



n° 14363

Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux

Septembre 1989

CENTRE NATIONAL DU MACHINISME AGRICOLE, DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORETS
Groupement Antony

Division : «Hydrologie, hydraulique fluviale et souterraine»

BP 121, 92164 Antony Cedex ; Tél. : (1) 40 96 61 21 ; Télex : 632 672 F ; Télécopie : (1) 40 96 60 36

AVANT-PROPOS

Le Ministère de l'Agriculture et le CEMAGREF ont depuis longtemps apporté une attention particulière aux problèmes touchant aux ressources en eau, ce qui est justifié par l'importance de ce facteur dans l'espace rural.

Ce document tente de résumer de façon homogène les nombreux apports de l'équipe qui, au CEMAGREF, a la charge de faire progresser l'application de l'hydrologie en matière d'aménagement du territoire et dont la création a été l'oeuvre de Robert HLAWEK puis d'Etienne COLIN et de Guy OBERLIN. Les méthodes développées s'appuient sur les données collectées sur le bassin représentatif de l'ORGEVAL et sur l'ensemble de la banque AHRMA que le Ministère de l'Agriculture a mise sur pied grâce aux efforts patients des Services Régionaux d'Aménagement des Eaux. (AHRMA : Annuaire Hydrométrique du Réseau du Ministère de l'Agriculture, actuellement banque HYDRØ).

Tout cela nécessite au préalable des données d'observation. Leur obtention est fondamentale, complexe et coûteuse, cependant les techniques correspondantes ne sont pas décrites dans le présent document.

Certains chapitres sont suivis d'une liste de documents. Ces documents portent exclusivement sur des textes élaborés au CEMAGREF car ce sont eux qui ont donné matière au présent document et parce qu'il aurait été trop long de citer tous les ouvrages extérieurs concernés. Parmi les documents cités, deux d'entre eux sont assez généraux et couvrent une partie importante de ce manuel ; il s'agit de :

"Problèmes hydrologiques relatifs à l'étude des crues" COLIN - MEUNIER - PUECH, mai 1972."

et de

"Techniques des barrages en aménagement rural", chapitre II.4 : Etudes hydrologiques, Ministère de l'Agriculture, D.I.A.M.E., septembre 1977".

Certains sujets ont été traités très rapidement du seul fait que le CEMAGREF les a peu enrichis par sa propre expérience, limitée aux petits bassins versants (en gros, moins de 2000km²) en milieu rural. Pour une vue plus complète de l'hydrologie il est nécessaire de se reporter aux ouvrages classiques tels que "Hydrologie de surface" de Marcel ROCHE, "l'hydrologie de l'Ingénieur" de G. REMENIERAS, "Initiation à l'analyse hydrologique" de Pierre DUBREUIL, "Prévision et prédétermination des étiages et des crues" de J. LARRAS, "Le Guide d'estimation des probabilités de crues" de J. MIQUEL et aux nombreux travaux de BERNIER ou de CORMARY, pour se limiter à des ouvrages français.

On a distingué trois parties :

Une première partie aborde les problèmes concrets tels qu'ils se posent sur le terrain. Une deuxième partie expose les questions proprement hydrologiques qui en découlent et les réponses apportées. Une troisième partie rassemble quelques éléments relatifs aux outils mathématiques ou statistiques indispensables à la description et à la mise en oeuvre correcte des méthodes utilisées.

Enfin une dernière partie rassemble quelques exemples concrets plus ou moins étroitement liés à des études réelles du CEMAGREF.

Les trois premières parties ont été rédigées par C. MICHEL, la dernière partie a été rédigée en collaboration par J.C. MAILHOL et C. MICHEL.

L'ensemble a été supervisé et considérablement remanié par Robert HLAWEK, Chef du Département Hydraulique Agricole et a bénéficié des critiques de plusieurs hydrologues dont Pierre DUBREUIL, Inspecteur Général de Recherches à l'ORSTOM, Etienne COLIN du Service Régional d'Aménagement des Eaux de Lorraine, Jacques LAVABRE de la Division Hydraulique Générale du CEMAGREF à AIX en PROVENCE.

DECEMBRE 1985

Pour la version de juin 1987 une nouvelle partie a été insérée pour exposer quelques exercices illustrant notamment la technique des régressions multiples très utilisée en hydrologie.

Enfin la version actuelle a été largement améliorée notamment en matière de modélisation, et augmentée d'une présentation de quelques outils informatiques sommaires destinés aux étudiants pour leur permettre de se familiariser avec des données hydrologiques. Ces logiciels, écrits de façon très élémentaire, n'ont pas été testés de façon extensive et ne sont donc pas utilisables à des fins professionnelles. Enfin un redécoupage de l'ensemble en trois parties a été effectué pour garantir une plus grande simplicité de présentation.

SEPTEMBRE 1989

SOMMAIRE

PREMIERE PROBLEMES ET DEMARCHES
PARTIE : DE L'HYDROLOGIE DE SURFACE

Chapitre 1 - Les problèmes concrets

1.1 L'hydrologie, pour quoi faire ?	5
1.2 Les inondations	7
1.3 Les sécheresses	8
1.4 Calcul des ouvrages de franchissement ou de barrage	10
1.5 Exploitation de l'eau et gestion des barrages	11
1.6 Assainissement urbain et assainissement des terres agricoles	11
1.7 Erosion des sols et des lits des rivières	13
1.8 Impact de certaines activités sur le cycle de l'eau	13
1.9 Conclusion	14

Chapitre 2 - Généralités et terminologie de base

2.1 Définitions usuelles	19
2.2 Hydrologie déterministe ou probabiliste ?	24
2.3 Les quatre opérations de l'hydrologie appliquée	29

Chapitre 3 - Etude des pluies

3.1 Pluies annuelles	33
3.2 Pluies maximales sur une durée donnée	33
3.3 Plus fortes pluies sur n jours	34
3.4 Distributions statistiques	35
3.5 Pluies relatives à un domaine de l'espace	35
3.6 Processus spatio-temporels	36
3.7 Synthèses régionales	37
Annexe : 3.I Pluies journalières décennales (JC.SCHERER)	41
3.II Coefficient de "tempérance" (JC.SCHERER)	47
3.III Gradex des pluies journalières	48

Chapitre 4 - Données générales sur les écoulements des petits bassins ruraux

4.1 Présentation d'une synthèse sur la banque HYDRO	53
4.2 Lamé d'eau annuelle	54
4.3 Irrégularité saisonnière	58
4.4 Débits spécifiques d'étiage	62
4.5 Coefficients de crue biennale	64
4.6 Ecoulements de base	66
4.7 Besoins de stockage	68
4.8 Interrelations	70

Chapitre 5 - Modélisation conceptuelle pluie-débit

5.1 Introduction	75
5.2 Définition	76
5.3 Généralités	77
5.4 Calage et test d'un modèle	78
5.5 Particularités des modèles à réservoirs	80
5.6 Etude du réservoir linéaire	82
5.7 Etude du réservoir quadratique	84
Linéarisation du réservoir quadratique	
5.8 Le modèle GR2	86
5.9 Le modèle GR3	87
5.10 Modélisation conceptuelle au pas de temps mensuel	99

Chapitre 6 - Distribution des crues, détermination des quantiles rares

6.1 Généralités	105
6.2 Définitions	105
6.3 Estimation de la crue décennale en un site de mesures	106
6.4 Etude directe des valeurs supérieures	108
6.5 Estimation de la crue décennale en l'absence de données	110
6.6 Courbe débit-durée pour la fréquence décennale et crue de projet	116
6.7 Le calcul des crues très rares : la méthode du gradex	118
6.8 Coefficient d'écoulement en prédétermination	123
6.9 Utilisation conjointe des méthodes régionales et des observations	125
6.10 Prise en compte des crues historiques	126

Chapitre 7 - Prévision de crue

7.1 Introduction	135
7.2 Méthode de l'hydrogramme unitaire	135
7.3 Utilisation des modèles régressifs	136
7.4 Correction des prévisions en fonction des observations précédentes	137
7.5 Coefficient d'écoulement en prévision	138
7.6 Jugement d'un modèle en prévision	139
7.7 Exemple de modèle global	142

Chapitre 8 - Propagation de crue

8.1 Méthode de l'onde de crue diffusante	147
8.2 Méthode MUSKINGUM	148
8.3 Méthode de l'onde cinématique	150
8.4 Atténuation d'un hydrogramme simplifié	155
8.5 Laminage d'une crue dans une retenue	159
Annexe 8.I Programme basic de laminage	163

Chapitre 9 - Considérations économiques concernant la protection contre les crues

9.1 Hypothèses préalables	167
9.2 Calculs économiques	168
9.3 Considérations générales	170

Chapitre 10 - Estimation des apports annuels et mensuels bilans en eau

10.1 Estimation d'un module au droit d'une station de mesure	175
10.2 Point situé entre deux stations de mesure	181
10.3 Utilisation d'une station similaire	182
10.4 Estimation d'un module en l'absence de mesures	183
10.5 Simulation de débits annuels successifs	184
10.6 Reconstitution de débits mensuels	187
10.7 Simulation de débits mensuels	188
10.8 Bilan de l'eau dans un bassin versant ?	191
Annexes 10.I Programme basic de simulation d'apports mensuels	195
10.II Modules moyens observés sur 1225 bassins de moins de 2 000 km ²	196

Chapitre 11 - Erosion et transports solides

11.1 L'érosion des sols agricoles	207
11.2 Quelques données	207
11.3 Quelques définitions et notations	208
11.4 Equation universelle de perte des sols	209
11.5 Le problème des données d'observation	211
11.6 Implications économiques de la lutte contre l'érosion	212
11.7 Apports solides annuels	217
11.8 Le transport solide	218
11.9 Décantation dans un bassin de tranquillisation	219

Chapitre 12 - Etudes des étiages

12.1 Variables caractéristiques	225
12.2 Prévision des étiages à longue échéance	225
12.3 Prévision des étiages à courte échéance	227

Chapitre 13 - Calcul et gestion des réservoirs

13.1 Confrontation Ressources-Besoins	233
13.2 Appréciation de la nécessité d'une réserve interannuelle	234
13.3 Hydroélectricité	235
13.4 Courbe objectif de remplissage	238
13.5 Méthode d'obtention par simulation et optimisation	241
13.6 Règle simple de gestion d'un ouvrage de régularisation	244
13.7 Retenues d'écrêtement de crues	250

Chapitre 14 - Influence des aménagements de l'espace

14.1 Introduction	263
14.2 Influence de l'urbanisation	263
14.3 Influence du drainage	263
14.4 Influence de l'assainissement agricole et de l'aménagement des rivières	263
14.5 Influence de la déforestation	264
14.6 Influence de l'extension des grandes cultures	264
14.7 Remarques générales	264

DEUXIEME PARTIE : OUTILS MATHÉMATIQUES POUR L'HYDROLOGIE

Chapitre 15 - Définitions usuelles en probabilités et en statistiques

15.1 Définitions	271
15.2 Théorème de BAYES	273
15.3 Lois discrètes	275
15.4 Lois continues	276

Chapitre 16 - Les modèles linéaires

16.1 Le modèle linéaire général	281
16.2 Extension du modèle général au cas d'autocorrélation des erreurs	289
16.3 Cas de l'hétéro-scédasticité des erreurs	292
Annexes 16.I Programme basic pour le modèle linéaire général	297
16.II Programme basic pour le choix d'une anamorphose	299
16.III Filtrage de KALMAN exemple d'application	301
16.IV Distribution de FISHER	305
16.V Tables de DURBIN-WATSON	307

Chapitre 17 - Distribution de fréquence, ajustements de lois

17.1 Distribution empirique	311
17.2 Lois classiques en hydrologie	312
17.3 Distribution de la plus forte de n valeurs	314
17.4 Ajustement par les moments	315
17.5 Ajustement par le maximum de vraisemblance	316
17.6 Application à la loi de GUMBEL (EV1)	317
17.7 Tests d'adéquation de lois	319
17.8 Distribution d'échantillonnage	
Distribution d'échantillonnage des quantiles empiriques	320
Annexes 17.I Table de GAUSS	325
17.II Simulation numérique d'une variable gaussienne et d'une variable log-normale	327
17.III Papiers à probabilité	328
17.IV Exemple de programme FORTRAN d'ajustement de loi	335
17.V Méthode manuelle d'ajustement de loi	339

Chapitre 18 - Etude des dépassements d'un seuil

18.1 Valeurs maximales, valeurs supérieures	347
18.2 Les modèles de renouvellement	347
18.3 Méthode de calage par le maximum de vraisemblance	349
18.4 Loi du maximum annuel d'après le modèle de renouvellement	350
18.5 Probabilité d'un nombre k de crues sur n années	352
18.6 Etude directe des plus fortes valeurs	353
18.7 Retour sur la loi des maximums annuels	354

Chapitre 19 - Analyse des données : analyse en composantes principales

19.1 Problème posé	361
19.2 Objectif de l'analyse en composantes principales	363
19.3 Résolution du problème	363
19.4 Analyse primale, analyse duale	365
19.5 Utilisation en hydrologie	366
Annexe 19.I Programme basic A.C.P.	369
19.II Sous-programme de recherche des vecteurs propres	371

Chapitre 20 - Problème de minimisation d'une fonction

20.1 Généralités	375
20.2 Fonctions critères	375
20.3 Les méthodes d'optimisation	376
20.4 Méthode pas à pas	377
20.5 Sous-programme FORTRAN	378

Chapitre 21 - Quelques logiciels simples

21.1 Généralités	383
21.2 Régression multiple	383
21.3 Ajustement de lois	386
21.4 Laminage d'un hydrogramme type	389
21.5 Calcul du module d'un bassin	391
21.6 Dimensionnement d'une retenue d'écrêtement de crue et de fourniture d'eau à l'étiage	397
21.7 Simulation de données mensuelles de débits à partir des pluies à l'aide d'un modèle conceptuel	399
21.8 Propagation de crue dans un cas simple	401

TROISIEME PARTIE : EXERCICE ET EXEMPLES

Chapitre 22 - Exercices d'application

22.1 Exemple d'analyse de distribution statistique	407
22.2 Exemple de modèle linéaire simple	414
22.3 Exemple de modèle linéaire à 2 variables explicatives	418
22.4 Modèle de génération de débits mensuels	423
22.5 Modèle de comblement de lacunes	430
22.6 Calcul d'une crue décamillénale	436
22.7 Prévision de crue	442

Chapitre 23 - Quelques exemples concrets

23.1 Protection de la ville de Melun des crues du rû d'Ancoeur (Seine et Marne)	453
23.2 Identification d'un hydrogramme unitaire pour le calcul d'une crue	463
23.3 Protection de bassins d'infiltration en milieu crayeux	469
23.4 Etablissement d'une courbe "objectif de remplissage"	482
23.5 Erosion en bordure d'un plateau	487
23.6 Estimation des crues de l'Euron à FROVILLE (54)	504
23.7 Lutte contre les inondations de l'AUME à AIGRE (Charente)	518