

Table des matières

Préface	V
Introduction	XX
Liste des notations	XXIV

Chapitre 1

Hydraulique à surface libre

1. Définitions essentielles : les paramètres géométriques	2
2. Définitions essentielles : les paramètres hydrauliques	3
2.1. Masse volumique	3
2.2. Poids volumique	3
2.3. Débit	3
2.4. Vitesse en un point de l'écoulement	3
2.5. Vitesse moyenne	4
2.6. Ligne de courant	4
2.7. Tube de courant	4
2.8. Pression hydrostatique en un point	4
2.9. Charge hydraulique en un point d'un liquide en mouvement	4
2.10. Charge moyenne dans une section	5
2.11. Ligne piézométrique	5
2.12. Ligne de charge moyenne	6
2.13. Charge spécifique	6
2.14. Poussée sur une paroi du canal	7
2.15. Frottement sur une paroi du canal	7
2.16. Viscosité d'un liquide	8
3. Définition des différents régimes d'écoulement	8
3.1. Régime permanent	8

3.2. Régime permanent uniforme	8
3.3. Régime permanent varié	9
3.4. Régime transitoire	9
4. Régime permanent uniforme	9
4.1. Rappel de la définition	9
4.2. Équation de continuité	9
4.3. Équation du régime uniforme	10
4.4. Formule de Chézy et formule de Manning-Strickler	11
4.4.1. Rugosités composées	15
4.4.2. Cas d'un lit majeur	15
4.5. Distribution des vitesses dans une section	16
5. Régime permanent graduellement varié	18
5.1. Présentation du problème considéré	18
5.2. Équation de la ligne d'eau ; tirant d'eau normal	18
5.3. Tirant d'eau critique	20
5.4. Écoulement fluvial, écoulement torrentiel	20
5.5. Calcul d'une courbe de remous	22
6. Régime permanent rapidement varié	23
6.1. Ressaut hydraulique	24
6.2. Typologie et longueur du ressaut	26
6.3. Position du ressaut	29
6.4. Seuil dénoyé ou noyé	30
6.4.1. Loi de débit d'un seuil frontal dénoyé	30
6.4.2. Loi de débit d'un seuil frontal noyé	33
6.4.3. Seuils profilés	33
6.4.4. Loi de débit d'un déversoir latéral	35
6.4.5. Fonctionnement en crue d'un seuil frontal ou d'un déversoir latéral	37
7. Régime transitoire	38
7.1. Les deux équations de base	38
7.1.1. Conservation de la masse	38
7.1.2. Équation dynamique	39
7.1.3. Cas particuliers	43
7.2. Résolution des équations de Barré de Saint-Venant	44
7.3. Problèmes réels rencontrés	46
7.4. Propagation de crue dans les chenaux à forte pente et à champ d'inondation réduit	46
7.5. Propagation de crue dans les chenaux à très faible pente	48
7.6. Conclusion sur la propagation des crues en rivière	51
8. Logiciels de calcul en rivières ou canaux	51
8.1. Logiciels de calcul 1D permanent	51
8.2. Logiciels de calcul 1D transitoire	53
8.3. Calculer en permanent ou en transitoire ?	54
8.4. Modèle à une, deux ou trois dimensions ?	55

Chapitre 2

Transport solide en hydraulique fluviale

1. Hydraulique fluviale et hydraulique torrentielle	61
2. Expérience pour illustrer charriage et suspension	62
3. Charriage et suspension	62
4. Érosion du fond, dépôt	66
5. Notion de capacité de transport solide	67
6. Taille des grains	68
7. Tri granulométrique, pavage	71
8. Contrainte tractrice et début de mise en mouvement d'une particule	74
8.1. Calcul de la contrainte tractrice	74
8.2. Valeurs limites du paramètre de Shields	78
8.3. Notion de contrainte tractrice efficace (cas des rivières à sable)	80
8.4. Nature du transport solide	81
8.5. Cas des rivières coulant sur des matériaux cohésifs	82
9. Estimation du débit solide	83
9.1. Formule de Meyer-Peter et Müller (rivières à graviers ou à sables grossiers)	84
9.2. Formule d'Engelund et Hansen	87
9.3. Tendances récentes : formules adaptées en granulométrie étendue et aux fortes pentes	88
9.3.1. Formule de Lefort (2007)	88
9.3.2. Formule de Recking (2010)	89
9.4. Utilisation des formules de transport solide et limites	90
10. Vitesse de début d'entraînement	93

Chapitre 3

Formes naturelles des rivières, ripisylve et évolution des berges

1. Définitions fondamentales	95
1.1. Lit mineur, lit moyen, lit majeur	95
1.2. Rive, berge	96
1.3. Ripisylve	97
1.4. Alluvions et substratum	99
2. Rôles de la ripisylve sur la vie des cours d'eau	100
3. Relations entre dimensions du cours d'eau et hydrologie	101
3.1. Débit dominant	101
3.2. Variables de contrôle et variables de réponse	103
3.3. Équilibre dynamique	104
4. Évolutions dans les courbes	105
5. Styles fluviaux	107
5.1. Formes en plan	108

5.1.2. Rivières en tresses	108
5.1.3. Rivières divagantes	110
5.1.4. Rivières à méandres	111
5.1.5. Apport des cartes et des photographies aériennes	113
5.2. Profil en long des cours d'eau	115
5.2.1. Cas des rivières à méandres : l'alternance seuils-mouilles	116
5.2.2. Cas des cours d'eau de montagne : profil en marches	118
5.2.3. Cas des rivières en tresses	121
5.2.4. Formes du profil en long et dissipation d'énergie	121
5.2.5. Évolutions irréversibles du profil en long	122
5.2.6. Apport des profils en long anciens	123
5.3. Synthèse sur les styles fluviaux et les formes en plan comme en profil	125
6. Mécanismes d'évolution des méandres	126
7. Mécanismes d'évolution des berges	129
7.1. Principes généraux d'évolution des berges	129
7.2. Érosion des berges par le courant	130
7.3. Glissement des berges	135
7.4. Éboulement des berges (ou effondrement)	137
7.5. Déformations des berges dues à un enfoncement du lit	138
7.6. Relations entre érosion et glissement	139
7.7. Autres facteurs aggravants pour la tenue des berges	140
7.8. Rôle de la végétation sur la tenue des berges	140
7.9. Indices aidant au diagnostic des causes de déformation des berges	147
7.10. Conclusion sur la déformation des berges	149
8. Équations du régime	150

Chapitre 4

Conséquences morphologiques des aménagements

1. Évolutions du profil en long	154
1.1. Prélèvements temporaires dans le lit mineur	154
1.2. Prélèvements permanents dans le lit mineur	155
1.3. Élargissement du lit	157
1.3.1. Élargissement du lit sans modification de la rugosité des berges	157
1.3.2. Élargissement du lit avec modification de la rugosité des berges	158
1.4. Enlèvement important de la végétation des berges	159
1.5. Influence des coupures de méandres	160
1.6. Influence des endiguements	161
1.7. Rétrécissement local du lit mineur	163
1.8. Prélèvements permanents dans le lit majeur	164
1.9. Enlèvement des atterrissements	166

1.10. Influence des barrages	167
1.10.1. Influence dans la retenue	167
1.10.2. Dévasement des retenues	169
1.10.3. Influence en amont de la retenue	170
1.10.4. Influence en aval du barrage	170
1.11. Influence des seuils (sans dérivation).	173
1.12. Seuil de dérivation avec restitution	179
1.13. Influence des déversoirs latéraux.	182
1.13.1. Influence généralisée d'un déversoir latéral	182
1.13.2. Influence locale d'un déversoir latéral	183
1.14. Influence des reforestations du bassin versant.	185
1.15. Conclusion morphologique sur les érosions régressive et progressive	186
2. Enlimonage des bancs	188
3. Évolutions morphologiques du lit majeur	189
4. Évolutions du tracé en plan.	190
4.1. Évolution du style fluvial	190
4.2. Évolution du tracé, sans changement du style fluvial	191
5. Évolution globale, en plan et en profil	191
6. Conséquences environnementales des incisions	193
7. Espace de mobilité des rivières actives	194
8. Conclusion sur l'évolution des rivières aménagées	198

Chapitre 5

Stratégie et techniques de gestion et de protection des berges

1. Stratégie de protection ou de non-protection	201
1.1. Point de vue morphologique	202
1.2. Point de vue écologique.	202
1.3. Délimitation de la zone menacée	203
1.4. Étude économique	204
1.5. Conclusion : protéger ou ne pas protéger	204
2. Principes généraux de protection des berges	206
2.1. Cas des tronçons de rivières rectilignes.	206
2.2. Cas de glissements de berge généralisés	208
3. Techniques végétales de protection des berges	210
3.1. Ensemencement	214
3.2. Géosynthétiques enherbés	214
3.3. Tapis vivant	216
3.4. Boutures	217
3.5. Plantations	218
3.6. Plançons.	218
3.7. Fascines	219
3.8. Tressages	220

3.9. Fascines d'hélophytes	221
3.10. Treillis de branches	221
3.11. Épis vivants	221
3.12. Peignes	222
3.13. Tunage	222
3.14. Pieux jointifs	223
3.15. Caissons végétalisés	223
3.16. Recommandations générales	224
4. Matériaux granulaires pour protéger les berges	225
4.1. Enrochements	226
4.1.1. Norme européenne sur les enrochements	226
4.1.2. Trois catégories d'enrochements prévues par la norme	228
4.1.3. Deux standards pour encadrer ou non la dimension moyenne.	229
4.1.4. Fuseaux granulométriques ou blocométriques	229
4.1.5. Propriétés physiques des enrochements	231
4.2. Gabions	232
4.3. Blocs préfabriqués en béton	236
5. Calcul des protections de berges minérales	237
5.1. Stabilité d'ensemble	237
5.2. Résistance des enrochements à la vitesse du courant	238
5.3. Résistance des gabions à la vitesse du courant	240
5.4. Protection du pied des revêtements de berge	242
5.5. Transition granulométrique granulaire	247
5.6. Transition assurée par un géotextile	250
6. Conception des protections de berges vis-à-vis du glissement	252
7. Mise en œuvre des enrochements et des matelas Reno	253
7.1. Mise en œuvre des enrochements	253
7.2. Mise en œuvre des matelas Reno	256
8. Protection indirecte des berges : les épis	256
8.1. Points communs aux deux types d'épis (navigation et protection)	257
8.2. Régularisation d'un cours d'eau en vue de la navigation	258
8.3. Protection des berges par épis	259
8.4. Construction des épis	261
8.5. Surveillance et entretien des épis	262
8.6. Rôle des épis sur la diversité du milieu	262
9. Génie civil ou génie biologique ?	263
10. Suppression des protections de berge	265

Chapitre 6

Cas des rivières endiguées : la fragilité des digues en terre

1. Définitions : digues, zones protégées, zones d'expansion des crues	268
1.1. Digues	268
1.2. Zones protégées et zones d'expansion des crues	271
2. Conséquences des ruptures de digues	272

3. Désordres et ruptures	274
3.1. Dignes en terre	274
3.2. Dignes en maçonnerie ou en béton	276
4. Différents mécanismes de rupture ou de désordre des digues	277
4.1. Rupture par surverse (érosion de surface)	277
4.2. Érosion interne	282
4.2.1. Érosion de conduit	283
4.2.2. Suffusion	283
4.2.3. Érosion de contact	284
4.2.4. Cinétique de l'érosion interne	284
4.2.5. Rôle aggravant des terriers	285
4.2.6. Rôle aggravant des arbres	285
4.2.7. Rôle aggravant des organes traversants	287
4.3. Érosion par le courant	287
4.4. Glissement en masse	289
4.5. Brèches de retour	289
4.6. Glissement du talus côté rivière, à la décrue	290
4.7. Glissement du talus côté vallée, en crue	290
4.8. Glissement du talus côté vallée, en décrue	291
5. Désordres d'origine géomorphologique	291
6. Faiblesses dues aux points singuliers	293
7. Le bilan négatif des digues bordant la rivière	295
8. Construction de digues fluviales nouvelles	295
9. Confortement des digues existantes	297
9.1. Diagnostic préalable	297
9.1.1. Connaissances préalables	297
9.1.2. Reconnaissances géophysiques	298
9.1.3. Reconnaissances géotechniques	299
9.2. Amélioration de la résistance des digues à la surverse	299
9.2.1. Carapaces	300
9.2.2. Autres revêtements	301
9.2.3. Écrans internes aux digues	301
9.3. Prévention de l'érosion interne	302
9.3.1. Érosion interne en tronçon courant	302
9.3.2. Érosion interne au droit de singularités	304
9.4. Affouillement du pied d'une digue en bord immédiat de la rivière	304
9.5. Glissement des talus d'une digue	305
9.6. Cas des constructions enchâssées dans les digues	305
9.7. Cas des mares en pied des digues côté plaine	306
9.8. Traitement des sols à la chaux	306
10. Crue de danger, crue de sûreté, crue de protection	308
10.1. Crue de danger d'une digue	308
10.2. Crue de sûreté d'une zone protégée	308

10.3. Cas d'un déversoir	309
10.4. Crue de protection de la zone protégée	310
11. Déversoirs dans les digues	311
11.1. Détermination de la cote et de la longueur du déversoir	311
11.2. Génie civil	312
11.3. Choix du site	315
11.4. Avantages d'un déversoir	315
11.5. Faut-il toujours un déversoir ?	316
12. Entretien des digues	317

Chapitre 7

Les seuils en rivière

1. Principe général d'un seuil de dérivation	322
2. Rôle du seuil de dérivation sur le transport solide ; choix du site	323
2.1. Transport solide par charriage	324
2.2. Transport solide par suspension	324
2.3. Implantation optimale de la prise	325
3. Types de seuils	327
3.1. Seuils poids en béton ou en maçonnerie	327
3.2. Seuils en enrochements	329
3.3. Seuils en gabions	332
3.4. Seuils mobiles	334
3.5. Seuils en bois	337
4. Fondations des seuils et dissipation de l'énergie	337
4.1. Propriétés mécaniques des terrains de fondation	337
4.2. Étanchéité et stabilité de la fondation d'un seuil poids	338
4.3. Précautions contre l'affouillement aval	339
4.3.1. Cas des seuils sans bassin de protection ni radier aval	340
4.3.2. Cas des seuils en béton à parement aval incliné	341
4.3.3. Cas des seuils en enrochements	343
4.3.4. Cas des seuils verticaux en gabions et à bassin dissipateur	343
4.3.5. Cas des seuils en gradins de gabions et à bassin dissipateur	344
4.3.6. Conclusion sur les protections aval des seuils	344
5. Calcul de stabilité des seuils en enrochements	346
6. Calcul de stabilité des seuils poids	346
7. Dégravement et vanne de chasse	347
8. Protection contre les corps flottants	349
9. Passes à poissons	351
10. Ouvrage de prise (cas d'un seuil de dérivation)	356
10.1. Seuil de prise (ou déversoir latéral)	356
10.2. Vannes de prises	357
10.3. Organes de dessablage	357

10.3.1. Décanteur (à purge discontinue)	358
10.3.2. Dessableur à purge continue	359
10.3.3. Bassin à nettoyage manuel ou mécanique	359
10.4. Protection de l'ouvrage de prise contre les crues	359
11. Impact des seuils sur les nappes	360
12. Problématique des anciens seuils de moulins	361
12.1. Faut-il supprimer ou conserver les seuils anciens ?	363
12.2. Matériaux et types	365
12.3. Mécanismes de dégradation	368
12.4. Techniques de réparation des seuils	370
12.4.1. Réparation d'un seuil affouillé	370
12.4.2. Prévention ou réparation d'un contournement	371
12.4.3. Réparation d'un seuil dont la maçonnerie est disloquée	372
12.4.4. Intervention en cas de circulation d'eau interne	373
12.4.5. Circulation d'eau dans les fondations	373
12.4.6. Traitement de la végétation	374
12.4.7. Aspects environnementaux et esthétiques	374
12.5. Difficultés et risques	374
12.6. Conclusion sur la réparation ou la suppression des seuils anciens	375

Chapitre 8

Rôle et actions de l'homme sur les crues

1. Rôle de l'homme sur les crues	378
1.1. Rôle de l'homme au niveau du bassin versant	378
1.2. Rôle de l'homme au niveau des lits mineur et majeur	380
2. Types de crue et types d'inondation	381
2.1. Inondations de plaine par débordement de cours d'eau	383
2.1.1. Inondations lentes de plaine	383
2.1.2. Inondations rapides de plaine	384
2.2. Inondations de plaine par débordement de nappe	385
2.3. Inondations torrentielles	385
2.4. Inondations par crues éclair	386
2.5. Inondations par ruissellement superficiel	387
2.6. Conséquences des crues selon leur type	388
3. Travaux de réduction de l'aléa crue au niveau du bassin versant	389
3.1. Actions diffuses dans le bassin versant	389
3.2. Actions concentrées dans le bassin versant : les barrages	390
4. Travaux de réduction de l'aléa débordement au niveau du lit	391
4.1. Augmentation de la capacité d'écoulement	391
4.2. Ralentissement des écoulements dans le lit majeur et le lit mineur	393
5. Modification de la vulnérabilité	395
6. Conclusion sur les crues	400

Gestion, aménagement et entretien des cours d'eau

1. Objectifs d'aménagement	409
1.1. Restaurations diverses à vocation hydraulique ou écologique ou morphologique	410
1.2. Typologie d'aménagements par grands types d'objectifs.	413
2. Travaux de protection contre les crues au droit des enjeux	413
2.1. Calibrage	413
2.1.1. Conséquences morphologiques d'un calibrage pour le profil en long	414
2.1.2. Conséquences morphologiques d'un calibrage pour les berges	415
2.1.3. Conséquences d'un calibrage sur les débits de pointe.	416
2.1.4. Conséquences écologiques et paysagères d'un calibrage	417
2.2. Coupures de méandres.	417
2.3. Curage	419
2.3.1. Définitions : curage, vase	419
2.3.2. Aspect réglementaire.	420
2.3.3. Techniques de curage.	421
2.3.4. Causes de l'envasement	421
2.4. Endiguements.	423
2.5. Restauration de rivière (restauration de la capacité d'écoulement)	423
2.6. Entretien de la végétation des berges	428
2.7. Entretien des atterrissements	428
3. Travaux de protection contre les crues en amont des enjeux	428
3.1. Barrages écrêteurs de crue	428
3.2. Bassins écrêteurs de crue	430
3.3. Recul des digues	431
3.4. Transformation d'un espace endigué en zone d'expansion de crues (ZEC).	432
3.5. Aménagement du lit majeur en zone rurale	436
3.6. Absence d'entretien de la végétation du lit mineur	438
4. Gérer la végétation et les embâcles (lits mineur et majeur).	438
4.1. Rôles de la végétation des berges	438
4.2. Embâcles	439
4.2.1. Causes et conséquences des embâcles	439
4.2.2. Gestion des embâcles.	441
4.3. Conciliation des objectifs d'entretien de la végétation.	443
4.4. Mode de gestion de la végétation selon l'objectif	444
5. Gestion des atterrissements	450
5.1. Gestion directe dans le lit mineur	450
5.2. Actions indirectes en amont	453
6. Restauration morphologique	454
6.1. Crues artificielles en aval des barrages	454
6.2. Recharges sédimentaires	455

6.3. Renaturation des tracés de cours d'eau	456
6.3.1. Reméandremments	456
6.3.2. Élargissement de lit	457
6.3.3. Remise en eau de bras morts.	457
6.3.4. Remise à ciel ouvert	458
6.3.5. Recours au génie biologique.	459
6.3.6. Suppression des protections de berge ou des seuils	460
7. Espaces de bon fonctionnement pour la rivière	461
7.1. Espace de mobilité des rivières actives	462
7.2. Espace « rivière-vie-nature »	463
7.3. Bandes riveraines en zone agricole (boisées et/ou enherbées)	463
7.4. Espace de rétention transitoire de l'eau (ou espace de ralentissement)	465
7.5. Conclusion sur les espaces dédiés	467
7.6. Perspective dans l'esprit de l'« espace de bon fonctionnement » ...	468
8. Conclusion sur l'aménagement et la gestion du lit.	470
Conclusion	473
1. Connaître le milieu.....	473
2. ... et les mécanismes naturels.....	474
3. ... pour bien étudier l'impact morphologique des actions projetées....	475
4. ... se protéger des crues, mais en arrêtant l'escalade.....	475
5. ... sans oublier les crues qui vont dépasser la protection.....	476
6. ... et ne pas se tromper sur les objectifs	477
Bibliographie	481
Lexique	491
Index	539