

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Analyse dimensionnelle et similitude</b>	<b>1</b>
1.1.	Introduction . . . . .	1
1.2.	Entités physiques . . . . .	2
1.3.	Unités de base et unités secondaires, système d'unités cohérent . . . . .	4
1.4.	Équation aux dimensions d'une entité physique . . . . .	6
1.5.	Application des équations aux dimensions aux changements des unités de mesure . . . . .	9
1.6.	Forme générale des entités physiques faisant l'objet de la mécanique des liquides et de l'hydraulique . . . . .	11
1.7.	Entités physiques possédant des équations aux dimensions indépendantes . . . . .	12
1.8.	Démonstration abrégée du théorème de Vaschy-Buckingham ou théorème $\pi$ . . . . .	14
1.9.	Application : détermination de la célérité des ondes dans une canalisation en charge . . . . .	20
1.10.	Application : détermination de la célérité des ondes sur la surface libre d'un liquide au contact avec la pression atmosphérique . . . . .	22
1.11.	Application : vitesse d'une goutte d'eau sphérique tombant dans l'air sans vitesse initiale . . . . .	23
1.12.	Détermination des principaux nombres adimensionnels rencontrés en mécanique des liquides . . . . .	26
1.13.	Détermination des principaux nombres adimensionnels rencontrés dans l'étude des phénomènes thermiques liés aux écoulements des liquides newtoniens . . . . .	29
1.14.	Mise sous forme adimensionnelle de l'équation de la conservation de la masse et de la loi locale de la MMCD pour un liquide newtonien incompressible en écoulement laminaire . . . . .	31
1.15.	Mise sous forme adimensionnelle de l'équation locale de l'énergie interne pour un liquide newtonien . . . . .	34
1.16.	Mise sous forme adimensionnelle de l'équation de la conservation de la masse et de la loi locale de la MMCD pour un liquide newtonien incompressible en écoulement turbulent et permanent en moyenne . . . . .	36
1.17.	Justification d'éventuelles simplifications apportées à l'écriture de l'équation de Navier-Stokes . . . . .	38
1.18.	Généralités sur les écoulements en charge et sur les écoulements à surface libre . . . . .	41
1.19.	Essais sur modèles et similitude . . . . .	43
1.20.	Similitude des écoulements en charge . . . . .	44
1.21.	Application des lois de similitude à l'étude d'un écoulement en charge . . . . .	45
1.22.	Similitude des écoulements à surface libre . . . . .	47
1.23.	Résumé des idées essentielles à retenir du premier chapitre . . . . .	50
<b>2</b>	<b>Généralités sur les écoulements unidimensionnels</b>	<b>53</b>
2.1.	Introduction : présentation générale de l'hydraulique unidimensionnelle . . . . .	53
2.2.	Choix d'un repère local et d'un repère absolu en hydraulique . . . . .	55
2.3.	Principales caractéristiques physiques de l'eau utilisées en hydraulique . . . . .	57
2.4.	Résolution d'un problème d'hydraulique dans le cadre d'un écoulement unidimensionnel . . . . .	64
2.5.	Théorème de Bernoulli généralisé appliqué à un écoulement unidimensionnel . . . . .	70
2.6.	Perte de charge entre deux sections transversales droites d'un écoulement permanent et unidimensionnel ne contenant pas de machines hydrauliques dans la veine liquide . . . . .	72
2.7.	Charge hydraulique moyenne dans une section transversale droite d'un écoulement unidimensionnel et permanent en moyenne . . . . .	73

2.8. Perte de charge entre deux sections transversales droites d'un écoulement turbulent et permanent en moyenne . . . . .	76
2.9. Ordre de grandeur des coefficients $\alpha_1$ et $\alpha_2$ pour un écoulement turbulent et permanent en moyenne dans une canalisation cylindrique de section circulaire . . . . .	78
2.10. Axiome des quantités de mouvement appliqué à un écoulement unidimensionnel et permanent en moyenne . . . . .	79
2.11. Ordre de grandeur des coefficients $\beta_1$ et $\beta_2$ pour un écoulement turbulent et permanent en moyenne dans une canalisation cylindrique de section circulaire . . . . .	83
2.12. Influence de la répartition des vitesses dans deux sections transversales droites d'une canalisation cylindrique de section circulaire en écoulement permanent en moyenne, sur la perte de charge entre ces deux sections . . . . .	84
2.13. Perte de charge unitaire dans un écoulement unidimensionnel : approche par l'analyse dimensionnelle . . . . .	86
2.14. Écoulement convergent et divergent : conséquence sur l'évaluation de la perte de charge . . . . .	90
2.15. Perte de charge singulière . . . . .	91
2.16. Équation de la conservation de la masse pour un écoulement unidimensionnel . . . . .	92
2.17. Axiome des quantités de mouvement pour un écoulement unidimensionnel : équation de Barré de Saint-Venant . . . . .	94
2.18. Problème d'application sur la propulsion d'un bateau à l'aide d'une hélice carénée . . . . .	97
2.19. Résumé des idées essentielles à retenir du deuxième chapitre . . . . .	104
<b>3 Écoulements en charge</b> . . . . .	<b>107</b>
3.1. Introduction . . . . .	108
3.2. Variation de la contrainte de cisaillement dans la section transversale droite d'une canalisation cylindrique de section circulaire . . . . .	109
3.3. Application de l'analyse dimensionnelle à la détermination du champ de vitesse dans une canalisation cylindrique de section circulaire, dont la paroi est rugueuse, en écoulement turbulent . . . . .	111
3.4. Rappel relatif aux écoulements laminaires . . . . .	115
3.5. Champ de vitesse d'un écoulement turbulent s'effectuant dans une canalisation cylindrique de section circulaire dont la paroi est idéalement lisse . . . . .	117
3.6. Application : construction d'un champ de vitesse . . . . .	119
3.7. Coefficient de perte de charge unitaire pour les canalisations idéalement lisses . . . . .	124
3.8. Champ de vitesse d'un écoulement turbulent s'effectuant dans une canalisation cylindrique de section circulaire dont la paroi est rugueuse au sens de Nikuradse . . . . .	129
3.9. Application : construction d'un champ de vitesse relatif à un écoulement turbulent en régime hydrauliquement rugueux . . . . .	133
3.10. Coefficient de perte de charge unitaire pour les canalisations possédant une rugosité artificielle . . . . .	136
3.11. Coefficient de perte de charge unitaire pour des canalisations possédant une rugosité artificielle, dans un régime hydraulique de transition . . . . .	137
3.12. Le diagramme de Moody . . . . .	140
3.13. Détermination de la rugosité industrielle $k$ des canalisations d'usage courant . . . . .	143
3.14. Incertitude sur la détermination d'une perte de charge unitaire . . . . .	146
3.15. Comparaison entre la formule de Colebrook-White et la formule d'Al'tsul . . . . .	147
3.16. Retour sur le fondement théorique de l'évaluation des pertes de charge linéaires des canalisations cylindriques de section circulaire . . . . .	148
3.17. Perte de charge dans une canalisation cylindrique rectiligne de section circulaire, ligne de charge, ligne piézométrique . . . . .	150
3.18. Pertes de charge singulières . . . . .	152
3.19. Application : tracé de la ligne piézométrique et de la ligne de charge d'une canalisation sur laquelle se trouve installée une vanne-papillon . . . . .	154
3.20. Panorama général des pertes de charge singulières . . . . .	155
3.21. Élargissement brusque entre deux canalisations cylindriques . . . . .	156
3.22. Élargissement progressif par diffuseur conique entre deux canalisations cylindriques . . . . .	160

3.23. Rétrécissement brusque entre deux canalisations cylindriques . . . . .	161
3.24. Rétrécissement progressif par convergent conique entre deux canalisations cylindriques	162
3.25. Entrée dans une canalisation à partir d'un réservoir de grandes dimensions . . . . .	163
3.26. Sortie d'une canalisation dans un réservoir de grandes dimensions . . . . .	165
3.27. Coude mis sur une canalisation sans changement de diamètre intérieur . . . . .	166
3.28. Branchements . . . . .	173
3.29. Vannes-Robinets . . . . .	180
3.30. Grilles, clapets, crépines . . . . .	185
3.31. Application : irrigation goutte à goutte . . . . .	191
3.32. Application : écoulement laminaire, détermination de la viscosité cinématique d'un liquide newtonien . . . . .	198
3.33. Application : perte de charge dans une galerie . . . . .	200
3.34. Application : étude d'un siphon . . . . .	203
3.35. Application : étude d'un branchement . . . . .	206
3.36. Application : vidange d'un réservoir dans un second réservoir . . . . .	208
3.37. Application : étude d'une canalisation de refoulement . . . . .	217
3.38. Résumé des idées essentielles à retenir du troisième chapitre . . . . .	222
<b>4 Écoulements à surface libre</b> . . . . .	<b>225</b>
4.1. Introduction . . . . .	226
4.2. Principales définitions rencontrées dans l'étude des écoulements à surface libre . . . . .	228
4.3. Équation de la conservation de la masse . . . . .	233
4.4. Canal prismatique, canal non prismatique . . . . .	234
4.5. La fonction scalaire impulsion totale en écoulement à surface libre . . . . .	236
4.6. Équation de Barré de Saint-Venant . . . . .	237
4.7. Écoulement à surface libre permanent à débit progressivement croissant dans un canal prismatique . . . . .	237
4.8. Écoulement à surface libre permanent à débit progressivement décroissant dans un canal prismatique . . . . .	240
4.9. Généralisation de l'équation de Barré de Saint-Venant . . . . .	241
4.10. Remarques relatives à l'introduction du débit à la place de la vitesse moyenne uniformisée dans une section transversale droite pour l'écriture de l'équation de Barré de Saint-Venant . . . . .	245
4.11. Méthode des caractéristiques pour l'étude des écoulements à surface libre s'effectuant sans apport latéral dans des canaux prismatiques . . . . .	247
4.12. Définition du nombre de Froude - Écoulement fluvial, torrentiel ou critique . . . . .	253
4.13. Principe de résolution des écoulements à surface libre par la méthode des car- actéristiques . . . . .	253
4.14. Méthode des caractéristiques dans un canal rectangulaire sous l'hypothèse $i - J = 0$	256
4.15. Application : vidange d'un canal de section rectangulaire sous l'hypothèse $i - J = 0$	260
4.16. Ondes positives dans un canal rectangulaire sous l'hypothèse $i - J = 0$ . . . . .	261
4.17. Application : détermination de la distance à laquelle se forme un mascaret dans un canal de section rectangulaire sous l'hypothèse $i - J = 0$ . . . . .	263
4.18. Relation d'Escoffier pour un écoulement s'effectuant dans un canal prismatique de section non rectangulaire . . . . .	263
4.19. Application : vidange d'un canal trapézoïdal sous l'hypothèse $i - J = 0$ . . . . .	267
4.20. Notions sur les méthodes numériques utilisées pour calculer les écoulements transi- toires dans les canaux prismatiques de section rectangulaire de longueur indéfinie . . . . .	269
4.21. Prise en compte des conditions aux limites dans le calcul des écoulements transitoires réalisés dans les canaux prismatiques de section rectangulaire de longueur finie . . . . .	272
4.22. Définition d'un canal prismatique uniforme . . . . .	275
4.23. Écoulement permanent et uniforme dans un canal prismatique uniforme . . . . .	275
4.24. Formule de Chézy, formule de Bazin, formule de Ganguillet-Kutter, formule de Manning-Strickler . . . . .	277
4.25. Détermination pratique du coefficient $K$ de la formule de Manning-Strickler . . . . .	279

4.26. Détermination du coefficient équivalent $K$ pour des canaux dont la rugosité varie au travers de la section du canal . . . . .	282
4.27. Formulaire relatif aux écoulements permanents et uniformes dans les canaux prismatiques de section rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale, circulaire, parabolique . . . . .	283
4.28. Écoulement permanent graduellement varié, sans apport latéral, dans un canal prismatique uniforme . . . . .	285
4.29. Perte de charge dans un écoulement permanent graduellement varié . . . . .	286
4.30. Équation différentielle des courbes de remous pour des écoulements permanents graduellement variés, sans apport latéral, dans des canaux prismatiques uniformes . . . . .	287
4.31. Définition de la charge spécifique moyenne dans une section transversale droite et dérivée par rapport à l'abscisse curviligne de l'écoulement de la charge spécifique . . . . .	288
4.32. Définition de la profondeur normale . . . . .	291
4.33. Profondeur normale et profondeur pseudo-normale . . . . .	293
4.34. Variation de la charge spécifique moyenne en fonction du tirant d'eau pour un débit fixé; profondeur critique . . . . .	295
4.35. Nouvelle écriture de l'équation différentielle des courbes de remous pour des écoulements permanents graduellement variés, sans apport latéral, dans des canaux prismatiques uniformes . . . . .	299
4.36. Définition de la pente critique. Canal de pente faible, canal de pente forte . . . . .	300
4.37. Nouvelle écriture de l'équation différentielle des courbes de remous pour les écoulements permanents graduellement variés, sans apport latéral, dans des canaux prismatiques uniformes, en tenant compte de la débitance et de la fonction pente critique. Méthode d'intégration de Bakhmeteff . . . . .	302
4.38. Signes des dérivées $\frac{d\overline{H}_s}{dy}$ et $\frac{d\overline{H}_s}{dx}$ , relation d'ordre entre $y_N$ et $y_c$ pour des canaux prismatiques uniformes évasés vers le haut . . . . .	307
4.39. Allure des différentes courbes de remous rencontrées dans les canaux prismatiques uniformes évasés vers le haut . . . . .	310
4.40. Allure des différentes courbes de remous rencontrées dans les galeries cylindriques de section circulaire . . . . .	317
4.41. Le ressaut stationnaire, description sommaire . . . . .	324
4.42. Équations du ressaut stationnaire dans des canaux prismatiques évasés vers le haut . . . . .	325
4.43. Principales propriétés du ressaut stationnaire se produisant dans un canal prismatique de section rectangulaire . . . . .	327
4.44. Application : détermination des principales caractéristiques d'un ressaut stationnaire se produisant dans un canal prismatique de section rectangulaire . . . . .	330
4.45. Détermination des profondeurs conjuguées d'un ressaut stationnaire se produisant dans un canal prismatique de section transversale droite triangulaire, trapézoïdale, circulaire, parabolique . . . . .	331
4.46. Ressaut noyé . . . . .	334
4.47. Localisation d'un ressaut . . . . .	334
4.48. Déversoir dénoyé en mince paroi rectangulaire sans contraction latérale ou déversoir de Bazin . . . . .	335
4.49. Déversoir dénoyé à large seuil . . . . .	340
4.50. Chute libre dans un canal . . . . .	342
4.51. Écoulement sous une vanne en mince paroi verticale, d'ouverture rectangulaire, sans contraction latérale fonctionnant en régime dénoyé et noyé . . . . .	348
4.52. Détermination de l'emplacement des sections de contrôle . . . . .	352
4.53. Passage d'un réservoir de grandes dimensions à un canal prismatique uniforme de grande longueur . . . . .	355
4.54. Passage d'un canal prismatique uniforme de grande longueur dans un réservoir de grandes dimensions . . . . .	357
4.55. Perte de charge singulière pour un élargissement brusque, l'écoulement s'effectuant en régime fluvial dans des canaux uniformes de section rectangulaire de pente nulle . . . . .	358

4.56. Écoulement dans un canal courbe de section transversale droite rectangulaire en régime fluvial . . . . .	361
4.57. Écoulement torrentiel dans un canal de section rectangulaire . . . . .	364
4.58. Application : étude de l'écoulement dans une gouttière . . . . .	371
4.59. Application : écoulement dans un canal cylindrique semi-circulaire . . . . .	379
4.60. Application : écoulement dans un canal cylindrique de section transversale droite parabolique . . . . .	387
4.61. Application : étude d'une courbe de remous dans un convergent de pente nulle précédé et suivi par un canal prismatique rectangulaire très long et de pente positive	395
4.62. Application : étude des courbes de remous dans un canal convergent-divergent de section rectangulaire . . . . .	404
4.63. Application : écoulement au-dessus d'un déversoir en régime dénoyé, étude de la courbe de remous dans un canal prismatique de section rectangulaire de pente nulle et dans un convergent de section rectangulaire . . . . .	409
4.64. Application : étude d'un écoulement permanent puis d'un écoulement transitoire sous une vanne placée dans un canal prismatique de section rectangulaire . . . . .	417
4.65. Application : étude d'un canal-déversoir latéral convergent en mince paroi . . . . .	426
4.66. Application : écoulement sous une vanne verticale d'ouverture rectangulaire en régime dénoyé puis noyé . . . . .	436
4.67. Application : écoulement transitoire issu de l'effacement instantané d'un barrage plan vertical . . . . .	445
4.68. Résumé des idées essentielles à retenir du quatrième chapitre . . . . .	461