3

Premier principe de la thermodynamique, principe de conservation	37
1. Introduction	37
2. Conservation de la matière	38
2.1. Conservation de la matière dans les systèmes fermés. Approche systémique	38
2.2. Conservation de la matière dans les systèmes ouverts. Approche systémique	39
2.3. Système et volume de contrôle	40
2.4. Conservation de la matière dans les systèmes ouverts. Volume de contrôle fini	41

2.5. Conservation de la matière dans les systèmes ouverts. Volume de contrôle différentiel. Constituant unique	42
2.6. Conservation de la matière dans les systèmes à plusieurs constituants. Volume de contrôle différentiel	43
3. Conservation de l'électricité	53
4. Conservation de la quantité de mouvement et du moment de quantité de mouvement.	54
4.1. Introduction.	54
4.2. Conservation de la quantité de mouvement	54
4.3. Conservation du moment de quantité de mouvement	55
4.4. Forme différentielle de l'équation de conservation de la quantité de mouvement	56
5. Conservation de l'énergie	61
5.1. Conservation de l'énergie dans les systèmes fermés. Approche systémique	61
5.2. Conservation de l'énergie dans les systèmes ouverts. Approche systémique	63
5.3. Conservation de l'énergie dans les systèmes ouverts. Expression intégrale	64
5.4. Forme différentielle de l'équation de conservation de l'énergie . . .	68
6. Fonction d'état d'un système thermodynamique	71
6.1. Définition.	71
6.2. Expression différentielle générale de l'énergie interne.	71
6.3. Expression différentielle générale de l'enthalpie.	71

Chapitre 4

Second principe de la thermodynamique, principe d'évolution . .	73
1. Introduction	73
2. Réversibilité et irréversibilité.	74
2.1. Transformation réversible.	74
2.2. Transformation irréversible	75
3. Énoncés classiques du second principe de la thermodynamique. Approche systémique	78
3.1. Énoncé de Clausius	78
3.2. Énoncé de Kelvin	78
3.3. Cycle de Carnot	78
3.4. Rendement d'un convertisseur d'énergie à deux sources de chaleur.	79
4. L'entropie fonction d'état	81
4.1. Échelle thermodynamique des températures ou échelle Kelvin . . .	81
4.2. Conséquences de l'existence d'une échelle thermodynamique des températures	82
4.3. Définition de l'entropie, fonction d'état.	84
4.4. Variation d'entropie	84
4.5. Exemples de production d'entropie	87
4.6. Bilan entropique pour un système ouvert	89

5. Expressions différentielle et intégrale de la seconde loi de la thermodynamique	90
5.1. Bilan entropique local	90
5.2. Expression intégrale du bilan d'entropie	91

Chapitre 5

Thermodynamique analytique.	93
1. Introduction	93
2. Transformations thermodynamiques. Schématisation et analyse	93
2.1. Recensement des transformations thermodynamiques standard.	94
2.2. Transformation polytropicque.	95
3. Coefficients calorimétriques	97
3.1. Définitions classiques	97
3.2. Relations entre les coefficients calorimétriques	97
3.3. Définition générale de la chaleur spécifique	98
4. Coefficients thermoélastiques.	98
4.1. Définitions	98
4.2. Remarques	99
5. Fonctions thermodynamiques caractéristiques	99
5.1. Fonction caractéristique $U - f(S, V)$	99
5.2. Autres fonctions caractéristiques.	100
5.3. Fonctions caractéristiques généralisées	103
6. Critères d'équilibre et de stabilité d'un système	103
6.1. Critères d'équilibre de systèmes homogènes	103
6.2. Critères de stabilité d'un équilibre.	104
7. Fluide réel et fluide parfait	106
7.1. Équations d'état des fluides réels	106
7.2. Fonctions d'état des fluides réels.	108
7.3. Gaz parfait.	109
8. Troisième principe	112
8.1. Insuffisance de la thermodynamique analytique.	112
8.2. Postulat de Nernst.	113
9. Conclusion.	117

Chapitre 6

Analyse thermodynamique des dégradations d'énergie	119
1. Introduction	119
2. Création d'entropie due aux transferts de chaleur	120
2.1. Transfert thermique par conduction	120
2.2. Transfert thermique par convection	121
2.3. Transfert thermique par rayonnement	131
3. Création d'entropie due aux dissipations visqueuses dans les écoulements	133
3.1. Illustration simple pour des écoulements laminaires	133
3.2. Création d'entropie dans les écoulements turbulents	136

4.	Création d'entropie dans les compressions et les détentees.	137
4.1.	Création d'entropie d'une détente isenthalpique	137
4.2.	Création d'entropie associée à une onde de choc de compression . . .	138
5.	Création d'entropie due au mélangeage et à la diffusion	139
5.1.	Création d'entropie due au mélangeage	140
5.2.	Création d'entropie associée au phénomène de diffusion	142
6.	Création d'entropie due à des réactions chimiques.	143
6.1.	Retour sur la notion de potentiel chimique	143
6.2.	Équilibre chimique en phase homogène.	144
6.3.	Création d'entropie associée à une réaction chimique	150
7.	Notions sur la thermodynamique des phénomènes irréversibles.	152
7.1.	Flux et forces généralisés	153
7.2.	Principe de Curie-Prigogine	153
7.3.	Relations de réciprocité d'Onsager	154
7.4.	Remarques	154
7.5.	États stationnaires.	154
8.	Exergie, anergie	155
8.1.	Théorème de Gouy-Stodola	155
8.2.	Définition de l'exergie, conséquences.	157
8.3.	Anergie, rendements	159
9.	Conclusions	160

Chapitre 7

Cycles thermodynamiques et diagrammes	161
1. Introduction	161
2. Diagrammes thermodynamiques et changements d'état.	162
2.1. Équilibre et changements de phases d'un corps pur	162
2.2. Diagrammes thermodynamiques.	167
3. Cycles thermodynamiques	171
3.1. Classification des cycles thermodynamiques.	171
3.2. Les cycles à gaz permanents.	173
3.3. Les cycles à fluides condensables.	183
4. Conclusions	187
Références bibliographiques	189

Partie 2

Méthodes d'études des systèmes et procédés

Chapitre 8

Théorie des modèles et de la valeur	195
1. Introduction	195
2. Les modèles.	195
2.1. Définition d'un modèle.	195
2.2. Types de modèles	196

2.3. Extrapolation et interpolation	197
2.4. Modèles aléatoires (ou stochastiques)	197
3. Types de problèmes à résoudre et types de variables	197
3.1. Objectifs du génie des systèmes et procédés	197
3.2. Types de problèmes.	198
3.3. Types de variables	200
4. Variables de valeur	200
4.1. Recensement non exhaustif de types de valeur	200
4.2. Critères d'optimisation	201
4.3. Pratique de l'optimisation	202

Chapitre 9

Modélisation et simulation de systèmes et procédés	203
1. Introduction	203
2. Techniques de modélisation	204
2.1. Méthodologie générale	204
2.2. Modélisation de composants et des corps utilisés	205
2.3. Méthode de description d'un système ou d'un procédé	209
2.4. Réduction de modèles	212
3. Identification de paramètres.	213
3.1. Méthodologie	213
3.2. Méthodes directes d'identification	214
3.3. Méthodes indirectes	218
3.4. Ouvertures sur d'autres méthodes.	220
4. Simulation de systèmes	221
4.1. Définition.	221
4.2. Diagramme de flux	221
4.3. Simulation simultanée	222
4.4. Simulation séquentielle	224
4.5. Simulation par substitution	225
4.6. Simulation par la méthode de Newton-Raphson.	227
5. Exemple de synthèse	232
5.1. Présentation du séchoir	232
5.2. Modélisation	233
5.3. Simplification et identification du modèle du séchoir	237
6. Problème d'illustration proposé	239

Chapitre 10

Optimisation de systèmes et procédés	243
1. Méthodes d'optimisation.	243
1.1. Représentation mathématique d'un problème d'optimisation.	243
1.2. Catalogue des méthodes d'optimisation.	244
2. Mise en forme d'un problème d'optimisation	246
2.1. Guide pour la formulation d'un problème d'optimisation	246

3.	Calcul des variations et optimisation	248
3.1.	Conditions d'utilisation de la méthode	248
3.2.	Optimisation sans contrainte	248
3.3.	Optimisation avec contraintes	249
4.	Optimisation statique par <i>méthodes de recherche</i>	254
4.1.	Caractérisation générale des méthodes de recherche	254
4.2.	Méthodes de recherche à une variable	255
4.3.	Méthodes de recherche à plusieurs variables sans contrainte	262
4.4.	Méthodes de recherche à plusieurs variables avec contraintes	269
5.	Programmation linéaire	274
5.1.	Formulation du problème mathématique	274
5.2.	Maximisation avec contraintes à seuil supérieur	274
5.3.	Minimisation avec contraintes à seuil inférieur	279
6.	Programmation géométrique	282
6.1.	Présentation générale de la méthode, degré de difficulté	282
6.2.	Programmation géométrique à une variable sans contrainte	283
6.3.	Programmation géométrique multivariable sans contrainte	285
6.4.	Programmation géométrique avec contrainte	287
7.	Programmation dynamique	289
7.1.	Introduction	289
7.2.	Principe de Bellmann ou principe d'optimalité	290
7.3.	Programmation dynamique de fonctions apparemment contraintes	298
8.	Principe du maximum	305
8.1.	Présentation de la méthode	305
8.2.	Notion de commande admissible	305
8.3.	Énoncé du problème fondamental	306
8.4.	Principe du maximum	308
8.5.	Exemple d'un système à un paramètre de commande	311
9.	Nouvelles tendances en optimisation	313
10.	Conclusion	314
	Références bibliographiques	315

Partie 3

Optimisation énergétique des systèmes et procédés

Chapitre 11

Échangeurs de chaleur	319
1. Introduction	319
2. Généralités sur les échangeurs	319
2.1. Classification des échangeurs	319
2.2. Problèmes abordés	320
3. Techniques d'amélioration du transfert de chaleur	320
3.1. Présentation du problème	320

3.2.	Analyse de la création d'entropie	321
3.3.	Problèmes abordés : surfaces de transfert améliorées.	323
4.	Optimisation d'échangeurs de chaleur à contre-courant	325
4.1.	Échangeurs à contre-courant	325
4.2.	Optimisation non contrainte	326
4.3.	Optimisation avec contraintes	330
4.4.	Distribution optimale de la surface d'échange.	331
5.	Optimisation dynamique d'échangeurs de chaleur.	334
5.1.	Position du problème	334
5.2.	Modélisation de la cinétique du dépôt.	334
5.3.	Formalisation analytique de l'optimum	335
5.4.	Illustration de la démarche précédente	336
6.	Conclusion.	338

Chapitre 12

Convertisseurs thermomécaniques	339
1. Introduction	339
1.1. Importance de la notion de cycles thermodynamiques.	339
1.2. Diversité des approches d'optimisation.	339
2. Optimisation de cycles thermodynamiques	
Approche sur un cas simple	340
2.1. Cycle moteur de Carnot à transformations réversibles ou irréversibles finies	340
2.2. Analyse du cycle	340
2.3. Optimisation du travail du cycle.	341
2.4. Optimisation du rendement du cycle endoréversible	342
2.5. Optimisation en puissance motrice	344
2.6. Extensions du modèle précédent.	345
3. Contrôle optimal de cycles thermodynamiques.	345
3.1. Modèle de machine thermique	345
3.2. Rappel sur la théorie du contrôle optimal	346
3.3. Optimum de puissance moyenne associée à la machine motrice endoréversible décrite	348
4. Optimisation particulière aux cycles de compresseurs	352
4.1. Généralités sur les cycles de compresseurs	352
4.2. Problème à résoudre.	352
4.3. Éléments de solution du problème	354
4.4. Conclusions du paragraphe	358
5. Optimisation particulière aux cycles des moteurs thermiques	358
5.1. Considérations générales sur l'optimisation des cycles des moteurs thermiques.	358
5.2. Cycles simples optimaux des moteurs alternatifs	358
5.3. Autres facteurs permettant d'améliorer les rendements des moteurs alternatifs.	360
6. Optimisation particulière aux cycles de turbines à gaz ou à vapeur	362
6.1. Optimisation de cycles de turbines à gaz	362

6.2. Optimisation de cycles de turbines à vapeur	364
7. Optimisation particulière d'un système ou procédé	377
7.1. Existence d'une température optimale des systèmes solaires moteurs.	377
7.2. Optimisation d'un système solaire à cycle de Carnot.	377
7.3. Optimisations particulières d'un système solaire à cycles idéaux.	379
8. Conclusion.	380

Chapitre 13

Production de froid, pompe à chaleur.	381
1. Différents types de machines réceptrices.	381
1.1. Les applications du froid et des pompes à chaleur.	381
1.2. Différents types de machines réceptrices	382
2. Optimisation particulière du cycle d'une machine à gaz permanent.	384
2.1. Machine à gaz permanent réversible à cycle simple	384
2.2. Cycles irréversibles d'une machine à gaz permanent.	385
3. Optimisation particulière d'une machine à compression mécanique de vapeur	388
3.1. Généralités sur les machines à compression de vapeur	388
3.2. Cycle réel de machines à compression de vapeur.	390
3.3. Optimisation du cycle de Carnot inverse endoréversible.	395
4. Optimisation particulière d'une machine tritherme à cycle inverse endoréversible	398
4.1. Principe des machines trithermes. Différents types de machines	399
4.2. Formulation mathématique du problème.	400
4.3. Optimisation et résultats	402
5. Optimisation thermo-économique d'isolation	404
5.1. Application au chauffage d'un volume.	404
5.2. Application en réfrigération	406
5.3. Comparaison succincte des approches précédentes.	407
6. Conclusion.	407

Chapitre 14

Conversion et stockage d'énergie	409
1. Conversion thermosolaire	409
2. Optimisation d'un absorbeur sélectif	410
2.1. Bilan thermique – bilan radiatif	410
2.2. Sélectivité d'un absorbeur solaire	412
2.3. Optimisation d'une surface absorbante sélective.	415
3. Optimisation d'un capteur solaire en régime dynamique stationnaire.	417
3.1. Analyse exergetique d'un capteur solaire.	417
3.2. Optimisation d'un capteur isotherme	419
3.3. Optimisation d'un capteur non isotherme	420

4.	Optimisation d'un capteur solaire en régime transitoire	421
4.1.	Approche générale du régime transitoire d'un capteur	421
4.2.	Détermination de la loi d'écoulement optimal.	422
4.3.	Autre approche d'une loi de contrôle optimal	424
5.	Conclusion sur la conversion thermosolaire.	425
6.	Stockage d'énergie.	426
6.1.	Énergie flux, énergie fossile.	426
6.2.	Possibilités de stockage d'énergie	426
6.3.	Conclusion partielle	428
7.	Procédés de conversion directe d'énergie	429
7.1.	Classification des procédés de conversion directe d'énergie.	429
7.2.	Conversion thermoélectrique.	429
7.3.	Les piles à combustibles	435
7.4.	Les cellules photovoltaïques.	437
8.	Conclusions.	440
	Références bibliographiques	441
	Conclusion et perspectives	445
	<i>Annexe 1</i>	
	Mécanique générale.	449
	<i>Annexe 2</i>	
	Diagrammes thermodynamiques	455
	<i>Annexe 3</i>	
	Complément de mathématiques	463
	Complément de bibliographie	471
	Index.	473