

TECHNOSUP

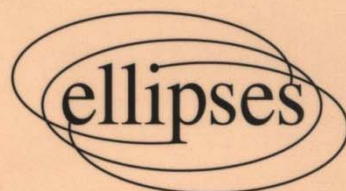
Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

ÉNERGÉTIQUE

Thermomécanique des milieux fluides

Application aux machines hydrauliques
et thermiques

André LALLEMAND



SOMMAIRE

NOMENCLATURE.....	XI
Chapitre I. CONCEPTS ET DÉFINITIONS.....	1
1. Milieu continu et système – Mouvement d'un fluide	1
1.1. Particule de fluide	1
1.2. Systèmes fermés – Systèmes ouverts - Conventions	1
1.3. Mouvement d'un élément de volume de fluide – Vitesse de déformation	4
2. Paramètres ou variables d'état des fluides	8
2.1. État d'équilibre et transformation d'un système – Réversibilité - Irréversibilité	8
2.2. Constituants et phases	9
2.3. Paramètres - Variance – Équation d'état	9
3. Variables intensives et variables extensives – Réservoir d'énergie.....	10
3.1. Définitions	10
3.2. Propriétés – Équilibre local	10
3.3. Relations entre les variables d'état et l'énergie	11
Chapitre II. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES FLUIDES ET TRANSFERTS À L'ÉCHELLE NANOSCOPIQUE	12
1. Les différents états des fluides	12
1.1. Liquides et gaz – Compressibilité – Vitesse du son	12
1.2. Fluide diphasique – Vapeurs et condensats	13
1.3. Mélanges	13
2. Considérations nanoscopiques.....	13
2.1. Agitation thermique – Mouvement brownien	14
2.2. Température et énergie cinétique d'agitation thermique des molécules	14
2.3. Pression – Équation d'état d'un gaz parfait	16
2.4. Libre parcours moyen des molécules d'un gaz parfait	17
3. Modélisation des effets nanoscopiques à l'échelle macroscopique	19
3.1. Équilibre liquide-vapeur	19
3.2. Diffusivité de quantité de mouvement – Viscosité	22
3.3. Diffusivité de masses ou d'espèces – Diffusion	28

3.4. Diffusivité d'énergie thermique – Conduction	32
Chapitre III. PRINCIPES DE CONSERVATION OU D'ÉVOLUTION - BILANS.....	37
1. Bilan local d'une grandeur quelconque – Équation de bilan	37
2. Bilan de la masse	39
2.1. Équation locale de la conservation de la masse	39
2.2. Équation intégrale de la conservation de la masse	40
3. Bilans de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique.....	41
3.1. Forces appliquées au fluide	41
3.2. Équation de Navier-Stokes	43
3.3. Équation intégrale du bilan de la quantité de mouvement en régime permanent	45
3.4. Bilan de l'énergie cinétique	46
4. Bilan de l'énergie – Bilan enthalpique.....	53
4.1. Premier principe de la thermodynamique – Bilan enthalpique	53
4.2. Analyse locale du bilan de l'énergie	63
5. Bilan entropique	65
5.1. Deuxième principe de la thermodynamique - Entropie	65
5.2. Analyse locale du bilan d'entropie	75
6. Bilan exergetique.....	76
Chapitre IV. APPLICATIONS DES PREMIER ET DEUXIÈME PRINCIPES.....	77
1. Convertisseurs d'énergie.....	77
1.1. Définitions	77
1.2. Analyse du fonctionnement d'un convertisseur d'énergies autres que thermique	77
1.3. Convertisseur d'énergie thermique	81
1.4. Dégradation de l'énergie	84
2. Convertisseurs thermomécaniques à cycles réversibles ou irréversibles	85
2.1. Cycles et rendements des convertisseurs thermomécaniques	85
2.2. Convertisseurs de Carnot	88
2.3. Moteur à cycle réversible quelconque	90
2.4. Moteur thermique quelconque (irréversible) à deux sources	91
3. Expressions des échanges d'énergie thermique et des coefficients calorimétriques ..	92
3.1. Diverses expressions de l'échange de chaleur	92
3.2. Relations entre les coefficients calorimétriques	93
3.3. Expressions des coefficients calorimétriques en fonction des coefficients de dilatation et d'accroissement de pression	96
3.4. Diverses expressions des différentielles de u , h et s	97
4. Exergie - Anergie – Bilan exergetique	97

4.1. Définition de l'exergie	97
4.2. Exergie et irréversibilités	100
4.3. Transferts thermiques et flux exergetiques	101
4.4. Bilans exergetiques et anergétiques	102
4.5. Application à un convertisseur thermomécanique en régime permanent	104
4.6. Exergie des systèmes fermés	106
Chapitre V. LES DIVERS FLUIDES ET LEURS ÉVOLUTIONS	108
1. Caractéristiques des divers fluides - Diagrammes.....	108
1.1. Gaz parfait	108
1.2. Gaz réels et vapeurs	112
1.3. Liquides	118
1.4. Fluides diphasiques	120
1.5. Évolutions des caractéristiques d'un état à l'autre	126
1.6. Cas des mélanges	128
2. Équation locale de la thermique des fluides en écoulement.....	133
2.1. Cas général	133
2.2. Cas particuliers	134
3. Compression et détente des gaz ou des vapeurs.....	136
3.1. Rendement des compressions et détentes	136
3.2. Transformations réversibles associées à une transformation réelle	136
3.3. Comparaison entre les divers types de compressions et de détentes polytropiques d'un gaz parfait	141
3.4. Compressions refroidies	142
3.5. Détente particulière : le laminage	146
3.6. Analyse exergetique des compressions et détentes	147
Chapitre VI. ÉCOULEMENT DES FLUIDES EN CANALISATIONS	151
1. Analyse dimensionnelle - Similitude.....	151
1.1. Analyse dimensionnelle	151
1.2. Similitude – Maquettes et prototypes	155
2. Écoulement des fluides parfaits.....	161
2.1. Bilan de la masse	161
2.2. Bilan de la quantité de mouvement	162
2.3. Équation de Bernoulli	163
3. Écoulement des fluides réels	163
3.1. Différents régimes d'écoulement	163
3.2. Écoulements laminaires	164

3.3. Écoulements turbulents pseudo permanents	169
4. Écoulement monodimensionnel permanent d'un fluide compressible	183
4.1. Étude générale de l'écoulement	184
4.2. Écoulement isentropique d'un gaz parfait	187
4.3. Écoulement isentropique d'un gaz parfait dans une tuyère	194
4.4. Rendement des tuyères - Réalisation pratique	200
Chapitre VII. ÉNERGÉTIQUE DES COMBUSTIONS.....	202
1. Définitions	202
2. Notions de base.....	202
2.1. Équations de combustion	202
2.2. Aspects énergétiques	204
2.3. Conditions de l'inflammation	206
3. Combustibles industriels – Composition et nomenclature	207
3.1. Différents types de combustibles	207
3.2. Nomenclature	208
4. Aspects pratiques de la combustion	209
4.1. Pouvoirs calorifiques	209
4.2. Chaleur dégagée par une combustion quelconque et température des fumées	211
4.3. Pouvoir comburivore et pouvoir fumigène	212
4.4. Analyse des fumées	214
4.5. Flammes	215
5. Analyse exergetique d'une combustion	216
5.1. Exergie d'un combustible	216
5.2. Mise en évidence de l'irréversibilité d'une combustion adiabatique	216
5.3. Irréversibilité d'une combustion quelconque	218
Chapitre VIII. TURBOMACHINES HYDRAULIQUES.....	219
1. Classification et constitution des turbomachines hydrauliques.....	219
1.1. Moteurs et générateurs	219
1.2. Description	219
2. Relations cinématiques, dynamiques et énergétiques	220
2.1. Relations cinématiques	220
2.2. Relations dynamiques	222
2.3. Relations énergétiques	223
2.4. Roues à action ou à réaction – degré de réaction	225
3. Caractéristique d'une turbomachine - Rendements	226
3.1. Équation de la caractéristique d'une pompe ou d'une turbine	226

3.2. Puissances et rendements	228
4. Fonctionnement d'une installation	229
4.1. Caractéristique d'un réseau	229
4.2. Point de fonctionnement de l'installation	229
4.3. Évolution du point de fonctionnement d'une installation hydraulique	230
4.4. Rendement d'une installation	231
5. Similitude dans les turbomachines hydrauliques	232
5.1. Présentation adimensionnelle des caractéristiques	232
5.2. Fonctionnements semblables	233
5.3. Nombre de tours spécifiques	234
6. Turbopompes	235
6.1. Différents types de pompes	235
6.2. Cavitation - NPSH	237
7. Turbines	239
7.1. Turbines à action - Turbines Pelton	239
7.2. Turbines à réaction	240
Chapitre IX. MACHINES DE COMPRESSION ET DE DÉTENTE DES GAZ OU VAPEURS	242
1. Compresseurs volumétriques	242
1.1. Compresseurs alternatifs à pistons	242
1.2. Compresseurs volumétriques rotatifs	248
1.3. Compression d'air humide	249
2. Machines de compression ou de détente dynamiques	250
2.1. Relations cinématiques, dynamiques et énergétiques	250
2.2. Machines génératrices – Ventilateurs et compresseurs	252
2.3. Machines motrices - Turbines	259
Chapitre X. MOTEURS THERMIQUES	267
1. Moteurs alternatifs à combustion interne (MACI)	267
1.1. Moteurs à fluide standard	267
1.2. Moteur diésel et moteur à allumage commandé	271
1.3. Détermination des performances des MACI	276
1.4. Paramètres particuliers d'un moteur	280
1.5. Moteur suralimenté	280
2. Moteurs alternatifs à apport externe de chaleur	282
2.1. Cycles à rendement maximum	282
2.2. Conditions nécessaires pour les transformations	283

2.3. Cas particuliers des transformations polytropiques	283
2.4. Écarts aux cycles théoriques	284
3. Turbines à gaz – Turboréacteurs	285
3.1. Turbines à gaz (TAG)	285
3.2. Turboréacteurs (TR)	289
4. Installations motrices à vapeur (IMV)	291
4.1. Cycles des IMV	291
4.2. Exemples d'applications – Énergies échangées - Rendements	293
4.3. Particularité des turbines	296
5. Couplage TAG/IMV – Cycles combinés	297
6. Cogénération	298
6.1. Cogénération avec des moteurs à combustion interne	298
6.2. IMV à contre-pression	298
6.3. IMV à condensation et soutirages pour procédés industriels	298
Chapitre XI. GÉNÉRATEURS THERMIQUES	300
1. Générateurs thermiques à gaz	300
1.1. Générateurs à cycles de Stirling ou d'Ericsson	300
1.2. Générateurs à cycle de Joule	301
1.3. Applications des cycles à gaz	306
2. Générateurs thermiques à compression de vapeur	307
2.1. Machines monoétagées	307
2.2. Machines multiétagées	314
3. Générateurs trithermes	321
3.1. Analyse théorique	322
3.2. Réalisations	325
4. Liquéfaction des gaz	327
4.1. Méthode thermique	328
4.2. Méthode thermomécanique	328
Chapitre XII. ANNEXES	333
1. Équations	333
2. Tableaux	334
3. Figures	345
INDEX	357