



Saad BENNIS

Hydraulique
et hydrologie

3^e édition

ÉTS

Extrait de la publication



Presses
de l'Université
du Québec

Hydraulique et hydrologie

3^e édition

Membre de
L'ASSOCIATION
NATIONALE
DES ÉDITEURS
DE LIVRES

Presses de l'Université du Québec

Le Delta 1, 2875, boulevard Laurier, bureau 450, Québec (Québec) G1V 2M2

Téléphone: 418 657-4399

Télécopieur: 418 657-2096

Courriel: puq@puq.ca

Internet: www.puq.ca

Diffusion/Distribution:

CANADA Prologue inc., 1650, boulevard Lionel-Bertrand, Boisbriand (Québec) J7H 1N7
Tél.: 450 434-0306 / 1 800 363-2864

FRANCE AFPU-D – Association française des Presses d'université
Sodis, 128, avenue du Maréchal de Lattre de Tassigny, 77 403 Lagny, France – Tél.: 01 60 07 82 99

BELGIQUE Patrimoine SPRL, avenue Milcamps 119, 1030 Bruxelles, Belgique – Tél.: 02 73 66 84 7

SUISSE Servidis SA, Chemin des Chalets 7, 1279 Chavannes-de-Bogis, Suisse – Tél.: 022 960.95.32



La Loi sur le droit d'auteur interdit la reproduction des œuvres sans autorisation des titulaires de droits. Or, la photocopie non autorisée – le « photocopillage » – s'est généralisée, provoquant une baisse des ventes de livres et compromettant la rédaction et la production de nouveaux ouvrages par des professionnels. L'objet du logo apparaissant ci-contre est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit le développement massif du « photocopillage ».

Saad BENNIS

Hydraulique et hydrologie

3^e édition



 Presses
de l'Université
du Québec

*Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives nationales
du Québec et Bibliothèque et Archives Canada*

Bennis, Saad, 1957-

Hydraulique et hydrologie

3^e édition.

Comprend des références bibliographiques et un index.

Publié en collaboration avec: École de technologie supérieure.

ISBN 978-2-7605-3966-2

1. Hydraulique. 2. Hydrologie. 3. Mécanique des fluides.
4. Cycle hydrologique. 5. Hydraulique – Problèmes et exercices.
6. Hydrologie – Problèmes et exercices. I. Université du Québec.
École de technologie supérieure. II. Titre.

TC145.B46 2013 532 C2013-942171-8

Les Presses de l'Université du Québec
reconnaissent l'aide financière du gouvernement du Canada
par l'entremise du Fonds du livre du Canada
et du Conseil des Arts du Canada pour leurs activités d'édition.

Elles remercient également la Société de développement
des entreprises culturelles (SODEC) pour son soutien financier.

Direction artistique

Yves Tougas

Image de couverture

Ronald Maisonneuve

Mise en pages

Info 1000 mots

Dépôt légal: 1^{er} trimestre 2014

- › Bibliothèque et Archives nationales du Québec
- › Bibliothèque et Archives Canada

©2014 – Presses de l'Université du Québec

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés

Imprimé au Canada

À Ismael, Nora, Maria,
Youssef et Malika

J'ai pris de votre temps
pour préparer cet ouvrage.

Remerciements

Je tiens à remercier très particulièrement le professeur Étienne Windisch, ing., Ph. D. et madame Céline Lavoie qui ont veillé à la mise en forme de ce document.

Je remercie les étudiants au doctorat Marouane Temimi, Éric Crobeddu et Anas Sebti qui ont participé à l'élaboration d'une ébauche de solutions pour les problèmes proposés à la fin des chapitres.

Je remercie également le professeur Pierre Lemieux, ing., Ph. D., vice-doyen à la recherche à l'Université de Sherbrooke pour la révision scientifique de l'ouvrage.

Finalement, je remercie tous les collègues dont les ouvrages et les publications scientifiques m'ont aidé dans la préparation de ce travail. Ces références bibliographiques sont citées à la fin de chaque chapitre.

Table des matières

Remerciements	IX
CHAPITRE 1 Équations de conservation de la masse	1
Introduction	2
1.1 Définitions	2
1.2 L'équation de continuité: forme intégrale	4
1.2.1 Formulation générale	4
1.2.2 L'équation de continuité pour un fluide incompressible ...	4
1.2.3 Cas particuliers courants pour les conduites sous pression	5
1.3 Autres formes courantes de l'équation de continuité	11
1.3.1 Définitions	11
1.3.2 Volume de contrôle infinitésimal fixe	11
1.3.3 Application aux écoulements souterrains	14
1.3.4 Application aux écoulements à surface libre	14
Résumé	18
Exercices	19
Ouvrages de référence	23
Symboles	24
CHAPITRE 2 Calcul des conduites sous pression	25
2.1 Définitions	26
2.2 Théorème de Bernoulli	28

2.3	Équation de Bernoulli généralisée	32
2.4	Calcul des pertes de charge par frottement	34
2.4.1	Définitions	34
2.4.2	Formulation générale de la perte de charge	36
2.4.3	Formule de Darcy-Weissbach	36
2.4.4	Formule de Hazen-Williams	42
2.4.5	Relation entre les deux formules de perte de charge	44
2.5	Calcul des pertes de charge singulières	44
2.5.1	Généralités	44
2.5.2	Pertes de charge dans un élargissement brusque	45
2.5.3	Pertes de charge dans un rétrécissement	46
2.5.4	Pertes de charge dans une dérivation latérale	47
2.5.5	Pertes de charge dans les vannes et les robinets	48
2.5.6	Pertes de charge dans les coudes	49
2.6	Longueur équivalente	50
2.7	Calcul des conduites en série et en parallèle	52
2.7.1	Conduites en série	52
2.7.2	Conduites en parallèle	55
2.8	Courbe caractéristique d'une conduite (C.C.C.)	58
2.9	Courbe caractéristique de conduites en série	59
2.10	Courbe caractéristique de conduites en parallèle	59
2.11	Problème des trois réservoirs	60
	Résumé	64
	Exercices	65
	Ouvrages de référence	72
	Symboles	73
	CHAPITRE 3 Les pompes	75
3.1	Considérations économiques	76
3.2	Description d'une pompe centrifuge	78
3.3	Nomenclature	80
3.4	Courbes caractéristiques d'une pompe	80
3.4.1	Courbe caractéristique Q-H _p	81
3.4.2	Courbe de rendement	82

3.5	Vitesse spécifique	83
3.5.1	Définition et considérations théoriques.....	83
3.5.2	Applications pratiques de la vitesse spécifique	86
3.6	Règles de similitude pour les pompes centrifuges	87
3.6.1	Rognage d'une pompe.....	87
3.6.2	Modification de la vitesse de rotation	88
3.7	Point de fonctionnement	89
3.7.1	Solution graphique	90
3.7.2	Solution numérique.....	92
3.8	Ajustement du point de fonctionnement	92
3.8.1	Problématique	92
3.8.2	Modification de la vitesse de rotation du moteur de la pompe	93
3.8.3	Modification du diamètre du rotor de la pompe.....	94
3.8.4	Réduction du débit par vannage.....	94
3.9	Problème de cavitation dans les pompes	95
3.10	Critères d'acceptation du point de fonctionnement	103
3.11	Pompes en série et pompes en parallèle	104
3.11.1	Pompes en série.....	104
3.11.2	Pompes en parallèle.....	106
3.12	Amorçage des pompes centrifuges	108
3.13	Profondeur d'immersion des prises d'eau	108
3.14	Choix des pompes	109
	Résumé	111
	Exercices	113
	Ouvrages de référence	119
	Symboles	120
CHAPITRE 4	Coup de bélier	121
4.1	Introduction	122
4.2	Compressibilité des liquides	122
4.3	Élasticité des conduites	123
4.4	Phénomène du coup de bélier	125

4.5	Vitesse de propagation des ondes	129
4.6	Manœuvre instantanée	131
4.7	Manœuvre progressive	133
4.8	Le coup de bélier dans les pompes	135
4.8.1	Généralités	135
4.8.2	Arrêt instantané	136
4.8.3	Arrêt non instantané	137
4.9	Coup de bélier dans les clapets	138
4.10	Transmission du coup de bélier	139
4.11	Moyens de diminuer les effets du coup de bélier	143
4.11.1	Volant couplé au moteur	143
4.11.2	Réservoir d'air	144
4.11.3	Cheminée d'équilibre	145
4.11.4	Soupapes de sécurité	145
	Résumé	146
	Ouvrages de référence	147
	Symboles	149
CHAPITRE 5 Écoulements à surface libre		151
5.1	Introduction	152
5.2	Classification des écoulements	153
5.3	Caractéristiques géométriques des écoulements à surface libre	154
5.3.1	Section mouillée d'un canal	154
5.3.2	Périmètre mouillé d'un canal	155
5.3.3	Rayon hydraulique	155
5.3.4	Profondeur ou tirant d'eau	156
5.3.5	Largeur au plan d'eau	156
5.3.6	Largeur au radier	156
5.3.7	Pente d'un canal	157
5.3.8	Canal prismatique	157
5.4	Vitesses et pressions dans une section d'écoulement	158
5.4.1	Répartition des vitesses	158
5.4.2	Répartition des pressions	160

5.5	Équation d'énergie pour les écoulements à surface libre	161
5.5.1	Formulation générale.	161
5.5.2	Écoulement uniforme.	162
5.5.3	Divers types de problèmes posés en pratique.	164
5.5.4	Cas particulier de la forme circulaire.	175
5.5.5	Règles pratiques de dimensionnement des canaux.	178
5.5.6	Forme optimale de la section d'un canal.	179
5.6	Notion d'énergie spécifique	180
5.6.1	Définition.	180
5.6.2	Divers régimes d'écoulement.	181
5.6.3	Cas particulier de la section rectangulaire.	184
5.6.4	Écoulement critique: cas général.	185
5.6.5	Interprétation de l'écoulement critique.	188
5.6.6	Notion de pente critique.	192
5.7	Écoulement variant graduellement	195
5.7.1	Définition.	195
5.7.2	Problématique.	195
5.7.3	Calcul de la courbe de remous.	195
5.8	Écoulement variant brusquement	205
5.8.1	Définition du ressaut hydraulique.	205
5.8.2	Profondeurs conjuguées.	207
5.8.3	Perte d'énergie dans le ressaut hydraulique.	208
5.8.4	Bassin d'amortissement.	210
	Résumé	213
	Exercices	214
	Ouvrages de référence	222
	Symboles	223
	CHAPITRE 6 Écoulements à travers les déversoirs et les orifices	225
6.1	Définitions et généralités	226
6.2	Écoulements à travers un orifice	227
6.3	Déversoir à paroi mince et rectangulaire	230
6.4	Déversoir triangulaire	232
6.5	Écoulement à travers un déversoir à seuil épais	234

6.6	Canaux jaugeurs Parshall	236
6.7	Déversoir latéral	238
6.7.1	Différents types d'écoulement	238
6.7.2	Formule de De Marchi	240
6.7.3	Formule de Dominguez	241
6.8	Analyse des incertitudes de mesure	243
	Résumé	244
	Exercices	245
	Ouvrages de référence	246
	Symboles	247
CHAPITRE 7	Cycle hydrologique – précipitations, évaporation et infiltrations	249
7.1	Introduction générale	250
7.2	Le cycle hydrologique	251
7.3	Hydrologie des bassins versants	253
7.3.1	Définition d'un bassin versant	253
7.3.2	Précipitations sur un bassin versant	256
7.3.3	Notion d'infiltration	262
7.3.4	Notion d'évaporation	268
	Résumé	272
	Exercices	273
	Ouvrages de référence	276
	Symboles	277
CHAPITRE 8	Modèles de transformation pluie-fonte-débit	279
8.1	Introduction	280
8.2	Hydrogramme de ruissellement	280
8.2.1	Généralités	280
8.2.2	Définitions	281
8.3	Séparation des différentes composantes de l'écoulement	282
8.4	Courbe de tarage	284
8.4.1	Principe	284
8.4.2	Détermination des paramètres	284

8.5 Transformations pluie-débit	285
8.5.1 Méthode rationnelle	285
8.5.2 Méthode de l'hydrogramme unitaire	292
8.5.3 Hydrogramme unitaire synthétique	298
8.5.4 Méthode du réservoir non linéaire	301
8.6 Modèle de fonte des neiges	302
8.6.1 Introduction	302
8.6.2 Modèle des degrés-jours	303
8.6.3 Modèle de transformation pluie-fonte-débit	304
8.6.4 Critère de validité du modèle	311
Résumé	312
Exercices	313
Ouvrages de référence	322
Symboles	324
CHAPITRE 9 Laminage des crues	325
9.1 Introduction	326
9.2 Définition	326
9.3 Laminage d'une onde de crue dans un tronçon de rivière	327
9.3.1 Équations du mouvement	327
9.3.2 Méthode de Muskingum	329
9.3.3 Méthode de Muskingum-Cunge	333
9.4 Laminage artificiel à travers un réservoir	334
9.4.1 Contexte	334
9.4.2 Principe de la méthode de solution	336
9.4.3 Calcul du débit de sortie	337
9.4.4 Calcul du volume stocké	339
Résumé	343
Exercices	344
Ouvrages de référence	347
Symboles	348

CHAPITRE 10 Hydrologie statistique	349
10.1 Introduction	350
10.2 Période de retour, risque hydrologique et règles générales de design.	351
10.2.1 Définitions	351
10.2.2 Gestion du risque hydrologique	351
10.3 Détermination des probabilités de dépassement	353
10.4 Détermination analytique des probabilités de dépassement ...	358
10.4.1 Paramètres d'un échantillon et d'une population	358
10.4.2 Modèle général pour l'estimation des quantiles	360
10.5 Loi normale.	360
10.5.1 Propriétés de la loi normale	361
10.5.2 Loi normale centrée réduite	361
10.5.3 Procédure d'utilisation de la loi normale	362
10.6 Intervalle de confiance dans l'estimation des quantiles	365
10.7 Présentation graphique des quantiles	366
10.8 La loi Log-normale	367
10.9 Distribution de Gumbel ou extrême de type 1	371
10.9.1 Procédure d'utilisation de la loi de Gumbel	372
10.10 Distribution Log-Pearson de type III (LP3)	375
10.11 Autres fonctions de distribution	378
10.11.1 Introduction	378
10.11.2 Distribution binomiale	379
10.11.3 Distribution géométrique	381
Résumé.	383
Exercices	384
Ouvrages de référence.	389
Symboles	390
SOLUTIONS DES EXERCICES.	391



Hydraulique et hydrologie est un ouvrage original qui regroupe des notions qu'on ne retrouve pas traditionnellement réunies dans un même volume. Cet ouvrage permet aussi bien à l'étudiant qu'à l'ingénieur praticien d'acquérir les notions fondamentales qui sont à la base du design hydraulique et hydrologique.

Dans la partie hydraulique, cet ouvrage traite des écoulements sous pression et à surface libre, des pompes et des stations de pompage, du coup de bélier dans les conduites gravitaires et de refoulement, des écoulements à travers les déversoirs et les orifices.

Dans la partie hydrologie, l'ouvrage traite de l'estimation des différentes composantes du cycle hydrologique, des modèles de transformation pluie-fonte-débit, des laminages naturel et artificiel des crues et de la modélisation statistique du risque hydrologique.

*Le professeur **SAAD BENNIS**, ing., Ph. D., a obtenu son doctorat en mécanique en 1983 à l'Institut national polytechnique de Toulouse en France, puis le Ph. D. en génie civil en 1987 à l'Université de Sherbrooke au Canada. Il a ensuite travaillé chez Hydro-Québec comme conseiller en modélisation.*

En 1989, l'auteur a intégré l'École de technologie supérieure pour y enseigner, aux différents cycles, la mécanique des fluides, la thermodynamique, l'hydraulique, l'hydrologie et la conception et la réhabilitation des égouts et des aqueducs. En parallèle, il a mené plusieurs projets de recherche subventionnés et commandités par l'industrie. La réalisation de ces projets a permis un avancement sensible des connaissances en hydrologies urbaine et rurale, le développement de logiciels utilisés par l'industrie, la réalisation de plusieurs publications scientifiques et la formation d'étudiants au niveau de la maîtrise et du doctorat.

