

CEMAGREF

SECTION HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE FLUVIALE ET SOUTERRAINE

ANTONY



12478 RM

Agence de l'eau  
Rhin-Meuse

HYDROLOGIE APPLIQUÉE  
AUX  
PETITS BASSINS RURAUX

C. MICHEL

JUIN 1987

# I

## SOMMAIRE

|  | Page |
|--|------|
| Introduction   |      |
| <b>Première partie : les problèmes concrets</b>                        |      |
| L'hydrologie, pour quoi faire ?  | 5    |
| Les inondations  | 7    |
| Les sécheresses  | 8    |
| Calcul des ouvrages de franchissement ou de barrage                    | 10   |
| Exploitation de l'eau et gestion des barrages                          | 11   |
| Assainissement urbain et assainissement des terres agricoles           | 11   |
| Erosion des sols et des lits des rivières                              | 13   |
| Impact de certaines activités sur le cycle de l'eau                    | 13   |
| Conclusion   | 14   |
| <b>Deuxième partie : problèmes hydrologiques proprement dits</b>       |      |
| <u>Généralités</u>   |      |
| Définitions usuelles   | 19   |
| Hydrologie déterministe ou probabiliste?                               | 20   |
| <u>Etude des pluies</u>  |      |
| Pluies annuelles   | 31   |
| Pluies maximales sur une durée donnée                                  | 31   |
| Plus fortes pluies sur n jours   | 32   |
| Pluies relatives à un domaine de l'espace                              | 33   |
| Processus spatio-temporels   | 34   |
| Synthèses régionales   | 35   |
| Annexe : Pluies journalières décennales                                | 39   |
| Coefficient de "tempérance"  | 43   |
| Gradex des pluies journalières   | 44   |
| <u>Données générales sur les écoulements des petits bassins ruraux</u> |      |
| Lame d'eau annuelle  | 46   |
| Irrégularité saisonnière   | 49   |
| Débits spécifiques d'étiage  | 52   |
| Coefficients de crue biennale  | 54   |
| Écoulements de base  | 56   |
| Besoins de stockage  | 59   |
| Interrelations   | 61   |

SOMMAIRE (Suite)

|   | Page |
|---|------|
| <u>Distribution des crues, détermination<br/>des quantiles rares</u>        |      |
| Généralités   | 65   |
| Définitions   | 65   |
| Estimation de la crue décennale en un site de mesures                       | 66   |
| Estimation de la crue décennale en l'absence de données                     | 68   |
| Courbe débit-durée pour la fréquence décennale                              | 74   |
| Crue de projet décennale  | 74   |
| Le calcul des crues très rares  | 76   |
| Passage des débits sur une durée $t$ aux débits instantanés                 | 77   |
| Coefficient d'écoulement en prédétermination                                | 78   |
| Utilisation conjointe des méthodes régionales et des observations           | 80   |
| Prise en compte des crues historiques                                       | 81   |
| Etude directe des valeurs supérieures                                       | 85   |
| <u>Prévision de crue</u>  |      |
| Méthode de l'hydrogramme unitaire   | 91   |
| Coefficient d'écoulement en prévision                                       | 92   |
| Prévision de crue sur les petits bassins versants                           | 94   |
| Remarque sur l'introduction de la pluie dans les modèles régressifs         | 97   |
| Exemple de modèle global  | 97   |
| <u>Propagation de crue</u>  |      |
| Méthode de l'onde de crue diffusante  | 101  |
| Méthode MUSKINGUM   | 102  |
| Méthode de l'onde cinématique   | 104  |
| Atténuation d'un hydrogramme simplifié                                      | 109  |
| Laminage d'une crue dans une retenue  | 111  |
| Annexe : Programme basic de laminage  | 114  |
| <u>Considérations économiques concernant la protection contre les crues</u> |      |
| Hypothèses préalables   | 117  |
| Calculs économiques   | 118  |
| Considérations générales  | 120  |

SOMMAIRE (suite)

|   | Page |
|---|------|
| <u>Estimation des apports annuels et mensuels - bilans en eau</u>             |      |
| Estimation d'un module au droit d'une station de mesure                       | 123  |
| Point situé entre deux stations de mesure                                     | 129  |
| Utilisation d'une station similaire   | 130  |
| Estimation d'un module en l'absence de mesures                                | 131  |
| Simulation de débits annuels successifs                                       | 132  |
| Modèle ARMA de simulation   | 132  |
| Reconstitution de débits mensuels   | 135  |
| Simulation de débits mensuels   | 136  |
| Bilan de l'eau dans un bassin versant ?                                       | 138  |
| Annexes : -programme basic de simulation<br>d'apports mensuels                | 143  |
| -Modules moyens observés sur 1225<br>bassins de moins de 2000 km <sup>2</sup> | 144  |
| <u>Erosion et Transports solides</u>  |      |
| L'érosion des sols agricoles  | 153  |
| Quelques données  | 153  |
| Quelques définitions et notations   | 154  |
| Equation universelle de perte des sols  | 155  |
| Le problème des données d'observation   | 157  |
| Implications économiques de la lutte contre l'érosion                         | 158  |
| Apports solides annuels   | 163  |
| Le transport solide   | 164  |
| Décantation dans un bassin de tranquillisation                                | 165  |
| <u>Etude des étiages</u>  |      |
| Variables caractéristiques  | 169  |
| Prévision   | 169  |
| <u>Calcul et gestion des réservoirs</u>                                       |      |
| Confrontation Ressources-Besoins  | 173  |
| Hydroélectricité  | 174  |
| Courbe objectif de remplissage  | 175  |
| Méthode d'obtention par simulation  | 178  |
| Sélection des basses satisfaisant les besoins en eau                          | 181  |
| Sélection de leur courbe  | 183  |

SOMMAIRE (suite)

|   | Page |
|---|------|
| Retenues d'écrêtement de crues  | 185  |
| Cas où les données limnigraphiques sont disponibles                     | 187  |
| Calcul du volume nécessaire en l'absence de données                     | 188  |
| Effet d'un réservoir linéaire sur les crues                             | 189  |
| Synthèse nationale sur le paramètre $\delta$                            | 190  |
| Formule globale dans le cas d'absence de données                        | 190  |
| Effet de retenues sur l'écrêtement des crues à l'aval                   | 192  |
| <u>Influence des aménagements de l'espace</u>                           |      |
| Influence de l'urbanisation   | 197  |
| Influence du drainage   | 197  |
| Influence de l'assainissement agricole et de l'aménagement des rivières | 197  |
| Influence de la déforestation   | 198  |
| Influence de l'extension des grandes cultures                           | 198  |
| <u>Modélisation Déterministe Pluie-Débit</u>                            |      |
| Définition  | 201  |
| Généralités   | 201  |
| Calage et test d'un modèle  | 204  |
| Période de mise en route  | 205  |
| Particularités des modèles à réservoirs                                 |      |
| - références aux temps  | 206  |
| - fonctionnement d'un réservoir   | 206  |
| - Etude du réservoir linéaire   | 208  |
| - Etude du réservoir quadratique  | 210  |
| - Linéarisation du réservoir quadratique                                | 211  |
| Le modèle GR2   | 212  |
| Complications éventuelles de GR2  | 213  |
| Avantages du faible nombre de paramètres                                | 214  |

## Troisième partie : outils mathématiques pour l'hydrologie

| <u>Définitions usuelles en probabilité statistique</u> |     |
|--|-----|
| Définitions  | 219 |
| Théorème de BAYES                                      | 221 |
| Lois discrètes   | 223 |
| Lois continues   | 224 |
| Lois dérivées de carrés de variables normales          | 225 |



SOMMAIRE (suite)

|  | Page |
|--|------|
| <u>Le modèle linéaire général et autres modèles linéaires</u>          |      |
| Le modèle  | 227  |
| Hypothèses   | 227  |
| Identification des paramètres du modèle                                | 228  |
| Coefficient de détermination   | 229  |
| Significativité de chaque variable                                     | 230  |
| Utilisation en prédiction  | 231  |
| Cas particulier du modèle à une variable explicative et terme constant | 231  |
| Modèle à une variable explicative sans terme constant                  | 233  |
| Modèle portant sur les déviations des variables                        | 233  |
| Transformation linéaire sur les variables explicatives                 | 234  |
| Mise à jour des paramètres d'un modèle                                 | 234  |
| Remarques pratiques  | 235  |
| Extension du modèle général au cas d'autocorrélation des erreurs       | 235  |
| Test d'autocorrélation des résidus                                     |      |
| Procédure pratique en cas d'autocorrélation des résidus                | 238  |
| Cas de l'hétéro-scédasticité des erreurs                               | 238  |
| Annexes : I - programme basic pour le modèle linéaire général          | 242  |
| II - programme basic pour le choix d'une anamorphose                   | 243  |
| III - Filtrage de KALMAN exemple d'application                         | 244  |
| IV - Distribution de FISHER  | 248  |
| V - Tables de DURBIN-WATSON  | 249  |
| <u>Distribution de fréquence, Ajustements de lois</u>                  |      |
| Distribution empirique   | 251  |
| Lois classiques en hydrologie  | 252  |
| Distribution de la plus forte de n valeurs                             | 254  |
| Ajustement par les moments   | 255  |
| Ajustement par le maximum de vraisemblance                             | 256  |
| Application à la Loi de GUMBEL (EV1)                                   | 257  |
| Tests d'adéquation de lois   | 259  |
| Distribution d'échantillonnage   | 260  |
| Intervalles de confiance des quantiles théoriques                      | 260  |

SOMMAIRE (suite)

|  | Page |
|--|------|
| Distribution d'échantillonnage des quantiles empiriques                          | 261  |
| Annexes : 1 - Table de GAUSS   | 263  |
| 2 - Simulation numérique d'une variable gaussienne et d'une variable log-normale | 264  |
| 3 - Papiers à probabilité  | 265  |
| 4 - Exemple de programme FORTRAN d'ajustement de loi                             | 270  |
| 5 - Méthode manuelle d'ajustement de loi   | 275  |

Etude des dépassements d'un seuil

|   |     |
|---|-----|
| Les modèles de renouvellement                     | 281 |
| Méthode de calage par le maximum de vraisemblance | 283 |
| Etude directe des plus fortes valeurs             | 287 |
| Retour sur la loi des maximums annuels            | 288 |
| La valeur annuelle                                | 288 |

Analyse des données : analyse en composantes principales

|   |     |
|---|-----|
| Problème posé   | 291 |
| Objectif de l'analyse en composantes principales            | 293 |
| Résolution du problème                                      | 293 |
| Analyse primale, analyse duale                              | 295 |
| Utilisation en hydrologie                                   | 296 |
| Annexe 1 : programme basic A.C.P.                           | 299 |
| Annexe 2 : sous-programme de recherche des vecteurs propres | 301 |

Quatrième partie : exercices d'application

|  |     |
|--|-----|
| Exercice n°1 - Exemple d'analyse de distribution statistique         | 305 |
| Exercice n°2 - Exemple de modèle linéaire simple                     | 313 |
| Exercice n°3 - Exemple de modèle linéaire à 2 variables explicatives | 317 |
| Exercice n°4 - Modèle de génération de débits mensuels               | 323 |
| Exercice n°5 - Modèle de comblement de lacunes                       | 331 |
| Exercice n°6 - Calcul d'une crue décennale                           | 337 |
| Exercice n°7 - Prévion de crue                                       | 343 |

SOMMAIRE (suite)

|   |
|---|
| Cinquième partie : quelques exemples concrets |
|---|

Page

|   |     |
|---|-----|
| Exemple n°1 - Protection de la ville de Melun<br>des crues du rû d'Ancoeur (Seine et Marne) | 353 |
| Exemple n°2 - Identification d'un hydrogramme unitaire<br>pour le calcul d'une crue         | 363 |
| Exemple n°3 - Protection de bassins d'infiltration en<br>milieu crayeux                     | 369 |
| Exemple n°4 - Etablissement d'une courbe "objectif de<br>remplissage"                       | 381 |
| Exemple n°5 - Erosion en bordure d'un plateau   | 387 |
| Exemple n°6 - Estimation des crues de l'Euron à<br>FROVILLE (54)                            | 403 |
| Exemple n°7 - Lutte contre les inondations de l'AUME<br>à AIGRE (Charente)                  | 419 |



## I N T R O D U C T I O N

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 HLAVEK 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).

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 2000 km<sup>2</sup>) 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 cinq 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. La quatrième partie propose quelques exercices illustrant notamment la technique des régressions multiples très utilisée en hydrologie. Enfin une cinquième partie rassemble quelques exemples concrets plus ou moins étroitement liés à des études réelles du CEMAGREF.

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, Sept. 1977

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

L'ensemble a été supervisé et considérablement remanié par Robert HLAVEK, 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.

Enfin, il faut signaler que le présent document reflète l'état actuel des méthodes employées à la Section Hydrologie - Hydraulique Fluviale et Souterraine du CEMAGREF et que celles-ci sont en rapide évolution compte tenu de la progression incessante des recherches, elles-mêmes liées à l'effort constant du Ministère de l'Agriculture pour rassembler des observations et à l'importance croissante des problèmes liés aux ressources en eau.