



Saad BENNIS

Hydraulique  
et hydrologie

3<sup>e</sup> édition

ÉTS



Presses  
de l'Université  
du Québec







# Hydraulique et hydrologie

3<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> édition



 Presses  
de l'Université  
du Québec

The logo for Presses de l'Université du Québec consists of three vertical bars of varying heights, arranged in a slightly staggered pattern to the left of the text.

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

Bennis, Saad, 1957-

Hydraulique et hydrologie

3<sup>e</sup> 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<sup>er</sup> 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
<b>CHAPITRE 1 Équations de conservation de la masse .....</b>	<b>1</b>
Introduction .....	2
<b>1.1 Définitions .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 L'équation de continuité: forme intégrale .....</b>	<b>4</b>
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
<b>1.3 Autres formes courantes de l'équation de continuité .....</b>	<b>11</b>
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
<b>CHAPITRE 2 Calcul des conduites sous pression .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Définitions .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Théorème de Bernoulli .....</b>	<b>28</b>

<b>2.3</b>	<b>Équation de Bernoulli généralisée</b> . . . . .	32
<b>2.4</b>	<b>Calcul des pertes de charge par frottement</b> . . . . .	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
<b>2.5</b>	<b>Calcul des pertes de charge singulières</b> . . . . .	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
<b>2.6</b>	<b>Longueur équivalente</b> . . . . .	50
<b>2.7</b>	<b>Calcul des conduites en série et en parallèle</b> . . . . .	52
2.7.1	Conduites en série . . . . .	52
2.7.2	Conduites en parallèle . . . . .	55
<b>2.8</b>	<b>Courbe caractéristique d'une conduite (C.C.C.)</b> . . . . .	58
<b>2.9</b>	<b>Courbe caractéristique de conduites en série</b> . . . . .	59
<b>2.10</b>	<b>Courbe caractéristique de conduites en parallèle</b> . . . . .	59
<b>2.11</b>	<b>Problème des trois réservoirs</b> . . . . .	60
	<b>Résumé</b> . . . . .	64
	<b>Exercices</b> . . . . .	65
	<b>Ouvrages de référence</b> . . . . .	72
	<b>Symboles</b> . . . . .	73
	<b>CHAPITRE 3 Les pompes</b> . . . . .	75
<b>3.1</b>	<b>Considérations économiques</b> . . . . .	76
<b>3.2</b>	<b>Description d'une pompe centrifuge</b> . . . . .	78
<b>3.3</b>	<b>Nomenclature</b> . . . . .	80
<b>3.4</b>	<b>Courbes caractéristiques d'une pompe</b> . . . . .	80
3.4.1	Courbe caractéristique Q-H <sub>p</sub> . . . . .	81
3.4.2	Courbe de rendement . . . . .	82

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

<b>4.5</b>	<b>Vitesse de propagation des ondes</b> .....	129
<b>4.6</b>	<b>Manœuvre instantanée</b> .....	131
<b>4.7</b>	<b>Manœuvre progressive</b> .....	133
<b>4.8</b>	<b>Le coup de bélier dans les pompes</b> .....	135
4.8.1	Généralités .....	135
4.8.2	Arrêt instantané .....	136
4.8.3	Arrêt non instantané .....	137
<b>4.9</b>	<b>Coup de bélier dans les clapets</b> .....	138
<b>4.10</b>	<b>Transmission du coup de bélier</b> .....	139
<b>4.11</b>	<b>Moyens de diminuer les effets du coup de bélier</b> .....	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
	<b>Résumé</b> .....	146
	<b>Ouvrages de référence</b> .....	147
	<b>Symboles</b> .....	149
<b>CHAPITRE 5 Écoulements à surface libre</b> .....		151
<b>5.1</b>	<b>Introduction</b> .....	152
<b>5.2</b>	<b>Classification des écoulements</b> .....	153
<b>5.3</b>	<b>Caractéristiques géométriques des écoulements à surface libre</b> .....	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
<b>5.4</b>	<b>Vitesses et pressions dans une section d'écoulement</b> .....	158
5.4.1	Répartition des vitesses .....	158
5.4.2	Répartition des pressions .....	160

<b>5.5</b>	<b>Équation d'énergie pour les écoulements à surface libre</b> . . . . .	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
<b>5.6</b>	<b>Notion d'énergie spécifique</b> . . . . .	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
<b>5.7</b>	<b>Écoulement variant graduellement</b> . . . . .	195
5.7.1	Définition. . . . .	195
5.7.2	Problématique. . . . .	195
5.7.3	Calcul de la courbe de remous. . . . .	195
<b>5.8</b>	<b>Écoulement variant brusquement</b> . . . . .	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
	<b>Résumé</b> . . . . .	213
	<b>Exercices</b> . . . . .	214
	<b>Ouvrages de référence</b> . . . . .	222
	<b>Symboles</b> . . . . .	223
<b>CHAPITRE 6 Écoulements à travers les déversoirs et les orifices</b> . . . . .		225
<b>6.1</b>	<b>Définitions et généralités</b> . . . . .	226
<b>6.2</b>	<b>Écoulements à travers un orifice</b> . . . . .	227
<b>6.3</b>	<b>Déversoir à paroi mince et rectangulaire</b> . . . . .	230
<b>6.4</b>	<b>Déversoir triangulaire</b> . . . . .	232
<b>6.5</b>	<b>Écoulement à travers un déversoir à seuil épais</b> . . . . .	234

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

<b>8.5</b>	<b>Transformations pluie-débit</b> .....	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
<b>8.6</b>	<b>Modèle de fonte des neiges</b> .....	302
8.6.1	Introduction.....	302
8.6.2	Modèle des degrés-jours .....	303
	<b>Résumé</b> .....	305
	<b>Exercices</b> .....	306
	<b>Ouvrages de référence</b> .....	315
	<b>Symboles</b> .....	316
	<b>CHAPITRE 9 Laminage des crues</b> .....	317
<b>9.1</b>	<b>Introduction</b> .....	318
<b>9.2</b>	<b>Définition</b> .....	318
<b>9.3</b>	<b>Laminage d'une onde de crue dans un tronçon de rivière</b> .....	319
9.3.1	Équations du mouvement.....	319
9.3.2	Méthode de Muskingum.....	321
9.3.3	Méthode de Muskingum-Cunge.....	325
<b>9.4</b>	<b>Laminage artificiel à travers un réservoir</b> .....	326
9.4.1	Contexte.....	326
9.4.2	Principe de la méthode de solution .....	328
9.4.3	Calcul du débit de sortie.....	329
9.4.4	Calcul du volume stocké.....	331
	<b>Résumé</b> .....	335
	<b>Exercices</b> .....	336
	<b>Ouvrages de référence</b> .....	339
	<b>Symboles</b> .....	340
	<b>CHAPITRE 10 Hydrologie statistique</b> .....	341
<b>10.1</b>	<b>Introduction</b> .....	342
<b>10.2</b>	<b>Période de retour, risque hydrologique et règles générales de design</b> .....	343
10.2.1	Définitions .....	343
10.2.2	Gestion du risque hydrologique.....	343

<b>10.3</b>	<b>Détermination des probabilités de dépassement</b> . . . . .	345
<b>10.4</b>	<b>Détermination analytique des probabilités de dépassement</b> . . .	350
10.4.1	Paramètres d'un échantillon et d'une population . . . . .	350
10.4.2	Modèle général pour l'estimation des quantiles. . . . .	352
<b>10.5</b>	<b>Loi normale.</b> . . . . .	352
10.5.1	Propriétés de la loi normale . . . . .	353
10.5.2	Loi normale centrée réduite . . . . .	353
10.5.3	Procédure d'utilisation de la loi normale. . . . .	354
<b>10.6</b>	<b>Intervalle de confiance dans l'estimation des quantiles</b> . . . . .	357
<b>10.7</b>	<b>Présentation graphique des quantiles</b> . . . . .	358
<b>10.8</b>	<b>La loi Log-normale</b> . . . . .	359
<b>10.9</b>	<b>Distribution de Gumbel ou extrême de type 1</b> . . . . .	363
10.9.1	Procédure d'utilisation de la loi de Gumbel . . . . .	364
<b>10.10</b>	<b>Distribution Log-Pearson de type III (LP3)</b> . . . . .	367
<b>10.11</b>	<b>Autres fonctions de distribution</b> . . . . .	370
10.11.1	Introduction. . . . .	370
10.11.2	Distribution binomiale . . . . .	371
10.11.3	Distribution géométrique . . . . .	373
	<b>Résumé.</b> . . . . .	375
	<b>Exercices</b> . . . . .	376
	<b>Ouvrages de référence.</b> . . . . .	381
	<b>Symboles</b> . . . . .	382
	<b>SOLUTIONS DES EXERCICES.</b> . . . . .	383