

BTS Métiers de l'eau
BTSA Gemeau
Écoles d'ingénieurs

**Abdelkader
B. AMEUR**

MÉCANIQUE

des fluides appliquée à l'eau

**Principes
fondamentaux
et exercices
corrigés**



CASTEILLA

Préface

La mécanique des fluides appliquée à l'eau revêt une grande importance dans le monde d'aujourd'hui. Elle touche de nombreux domaines : l'ingénierie navale, le nucléaire, l'aéronautique, la climatologie, l'océanographie...

De nos jours, les applications de l'eau ont une importance toute particulière, avec une demande croissante impliquant des moyens de traitement, de conservation, de distribution et d'utilisation. Pour répondre aux enjeux techniques, les techniciens, ingénieurs et professionnels des métiers relevant de l'eau doivent être en possession des connaissances fondamentales de chimie, physique et mécanique des fluides.

Dans cet ouvrage, M. AMEUR développe de manière concrète l'explication des phénomènes physiques et les connaissances fondamentales en les illustrant par des dessins pertinents. Il met ainsi à portée du lecteur les lois et principes de la mécanique des fluides appliquée à l'eau, par exemple le théorème de Pascal ou le Principe d'Archimède dans le chapitre consacré à l'hydrostatique.

Ainsi, cet ouvrage, bien structuré, progressif, avec des exercices de qualité reliés aux rappels de cours, sera un ouvrage de base pour l'ensemble des étudiants, les ingénieurs et techniciens et plus généralement toutes les personnes concernées par les métiers de l'eau qui ne peuvent plus ignorer les principes, théorèmes et lois de la mécanique des fluides appliquée à l'eau. Il peut leur servir non seulement pour la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu mais, aussi, comme base de justification scientifique simplifiée du dimensionnement des installations de stockage ou de distribution.

Nous félicitons l'auteur pour cet ouvrage qui vient enrichir la bibliothèque de l'Enseignement Technique. Qu'il soit ici remercié pour ce travail de qualité qui sera un guide de référence pour ses lecteurs.

C. HAZARD

Inspecteur Général Honoraire
des Sciences et Techniques Industrielles

Sommaire

1. HYDROSTATIQUE	11
1.1. Rapports théoriques	11
1.1.1. Pression statique	11
1.1.2. Pression relative et pression absolue	11
1.1.3. Lois fondamentales et principes de l'hydrostatique	11
1.1.4. Théorème de Pascal (ou principe de Pascal)	11
1.1.5. Principe d'Archimède	12
1.1.6. Action d'un fluide pesant sur une paroi immergée	12
1.1.6.1. Action d'un fluide sur une paroi horizontale	12
1.1.6.2. Action d'un fluide sur une paroi verticale	13
1.1.6.3. Action d'un fluide sur une plaque inclinée immergée à une profondeur a de la surface libre	13
1.1.6.4. Tableau de synthèse pour le calcul des centres de poussée, pour des formes simples	14
1.2. Exercices d'hydrostatique	15
1.2.1. Exercice : mesure de pression en fonction de la masse volumique du fluide	15
1.2.2. Exercice : mesure des hauteurs des 3 fluides en équilibre hydrostatique dans un tube en U de même section	15
1.2.3. Exercice : équilibre hydrostatique de 3 fluides non miscibles dans un tube en U dont les sections sont différentes	15
1.2.4. Exercice : mesure de la hauteur d'eau dans un réservoir	16
1.2.5. Exercice : différence de pression hydrostatique entre deux réservoirs fermés	16
1.2.6. Exercice : différence de hauteur d'eau entre deux réservoirs connectés	16
1.2.7. Exercice : hauteur de fluide dans les piézomètres	17
1.3. Exercice Principe de Pascal	17
1.3.1. Exercice : transmission de pression	17
1.4. Exercices Théorème d'Archimède	17
1.4.1. Exercice : flotteur	17
1.4.2. Exercice : poids réel d'un corps immergé	17
1.4.3. Exercice : fonte de glaçon	17
1.4.4. Exercice : volume immergé d'un iceberg	18
1.4.5. Exercice : au temps d'Archimède	18
1.5. Exercices Poussée hydrostatique	18
1.5.1. Exercice : poussée hydrostatique sur la paroi d'un barrage	18
1.5.2. Exercice : vanne verticale	18
1.5.3. Exercice : vanne inclinée	18
1.5.4. Exercice : vanne inclinée immergée	18
1.5.5. Exercice : poussée hydrostatique sur le bouchon d'un réservoir	19
1.6. Solution des exercices du chapitre 1	20
1.6.1. Exercices d'hydrostatique	20
1.6.1.1. Solution : mesure de pression en fonction de la masse volumique du fluide	20
1.6.1.2. Solution : mesure des hauteurs des 3 fluides en équilibre hydrostatique dans un U de même section	20
1.6.1.3. Solution : équilibre hydrostatique de 3 fluides non miscibles dans un U de sections différentes	20
1.6.1.4. Solution : mesure de la hauteur d'eau dans un réservoir	21
1.6.1.5. Solution : différence de pression hydrostatique entre deux réservoirs fermés	21
1.6.1.6. Solution : différence de hauteur d'eau entre deux réservoirs connectés	22

1.6.1.7. Solution : hauteur de fluide dans les piézomètres	22
1.6.2. Exercice sur le principe de Pascal	22
1.6.2.1. Solution : transmission de pression	22
1.6.3. Exercices théorème d'Archimède	22
1.6.3.1. Solution : flotteur	22
1.6.3.2. Solution : poids réel d'un corps immergé	23
1.6.3.3. Solution : fonte de glaçon	23
1.6.3.4. Solution : volume immergé d'un iceberg	23
1.6.3.5. Solution : au temps d'Archimède	23
1.6.4. Exercices poussée hydrostatique	24
1.6.4.1. Solution : poussée hydrostatique sur la paroi d'un barrage	24
1.6.4.2. Solution : vanne verticale	24
1.6.4.3. Solution : vanne inclinée	25
1.6.4.4. Solution : vanne inclinée immergée	25
1.6.4.5. Solution : poussée hydrostatique sur le bouchon d'un réservoir	26
2. APPLICATION DES LOIS DE L'HYDRODYNAMIQUE DANS LES	
ÉCOULEMENTS PERMANENTS EN CHARGE	27
2.1. Rappels théoriques	27
2.1.1. Equation de la conservation de la masse ou équation de continuité	27
2.1.2. Equation de la conservation de l'énergie (théorème de Bernoulli)	27
2.1.2.1. Interprétation graphique du théorème de Bernoulli	28
2.1.3. Théorème d'Euler	28
2.1.3.1. Action d'un jet sur un coude caractérisé par un angle α et sans variation de section	29
2.1.4. Théorème de Torricelli	29
2.1.4.1. Fluide idéal	29
2.1.4.2. Fluide réel	29
2.1.5. Temps de vidange totale d'un réservoir cylindrique	30
2.1.5.1. Vidange totale pour un fluide parfait	30
2.1.5.2. Vidange totale pour un fluide réel	30
2.1.6. Pertes de charge	31
2.1.6.1. Perte de charge linéaire	31
2.1.6.2. Perte de charge singulière	32
2.2. Exercices Théorème d'Euler	33
2.2.1. Exercice : poussée hydrodynamique sur un coude	33
2.2.2. Exercice : poussée hydrodynamique et perte de charge dans un élargissement brusque	33
2.2.3. Exercice : poussée hydrodynamique d'une lance à incendie	33
2.3. Exercices Application du théorème de Torricelli	33
2.3.1. Exercice : temps de vidange d'un réservoir	33
2.3.2. Exercice : débit et différence de hauteur piézométrique	34
2.3.3. Exercice : débit et hauteur de cavitation dans la canalisation de vidange d'un réservoir	34
2.3.4. Exercice : temps pour égalisation des niveaux de 2 réservoirs connectés	35
2.3.5. Exercice : pression, perte de charge et temps d'égalisation des niveaux	35
2.3.6. Exercice : horloge à eau	35
2.4. Exercices Siphon	36
2.4.1. Exercice : pression et hauteur maximale de siphonnage	36
2.4.2. Exercice : débit, pression et hauteur de cavitation	37
2.4.3. Exercice : étude d'un cycle vidange-remplissage d'un réservoir	37

2.5. Exercices Pertes de charge	38
2.5.1. Exercice : différence de pression dans un venturi	38
2.5.2. Exercice : accélération d'un fluide dans un convergent	38
2.5.3. Exercice : différence de pression dans un divergent	38
2.5.4. Exercice : différents calculs de la perte de charge dans une canalisation	39
2.5.5. Exercice : coefficient de perte de charge linéaire dans un conduit relié à un réservoir	39
2.5.6. Exercice : relation entre vitesse d'écoulement et perte de charge dans une canalisation	39
2.5.7. Exercice : relation entre diamètre de canalisation et perte de charge	39
2.5.8. Exercice : relation entre débit d'écoulement et pression dans une canalisation	40
2.5.9. Exercice : répartition des débits entre réservoirs connectés (solution par solveur)	40
2.5.10. Exercice : répartition des débits dans un réseau ramifié (solution graphique)	40
2.5.11. Exercice : pression dans une canalisation reliant deux réservoirs	41
2.5.12. Exercice : débits de vannes de purge de réservoir	41
2.5.13. Exercice : réservoir alimentant gravitairement deux autres réservoirs	41
2.5.14. Exercice : répartition des débits d'alimentation gravitaire	42
2.5.15. Exercice : répartition des débits dans une installation d'alimentation gravitaire	43
2.5.16. Exercice : répartition des débits dans une installation gravitaire	43
2.5.17. Exercice : puissance hydraulique d'une perte de charge dans une canalisation	43
2.5.18. Exercice : puissance hydraulique nécessaire pour un débit donné dans une canalisation	44
2.5.19. Exercice : évaluation de la longueur de canalisation entre deux réservoirs d'un système hydraulique gravitaire	44
2.5.20. Exercice : étude d'un système hydraulique gravitaire débouchant en gueule bée	44
2.6. Exercices Conduites en série	45
2.6.1. Exercice : évaluation des pertes de charge des canalisations en série reliant deux réservoirs	45
2.6.2. Exercice : évaluation du débit d'écoulement dans des canalisations en série débouchant à l'air libre	45
2.6.3. Exercice : débit et pression dans des canalisations en série	45
2.6.4. Exercice : débit dans des conduites en série	46
2.6.5. Exercice : débit dans des conduites en série et longueur équivalente	46
2.7. Exercices Conduites en parallèle	46
2.7.1. Exercice : répartition des débits et pressions dans des conduites en parallèle	46
2.7.2. Exercice : répartition des débits dans des conduites en parallèle	46
2.7.3. Exercice : répartition des débits et longueur équivalente dans des conduites en parallèle	47
2.7.4. Exercice : longueur équivalente des conduites en parallèle	47
2.7.5. Exercice : répartition des débits dans un système hydraulique avec des conduites en parallèle	47
2.7.6. Exercice : application de la méthode Hardy-Cross pour l'évaluation des débits dans des conduites en parallèle	48
2.8. Solution des exercices du chapitre 2	49
2.8.1. Exercices Théorème d'Euler	49
2.8.1.1. Solution : poussée sur un coude	49
2.8.1.2. Solution : élargissement brusque	49
2.8.1.3. Solution : lance à incendie	50
2.8.2. Exercices Théorème de Torricelli	50
2.8.2.1. Solution : temps de vidange d'un réservoir	50

2.8.2.2. Solution : débit et différence de hauteur piézométrique	51
2.8.2.3. Solution : cavitation dans une canalisation de vidange	51
2.8.2.4. Solution : égalisation des niveaux de 2 réservoirs connectés	52
2.8.2.5. Solution : pression et perte de charge et temps d'égalisation des niveaux	52
2.8.2.6. Solution : horloge à eau	53
2.8.3. Exercices : siphon	55
2.8.3.1. Solution : pression et hauteur maximale de siphonnage	55
2.8.3.2. Solution : débit, pression et hauteur de cavitation	56
2.8.3.3. Solution : étude d'un cycle de vidange-remplissage d'un réservoir	57
2.8.4. Exercices Perte de charge	58
2.8.4.1. Solution : perte de charge dans un venturi	58
2.8.4.2. Solution : accélération d'un fluide dans un convergent	59
2.8.4.3. Solution : différence de pression dans un divergent	59
2.8.4.4. Solution : différents calculs de perte de charge dans une canalisation	59
2.8.4.5. Solution : coefficient de perte de charge linéaire dans une canalisation	60
2.8.4.6. Solution : relation entre vitesse d'écoulement et perte de charge	60
2.8.4.7. Solution : relation entre diamètre et perte de charge	61
2.8.4.8. Solution : relation entre débit et pression dans une canalisation	61
2.8.4.9. Solution : répartition des débits dans un réseau ramifié (solution par solveur)	62
2.8.4.10. Solution : répartition des débits dans un réseau ramifié (solution graphique)	62
2.8.4.11. Solution : pression dans une canalisation	64
2.8.4.12. Solution : débits des vannes de purge	65
2.8.4.13. Solution : réservoir alimentant gravitairement 2 autres	66
2.8.4.14. Solution : répartition des débits d'alimentation gravitaire	66
2.8.4.15. Solution : répartition des débits dans une installation d'alimentation gravitaire	67
2.8.4.16. Solution : répartition des débits dans une installation gravitaire	68
2.8.4.17. Solution : puissance hydraulique d'une perte de charge dans une canalisation	69
2.8.4.18. Solution : puissance hydraulique nécessaire pour un débit donné dans une canalisation	69
2.8.4.19. Solution : évaluation de la longueur de canalisation entre 2 réservoirs d'un système hydraulique gravitaire	70
2.8.4.20. Solution : étude d'un système hydraulique gravitaire débouchant en gueule bée	70
2.8.5. Exercices Conduites en série	71
2.8.5.1. Solution : évaluation des pertes de charge des canalisations en série reliant deux réservoirs	71
2.8.5.2. Solution : évaluation du débit d'écoulement dans des canalisations en série débouchant à l'air libre	71
2.8.5.3. Solution : débit et pression dans des canalisations en série	71
2.8.5.4. Solution : débit dans des conduites en série	72
2.8.5.5. Solution : débit dans des conduites en série et longueur équivalente	72
2.8.6. Exercices Conduites en parallèle	72
2.8.6.1. Solution : répartition des débits et pressions dans des conduites en parallèle	72
2.8.6.2. Solution : répartition des débits dans des conduites en parallèle	73
2.8.6.3. Solution : répartition des débits et longueur équivalente dans des conduites en parallèle	73
2.8.6.4. Solution : longueur équivalente des conduites en parallèle	74
2.8.6.5. Solution : répartition des débits dans un système hydraulique avec des conduites en parallèle	74
2.8.6.6. Solution : application de la méthode Hardy-Cross pour l'évaluation des débits dans des conduites en parallèle	75

3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES POMPES	77
3.1. Rappels théoriques	77
3.1.1. Hauteur manométrique totale	77
3.1.2. Puissance hydraulique	77
3.1.3. Rendement	77
3.1.4. Lois de similitude pour une pompe centrifuge	77
3.1.4.1. Pompes semblables ou pompes homologues	77
3.1.4.2. Rognage des roues	78
3.1.4.3. Changement de vitesse	78
3.1.5. Notions de NPSH disponible et NPSH requis	79
3.1.5.1. NPSH disponible	79
3.1.5.2. NPSH requis	79
3.1.5.3. Condition de fonctionnement d'une pompe	79
3.1.6. Couplage des pompes	79
3.1.6.1. Couplage en série	79
3.1.6.2. Couplage en parallèle	80
3.2. Exercices caractéristiques de pompe et étude de réseau muni d'une pompe	82
3.2.1. Exercice : détermination du NPSH et de la puissance de pompe	82
3.2.2. Exercice : NPSH et hauteur de cavitation	82
3.2.3. Exercice : hauteur de cavitation d'une pompe	82
3.2.4. Exercice : débit et HMT de pompe dans un circuit hydraulique	83
3.2.5. Exercice : débit de pompage et temps de remplissage d'un réservoir	83
3.2.6. Exercice : puissance hydraulique de pompe	83
3.2.7. Exercice : puissance hydraulique d'une pompe nécessaire pour un temps de remplissage donné	84
3.2.8. Exercice : apport de la pompe dans un réseau hydraulique	84
3.2.9. Exercice : débit et puissance de pompe dans un système hydraulique	84
3.2.10. Exercice : puissance hydraulique pour un débit donné	84
3.2.11. Exercice : débit et puissance hydraulique dans un système hydraulique	85
3.2.12. Exercice : caractéristiques d'une pompe immergée dans un circuit de pompage	85
3.2.13. Exercice : point de fonctionnement d'une pompe dans un réseau	85
3.2.14. Exercice : répartition des débits dans un réseau de 3 réservoirs dont l'un est muni d'une pompe	86
3.2.15. Exercice : étude d'un réseau hydraulique muni d'une pompe	86
3.2.16. Exercice : répartition des débits dans un réseau en parallèle dont l'une des branches est munie d'une pompe	87
3.2.17. Exercice : hauteur de cavitation d'une pompe en fonction de la valeur de la pression atmosphérique	87
3.2.18. Exercice : pompes semblables (détermination du nouveau diamètre et de la nouvelle vitesse)	87
3.2.19. Exercice : rognage et changement de vitesse de pompe	87
3.3. Exercices avec 2 pompes	88
3.3.1. Exercice : point de fonctionnement d'une pompe seule et de 2 pompes identiques en parallèle	88
3.3.2. Exercice : point de fonctionnement des pompes identiques en série ou en parallèle	88
3.3.3. Exercice : point de fonctionnement des pompes différentes en parallèle	88
3.4. Solution des exercices du chapitre 3	89
3.4.1. Caractéristiques de pompe et étude de réseau muni d'une pompe	89
3.4.1.1. Solution : détermination du NPSH et de la puissance de pompe	89
3.4.1.2. Solution : NPSH et hauteur de cavitation	90

3.4.1.3. Solution : hauteur de cavitation d'une pompe	90
3.4.1.4. Solution : débit et HMT de pompe dans un circuit hydraulique	90
3.4.1.5. Solution : débit de pompage et temps de remplissage d'un réservoir	91
3.4.1.6. Solution : puissance hydraulique de pompe	91
3.4.1.7. Solution : puissance hydraulique d'une pompe nécessaire pour un temps de remplissage donné	92
3.4.1.8. Solution : apport de la pompe dans un réseau hydraulique	92
3.4.1.9. Solution : débit et puissance de pompe dans un système hydraulique	92
3.4.1.10. Solution : puissance hydraulique pour un débit donné	93
3.4.1.11. Solution : débit et puissance hydraulique dans un système hydraulique	94
3.4.1.12. Solution : caractéristiques d'une pompe immergée dans un circuit de pompage	95
3.4.1.13. Solution : point de fonctionnement d'une pompe dans un réseau	95
3.4.1.14. Solution : répartition des débits dans un réseau de 3 réservoirs dont l'un est muni d'une pompe	95
3.4.1.15. Solution : étude d'un réseau hydraulique muni d'une pompe	97
3.4.1.16. Solution : répartition des débits dans un réseau en parallèle dont l'une des branches est munie d'une pompe	97
3.4.1.17. Solution : hauteur de cavitation d'une pompe en fonction de la valeur de la pression atmosphérique	97
3.4.1.18. Solution : pompes semblables (détermination du nouveau diamètre et de la nouvelle vitesse)	98
3.4.1.19. Solution : rognage et changement de vitesse de pompe	98
3.4.2. Exercices avec 2 pompes	99
3.4.2.1. Solution : point de fonctionnement d'une pompe seule et de 2 pompes identiques en parallèle	99
3.4.2.2. Solution : point de fonctionnement des pompes identiques en série ou en parallèle	100
3.4.2.3. Solution : point de fonctionnement des pompes différentes en parallèle	101

4. APPLICATION DES LOIS DE L'HYDRODYNAMIQUE DANS LES ÉCOULEMENTS A SURFACE LIBRE

4.1. Rappels théoriques	103
4.1.1. Paramètres géométriques	103
4.1.2. Paramètres hydrauliques	103
4.1.2.1. Charge hydraulique	103
4.1.2.2. Charge spécifique	103
4.1.3. Différents régimes d'écoulement	104
4.1.3.1. Régime permanent	104
4.1.3.2. Écoulement uniforme	104
4.1.3.3. Écoulement permanent uniforme	104
4.1.3.4. Écoulement permanent varié	104
4.1.3.5. Régime transitoire	105
4.1.4. Calcul inhérent aux différents régimes	105
4.1.4.1. Equation du régime uniforme	105
4.1.4.2. Equation pour le régime permanent graduellement varié	105
4.1.4.3. Ressaut hydraulique	107
4.1.5. Déversoir	107
4.1.5.1. Déversoir submergé ou noyé	108
4.2. Exercices Écoulement à surface libre	109
4.2.1. Exercice : caractéristiques géométriques des canaux et débits	109
4.2.2. Exercice : étude de l'écoulement dans un canal rectangulaire	109
4.2.3. Exercice : débit et section critique	110

4.2.4. Exercice : pente critique dans un canal rectangulaire	110
4.2.5. Exercice : ressaut et régimes d'écoulement dans un canal rectangulaire	110
4.2.6. Exercice : déversoir à mince paroi dans un canal rectangulaire	110
4.2.7. Exercice : lame d'approche du déversoir rectangulaire en mince paroi	110
4.2.8. Exercice : écoulement dans un venturi	111
4.2.9. Exercice : écoulement dans un venturi avec changement de pente	111
4.3. Solution des exercices du chapitre 4	112
4.3.1.1. Solution : caractéristiques géométriques des canaux et débits	112
4.3.1.2. Solution : étude de l'écoulement dans un canal rectangulaire	112
4.3.1.3. Solution : débit et section critique	113
4.3.1.4. Solution : pente critique dans un canal rectangulaire	113
4.3.1.5. Solution : ressaut et régimes d'écoulement dans un canal rectangulaire	113
4.3.1.6. Solution : déversoir à mince paroi dans un canal rectangulaire	113
4.3.1.7. Solution : lame d'approche du déversoir rectangulaire à mince paroi	114
4.3.1.8. Solution : écoulement dans un venturi	114
4.3.1.9. Solution : écoulement dans un venturi avec changement de pente	115
5. PROBLEMES ET ANNALES	116
5.1. Problème 1 : étude d'un réseau hydraulique	116
5.2. Problème 2 : étude d'un système de pompage en parallèle	117
5.3. Problème 3 : calcul de pertes de charge selon deux méthodes différentes	119
5.4. Problème 4 : étude du circuit d'aspiration d'une pompe	120
5.5. Annales BTS GEMEAU 2004 1 ^{re} session (partie hydraulique)	123
5.6. Annales BTS GEMEAU 2004 2 ^e session (partie hydraulique)	127
5.7. Annales BTS GEMEAU 2005 1 ^{re} session (partie hydraulique)	132
5.8. Annales BTS GEMEAU 2005 2 ^e session (partie hydraulique)	135
5.9. Annales BTS GEMEAU 2006 1 ^{re} session (partie hydraulique)	138
5.10. Annales BTS GEMEAU 2006 2 ^e session (partie hydraulique)	146
5.11. Annales BTS GEMEAU 2007 1 ^{re} session (partie hydraulique)	150
5.12. Annales BTS GEMEAU 2007 2 ^e session (partie hydraulique)	155
6. SOLUTION DES PROBLEMES ET ANNALES	162
6.1. Solution problème 1 : étude d'un réseau hydraulique	162
6.2. Solution problème 2 : étude d'un système de pompage en parallèle	164
6.3. Solution problème 3 : calcul de pertes de charge selon deux méthodes différentes	166
6.4. Solution problème 4 : étude du circuit d'aspiration d'une pompe	168
6.5. Solution Annales BTS GEMEAU 2004 1 ^{re} session (partie hydraulique)	169
6.6. Solution Annales BTS GEMEAU 2004 2 ^e session (partie hydraulique)	172
6.7. Solution Annales BTS GEMEAU 2005 1 ^{re} session (partie hydraulique)	175
6.8. Solution Annales BTS GEMEAU 2005 2 ^e session (partie hydraulique)	177
6.9. Solution Annales BTS GEMEAU 2006 1 ^{re} session (partie hydraulique)	181
6.10. Solution Annales BTS GEMEAU 2006 2 ^e session (partie hydraulique)	187
6.11. Solution Annales BTS GEMEAU 2007 1 ^{re} session (partie hydraulique)	190
6.12. Solution Annales BTS GEMEAU 2007 2 ^e session (partie hydraulique)	192
7. ANNEXES	196
7.1. Propriétés de l'eau	196
7.2. Abaque de Moody	197
8. REFERENCES	198