

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

Exercices et problèmes de thermodynamique

Des principes aux applications aux machines

André LALLEMAND

ellipses

TECHNOSUP

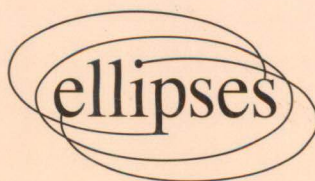
Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

Exercices et problèmes de thermodynamique

Des principes aux applications aux machines

André LALLEMAND

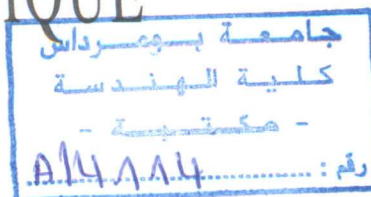


TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

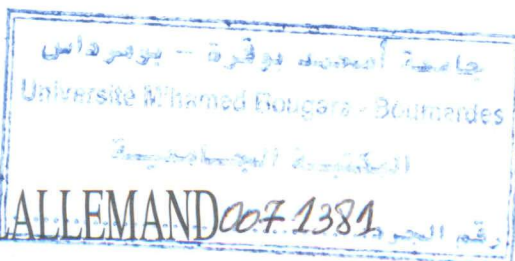
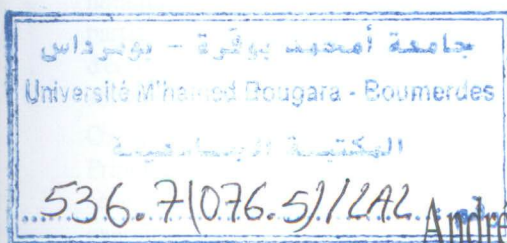


GÉNIE ÉNERGÉTIQUE



Exercices et problèmes de thermodynamique

Des principes aux applications aux machines



André LALLEMAND

or exp.

Professeur des universités



SOMMAIRE

SOMMAIRE	V
NOMENCLATURE	XIV
Chapitre I. CONSTANTES PHYSIQUES ET UNITES	1
1. Valeurs de quelques constantes physiques	1
2. Facteurs de conversion des unités usuelles	2
3. Définitions officielles des unités et règles d'écriture	3
3.1. Unités du système international (SI)	3
3.2. Unités légales en dehors du système international	4
3.3. Règles d'écriture et de typographie des unités	5
3.4. Préfixes	6
Chapitre II. PREMIER PRINCIPE	7
1. Rappels	7
1.1. Conventions	7
1.2. Énoncé du Premier Principe (PP) ou Principe de la conservation de l'énergie	7
1.3. Premier Principe sous forme technique	8
1.4. Généralisation de la forme technique du premier principe	9
1.5. Expressions des énergies thermique et mécanique échangées	9
X1.6. Relations propres au gaz parfait	10
2. Exercices relatifs au Premier Principe	10
2.1. Importance de la définition stricte du système considéré	10
2.2. Mise en œuvre des propriétés des fonctions d'état	11
2.3. Association de systèmes et de sous-systèmes – additivité des fonctions d'état	12
2.4. Système en déplacement – mise en œuvre des fonctions d'état	13

2.10. Écoulement d'un gaz parfait à travers un orifice	17
2.11. Passage d'un système d'unités à un autre	17
2.12. Pressurisation d'un réservoir	18
2.13. Systèmes fluides évoluant à travers une machine thermique	19
2.14. Bilan enthalpique d'un échangeur de chaleur	19
2.15. Bilan enthalpique d'un système mécano-thermique	20
2.16. Bilan enthalpique d'une machine motrice	21
Chapitre III. DEUXIEME PRINCIPE	22
1. Rappels	22
1.1. Caractéristiques des variables intensives et extensives	22
1.2. Expression différentielle d'un type d'énergie d'échange quelconque	22
1.3. Cas de l'énergie thermique – température et entropie	22
1.4. Transferts réversibles ou irréversibles – source de chaleur	23
1.5. Variation d'entropie d'un système (Σ)	23
1.6. Bilan entropique d'un système ouvert	24
1.7. Machine de Carnot	24
1.8. Exergie - anergie	25
1.9. Expressions de la chaleur échangée - coefficients calorimétriques	27
1.10. Expressions des variations des fonctions d'état classiques	28
2. Exercices relatifs au Deuxième Principe	29
2.1. Notions de base du deuxième principe	29
2.2. Entropie fonction d'état – création d'entropie	30
2.3. Création d'entropie lors d'un mélange d'un même fluide – addition de fonctions d'état	31
2.4. Échanges thermiques réversibles ou irréversibles	32
2.5. Transfert thermique direct ou par pompe à chaleur	33
2.6. Création d'entropie par transfert thermique direct	35
2.7. Création d'entropie par transfert conductif dans une barre métallique	35
2.8. Échanges énergétiques et exergétiques entre deux sources à températures négatives	36
2.9. Échanges énergétiques et exergétiques entre deux sources à températures positive et négative	37
2.10. Générateur thermique de Carnot avec échanges irréversibles avec les sources – production anergétique	38
2.11. Création interne d'entropie lors de l'évolution d'un système	39
2.12. Détente brusque – système ouvert - création d'entropie	40
2.13. Compression instantanée d'un gaz parfait – création d'entropie	42

2.14. Application des propriétés des fonctions d'état – évolution des caractéristiques thermiques d'une barre lors d'une traction	43
2.15. Création d'entropie due aux pertes de charge dans un écoulement	46
2.16. Démonstration exergetique de l'impossibilité d'atteindre le zéro absolu	48
2.17. Représentation exergetique adaptée au cas des échangeurs de chaleur	48
2.18. Bilan exergetique d'un échangeur de chaleur	49
2.19. Bilan exergetique d'un compresseur	50
Chapitre IV. CARACTERISTIQUES ET EVOLUTIONS DES FLUIDES	52
1. Rappels	52
1.1. Préambule	52
✚ 1.2. Gaz parfaits	52
✚ 1.3. Gaz réels	54
1.4. Liquides	57
1.5. Équilibre liquide-vapeur	58
1.6. Transformations (ou évolutions) particulières	59
2. Exercices relatifs aux caractéristiques et évolutions des fluides	61
2.1. Application de l'équation d'état du gaz parfait – détermination d'une pression	61
2.2. Application de l'équation d'état du gaz parfait – constante du gaz	61
2.3. Équation d'état d'un gaz parfait et coefficient calorimétrique	61
2.4. Condition d'identité des capacités thermiques à volume et à pression constants	62
2.5. Transformation d'énergie cinétique en "chaleur interne"	62
2.6. Détente d'un gaz parfait – propriété des fonctions d'état – dépendance entre types de transformations et échanges énergétiques	63
2.7. Détentes réversible ou irréversible d'un gaz parfait – rendement isothermique	64
2.8. Laminage d'un gaz parfait	65
2.9. Expression de la vitesse du son	65
2.10. Détente irréversible d'un gaz parfait en écoulement – rendement exergetique	66
2.11. Application directe des équations du gaz parfait	67
2.12. Comparaison de compressions réversible et irréversible – production d'anergie	69
2.13. Définition d'une transformation polytropique d'un gaz parfait et évolutions particulières	70
2.14. Détente adiabatique d'un GP – rendement isentropique – production énergetique	72
2.15. Transfert thermique entre une source et un GP en évolution polytropique	73
2.16. Compression réelle d'un gaz parfait – compression polytropique – production énergetique	74
✚ 2.17. Gaz parfait : compression suivie d'une détente adiabatiques – puissance, production énergetique, coefficient polytropique, rendement isentropique	76

2.18. Caractéristiques d'un mélange de gaz parfaits - cas de l'air	78
2.19. Coefficients de dilatation et d'accroissement de pression - équation d'état	78
2.20. Relation entre les coefficients de dilatation et de compressibilité - déduction d'une équation d'état d'un gaz réel	79
2.21. Expression de l'énergie interne d'un gaz réel à partir de l'équation d'état et de celle de la capacité thermique	80
2.22. Gaz réel - détente isentropique	81
2.23. Application de l'équation de Van der Waals - cas de la vapeur d'eau	81
2.24. Gaz réel - équation du viriel - calcul de l'énergie interne et de l'enthalpie	83
2.25. Gaz réel - équation du viriel - transformation isentropique	83
2.26. Vapeur d'eau avec équation du viriel - évolution isotherme	84
2.27. Gaz réels - application de la loi des états correspondants	86
2.28. Caractéristiques d'un gaz combustible	86
2.29. Entropie massique d'un fluide diphasique liquide/vapeur	87
2.30. Expression de la variation d'entropie d'un fluide en transformation liquide/vapeur	87
2.31. Équation de l'équilibre liquide/vapeur	88
2.32. Transformation liquide/vapeur - propriété des fonctions d'état	89
2.33. Variation d'enthalpie d'un liquide	89
2.34. Pompage d'un liquide suivi d'un laminage - évolution thermique et puissance consommée	90
2.35. Transformation liquide/vapeur - application du premier principe et de la propriété des fonctions d'état	91
2.36. Évolution des chaleurs latentes en fonction des capacités thermiques	92
2.37. Application des propriétés des fonctions d'état au changement de phase	93
2.38. Application des deux principes et changement de phase	94
2.39. Mise en application des équations de base d'un liquide et d'un gaz réel	95
2.40. Transfert thermique entre deux fluides avec un changement de phase - Application du premier et du deuxième principes	96
2.41. Travail et échange thermique au cours d'un cycle	98
2.42. Travail de détente irréversible ou réversible d'un GP - rendements	100
2.43. Détente adiabatique ou polytropicque d'un GPI - production anergétique	101
2.44. Compression isochorique d'un gaz réel - rendement exergétique de compression	102
2.45. Rupture de surfusion - application des propriétés des fonctions d'état	104
2.46. Mélange de gaz parfaits à la pression atmosphérique	105
2.47. Mélange isotherme de deux gaz différents à des pressions différentes	106
2.48. Bilan enthalpique	107

2.49. Capacités thermiques des évolutions le long de la courbe de saturation	108
2.50. Évolution isochore de l'eau en équilibre liquide vapeur	111
Chapitre V. TABLES ET DIAGRAMMES THERMODYNAMIQUES	113
1. Rappels	113
1.1. Généralités	113
1.2. Tables	113
1.3. Diagrammes	114
2. Exercices relatifs aux tables et diagrammes thermodynamiques	115
2.1. Principe de construction d'un diagramme entropique	115
2.2. Compresseur volumétrique à air – comparaison de divers types de compression – calculs et utilisation du diagramme entropique de l'air	116
2.3. Machine frigorifique à air – utilisation du diagramme entropique de l'air sec	119
2.4. Moteur à air – utilisation du diagramme entropique de l'air sec	121
2.5. Turbine à vapeur de fluide organique – utilisation du diagramme de Mollier	123
2.6. Installation motrice à vapeur - cycle de Rankine – utilisation du diagramme de Mollier	125
2.7. Justification de la forme des courbes en diagramme exergetique	128
2.8. Évolutions de l'eau – utilisation des tables thermodynamiques	129
2.9. Détente isentropique d'eau – utilisation des tables thermodynamiques	130
2.10. Détente d'eau avec échange thermique – production anergétique - utilisation des tables thermodynamiques	131
2.11. Détente adiabatique d'eau – production anergétique - utilisation des tables thermodynamiques	132
2.12. Détente isochore d'un fluide organique – utilisation des tables thermodynamiques	134
2.13. Recherche des caractéristiques d'un fluide par les états correspondants et les tables thermodynamiques	134
2.14. Évolution cyclique d'eau – utilisation des tables thermodynamiques	135
2.15. Compression et détente d'éthylène – analyse exergetique - utilisation du diagramme	137
2.16. Liquéfaction d'éthylène – utilisation du diagramme – conversion d'unités	138
2.17. Liquéfaction d'éthane – utilisation du diagramme	139
2.18. Installation motrice à vapeur d'eau – utilisation du diagramme – prise en compte des énergies cinétiques	140
2.19. Pompe à chaleur à ammoniac – utilisation du diagramme	142
2.20. Détente isothermique d'un gaz réel à travers un orifice avec prise en compte de l'énergie cinétique – utilisation du diagramme	143
2.21. Détente adiabatique d'un gaz réel à travers un détendeur avec prise en compte de l'énergie cinétique – utilisation du diagramme	143

2.22. Liquéfaction d'un gaz réel par compression-détente – cas de l'air - utilisation du diagramme de l'air sec – bilan exergetique	144
Chapitre VI. AIR HUMIDE	147
1. Rappels	147
1.1. Caractéristiques et définitions	147
1.2. Évolution du degré hygrométrique	149
1.3. Calculs relatifs à l'air humide	149
1.4. Mesures des caractéristiques de l'AH	150
1.5. Diagrammes de l'AH	151
1.6. Opérations sur l'air humide	151
1.7. Climatisation	153
2. Exercices relatifs à l'air humide	154
2.1. Détermination des caractéristiques d'un AH à partir d'un psychromètre à deux thermomètres – utilisation d'un diagramme et calcul	154
2.2. Relation entre une isenthalpe et une isotherme humide	155
2.3. Condensation d'un air humide autour d'une aile d'avion	156
2.4. Lien entre l'apparition de buée et les caractéristiques d'un AH	157
2.5. Échauffement d'un AH – utilisation du diagramme de Carrier et calcul	158
2.6. Séchage par air chaud – diagramme et calculs	158
2.7. Mélange de deux AH – calculs et diagramme	160
2.8. Détermination des caractéristiques d'un AH sous une pression différente de la pression atmosphérique normale – calculs et diagramme	161
2.9. Air humide sous une pression différente de la pression atmosphérique – humidification à la vapeur	162
2.10. Changement de propriétés d'un AH par actions calorifiques	164
2.11. Évolution d'une certaine quantité d'AH suivie d'un mélange	165
2.12. Traitement d'air humide par de la vapeur – comparaison avec un traitement par injection d'eau liquide	166
2.13. Traitement de l'air pour le conditionnement d'été et d'hiver d'un local	167
2.14. Climatisation d'un local – droite de soufflage et facteur de by-pass	170
Chapitre VII. ENERGETIQUE DES COMBUSTIONS	173
1. Rappels	173
1.1. Définitions	173
1.2. Équations de combustion	173
1.3. Chaleur de combustion - Chaleur de formation	174
1.4. Température d'inflammation – Limites d'inflammabilité	175
1.5. Combustibles industriels – composition et nomenclature	175

1.6. Pouvoirs calorifiques - relations entre pouvoirs calorifiques - influence des paramètres externes	176
1.7. Chaleur dégagée par une combustion quelconque et température des fumées	177
1.8. Pouvoirs comburivore et fumigène	178
1.9. Composition des fumées - diagramme de combustion - point de rosée - diagramme enthalpique	179
1.10. Exergie d'un mélange combustible	181
1.11. Flammes	181
2. Exercices relatifs à l'énergétique des combustions	182
2.1. Relation PCI / chaleur de formation - application au méthane	182
2.2. Relation PCI / chaleur de formation du benzène	182
2.3. Consommation d'un générateur de vapeur	183
2.4. Détermination du point de rosée d'une fumée	183
2.5. Calculs du PCI, des pouvoirs comburivore et fumigène et du point de rosée d'un combustible gazeux	184
2.6. Fumées de la combustion avec excès d'air d'un hydrocarbure	186
2.7. Calcul des PCI et PCS et du pouvoir comburivore d'une essence - chaleur disponible par unité de volume de mélange air-essence - puissance potentielle d'un moteur	187
2.8. Combustion d'un charbon - représentation et utilisation du diagramme d'Ostwald	189
2.9. Mélange gazeux combustible - limites d'inflammabilité - température des fumées - puissance spécifique et aire du front de flamme	192
2.10. Mélange gazeux combustible - limites d'inflammabilité - PCI - pouvoirs comburivore et fumigène - énergie récupérable - température de rosée	194
2.11. Combustion d'éthanol - relation chaleur de formation / PCI - énergie récupérable - température de rosée des fumées	196
2.12. Construction du diagramme des fumées d'un fuel - détermination de la puissance thermique récupérable	198
2.13. Analyse complète de l'incinération de papiers	201
Chapitre VIII. PROBLEMES DE SYNTHÈSE	203
1. Procédés divers	203
1.1. Exploitation d'un diagramme (NH_3) - évolutions d'un fluide réel	203
1.2. Évolution d'un gaz parfait dans un compresseur refroidi par eau	205
1.3. Cycle générateur de Lenoir	207
1.4. Pseudo-cycle moteur de Lenoir (irréversible)	209
1.5. Production d'eau liquide par compression d'air humide, refroidissement et détente	211
1.6. Analyse d'une compression suivie d'une détente d'un GP - nécessité d'un apport	

thermique entre les deux pour que la turbine entraîne le compresseur	212
1.7. Système d'entraînement à éjecteur – production anergétique	214
1.8. Production d'azote à partir de liquide et après détente à travers une turbine	215
1.9. Production d'oxygène liquide par laminage - compression de la vapeur	217
2. Génération de vapeur et installations motrices à vapeur (IMV).....	218
2.1. Échanges thermiques au niveau d'un poste d'eau de centrale thermique	218
2.2. Bilan énergétique et exergétique d'une IMV à cycle de Rankine	219
2.3. Étude exergétique d'une IMV à fluide organique	221
2.4. Générateur de vapeur et cycle de Hirn – utilisation d'un diagramme enthalpique des fumées et bilans énergétiques	223
2.5. Combustion adiabatique en air humide et production de vapeur par échangeur sur les fumées	225
2.6. Génération de vapeur à partir d'une combustion incomplète de gaz naturel – production anergétique	229
2.7. Installation motrice à vapeur d'ammoniac et combustion complète de propane avec excès d'air – rendement exergétique d'un échangeur	231
2.8. Production combinée de vapeur d'eau et d'ammoniac à partir d'une combustion d'un mélange gazeux – production anergétique d'un échangeur - puissance récupérable sur la turbine à ammoniac	234
2.9. Cogénération avec préchauffage de l'eau et de l'air par les fumées qui se condensent partiellement	240
3. Moteurs à combustion interne	244
3.1. Moteur à allumage commandé	244
3.2. Suralimentation d'un moteur Diesel – étude de la détente dans la turbine	246
3.3. Combustion incomplète dans un moteur Diesel – diagramme d'Ostwald – température de combustion - travail de compression	248
3.4. Turbine à gaz refroidie par excès d'air ou par eau	252
3.5. Turboréacteur	256
3.6. Moteur de fusée à hydrogène et oxygène liquides	259
4. Génie climatique - Chauffage.....	261
4.1. Chauffage d'un immeuble par chaudière au bois (combustion incomplète avec défaut d'air)	261
4.2. Traitement de l'air en période estivale par une machine frigorifique	264
4.3. Production de chaleur par PAC – comparaison de trois types de PAC à air	267
4.4. Chauffage d'un local par pompe à chaleur, conditionnement d'air humide et récupération sur l'air extrait	271
4.5. Conditionnement d'air en été par humidification et récupération thermique	274
4.6. Chauffage d'immeubles par pompe à vapeur d'eau (chaudière à condensation)	275
5. Couplage de systèmes	279

Production d'air liquide par un système comprenant un compresseur entraîné par une IMV	279
Chapitre IX. ANNEXES	284
1. Tables thermodynamiques	284
2. Figures et diagrammes thermodynamiques	307
INDEX	332

La collection TECHNOSUP dirigée par Claude Chèze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

Niveau A Approche (éléments, résumés ou travaux dirigés)
Niveau B Bases (cours avec exercices et problèmes résolus)
Niveau C Compléments (approfondissement, spécialisation)

IUT - BTS - 1^{er} cycle
IUP - Licence
Écoles d'ingénieurs, Master

L'ouvrage : niveau B (IUP - Licence)

L'ouvrage propose des rappels de cours et des exercices et problèmes corrigés résolument orientés vers les applications aux systèmes énergétiques.

Les premiers chapitres portent sur les principes de la thermodynamique et les transformations de base mettant en œuvre les fonctions d'état et les échanges énergétiques. Ils concernent également les caractéristiques théoriques ou réelles des fluides avec les évolutions associées.

Les chapitres suivants traitent de deux aspects particuliers : celui de l'air humide (en vue du traitement de l'air et de la climatisation) et celui de l'énergétique de la combustion.

Enfin un important chapitre développe des problèmes de synthèse ciblés sur des applications techniques : procédés industriels, générateurs de vapeur, moteurs alternatifs à combustion interne, turbines à gaz, turboréacteurs, chauffage et climatisation.

Dans un but pédagogique, l'utilisation des tables et des diagrammes thermodynamiques est préférée aux traitements informatisés.

L'auteur :

André Lallemand, Professeur des universités, a enseigné la thermodynamique appliquée à l'INSA de Lyon où il a dirigé le Département de génie énergétique. Il est conseiller éditorial aux Techniques de l'ingénieur et a été éditeur d'une revue scientifique internationale.

Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.

