

José Llamas

HYDROLOGIE GÉNÉRALE

Principes et applications

2^e édition



gaëtan morin
éditeur

TABLE DES MATIÈRES

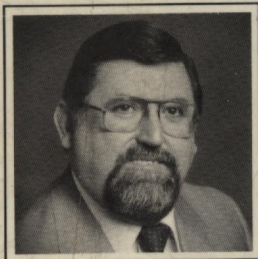
REMERCIEMENTS	VII
AVANT-PROPOS	IX
LISTE DES SYMBOLES	XVII
CHAPITRE 1: Définitions et quelques principes d'hydrométéorologie	1
1.1 HISTORIQUE	1
1.2 DÉFINITIONS ET DIVISIONS DE L'HYDROLOGIE	2
1.3 PROPRIÉTÉS DE L'EAU COMME RESSOURCE NATURELLE	5
1.3.1 États de l'eau dans la nature	5
1.3.2 Mécanisme du mouvement de l'eau dans la nature	6
1.4 LOIS DU MOUVEMENT DE L'EAU DANS LA NATURE	8
1.5 EAU DANS L'ATMOSPHÈRE	9
1.5.1 Paramètres fondamentaux	9
1.5.2 Influence de la température sur la stabilité et le mouvement des masses d'air	22
1.6 CLIMAT	26
1.6.1 Définition	26
1.6.2 Classification des climats	27
1.7 MISES EN APPLICATION	43
RÉFÉRENCES	45
CHAPITRE 2: Définitions des caractéristiques physiques et physiographiques des bassins-versants	47
2.1 LE BASSIN-VERSANT	47
2.1.1 Caractéristiques physiographiques des bassins	48
2.1.2 Construction du réseau d'isochrones	49
2.1.3 Caractéristiques physiques	50
2.1.4 Puissance caractéristique d'une rivière	65
2.2 APPLICATIONS	66
RÉFÉRENCES	68
CHAPITRE 3: Notions de probabilité et d'analyse statistique	69
3.1 INTRODUCTION	69
3.2 RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE PROBABILITÉ ET D'ANALYSE STATISTIQUE	69
3.2.1 Définitions	69
3.2.2 Valeurs caractéristiques d'un échantillon et d'une population	71
3.2.3 Valeurs caractéristiques de l'échantillon	71
3.3 TYPES DE FONCTIONS DE DISTRIBUTION (OU DE DENSITÉ) EN HYDROLOGIE	76
3.3.1 Fonctions avec un nombre réduit de paramètres	76
3.3.2 Fonctions avec un nombre supérieur de paramètres	96
3.3.3 Fonctions de distribution ensemble de deux variables hydrologiques	102
3.4 Valeurs extrêmes d'une variable	106
3.5 THÉORIE GÉNÉRALE DE L'AJUSTEMENT STATISTIQUE	117
3.5.1 Méthode des moments	117
3.5.2 Méthode du maximum de vraisemblance	119
3.5.3 Intervalles de confiance et bandes de confiance	121
3.6 TEST D'AJUSTEMENT: TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	122
3.7 MISE EN APPLICATION	125
3.7.1 Application de la loi normale dans la détermination de la période de retour	125

3.7.2	Exemple d'ajustement d'un échantillon selon la loi de Goodrich	125
3.7.3	Ajustement de plusieurs types de courbes pour le calcul des fréquences des valeurs extrêmes	129
RÉFÉRENCES		131
CHAPITRE 4: Corrélation et analyse des données hydrologiques		133
4.1	DÉFINITIONS	133
4.1.1	Corrélation orthogonale	136
4.1.2	Corrélation linéaire	138
4.1.3	Autres types de corrélation	139
4.2	COMPLÉMENT CRITIQUE DES DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES	144
4.2.1	Analyse primaire de qualité	144
4.2.2	Complément statistique des données	145
4.2.3	Analyse séquentielle des données hydrologiques	149
4.3	PROCESSUS, VARIABLES ET SÉRIES	161
4.3.1	Définitions	161
4.3.2	Valeurs caractéristiques d'une série chronologique	162
4.3.3	Lissage des séries chronologiques	165
4.4	TEST D'HOMOGENÉITÉ	166
4.4.1	Approche générale	166
4.4.2	Test d'homogénéité d'après la distribution de Gumbel	170
4.4.3	Test d'homogénéité d'après la distribution de Laplace	173
4.5	MISE EN APPLICATION	174
RÉFÉRENCES		186
CHAPITRE 5: Précipitations: analyse et mesure		189
5.1	INTRODUCTION	189
5.2	CONDENSATION DE LA VAPEUR D'EAU	189
5.2.1	Point de rosée	189
5.2.2	Types de condensation	190
5.3	TYPES DE PRÉCIPITATIONS	191
5.3.1	Précipitations cycloniques	191
5.3.2	Précipitations de convection	192
5.3.3	Précipitations orographiques	192
5.4	RELATION ENTRE LES PRÉCIPITATIONS ET LE RELIEF	192
5.5	VOLUME TOTAL DES PRÉCIPITATIONS D'UNE RÉGION	193
5.5.1	Méthode de Horton	194
5.5.2	Méthode de la moyenne arithmétique	194
5.5.3	Méthode des isohyètes	195
5.5.4	Méthode de Thiessen	195
5.5.5	Méthode des deux axes	196
5.5.6	Méthode des éléments finis	198
5.6	CALCUL DE LA COURBE HAUTEUR-SUPERFICIE-DURÉE D'UNE AVERSE	205
5.7	ANALYSE DES FRÉQUENCES	205
5.8	ANALYSE DES PLUIES MAXIMALES	207
5.9	PRÉCIPITATIONS MAXIMALES PROBABLES (PMP)	209
5.10	INTERPOLATION DES DONNÉES RELATIVES AUX PRÉCIPITATIONS	210
5.11	CALCUL DU RISQUE	210
5.12	CALCUL DU RÉSEAU PLUVIOMÉTRIQUE OPTIMAL	212
5.13	ANALYSE STATISTIQUE POUR COMPLÉTER LES DONNÉES MANQUANTES	216
5.14	MISES EN APPLICATION	218
5.14.1	Calcul des précipitations moyennes sur un bassin suivant différentes méthodes	218
5.14.2	Application de la méthode d'éléments finis au calcul des précipitations moyennes	223
5.14.3	Analyse hauteur-superficie-durée	225
5.14.4	Optimisation d'un réseau pluviométrique	231
RÉFÉRENCES		233

CHAPITRE 6: Évaporation, évapotranspiration et sublimation	235
6.1 ÉVAPORATION COMME PROCESSUS PHYSIQUE	235
6.2 MESURE DE L'ÉVAPORATION	237
6.2.1 Méthodes directes	238
6.2.2 Méthodes empiriques	238
6.2.3 Méthodes analytiques	240
6.3 TRANSPIRATION	246
6.4 MESURE DE LA TRANSPIRATION	246
6.4.1 Méthode hygrométrique	246
6.4.2 Méthode utilisant les indicateurs	246
6.4.3 Méthode utilisant les appareils de mesures directes	247
6.4.4 Méthode utilisant un bassin expérimental	247
6.4.5 Méthode empirique	247
6.5 ÉVAPOTRANSPIRATION	248
6.6 MESURE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION	249
6.6.1 Méthode de Hamon	249
6.6.2 Méthode de Thornthwaite	250
6.6.3 Méthode de Blaney et Criddle	250
6.6.4 Méthode de Turc	252
6.7 INTERCEPTION	253
6.8 SUBLIMATION	256
6.9 MISES EN APPLICATION	257
RÉFÉRENCES	268
CHAPITRE 7: Infiltration et eaux souterraines	271
7.1 DÉFINITION	271
7.2 MESURE DE L'INFILTRATION	272
7.2.1 Infiltromètres	272
7.2.2 Analyse hydrographique	272
7.3 INDICES D'INFILTRATION	277
7.4 MOUVEMENTS DES EAUX SOUTERRAINES	278
7.4.1 Principes fondamentaux	278
7.4.2 Définitions	279
7.4.3 Théorie des puits	281
7.5 MISES EN APPLICATION	294
7.5.1 Calcul d'une courbe d'infiltration	294
7.5.2 Essai de pompage	301
RÉFÉRENCES	308
CHAPITRE 8: Ruissellement	311
8.1 DÉFINITIONS ET MESURES	311
8.2 RUISSELLEMENT SUPERFICIEL	312
8.2.1 Vitesse moyenne	312
8.2.2 Couverture végétale	312
8.3 TYPES D'ÉCOULEMENT	315
8.4 COURBE DE TARAGE	316
8.5 PLANIFICATION D'UN RÉSEAU DE STATIONS DE JAUGEAGE	321
8.6 DISTRIBUTION CHRONOLOGIQUE DE L'ÉCOULEMENT	324
8.6.1 Rappel sur le mécanisme du ruissellement	324
8.6.2 Forme générale de l'hydrogramme	326
8.6.3 Séparation des différentes composantes de l'écoulement	333
8.7 ESTIMATION DE LA POINTE DE L'HYDROGRAMME	335
8.7.1 Méthode rationnelle	335
8.7.2 Méthodes empiriques	339
8.7.3 Hydrogramme en échelons	339

8.8	HYDROGRAMME UNITAIRE	343
8.8.1	Définition	343
8.8.2	Hydrogramme en S	344
8.8.3	Principes de la méthode de l'hydrogramme unitaire	344
8.8.4	Construction de l'hydrogramme unitaire à partir des données de précipitations et de débit	344
8.8.5	Construction de l'hydrogramme unitaire à partir des averses complexes	345
8.8.6	Critique	346
8.9	THÉORIE DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE INSTANTANÉ (HUI)	346
8.9.1	Rappel de statistiques	346
8.9.2	Principe fondamental de l'hydrogramme unitaire instantané	349
8.9.3	Calcul de l'hydrogramme unitaire instantané	351
8.10	HYDROGRAMME STANDARD	354
8.10.1	Hydrogramme standard à décroissance exponentielle	355
8.10.2	Hydrogramme standard à décroissance hyperbolique	357
8.11	AUTRES MÉTHODES	360
8.11.1	Méthode Soil Conservation Service, Department of Agriculture (SCS)	360
8.11.2	Hydrogramme synthétique	362
8.12	DÉBIT TURBINABLE D'UNE RIVIÈRE	364
8.13	MISES EN APPLICATION	366
8.13.1	Calcul d'un hydrogramme unitaire à partir d'une averse isolée	366
8.13.2	Calcul d'un hydrogramme unitaire instantané	376
	RÉFÉRENCES	380
	CHAPITRE 9: Courbes de remous et laminage des crues	383
9.1	DÉFINITIONS	383
9.2	COURBES DE REMOUS	385
9.3	LAMINAGE DES CRUES	388
9.3.1	Laminage à travers un réservoir	388
9.3.2	Laminage d'une onde de crue dans un tronçon de rivière par la méthode de Muskingum	391
9.3.3	Application de la méthode de Muskingum avec des coefficients variables	393
9.4	MISES EN APPLICATION	396
9.4.1	Laminage d'un hydrogramme de crue	396
	RÉFÉRENCES	412
	CHAPITRE 10: Neige: formation, propriétés et fonte	415
10.1	INTRODUCTION	415
10.2	FORMATION DE LA NEIGE	416
10.2.1	Nucléation hétérogène	416
10.2.2	Nucléation homogène	418
10.3	CARACTÉRISTIQUES DES CRISTAUX DE NEIGE	418
10.4	ÉVOLUTION DU COUVERT NIVAL	421
10.4.1	Métamorphose destructive	421
10.4.2	Métamorphose constructive	423
10.4.3	Métamorphose de fusion	424
10.4.4	Profil stratigraphique	424
10.5	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA NEIGE	425
10.5.1	Masse volumique	425
10.5.2	Porosité et indice des vides	425
10.5.3	Perméabilité	427
10.5.4	Résistance de la neige dans le domaine élastique	429
10.5.5	Résistance à la compression	429
10.5.6	Résistance à la tension	431
10.5.7	Résistance au cisaillement	431
10.5.8	Dureté de la neige	432
10.5.9	Propriétés radiantes de la neige	433
10.5.10	Conductivité	435
10.5.11	Température du couvert de neige	436
10.5.12	Contenu en eau	438

10.6	ÉCOULEMENT DE L'EAU À L'INTÉRIEUR DU MASSIF DE NEIGE	440
10.7	DYNAMIQUE DE LA FONTE DE NEIGE	441
10.7.1	Bilan des échanges énergétiques du couvert	442
10.8	CALCUL DE LA FONTE PAR DES ÉCHANGES THERMIQUES	446
10.9	CALCUL DE LA FONTE PAR RÉGRESSION AVEC DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES	449
10.10	MISE EN APPLICATION	450
	RÉFÉRENCES	450
CHAPITRE 11: Modèles mathématiques en hydrologie		453
11.1	DÉFINITIONS	453
11.2	ÉTAPES DANS L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE MATHÉMATIQUE	456
11.2.1	Identification	456
11.2.2	Calibration	456
11.2.3	Validation	456
11.2.4	Limites d'application	457
11.3	CLASSIFICATION DES MODÈLES MATHÉMATIQUES	457
11.3.1	Modèles de non-optimisation	459
11.3.2	Modèles d'optimisation	460
11.3.3	Quelques modèles déterministes en hydrologie	466
11.3.4	Modèles de génération stochastique	477
11.4	MODÈLES MATHÉMATIQUES DE PLUIE	481
11.4.1	Définitions	481
11.5	ANALYSE STATISTIQUE DU PROBLÈME DE LA SÉCHERESSE RÉGIONALE	494
11.5.1	Définition du problème et des variables en jeu	494
11.5.2	Analyse mathématique	497
11.5.3	Durée probable d'une sécheresse	499
11.5.4	Sévérité d'une sécheresse et d'un surplus	499
11.6	MISES EN APPLICATION	503
11.6.1	Calcul de la capacité optimale d'un réservoir	503
	RÉFÉRENCES	509



José Llamas est professeur titulaire au Département de génie civil de l'Université Laval. Il est responsable du programme de recherches en hydrologie et de l'enseignement de cette discipline au niveau du premier cycle, de la maîtrise et du doctorat. Ingénieur civil, membre de l'Ordre des ingénieurs du Québec, il a obtenu en 1968 un doctorat (Ph.D.) de l'Université de l'État du Colorado (États-Unis).

À l'emploi du ministère des Richesses naturelles (aujourd'hui ministère de l'Environnement) du Québec, il a été directeur du Service de l'aménagement hydraulique en 1969 et en 1972. Professeur à l'Université Laval depuis 1972, il a été, pendant sept ans (1975-1982), directeur du Centre de recherche sur l'eau (CENTREAU) et est professeur titulaire depuis 1976.

Ses travaux de recherche portent sur la modélisation mathématique en hydrologie nordique et sur la mise au point et l'adaptation aux conditions nordiques des modèles de gestion des ressources hydriques.

Il a participé à de nombreuses missions scientifiques à titre de consultant pour l'Organisation des Nations Unies (ONU, PNUD, UNESCO et OMM), pour l'Agence canadienne de développement international (ACDI), le Centre de recherche pour le développement international (CRDI), la Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), etc.

Enfin, José Llamas est le représentant canadien du bureau de direction de l'Association internationale des ressources en eau (AIRE) et il est membre de quelque quinze organismes scientifiques internationaux.

HYDROLOGIE GÉNÉRALE

Principes et applications

2^e édition

Ce volume s'adresse aux étudiants en sciences physiques de premier cycle et aux diplômés. Il peut également intéresser les spécialistes travaillant en référence, les spécialistes travaillant en référence, les ressources hydriques.

Dans les trois premiers chapitres, l'auteur expose les caractéristiques et les propriétés fondamentales de l'hydrologie; il étudie les processus de base de plusieurs phénomènes hydrologiques (précipitation, ruissellement); il fait aussi une révision sommaire des propriétés statistiques des variables hydrologiques. Le chapitre 4 présente d'abord la corrélation entre variables hydrologiques avec un examen sur les caractéristiques des échantillons, puis une étude d'homogénéité régionale. Les quatre chapitres suivants portent, de façon détaillée, sur les composantes principales du cycle hydrologique: précipitation, évaporation, infiltration et ruissellement. Au chapitre 9, l'auteur traite de certains aspects de l'écoulement non permanent en rivières (courbes de remous) et de l'évolution des hydrogrammes de ruissellement (laminage). Dans le chapitre 10, il présente une analyse des caractéristiques physiques de la neige et du couvert nival, ainsi que le processus de fonte printanière. Finalement, au chapitre 11, l'auteur fait une synthèse des modèles mathématiques existants les plus couramment utilisés à l'heure actuelle.

Comme ce volume est avant tout un outil pédagogique, il comporte un grand nombre d'exemples qui contribuent à clarifier certains concepts et à donner un caractère très pratique au contenu général de l'ouvrage.



9 782891 054850

ISBN 2-89105-485-7