

# Sommaire

Préface	vii
Avant-propos	xi
<b>I Les fondamentaux en hydrologie</b>	<b>1</b>
<b>1 Le cycle de l'eau</b>	<b>3</b>
1.1 Évolution des conceptions du cycle de l'eau . . . . .	4
1.2 Origine de l'eau sur Terre et paléoclimats . . . . .	6
1.3 Le cycle de l'eau aujourd'hui . . . . .	7
1.4 L'eau dans la régulation thermodynamique du globe . . . . .	10
1.4.1 Bilans énergétiques et bilans en eau globaux . . . . .	10
1.4.2 Une représentation zonale : l'eau, correcteur des déséquilibres radiatifs . . . . .	11
1.5 Les grandes circulations atmosphériques . . . . .	14
1.6 Précipitations . . . . .	16
1.7 Climats et régimes hydrologiques . . . . .	18
1.8 Ressources en eau et activités humaines . . . . .	20
1.8.1 Eau verte, eau bleue : les activités humaines et le cycle de l'eau . . . . .	20
1.8.2 Répartition et disponibilité de l'eau . . . . .	23
1.8.3 Les ressources « mobilisables » ou « renouvelables » . . . . .	23
1.8.4 Prélèvements et consommations par grandes classes d'usages . . . . .	24
1.8.5 Utilisation et réutilisation . . . . .	25
1.8.6 Échapper aux limites du bassin versant . . . . .	26
1.8.7 Confrontation ressources-usages : une première approche . . . . .	27
1.8.8 Exercices prospectifs : de la « vision pour l'eau en 2025 » à une vision globale intégrant irrigations pluviales et transferts d'eau virtuelle . . . . .	28
1.8.9 Modéliser les influences anthropiques dans ou en dehors du modèle hydrologique . . . . .	30

1.9	Le cycle de l'eau au cœur du débat autour du changement climatique . . . . .	31
1.9.1	Les mécanismes en jeu . . . . .	32
1.9.2	Les constats globaux concernant pluies et débits . . . . .	34
1.9.3	Les évolutions constatées concernant l'Europe et la France métropolitaine . . . . .	34
1.9.4	Les évolutions futures . . . . .	36
1.10	La gestion des ressources en eau confrontée à des non-stationnarités . . . . .	38
<b>2</b>	<b>Processus physiques à l'échelle des bassins versants</b>	<b>41</b>
2.1	Introduction . . . . .	41
2.1.1	La notion de bassin versant . . . . .	42
2.1.2	Compartiments et processus d'écoulement . . . . .	43
2.1.3	La réponse pluie-écoulement . . . . .	45
2.1.4	Hétérogénéité et complexité du milieu . . . . .	46
2.2	Les échanges entre les sols et l'atmosphère . . . . .	47
2.2.1	L'évapotranspiration . . . . .	47
2.2.2	L'évapotranspiration potentielle . . . . .	48
2.2.3	Les réserves en eau du sol : vision agronomique . . . . .	49
2.2.4	Premiers pas vers les bilans hydrologiques . . . . .	56
2.3	Circulation de l'eau dans les sols et le sous-sol . . . . .	61
2.3.1	Écoulements dans les milieux poreux saturés . . . . .	61
2.3.2	Écoulement de l'eau dans les milieux non saturés . . . . .	64
2.3.3	L'importance des états de surface du sol : la battance . . . . .	68
2.4	Fonctionnement des aquifères souterrains . . . . .	70
2.4.1	Du permanent au transitoire . . . . .	70
2.4.2	Les équations de diffusivité en captif et en libre . . . . .	70
2.4.3	Différences de comportement des nappes libres et captives . . . . .	74
2.4.4	Bilan sur le fonctionnement des aquifères souterrains . . . . .	75
2.4.5	Les aquifères, leur recharge et leur drainage . . . . .	78
2.5	Formation des écoulements sur les bassins versants . . . . .	81
2.5.1	Origine des écoulements en période de crue . . . . .	81
2.5.2	Zones saturées contributives et écoulements préférentiels . . . . .	84
2.6	Analyse et comparaison de quelques hydrogrammes de crues . . . . .	86
2.6.1	Éléments méthodologiques . . . . .	86
2.6.2	Analyse des hydrogrammes de crues . . . . .	88
2.7	Quelques illustrations de la diversité des situations . . . . .	91
2.8	Conclusion . . . . .	93
<b>3</b>	<b>Les crues : hydraulique et morphologie fluviale</b>	<b>95</b>
3.1	Introduction . . . . .	95
3.1.1	Hydraulique et morphologie fluviale : des déterminants pour l'hydrologie opérationnelle . . . . .	95
3.1.2	La rivière : description et fonctionnement . . . . .	97

3.2	Description des crues . . . . .	98
3.2.1	Définition et caractérisation de la crue . . . . .	98
3.2.2	Facteurs aggravants . . . . .	99
3.2.3	Typologie des crues . . . . .	101
3.2.4	Propagation des crues : l'onde de crue . . . . .	105
3.3	Hydraulique fluviale . . . . .	107
3.3.1	Rappels d'hydraulique fluviale appliquée aux crues . . .	107
3.3.2	Modèles déterministes . . . . .	116
3.3.3	Modèles conceptuels . . . . .	127
3.3.4	Modèles empiriques . . . . .	133
3.3.5	Quel modèle utiliser? . . . . .	137
3.4	Morphologie fluviale . . . . .	140
3.4.1	Le transport solide . . . . .	140
3.4.2	Morphodynamique . . . . .	155
3.4.3	Modèles de transport solide et morphologie fluviale . . .	158
3.5	Conclusion . . . . .	162
<b>4</b>	<b>Mesure en hydrologie</b>	<b>165</b>
4.1	Mesure des précipitations . . . . .	165
4.1.1	Mesure de pluie ponctuelle à l'aide de pluviomètres . . .	165
4.1.2	Réseaux pluviométriques . . . . .	169
4.1.3	Ordres de grandeur des valeurs de pluies ponctuelles . .	170
4.1.4	Interpolation spatiale des pluies . . . . .	174
4.1.5	Mesure des pluies par radar . . . . .	179
4.1.6	Mesure satellitaire . . . . .	187
4.1.7	Mesure des précipitations solides et le suivi des stocks de neige et de glace . . . . .	188
4.2	Mesure des écoulements . . . . .	189
4.2.1	Introduction . . . . .	189
4.2.2	Choix du site d'installation d'une station limnimétrique	192
4.2.3	Les dispositifs limnimétriques . . . . .	197
4.2.4	La pratique du jaugeage . . . . .	198
4.2.5	Établissement de la courbe de tarage . . . . .	208
4.2.6	Construction et critique des chroniques de débits . . . .	217
4.2.7	Réseau hydrométrique et ordres de grandeur de débits .	217
4.3	Mesures piézométriques et humidité des sols . . . . .	219
4.3.1	Mesure de l'état et des propriétés des aquifères . . . . .	219
4.3.2	Mesure de l'état et des propriétés des sols . . . . .	221
4.4	Conception et gestion d'un réseau hydrométrique . . . . .	225
4.5	Conclusion	228

<b>5</b>	<b>Principes de modélisation en hydrologie</b>	<b>233</b>
5.1	Réflexions préliminaires . . . . .	233
5.2	Notions de base et vocabulaire . . . . .	234
5.2.1	Structure d'un modèle hydrologique . . . . .	234
5.2.2	D'un modèle hydrologique à l'autre . . . . .	236
5.2.3	Modèles déterministes et modèles stochastiques . . . . .	237
5.2.4	Modèles à temps continu ou temps discret . . . . .	239
5.2.5	Utilité des modèles en hydrologie . . . . .	241
5.3	Incertitudes, erreurs et qualités d'un modèle hydrologique . . . . .	242
5.3.1	Erreurs et incertitudes . . . . .	242
5.3.2	Qualités d'un modèle . . . . .	244
5.4	Élaboration d'un modèle hydrologique . . . . .	246
5.4.1	Choix d'un modèle . . . . .	246
5.4.2	Le calage : approche traditionnelle . . . . .	246
5.4.3	Le calage : approche bayésienne . . . . .	247
5.4.4	La validation . . . . .	251
5.4.5	Traitement des incertitudes en cours d'exploitation . . . . .	252
5.5	Retour sur la stationnarité temporelle . . . . .	253
5.5.1	Types et causes de non-stationnarités . . . . .	254
5.5.2	Contrôle de stationnarité et détection de non-stationnarités . . . . .	257
5.5.3	Traitement des non-stationnarités . . . . .	258
5.6	Conclusion . . . . .	259
<b>6</b>	<b>Modélisation pluie-débit et hydrogéologique</b>	<b>263</b>
6.1	Les débuts de la modélisation hydrologique . . . . .	264
6.2	Le modèle fondé sur les « lois de la physique » . . . . .	266
6.2.1	Enseignements de la modélisation d'une maquette de versant . . . . .	267
6.2.2	Extrapolation à un versant élémentaire théorique . . . . .	273
6.3	Un point de vue pragmatique : l'approche fonctionnelle . . . . .	276
6.3.1	Les défis de la modélisation hydrologique . . . . .	276
6.3.2	Décomposition théorique d'un hydrogramme de réponse aux pluies . . . . .	277
6.4	Modélisation des échanges de surface . . . . .	279
6.4.1	Interpolation et distribution spatiale . . . . .	279
6.4.2	Calcul de précipitation totale : modèles de fonte de neige ou de glace . . . . .	279
6.4.3	Estimation de l'ETR et de l'état hydrique des sols . . . . .	281
6.5	Modélisation des hydrogrammes de réponse aux pluies . . . . .	284
6.5.1	Les modèles de type réservoir . . . . .	285
6.5.2	Fonctions de production . . . . .	287
6.5.3	Fonctions de transfert . . . . .	292
6.6	Modélisation des écoulements souterrains . . . . .	297

6.6.1	Modèles simplifiés de récession et tarissement . . . . .	297
6.6.2	Modélisation détaillée des aquifères profonds . . . . .	298
6.7	Exemples de modèles hydrologiques . . . . .	310
6.7.1	Un modèle global à réservoirs : GR4 . . . . .	310
6.7.2	Un modèle distribué événementiel : Cinécar . . . . .	312
6.7.3	Un modèle distribué continu : SIM (SAFRAN ISBA MOD-COU) . . . . .	314
6.7.4	Les modèles linéaires (ARMAX) et les réseaux de neurones	316
6.8	Mise en œuvre et utilisation des modèles hydrologiques . . . . .	319
6.8.1	Le modèle comme outil d'aide à l'interprétation des observations . . . . .	319
6.8.2	Le modèle comme outil de simulation . . . . .	320
6.9	Retour d'expérience sur l'utilisation des modèles hydrologiques	326
6.9.1	Mérites comparés des modèles distribués et des modèles globaux . . . . .	326
6.9.2	Mérites comparés des modèles de prévision hydrologique	327
6.9.3	Limites des modèles hydrologiques . . . . .	330
6.10	Conclusion . . . . .	331

## **7 Prédétermination des crues 333**

7.1	Évaluer un risque de crue : pourquoi et comment ? . . . . .	334
7.1.1	Les notions de risque et de prédétermination des crues . . . . .	334
7.1.2	Variable aléatoire d'étude associée à l'événement « crue »	336
7.1.3	Analyses statistiques : approche classique et approche bayésienne . . . . .	338
7.1.4	Notion de période de retour . . . . .	341
7.1.5	Répartition des crues dans le temps . . . . .	344
7.2	Principes et conditions d'application des analyses statistiques . . . . .	346
7.2.1	Inférence statistique . . . . .	346
7.2.2	Collecte et analyse critique des données. . . . .	347
7.2.3	Constitution d'un échantillon de travail . . . . .	348
7.2.4	Hypothèses et vérification . . . . .	349
7.2.5	Choix d'un modèle : lois classiquement utilisées en hydrologie . . . . .	356
7.2.6	Estimation des paramètres d'une loi théorique . . . . .	366
7.2.7	Intervalles de confiance . . . . .	369
7.2.8	Exemple d'estimations pour la Loi Normale . . . . .	372
7.2.9	Qualité d'ajustement d'une loi théorique à un échantillon observé . . . . .	373
7.2.10	Prise en compte de l'information historique . . . . .	378
7.2.11	Incertitudes . . . . .	381
7.2.12	Les analyses multivariées . . . . .	387
7.3	Principales méthodes de prédétermination des débits de crue . . . . .	387
7.3.1	La méthode des « Maxima annuels » . . . . .	388
7.3.2	La méthode du « Renouvellement » . . . . .	391

7.3.3	La méthode du « Gradex » . . . . .	397
7.3.4	Autres méthodes faisant appel à l'analyse statistique . .	403
7.3.5	Méthodes ne faisant pas, ou peu, appel à l'analyse statistique . . . . .	409
7.4	Fil conducteur d'une étude de prédétermination . . . . .	410
<b>8</b>	<b>Prédétermination des étiages</b>	<b>413</b>
8.1	L'approche globale débit-durée . . . . .	413
8.2	Les principaux indicateurs d'étiages . . . . .	415
8.3	Analyse statistique des indicateurs d'étiages . . . . .	417
8.4	Les courbes « débit-durée-fréquence » . . . . .	421
8.5	Conclusion sur la prédétermination des étiages . . . . .	426
<b>9</b>	<b>Prévision hydrologique : cas général</b>	<b>427</b>
9.1	Caractéristiques générales de l'exercice de prévision . . . . .	427
9.2	Contexte de la prévision des étiages . . . . .	429
9.2.1	Les principales phases de la prévision des étiages . . . .	430
9.2.2	Les phénomènes physiques propres aux étiages . . . . .	432
9.2.3	Les échelles temporelles . . . . .	433
9.2.4	La prévision des niveaux des nappes souterraines . . . .	434
9.2.5	Prévisions du bon indicateur débits d'étiage . . . . .	435
9.2.6	Les modèles utilisés . . . . .	436
9.2.7	La technique des scénarios . . . . .	439
9.3	Prévision des débits journaliers en toutes saisons . . . . .	442
9.4	Traitements des écarts . . . . .	444
<b>10</b>	<b>Prévisions hydrologiques en période de crue</b>	<b>447</b>
10.1	La prévision des crues : principes généraux . . . . .	447
10.1.1	La possibilité de prévoir les crues : trois délais d'anticipation potentiels . . . . .	448
10.1.2	Le temps réel change tout . . . . .	449
10.1.3	Contenu de la prévision des crues . . . . .	450
10.2	Information hydrométéorologique en temps réel . . . . .	452
10.2.1	L'information météorologique . . . . .	452
10.2.2	L'information hydrologique . . . . .	455
10.2.3	Prévision d'ensemble (EPS) . . . . .	460
10.3	Les modèles de prévision des crues . . . . .	461
10.3.1	Les modèles de prévision utilisés . . . . .	461
10.3.2	Techniques de scénarios . . . . .	466
10.3.3	Tester un modèle de prévision et croiser l'information .	467
10.3.4	Superviseurs et plateformes de modélisation . . . . .	468
10.4	Le retour d'expérience . . . . .	470
10.5	Analyse et traitement des erreurs . . . . .	471
10.5.1	Types d'erreurs . . . . .	471
10.5.2	Détection des erreurs et des sources d'incertitude .	471

10.5.3	Filtrage et assimilation de données . . . . .	473
10.5.4	Procédures multi-modèles . . . . .	474
10.6	Constitution d'un service opérationnel de prévision hydrologique	475
10.6.1	Équipe chargée du réseau métrologique . . . . .	475
10.6.2	L'équipe chargée des modèles et des outils de prévision	475
10.6.3	L'équipe des prévisionnistes . . . . .	476
10.7	Pistes de progrès et évolutions actuelles . . . . .	477
<b>11</b>	<b>Gestion des réserves hydrauliques</b>	<b>481</b>
11.1	Introduction . . . . .	481
11.2	La gestion au jour le jour d'une réserve hydraulique . . . . .	483
11.2.1	Le système physique . . . . .	485
11.2.2	Les usages, les besoins, les enjeux et leur quantification	488
11.2.3	Les aléas . . . . .	491
11.2.4	Les décisions et leur « optimisation » en avenir plus ou moins incertain . . . . .	494
11.3	Exemples de gestion court terme en avenir certain . . . . .	495
11.3.1	Le cas mono-usage et fonction de coût connue à chaque instant . . . . .	495
11.3.2	Un cas encore simple : multi-usage avec fonction de coût commune . . . . .	499
11.3.3	Un cas fréquent : multi-usage avec optimisation sous contrainte . . . . .	501
11.3.4	Les gestions multi-réservoirs ou de vallée . . . . .	504
11.4	Exemples de gestion court terme en avenir incertain . . . . .	506
11.4.1	Le cas favorable : fonction(s) de coût connue à chaque instant . . . . .	506
11.4.2	Multi-usage et optimisation sous contrainte en avenir incertain . . . . .	510
11.4.3	Les approches globales . . . . .	514
11.5	La gestion long terme et le dimensionnement des réservoirs . . . . .	519
11.5.1	Simuler la gestion long terme . . . . .	519
11.5.2	Le bilan économique et le dimensionnement des réservoirs	521
11.5.3	Impacts des incertitudes et valeur de l'information . . . . .	529
11.5.4	La gestion des réserves souterraines . . . . .	534
11.6	Environnement et gestion de l'eau . . . . .	539
11.6.1	L'environnement, partie prenante de la gestion des réservoirs . . . . .	539
11.6.2	Formaliser des objectifs pour la gestion . . . . .	540
11.6.3	Protection par la norme et l'interdiction . . . . .	542
11.6.4	La dimension économique des services environnementaux	543
11.6.5	Les valeurs de référence ou tutélaires . . . . .	544
11.6.6	La question du taux d'actualisation, de la résilience et des irréversibilités . . . . .	545
11.6.7	Méthodes de monétarisation . . . . .	547

11.6.8	Des exemples de valeurs environnementales positives . .	548
11.6.9	Explorer et quantifier pour partager? . . . . .	548
11.7	Conclusion . . . . .	549

<b>Bibliographie</b>	<b>551</b>
----------------------	------------

<b>Index</b>	<b>583</b>
--------------	------------

Matériel protégé par le droit d'auteur



# Table des annexes

Les annexes se trouvent sur le DVD-Rom joint à l'ouvrage.

## Chapitre 1

- 1.1 Eau et mythes
- 1.2 Émergence des conceptions modernes du cycle eau
- 1.3 Origines de l'eau sur Terre
- 1.4 Paléoclimats
- 1.5 L'eau dans la régulation thermodynamique de la planète
- 1.6 Les nuages et les précipitations
- 1.7 Les climats et régimes hydrologiques
- 1.8 La démarche prospective « Vision pour 2025 »
- 1.9 Exemples de déséquilibres besoins-ressources et de leurs conséquences
- 1.10 Le cycle de l'eau au cœur du changement climatique

## Chapitre 2

- 2.1 Synthèse bibliographique sur les processus de genèse des écoulements
- 2.2 L'eau, le sol, la plante
- 2.3 Perspectives de recherche : ce que l'on ne sait pas encore

## Chapitre 3

- 3.1 Les modèles linéaires régressifs et autorégressifs

## Chapitre 4

- 4.1 Jaugeage de la Seine à Paris par E. Belgrand en 1875
- 4.2 Essais de pompage

## Chapitre 5

- 5.1 Application des réseaux de neurones en hydrologie
- 5.2 Cascades multiplicatives et multifractales
- 5.3 Chaos déterministe et hydrologie
- 5.4 Rappels sur les processus hydrologiques et sur le contrôle de leur stationnarité
- 5.5 Calage de modèle et approches bayésiennes

## Chapitre 6

- 6.1 Présentation étude de cas hydrologie
- 6.2 Étude de cas hydrologie fichiers version Linux
- 6.3 Étude de cas hydrologie PC
- 6.4 Correction étude de cas hydrologie
- 6.5 Modélisation hydrogéologique de la nappe de Beauce

## Chapitre 7

- 7.1 Retour sur l'acceptabilité du risque, le dimensionnement économique d'ouvrages, et l'utilisation de normes
- 7.2 Discussion à propos de la variable d'étude et de la période de retour
- 7.3 Probabilité d'observer plusieurs crues de période de retour  $T$  pendant une période de  $n$  années.
- 7.4 Les méthodes rationnelles
- 7.5 Mémento de quelques notions de probabilités et de statistique utiles en prédétermination des crues
- 7.6 Principe de la méthode PMF (probable maximum flood)
- 7.7 Cas d'étude : prédétermination des débits de la Garonne à Mas d'Agenais
- 7.8 Logiciel DONNÉES de traitement des données de la Garonne à Mas d'Agenais
- 7.9 logiciel MAXAN de prédétermination des débits de crue par la méthode des Maxima Annuels
- 7.10 Logiciel RENOU de prédétermination des débits de crue par la méthode du Renouvellement
- 7.11 Logiciel PEKATETO d'estimation de la probabilité d'observer  $k$  crues  $Q_T$  en  $n$  années
- 7.12 Prédétermination des crues de l'Ardèche à Sauze par la méthode du Gradex

- 7.13 Calculs complémentaires
- 7.14 Inférence statistique bayésienne, exemple de prise en compte d'information historique
- 7.15 Théorie des valeurs extrêmes et ses limites
- 7.16 Réponses aux exercices

## Chapitre 9

- 9.1 Prévion pour un processus de Poisson filtré
- 9.2 Le modèle de prévion des débits de la Charente

## Chapitre 10

- 10.1 Le système de surveillance et de prévions hydrométéorologiques d'EDF
- 10.2 Cartes de vigilance crues et informations pluviométriques utilisées par le SCHAPI
- 10.3 ATelier HYdrologique Spatialisé (ATHYS)
- 10.4 Marine
- 10.5 Modèle de prévion de crues GRP
- 10.6 Mascaret
- 10.7 Sophie, un outil d'aide à la prévion des crues
- 10.8 Exemples de résultats obtenus avec des méthodes d'assimilation des données
- 10.9 Modèle MORDOR

## Chapitre 11

- 11.1 Bref historique des aménagements hydrauliques français
- 11.2 Algorithme de Bellman en avenir certain
- 11.3 Principes de programmation linéaire
- 11.4 Méthode du fil tendu
- 11.5 Algorithme de Bellman en avenir incertain
- 11.6 Risque et changement géophysique
- 11.7 Serre-Ponçon et le bassin de la Durance
- 11.8 La régularisation du bassin de la Seine
- 11.9 Le tableau de bord de la ressource en eau de la Charente (TBRE).
- 11.10 Gestion de l'Albien et du Néocomien

