

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

## ÉNERGÉTIQUE

# Machines hydrauliques et thermiques

Résumés et problèmes corrigés

André LALLEMAND

ellipses

# SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	V
NOMENCLATURE.....	XII
Chapitre I. CINÉMATIQUE ET DYNAMIQUE DES FLUIDES.....	1
1. Rappels.....	1
1.1. Cinématique.....	1
1.2. Dynamique.....	6
1.3. Énergétique.....	8
2. Problèmes.....	11
2.1. Recherche d'une trajectoire en écoulement permanent.....	11
2.2. Traitement lagrangien ou eulérien de l'écoulement d'un fluide.....	12
2.3. Écoulement non permanent dans un élément de cylindre.....	13
2.4. Fonction de courant et lignes de courant.....	14
2.5. Lignes de courant et trajectoires – Fonction potentielle des vitesses.....	15
2.6. Écoulement irrotationnel dans une canalisation à section variable.....	17
2.7. Variation de pression dans un écoulement permanent bidimensionnel.....	18
2.8. Écoulement dans un divergent.....	19
2.9. Écoulement visqueux et contrainte de cisaillement.....	20
2.10. Évolution de la pression dans une section droite d'un écoulement rectiligne.....	21
2.11. Intégration de l'équation de Navier-Stokes le long d'une ligne de courant.....	22
2.12. Mesure des pressions par un tube manométrique.....	23
2.13. Action d'un fluide immobile sur une paroi.....	24
2.14. Équilibre relatif – Surface libre d'un liquide dans un cylindre en rotation.....	25
2.15. Évolution de la pression en fonction de la vitesse de rotation d'un élément de conduite cylindrique qui contient un liquide.....	26
2.16. Vidange d'un réservoir.....	27
2.17. Effort sur un coude de conduite.....	28
2.18. Effort sur une extrémité conique de conduite.....	29
2.19. Jet à la sortie d'une canalisation.....	29

2.20. Écoulement d'un fluide visqueux entre deux plans parallèles – Écoulement de Hagen-Poiseuille – Écoulement de Couette	31
2.21. Principe de fonctionnement d'un amortisseur hydraulique	33
Chapitre II. ANALYSE DIMENSIONNELLE - SIMILITUDE	36
1. Rappels	36
1.1. Analyse dimensionnelle	36
1.2. Similitude – Maquettes et prototypes	39
2. Problèmes	46
2.1. Vitesse limite d'une sphère tombant dans un liquide	46
2.2. Formulation adimensionnelle de la puissance d'une éolienne	48
2.3. Loi de Jurin	50
2.4. Expression adimensionnelle de la contrainte à la paroi dans un écoulement de fluide	50
2.5. Sustentation d'une balle dans un jet d'air	51
2.6. Échelle des débits dans un écoulement soumis à l'inertie et à la pesanteur	52
2.7. Recherche de la viscosité du fluide d'une maquette	53
2.8. Similitude entre deux écoulements de fluides différents en canalisation	54
2.9. Détermination des caractéristiques de la maquette d'une pompe	55
2.10. Caractéristique de fonctionnement d'un bateau à partir d'une maquette	56
2.11. Vidange d'un réservoir	56
2.12. Prise en compte de la tension superficielle – Similitude de Weber	57
2.13. Maquette et prototype de jetée	57
2.14. Respect des similitudes de Reynolds et de Froude	58
2.15. Caractéristiques d'une pompe à partir du fonctionnement de sa maquette	59
2.16. Pertes de charge en conduites cylindriques	60
2.17. Similitude pour une turbine hélice	60
Chapitre III. ÉCOULEMENT DES LIQUIDES EN CONDUITES	62
1. Rappels	62
1.1. Bilan de l'énergie cinétique – Pertes de charge régulières	62
1.2. Pertes de charge dans les singularités	71
1.3. Équation intégrale de la quantité de mouvement pour un tube de courant	75
2. Problèmes	78
2.1. Mesure de débit par tube de Venturi	78
2.2. Écoulement de Poiseuille	79
2.3. Comparaison de la force de cisaillement à la paroi d'un écoulement laminaire et de la force de pression	83

2.4. Relation entre le profil des vitesses et la perte de charge dans une canalisation	83
2.5. Écoulement sous pression en canalisation inclinée – Conditions à respecter pour avoir un écoulement semblable	85
2.6. Vidange d'un réservoir fermé surmonté d'un gaz	86
2.7. Écoulement laminaire entre deux réservoirs	88
2.8. Écoulement turbulent dans une canalisation inclinée ascendante	89
2.9. Alimentation d'une canalisation à section variable à partir d'un réservoir – Rendement cinétique	90
2.10. Utilisation du phénomène de siphon pour soutirer de l'eau d'un réservoir	92
2.11. Conduite forcée d'alimentation d'une turbine – Hauteur nette – Hauteur brute – Rendement manométrique	96
2.12. Alimentation d'une microturbine – Hauteur effective et puissance	98
2.13. Transfert de fluide entre deux bassins par branchement ou confluent	99
2.14. Alimentation d'une conduite forcée à partir de deux réservoirs à altitudes différentes	103
Chapitre IV. TURBOMACHINES HYDRAULIQUES .....	105
1. Rappels .....	105
1.1. Classification et constitution des turbomachines hydrauliques	105
1.2. Relations cinématiques et dynamiques	106
1.3. Relations énergétiques	108
1.4. Caractéristique d'une turbomachine – Puissances – Rendements - Point de fonctionnement	110
1.5. Similitude dans les TMH	114
1.6. Turbopompes	117
1.7. Turbines	120
2. Problèmes .....	122
2.1. Pompage entre deux réservoirs	122
2.2. Pompage en parallèle	124
2.3. Détermination des caractéristiques géométriques d'une pompe centrifuge	125
2.4. Diffuseur spiraloïde	128
2.5. Pompe débitant sur un réseau hydraulique double	129
2.6. Circulateur de chauffage central	131
2.7. Alimentation de deux réservoirs par une seule pompe	132
2.8. Pompage dans un puits – Choix de la pompe – Vérification de non cavitation	134
2.9. Dimensionnement d'une pompe à placer sur un réseau	136
2.10. Pompe centrifuge bi-étagée	140

2.11. Forme de la canalisation pour éviter la cavitation à la sortie d'un condenseur	141
2.12. Pompe alimentaire de centrale thermique	142
2.13. Recherche d'une pompe semblable à une autre de caractéristiques données	145
2.14. Changement de vitesse de rotation d'une pompe	146
2.15. Fonctionnement d'une pompe semblable à une pompe de référence	147
2.16. Pompe hélice	148
2.17. Pompe d'un système d'irrigation	149
2.18. Pompe alimentant un tourniquet hydraulique	152
2.19. Production d'énergie par une turbine Pelton	154
2.20. Alimentation d'une turbine Pelton à partir de deux réseaux	156
2.21. Analyse du fonctionnement d'une turbine Francis	158
2.22. Micro-turbine à air	160
2.23. Théorie de Betz des éoliennes	161
Chapitre V. PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE ET COMPORTEMENT DES GAZ	163
1. Rappels	163
1.1. Premier principe – Bilan enthalpique	163
1.2. Deuxième principe – Bilans entropique et exergetique	164
1.3. Expressions des énergies et fonctions d'état – Equations d'état	166
1.4. Compression et détente des gaz ou des vapeurs	168
1.5. Particularités de l'écoulement des gaz et des vapeurs	171
2. Problèmes	174
2.1. Analyse dimensionnelle et loi des états correspondants	174
2.2. Comparaison des puissances consommées selon le type de compression	175
2.3. Analyse comparative de plusieurs types de détentes – Rendement exergetique	176
2.4. Compression adiabatique – Production anergétique	178
2.5. Compression refroidie d'air avec prise en compte des énergies cinétiques	179
2.6. Compression réchauffée – Expression des irréversibilités internes et externes	181
2.7. Bilan exergetique d'une compression refroidie avec refroidissement complémentaire externe	182
2.8. Machine thermique à cycle triangulaire	184
2.9. Fonctionnement d'un turbocompresseur de suralimentation	186
2.10. Compressions étagées refroidies – Optimisation de l'étagement des pressions – Efficacité par rapport à une compression mono-étagée	187
2.11. Compression refroidie d'une turbine à gaz terrestre – Efficacité des refroidisseurs	189
2.12. Détente avec réchauffe dans une turbine à gaz terrestre	194

2.13. Équation de la quantité de mouvement d'un écoulement isentropique	196
3.14. Tuyère convergente d'alimentation d'une turbine à vapeur	196
2.15. Écoulement adiabatique réversible d'un gaz parfait – Tuyère de Laval	198
2.16. Débit d'air atmosphérique détendu dans une tuyère convergente à des pressions inférieures à la $P_a$ – Fonctionnement subsonique ou sonique au col	199
2.17. Tuyère d'éjection des gaz d'un moteur de fusée	200
2.18. Utilisation d'une tuyère comme régulateur de débit – États générateurs	201
2.19. Écoulement supersonique en amont d'un convergent alimentant un réservoir – Conditions génératrices d'un écoulement irréversible – Production anergétique	204
2.20. Évolution du fluide de part et d'autre d'une onde de choc droite – Destruction d'exergie due à l'irréversibilité de l'onde	206
2.21. Température et pression au nez d'un missile supersonique	208
Chapitre VI. COMPRESSEURS VOLUMÉTRIQUES .....	211
1. Rappels .....	211
1.1. Compresseurs alternatifs à pistons	211
1.2. Compresseurs volumétriques rotatifs	215
1.3. Compression d'air humide	217
2. Problèmes .....	218
2.1. Compression refroidie – Puissances mécanique et thermique - Analyse exergétique	218
2.2. Différence entre les énergies de compression et de détente du fluide mort	220
2.3. Calcul de la cylindrée d'un compresseur à piston sans volume mort	221
2.4. Performances d'un compresseur à piston de caractéristiques données	222
2.5. Influence de la différence d'énergie massique à la compression et à la détente du volume mort sur le comportement d'un compresseur à piston	223
2.6. Compresseur d'ammoniac à piston à double effet	225
2.7. Détermination des caractéristiques d'un compresseur à piston monoétagé – Compression d'air humide	227
2.8. Compresseur à pistons bi-étagé sans volume mort à refroidissement continu et intermédiaire	229
2.9. Compresseur à pistons bi-étagé à refroidissement continu et fractionné avec volume mort et soutirage intermédiaire	232
2.10. Compresseur d'air humide à pistons à trois étages et refroidissement intermédiaire – Prise en compte des caractéristiques réelles de l'air humide	235
2.11. Compression de méthane avec refroidissement continu et fractionné dans un compresseur à trois étages du type piston différentiel et étagé	236
2.12. Pompe à vide à piston – Évolution du volume effectif, du débit et de la puissance	239
2.13. Soutirage d'oxygène liquide par une pompe à vide à piston	241

2.14. Compresseur à palettes – Analyse de l'adaptation à une pression de refoulement donnée – Puissance consommée	242
2.15. Surpresseur à lobes	245
2.16. Compresseur à vis – Comparaison de la puissance à fournir par rapport à un compresseur à piston	246
2.17. Compression d'air humide par un compresseur à vis	247
2.18. État du fluide après une mise en relation brusque de la chambre de compression d'un compresseur rotatif avec la canalisation de refoulement	250
Chapitre VII. MOTEURS ALTERNATIFS A COMBUSTION INTERNE	253
1. Rappels	253
1.1. Cycles thermodynamiques	253
1.2. Cycles moteurs particuliers	254
1.3. Moteurs Diesel et moteur à allumage commandé	255
1.4. Détermination des performances des MACI	259
1.5. Moteur suralimenté	264
2. Problèmes	264
2.1. Comparaison des cycles Beau de Rochas et mixte	264
2.2. Moteur à allumage commandé alimenté en heptane – Cycle BdR	266
2.3. Moteur Diesel alimenté en gazole – Moteur à fluide standard et cycle Diesel	267
2.4. Moteur à cycle mixte – Compression et détente polytropiques	269
2.5. Moteur d'automobile à cycle mixte à fluide standard – Laminage aux soupapes – Comportement du véhicule	270
2.6. Moteur à allumage par compression – Pressions moyennes effectives et indiquées	273
2.7. Suralimentation d'un moteur par un turbocompresseur – Amélioration du rendement	274
2.8. Moteur Diesel suralimenté – Influence sur le cycle Diesel – Augmentation de puissance	275
2.9. Moteur Diesel atmosphérique – Prise en compte de l'évolution des caractéristiques des fluides – Consommation spécifique	277
2.10. Moteur à allumage commandé – Cycle BdR avec fluides réels - Utilisation des tables d'entropies et d'énergies internes	281
2.11. Moteur à allumage commandé – Comparaison des résultats de trois modélisations différentes	284
2.12. Moteur Diesel et diagramme d'Eichelberg	288
2.13. Fluide résiduel et laminages aux soupapes dans un moteur à allumage commandé – Calculs avec fluides réels, transformations polytropiques et tables de capacités thermiques moyennes – Couple moteur	291
2.14. Automobile à moteur Diesel suralimenté – Fluides réels - Échanges thermiques avec les parois – Accélération du véhicule	295

Chapitre VIII. TURBOMACHINES A FLUIDES COMPRESSIBLES.....	300
1. Rappels .....	300
1.1. Ventilateurs et compresseurs	300
1.2. Installations motrices à vapeur	304
1.3. Turbines à gaz – Turboréacteurs	308
2. Problèmes .....	311
2.1. Ventilateur centrifuge du type cage d'écureuil	311
2.2. Exploitation des diagrammes typiques d'un ventilateur centrifuge	313
2.3. Analyse d'une roue de ventilateur axial	314
2.4. Étude des caractéristiques constructives d'un ventilateur axial mono-étagé	315
2.5. Compresseur centrifuge de suralimentation d'un MACI – Prise en compte de la compressibilité du fluide	318
2.6. Compresseur centrifuge - Courbes constructeur – Fluide compressible	320
2.7. Compresseur centrifuge bi-étagé d'une machine frigorifique	322
2.8. Compresseur axial de turboréacteur	325
2.9. Comparaison de divers cycles d'IMV sans ou avec soutirages - Cogénération	328
2.10. Turbine à vapeur à action à étages de vitesse	332
2.11. Cogénération chaleur/force - Turbine à vapeur à action à étages de pression	335
2.12. Couplage d'installations motrices à vapeurs d'eau et d'ammoniac	338
2.13. Turbine à gaz à cycle de Joule - Utilisation du diagramme d'Eichelberg – Comparaison avec l'hypothèse du moteur à fluide standard	340
2.14. Refroidissement des gaz par injection d'eau dans la chambre de combustion d'une TAG – Caractéristiques géométriques de la turbine	342
2.15. Turboréacteur sans ou avec postcombustion – Fluide standard	347
2.16. Statoréacteur en vol supersonique	348
2.17. Installation à cycles combinés gaz/vapeur avec post-combustion	351
Chapitre IX. ANNEXES .....	356
1. Rappels mathématiques .....	356
1.1. Expressions des gradients et rotationnels en coordonnées cylindriques	356
1.2. Expressions des bilans en coordonnées cylindriques	356
2. Tableaux .....	358
3. Figures et diagrammes.....	366
INDEX.....	378

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)	IUT - BTS - 1 <sup>er</sup> cycle
Niveau B	Bases (cours avec exercices et problèmes résolus)	IUP - Licence
Niveau C	Compléments (approfondissement, spécialisation)	Écoles d'ingénieurs, Master

*L'ouvrage : niveau C (Master - Écoles d'ingénieurs - Recherche)*

L'ouvrage propose un vaste choix de problèmes typiques portant sur des machines couramment employées dans les secteurs de l'énergie. Afin d'en faciliter la compréhension, les solutions détaillées sont précédées dans chaque chapitre par des rappels de cours.

Quelles que soient les machines considérées, leur fonctionnement est basé sur l'évolution énergétique du fluide, compressible ou incompressible, qui les traverse. Ainsi, deux chapitres sont d'abord consacrés à des rappels et problèmes concernant, d'une part, les bases de la mécanique des fluides, et d'autre part, les principes de la thermodynamique et le comportement des gaz. Deux autres chapitres qui ont également un caractère général concernent l'analyse dimensionnelle et la similitude, puis les écoulements en conduite.

Un important chapitre traite des turbomachines hydrauliques, (pompes centrifuges et axiales, turbines hélico-centrifuges, axiales et du type Pelton), de leurs caractéristiques géométriques et de leur implantation sur des réseaux.

Trois chapitres sont consacrés aux machines à fluides compressibles. L'un d'eux concerne les compresseurs volumétriques (alternatifs et rotatifs). Un autre aborde les moteurs alternatifs à combustion interne, à allumage commandé ou diesel et traite la problématique de la combustion. Enfin le dernier chapitre est relatif aux turbomachines à fluides compressibles (compresseurs centrifuges et axiaux multi-étagés, turbines à vapeur, turbines à gaz et turboréacteurs).

*L'auteur :*

*André LALLEMAND, Professeur émérite des universités, a enseigné la mécanique des fluides, la thermodynamique et les machines hydrauliques et thermiques à l'INSA de Lyon, où il a dirigé le Département de génie énergétique. Il est rédacteur en chef honoraire de l'International Journal of Thermal Sciences.*

Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.



[www.editions-ellipses.fr](http://www.editions-ellipses.fr)