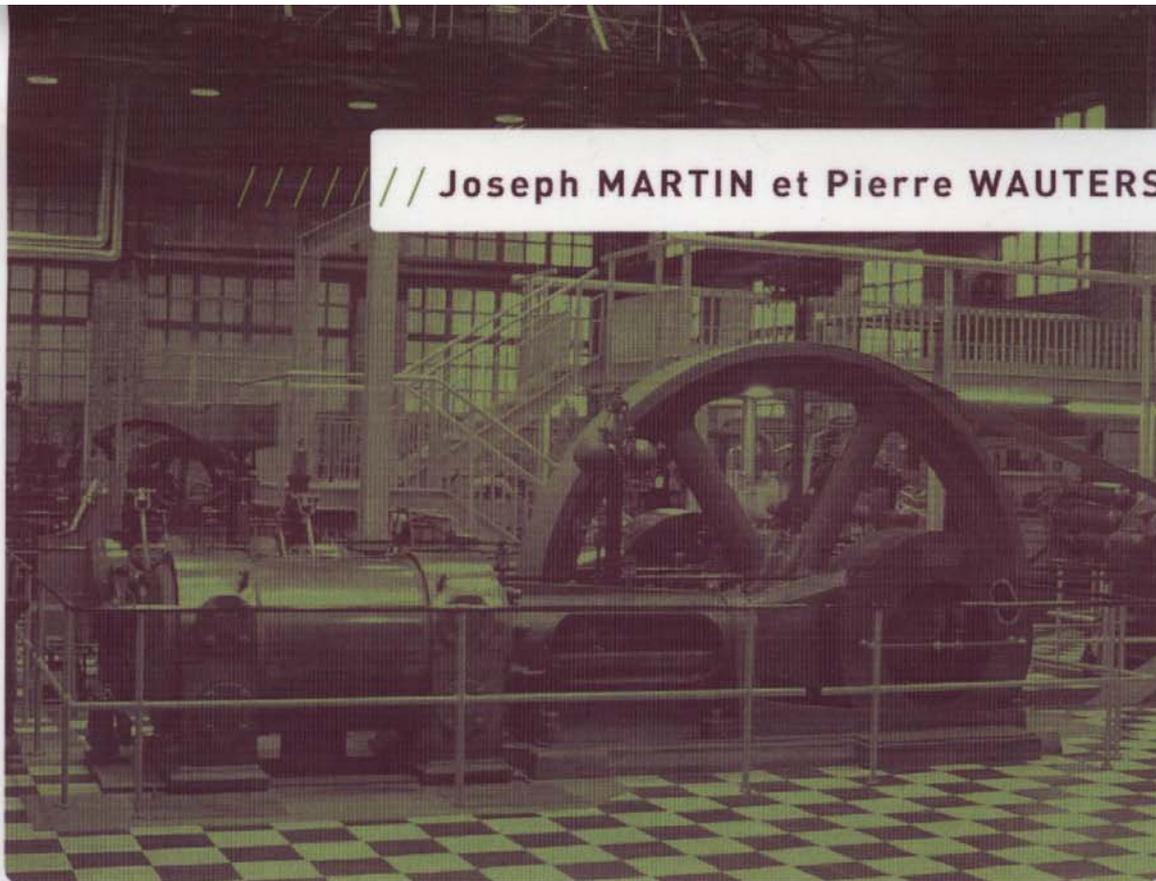


/// Joseph MARTIN et Pierre WAUTERS



ÉLÉMENTS DE THERMODYNAMIQUE TECHNIQUE

COURS UNIVERSITAIRES

UCL PRESSES
UNIVERSITAIRES
DE LOUVAIN

DUC

Table des matières

AVANT-PROPOS	vii
PRÉFACE.....	ix
CHAPITRE 1	
LE PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE	1
1. Les notions thermiques fondamentales	1
1.1. La température.....	1
1.2. L'action calorifique.....	4
1.3. Les chaleurs massiques.....	5
2. L'équation d'état d'une substance	6
2.1. Les trois états de la matière	6
2.2. Les changements d'état.....	7
2.3. La règle des phases.....	8
2.4. L'équation d'état.....	9
2.5. Les états de référence	11
2.5.1. L'état de référence pour les systèmes gazeux.....	11
2.5.2. L'état de référence pour les systèmes liquides.....	11
3. L'équation fondamentale de la dynamique.....	11
3.1. Le travail des forces intérieures.....	12
3.2. Le travail des forces extérieures	13
3.3. L'équation fondamentale de la dynamique	13
4. Le premier principe de la thermodynamique	13
4.1. Le principe d'équivalence pour une transformation cyclique	15
4.2. Le principe d'équivalence pour une transformation ouverte.....	15
5. L'équation thermodynamique de base	16
5.1. L'équation thermodynamique de base sous sa première forme et l'énergie interne.....	16
5.2. L'équation thermodynamique de base sous sa deuxième forme et l'enthalpie.....	18
6. Le caractère irréversible des transformations.....	19
CHAPITRE 2	
LE SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE	21
1. L'entropie	22
2. L'inégalité de CLAUSIUS.....	24
3. Le postulat de NERNST	25
4. Les dérivées partielles de l'entropie	26
5. Les potentiels thermodynamiques et les relations de MAXWELL	28
6. Les expressions différentielles des fonctions d'état.....	30
7. L'enthalpie libre comme fonction canonique	32

CHAPITRE 3

LES MACHINES THERMODYNAMIQUES 35

1. Les notions de machine opératrice et de machine motrice 35
 - 1.1. Le travail exercé sur un fluide dans une machine opératrice 35
 - 1.2. Le travail exercé par un fluide dans une machine motrice 37
 - 1.3. Les expressions énergétiques du travail opérateur et du travail moteur dans une machine thermodynamique 38
 - 1.4. L'équation de BERNOULLI 39
2. Modes d'interaction entre un fluide et un organe de machine 39
 - 2.1. Les machines de type volumétrique 40
 - 2.1.1. Le travail opérateur et le travail moteur dans les machines volumétriques 40
 - 2.1.2. Les machines volumétriques alternatives 42
 - 2.1.3. Les machines volumétriques rotatives 44
 - 2.2. Les machines de type dynamique ou turbomachines 47
 - 2.2.1. Le travail dans les turbomachines et les équations d'EULER 47
 - 2.2.2. Les déductions des équations d'EULER 50
 - 2.2.3. Les turbomachines radiales 52
 - 2.2.4. Les turbomachines axiales 55
 - 2.2.5. Les turbomachines tangentielles 58

CHAPITRE 4

LES CYCLES THERMODYNAMIQUES 59

1. Le diagramme entropique (T,S) 59
2. La transformation adiabatique 61
3. Les cycles thermodynamiques 62
 - 3.1. Les cycles moteurs 64
 - 3.1.1. Le cycle monotherme 64
 - 3.1.2. Le cycle moteur à deux sources de chaleur 65
 - 3.1.3. Bilan énergétique d'une installation thermique motrice 67
 - 3.1.4. Le cycle moteur de CARNOT 68
 - 3.2. L'exergie 70
 - 3.2.1. Le facteur de qualité de l'énergie calorifique 71
 - 3.2.2. La fonction exergie 72
 - 3.2.3. Le rendement exergetique d'un cycle moteur 74
 - 3.2.4. Bilan exergetique d'une installation thermique motrice 76
 - 3.3. Les cycles opérateurs 77
 - 3.3.1. Le cycle de CARNOT frigorifique 78
 - 3.3.2. Le cycle de CARNOT calorifique 79
 - 3.3.3. L'approche exergetique 79

CHAPITRE 5

LA THERMODYNAMIQUE DES GAZ	81
1. L'état gazeux idéal.....	81
1.1. L'équation d'état du gaz idéal	81
1.2. La loi de Joule	83
1.3. Les chaleurs massiques ou molaires	85
1.4. Le diagramme (t,s) du gaz idéal	87
1.5. La transformation isentropique du gaz idéal	90
2. Les mélanges de gaz	92
2.1. La loi de DALTON et la masse molaire fictive d'un mélange de gaz	92
2.2. Les fonctions thermodynamiques des mélanges de gaz	94
2.2.1. L'enthalpie et l'énergie interne d'un mélange de gaz.....	94
2.2.2. L'entropie d'un mélange de gaz	95
3. L'état gazeux non idéal.....	96
3.1. L'équation de VAN DER WAALS	97
3.2. Les équations dérivées de l'équation de VAN DER WAALS.....	100
3.3. Les variables réduites et la loi des états correspondants.....	102
3.4. Le facteur de compressibilité.....	103
3.5. Les équations d'état semi-empiriques	105

CHAPITRE 6

LA THERMODYNAMIQUE DES VAPEURS	107
1. La continuité entre les états gazeux et liquide.....	107
2. Le phénomène de vaporisation.....	109
3. Le diagramme (p,v) d'une vapeur.....	110
4. La surface d'état (p,v,T) d'une substance	113
5. L'action calorifique de formation d'une vapeur.....	114
5.1. La chaleur d'échauffement du liquide.....	115
5.2. La chaleur de vaporisation.....	116
5.3. La chaleur de surchauffe	118
6. L'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'une vapeur saturée humide	118
6.1. Variation des fonctions U, H et S le long de l'isotherme liquide de $\theta^\circ\text{C}$	119
6.2. Calcul des fonctions u, h et s pour les états de vapeur saturée	120
7. Le diagramme (t,s) d'une vapeur	123
8. La surface d'état (p, S, T) d'une substance.....	125
9. L'ensemble des équations caractéristiques d'un fluide.	129
9.1. Les équations d'état relatives à la phase liquide	129
9.1.1. Le liquide sous-refroidi.....	129
9.1.2. Le liquide saturé.....	130
9.2. Les équations d'état relatives à la phase gazeuse.....	132
10. Le diagramme (h,s) de la vapeur d'eau.....	135
11. Le diagramme (p,h) d'un fluide frigorigène	139

CHAPITRE 7

LES MÉLANGES GAZEUX HUMIDES..... 141

1. Le point de rosée d'un mélange gazeux..... 141
2. L'humidité vapeur et l'humidité absolue d'un mélange gazeux 143
3. L'enthalpie d'un mélange gazeux humide 145
4. L'air humide 146
5. L'évaporation de l'eau au contact de l'air..... 149
6. La mesure de l'humidité de l'air 151
7. Le refroidissement de l'eau dans un réfrigérant atmosphérique 153

CHAPITRE 8 159

LA COMPRESSION DES GAZ 159

1. Classification des machines de compression..... 159
2. Etude thermodynamique de la compression..... 161
 - 2.1. La compression d'un gaz dans un turbocompresseur..... 161
 - 2.1.1. Le modèle de compression isentropique 161
 - 2.1.2. Le modèle de compression polytropique 162
 - 2.1.3. La puissance opératrice et la puissance absorbée..... 166
 - 2.1.4. Le cas particulier du ventilateur..... 166
 - 2.2. La compression d'un gaz dans un compresseur à piston..... 169
 - 2.2.1. Le diagramme indicateur 169
 - 2.2.2. Le coefficient de remplissage 170
 - 2.2.3. Le travail opérateur et le rendement 173
 - 2.2.4. La puissance absorbée 178
 - 2.3. La compression dans les compresseurs volumétriques rotatifs 179
 - 2.3.1. Le compresseur à palettes 179
 - 2.3.2. Le compresseur ROOTS..... 180
 - 2.3.3. Le compresseur LYSHOLM..... 182
3. La compression multiétagée avec refroidissement intermédiaire..... 185

CHAPITRE 9

LA DÉTENTE DES GAZ 191

1. Les turbomachines de détente des gaz 191
 - 1.1. Les turbines à vapeur..... 191
 - 1.2. Les turbines à gaz..... 192
2. Etude thermodynamique de la détente 193
 - 2.1. La détente adiabatique..... 193
 - 2.2. La détente non adiabatique..... 197
3. Le rendement mécanique et la puissance 201

CHAPITRE 10	
APPROCHES ÉNERGÉTIQUE ET EXERGÉTIQUE DE LA COMBUSTION	203
1. Le rendement énergétique de génération de chaleur par combustion.....	203
1.1. Le pouvoir calorifique d'un combustible	203
1.2. Le pouvoir comburivore d'un combustible	204
1.3. Le coefficient d'excès d'air d'une combustion	205
1.4. Le bilan énergétique d'une combustion adiabatique	206
1.5. Le rendement énergétique de génération de chaleur par combustion.....	207
2. Le rendement exergétique de génération de chaleur par combustion.....	209
2.1. L'exergie d'un combustible	209
2.2. L'exergie des gaz comburés.....	211
2.3. Le rendement exergétique de la combustion	212
2.4. Le rendement exergétique du transfert de chaleur entre les fumées et le fluide moteur.....	213
2.5. La perte d'exergie à la cheminée	214
2.6. Le rendement exergétique de génération de chaleur par combustion.....	214
CHAPITRE 11	
LES INSTALLATIONS MOTRICES À VAPEUR	217
1. Le cycle thermodynamique de base	218
2. Analyse énergétique.....	219
3. Analyse exergétique.....	224
4. Les améliorations du cycle de base	227
4.1. Les soutirages de vapeur pour réchauffer l'eau alimentaire.....	227
4.2. La resurchauffe de la vapeur	230
4.3. La combinaison de la resurchauffe et des soutirages.....	232
5. Les installations nucléaires à eau sous pression.....	233
CHAPITRE 12	
LES TURBINES À COMBUSTION INTERNE	237
1. La turbine à gaz.....	238
1.1. Analyse énergétique	240
1.2. Analyse exergétique	244
2. La turbine à gaz avec récupérateur de chaleur	244
3. La turbine à gaz à compression étagée.....	246
4. Les installations à cycles combinés gaz-vapeur	248
CHAPITRE 13	
LES MOTEURS À COMBUSTION INTERNE.....	253
1. Description et fonctionnement	253
2. Analyse énergétique.....	255
2.1. Bilan de la phase fonctionnelle motrice	255
2.2. Cycles thermodynamiques de base.....	257
2.3. Influence de l'action calorifique pariétale.....	261

3. Les pressions moyennes indiquée et effective	263
3.1. Le rendement indiqué et la pression moyenne indiquée.....	263
3.2. Le rendement mécanique et la pression moyenne effective	265
4. La suralimentation.....	266
5. Le rendement énergétique total et la puissance effective	269
5.1. Le rendement énergétique total	269
5.2. La puissance effective	270
CHAPITRE 14	
LA PRODUCTION COMBINÉE DE CHALEUR ET D'ÉLECTRICITÉ	273
1. Le concept de cogénération.....	273
2. Les différents systèmes de cogénération.....	275
2.1. Cogénération au moyen d'une turbine à vapeur.....	276
2.2. Cogénération au moyen d'une turbine à gaz.....	277
2.3. Cogénération au moyen d'un moteur à combustion interne.....	279
3. Les critères de performance des installations de cogénération.....	280
3.1. Facteurs de conversion et rendement énergétique d'ensemble	280
3.2. Rendement exergetique d'ensemble.....	282
3.3. Economie relative d'énergie primaire	284
CHAPITRE 15	
LES INSTALLATIONS THERMIQUES OPÉRATRICES.....	287
1. Les machines frigorifiques à compression	287
1.1. Le cycle thermodynamique de base.....	287
1.2. Le choix du fluide frigorigène.....	289
1.3. Analyse thermodynamique	291
1.4. Le cycle frigorifique à compression et détente étagées	294
1.5. Les machines frigorifiques à plusieurs fluides	296
2. Les machines frigorifiques à absorption	300
2.1. L'équilibre liquide – vapeur d'un mélange binaire	300
2.2. Le cycle thermodynamique de la machine frigorifique à absorption.....	302
3. La pompe à chaleur	307
3.1. Le cycle thermodynamique de base.....	307
3.2. Les sources de chaleur.....	309
3.2.1. La source froide	309
3.2.2. La source chaude.....	310
3.3. Analyse thermodynamique	310
3.4. Application numérique	311
LISTE DES SYMBOLES	315
INDEX ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES	319
BIBLIOGRAPHIE	329
SOURCES DES ILLUSTRATIONS	331



La collection COURS UNIVERSITAIRES offre aux étudiants universitaires du monde entier, à un prix accessible, des contenus de qualité servis par une approche pédagogique exemplaire.

L'OUVRAGE

Ce livre présente les bases de la thermodynamique technique en vue de leur utilisation dans le domaine des machines et installations thermiques. L'exposé commence par les deux principes de la thermodynamique et la présentation des fonctions d'état des fluides. Cette introduction est suivie de la description des principes de fonctionnement des machines opérant sur les fluides et de l'examen des concepts de cycles thermodynamiques incluant la notion d'exergie. L'étude de l'état gazeux est ensuite abordée et son analyse est prolongée par la présentation des équations d'état qui permettent d'appréhender la continuité entre les phases gazeuse et liquide. La phénoménologie des vapeurs et des mélanges gazeux humides complète cette partie consacrée aux propriétés thermodynamiques des fluides. L'analyse du fonctionnement des machines de compression et de détente ainsi que l'approche énergétique et exergetique de la génération de chaleur par combustion donnent les clefs de lecture de la dernière partie de l'ouvrage. Celle-ci est constituée d'une série de monographies traitant succinctement des installations motrices à vapeur, des turbines à gaz, des moteurs à combustion interne et des systèmes de cogénération. On y trouve aussi l'étude des installations thermiques opératrices (machines frigorifiques et pompes à chaleur).

LE PUBLIC

Cet ouvrage est destiné aux étudiants ingénieurs des universités et des grandes écoles ainsi qu'aux ingénieurs de bureaux d'études ou d'exploitation travaillant dans le secteur de l'énergie. Il s'adresse aussi aux agronomes et aux physiciens climatologues ou météorologues intéressés par les questions énergétiques.

LES AUTEURS

Professeurs émérites de l'École polytechnique de Louvain, les auteurs ont une longue expérience d'enseignement de la thermodynamique technique et des disciplines voisines.

Pierre Wauters est ingénieur civil mécanicien et électricien. Il a enseigné la thermodynamique, la mécanique des fluides, les turbomachines, l'emploi des combustibles et l'énergétique. En contact permanent avec l'industrie, ses recherches ont porté sur le fonctionnement des turbines à vapeur et des ventilateurs.

Joseph Martin est ingénieur civil mécanicien et docteur en sciences appliquées. Il a enseigné les moteurs à combustion interne, la propulsion aérienne, la thermodynamique, la combustion et les organes de machines. Ses recherches sur l'utilisation de carburants non conventionnels dans les moteurs à combustion interne ont abouti à un développement industriel de la gazéification de la biomasse.



9 782875 583178