



HAL
open science

Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale

Messaouda Kabouya

► **To cite this version:**

Messaouda Kabouya. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Sciences de l'environnement. Université Paris Sud Orsay, 1990. Français. NNT: . tel-02575980

HAL Id: tel-02575980

<https://hal.inrae.fr/tel-02575980v1>

Submitted on 23 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Présentée

pour obtenir

Le titre de DOCTEUR EN SCIENCES

par

Messaouda KABOUYA

Sujet :

MODELISATION PLUIE-DEBIT AUX PAS DE TEMPS MENSUEL ET ANNUEL EN ALGERIE SEPTENTRIONALE

Soutenu le 19 Décembre 1990

Devant la commission d'examen :

MM. J.Ch FONTES	Président
P. HUBERT	Rapporteur
D. THIERY	Rapporteur
J. ANDRIEUX	Examineur
A. DEMMAK	Examineur
C. MICHEL	Examineur

A ma mère
A ma famille
et à la famille LOUMAGNE

REMERCIEMENTS

A l'heure de conclure ce travail, je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur Jean-Charles FONTES pour m'avoir accueillie dans son laboratoire pendant mon année de D.E.A. et pour l'enseignement dont j'ai pu bénéficier à cette occasion.

Je remercie Monsieur Thierry LEVIANDIER, Chef de la Division Hydrologie du CEMAGREF pour m'avoir reçu dans son service et surtout pour l'appui qu'il m'a apporté pendant les moments difficiles.

Ma reconnaissance est grande pour Monsieur Claude MICHEL, qui m'a accordé sa confiance en me proposant cette recherche et auprès duquel j'ai trouvé les conseils, l'aide et l'appui de tous les instants.

Ma reconnaissance s'adresse aussi à MM. M. NORMAND, JM. PANETIER, M. POIRSON, M. TANGARA, JL. ROSIQUE et M. FERRY de la Division Hydrologie du CEMAGREF d'ANTONY pour l'aide technique et le soutien moral qu'ils m'ont apportés pendant mon séjour au laboratoire.

Je tiens également à assurer de ma gratitude MM. P. HUBERT, D. THIERY, J. ANDRIEUX, A. DEMMAK qui m'ont fait l'honneur d'accepter de faire partie du jury.

Je n'oublie pas également le bon climat de fraternité et de coopération avec Cécile, Edi, Ma, Marcio et Ali.

Ma reconnaissance s'adresse également à MM. M. TOUAT, ABOU ZAKARIA et ABDIOUS de l'A.N.R.H. à Alger.

Ma gratitude ne saurait enfin être totale sans adresser mes remerciements à Mme PALAGOS qui a bien voulu accepter la primeur de déchiffrer mon manuscrit, et pour le soin avec lequel elle a effectué la frappe de ce texte.

MODELISATION PLUIE-DEBIT AUX PAS DE TEMPS MENSUEL ET ANNUEL

EN ALGERIE SEPTENTRIONALE

Résumé :

La présente recherche a consisté en l'élaboration d'un modèle pluie-débit pour l'estimation des ressources en eau superficielles de l'Algérie Septentrionale.

Deux approches de modélisation ont été utilisées : la modélisation linéaire et la modélisation conceptuelle. Dans les deux approches nous nous sommes efforcés de rechercher un modèle pluie-débit satisfaisant aux objectifs suivants : commodité de calage d'où la nécessité d'un modèle parcimonieux; généralité d'emploi impliquant un modèle robuste; clarté de fonctionnement exigeant un modèle très simple ; simplicité dans l'acquisition des données ce qui suppose un modèle global et enfin possibilité d'application du modèle à des bassins non jaugés ce qui interdit un nombre de paramètres trop important.

Un premier modèle linéaire visant la détermination du débit annuel à partir d'un pluie annuelle et de sa répartition entre les mois a été mis au point. Cependant les résultats obtenus par cette approche étant assez pauvres, nous avons choisi une analyse un peu plus conceptuelle et avec la prise en compte systématique des données au pas de temps mensuel.

Dans cette démarche, nous avons construit, par une recherche systématique, un modèle mensuel rustique à trois paramètres dont l'élaboration a été justifiée point par point par une meilleure efficacité des résultats fournis sur une soixantaine de bassins versants. La comparaison des résultats des deux approches a montré la nette supériorité du modèle conceptuel.

Mots-clés :

Ressources en eau ; modèle conceptuel pluie-débit ; pas de temps mensuel ; sensibilité des paramètres.

MONTHLY AND ANNUAL RAINFALL RUNOFF MODELLING IN NOTHERN ALGERIA

Abstract :

This research consisted in developing a rainfall-runoff model aimed at Northern Algeria surficial water resources assessment.

Two modelling approaches have been used : linear modelisation and conceptual modelisation. For the two approaches we looked for the following qualities : calibration easiness implying a parsimonious model, application generality implying a robust model, data gathering simplicity implying a lumped model, working clarity implying a very simple model et finally applicability to ungauged catchments which precludes a high number of parameters.

A first model, linear, aimed at estimating annual runoff from annual rainfall and its monthly allocation, has been developed. However, results given by this approach proving rather poor, we chose a somehow more conceptual analysis and worked on a monthly time step basis.

We devised, after a systematic search, a robust monthly three parameter model, the development of which has been justified point by point according to a better effectiveness over some sixty watersheds. The two approaches comparison showed the conceptual model clear superiority.

Key words :

Water resources ; conceptual rainfall-runoff model ; monthly time step ; parameter sensitivity.

SOMMAIRE

	Pages
- Introduction.....	11
PREMIERE PARTIE : DEMARCHES USUELLES POUR L'ESTIMATION DES APPORTS ET OPTIONS CHOISIES	
1.1 - DEMARCHES USUELLES POUR L'ESTIMATION DES APPORTS	13
1.1.1 - Cas où les données hydrométriques sont en nombre suffisant : études statistiques directes	13
1.1.2 - Cas où les données hydrométriques sont en petit nombre et où il existe des stations voisines de longue durée : extension des séries par corrélacion	14
1.1.3 - Données hydrométriques peu nombreuses sans station longue durée comparable : modélisation pluie-débit	14
1.2 - OPTIONS CHOISIES DANS LE CADRE DE LA PRESENTE RECHERCHE	15
DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE ET TRAITEMENT DES DONNEES HYDROPLUVIOMETRIQUES	
2.1 - PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE	19
2.1.1 - Les conditions de formation et le régime des débits des cours d'eau de l'Algérie Septentrionale	19
2.1.2 - Les stations de jaugeages disponibles	22
2.1.3 - Répartition des bassins par région hydrologique	22
2.1.4 - Répartition des stations selon la superficie du bassin	27
2.1.5 - Périodes d'observation des stations hydrométriques ...	27
2.1.6 - Conclusion	29

	Pages
2.2 - TRAITEMENT DES DONNES HYDRO-PLUVIOMETRIQUES	30
2.2.1 - Présentation de la banque de données	31
2.2.1.1 - Définition et choix des variables à utiliser	31
2.2.1.2 - Elaboration des fichiers et traitement préliminaire	31
2.2.1.3 - Conclusion	34
2.2.2 - Sélection des données pluviométriques	35
2.2.3 - Analyse des séries d'observations pluviométriques	36
2.2.4 - Mise au point d'une méthodologie de comblement des lacunes mensuelles et annuelles	38
2.2.5 - Principe adopté dans la critique des données	39
2.2.5.1 - Première vérification des données	40
2.2.5.2 - Méthodes de détection des anomalies	41
2.2.6 - Amélioration de l'information des B.V. à série d'observation courte	43
2.2.6.1 - Essai de récupération des séries débimé- triques courtes	43
2.2.6.2 - Vérification des données	44
2.2.6.3 - Détermination des postes pluviométriques les plus représentatifs	45
2.2.6.4 - Premières conclusions de l'étude des séries courtes	48
2.2.7 - Généralisation de la critique sur l'ensemble des stations	48
2.2.7.1 - Comblement des lacunes des débits à série d'observation considérée suffisante	50
2 - Vérification des données	
2.2.7.3 - Détermination des pluviomètres les plus représentatifs pour les B.V. douteux	53

TROISIEME PARTIE MODELISATION LINEAIRE

3.1 - ETUDES ANTERIEURES SUR LES DEBITS MOYENS EN ALGERIE	60
---	----

	Pages
3.1.1 - Formules d'estimation du module	60
3.1.1.1 - Formule de G. MEDINGER	60
3.1.1.2 - Formule de COUTAGNE	61
3.1.1.3 - Formule de PADOUN	61
3.1.1.4 - Formule de DERI	63
3.1.1.5 - Formule de ADJEL et ISMAIL	63
3.1.2 - Analyse de certaines formules	63
3.1.3 - Conclusion	64
3.2 - LES VARIABLES EN CAUSE	65
3.2.1 - Choix de la variable écoulement annuel	65
3.2.2 - Choix des variables influençant l'écoulement	65
3.3 - RECHERCHE DE RELATIONS ECOULEMENT-FACTEURS EXPLICATIFS	66
3.3.1 - Premier ensemble de modèles linéaires	66
3.3.2 - Application à un ensemble de B.V.	69
3.3.2.1 - Analyse des résultats des 5 modèles proposés ...	69
3.3.2.2 - Synthèse des résultats	74
3.3.3 - Deuxième ensemble de modèles linéaires	76
3.3.3.1 - Formulations étudiées	76
3.3.3.2 - Application des modèles (6), (7) et (8) aux 41 B.V.	78
3.3.3.3 - Amélioration de la prise en compte de la répartition des pluies	80
3.4 - MISE AU POINT DEFINITIVE DU MODELE LINEAIRE	85

QUATRIEME PARTIE : MODELISATION CONCEPTUELLE
--

Introduction

4.1 - RECHERCHE D'UN MODELE CONCEPTUEL SIMPLE	89
4.1.1 - Généralités	89
4.1.2 - Quelques exemples de modèles	90

	Pages
4.1.2.1 - Le modèle SMAP	91
4.1.2.2 - Le modèle CREC	94
4.1.2.3 - Le modèle BOUGHTON	96
4.1.2.4 - Le modèle $T\alpha$ d'ALLEY	100
4.1.2.5 - Le modèle non linéaire de M.L. KAVVAS	103
4.1.2.6 - Le modèle ABCD de THOMAS	107
4.1.2.7 - Enseignements	109
4.1.3 - Description du modèle de départ : GR3j	112
4.1.3.1 - Le réservoir-sol : S	112
4.1.3.2 - Le réservoir-sol-eau gravitaire : R	114
4.1.3.3 - Hydrogramme unitaire	115
4.2 - STRUCTURE INITIALE DU MODELE MENSUEL : GR3M	115
4.2.1 - La référence de GR3j	115
4.2.2 - Faut-il améliorer la fonction de production ou la fonction de transfert ?.....	118
4.2.3 - Enrichissement de la fonction de production	119
4.3 - CALAGE DU MODELE	121
4.3.1 - Fonction critère	121
4.3.2 - Initialisation des réservoirs	123
4.3.3 - Optimisation des paramètres	125
4.3.3.1 - Essai d'optimisation par la méthode de ROSENBROCK	125
4.3.3.2 - Méthode utilisée	126
4.4 - CONTROLE DE LA VERSION INITIALE DE GRM1	126
4.4.1 - Mode opératoire et rappel des options choisies	126
4.4.1.1 - Les fichiers de données hydrométriques	130
4.4.1.2 - Les fichiers de données pluviométriques	131
4.4.1.3 - Les fichiers de données d'évaporation	131
4.4.2 - Options choisies pour le contrôle du modèle	132
4.4.3 - Tests du modèle sur un échantillon réduit	132
4.4.3.1 - Présentation des sorties du programme de calage	133
4.4.3.2 - Les paramètres identifiés	136
4.4.3.3 - Qualité de l'ajustement	138
4.4.3.4 - Conclusion sur la variante de base de GRM1	

	Pages
4.4.4 - Comparaison du modèle linéaire et du modèle conceptuel GRM1	147
4.5 - ESSAI D'AMELIORATION DE LA VERSION DE BASE DE GRM1	149
4.5.1 - Tests de différentes options de neutralisation pluie-évaporation	149
4.5.1.1 - Neutralisation complète	149
4.5.1.2 - Neutralisation imposée	150
4.5.1.3 - Sans neutralisation	151
4.5.1.4 - Conclusion	151
4.5.2 - La loi de vidange du réservoir de routage	151
4.5.2.1 - Hypothèse de base	151
4.5.2.2 - Initialisation des réservoirs de routage	153
4.5.2.3 - Résultats des différents essais	157
4.5.3 - Rôle des erreurs dans les modèles pluies-débits	158
4.5.3.1 - Sensibilité aux erreurs sur les entrées	158
4.5.3.2 - Correction des entrées	160
4.5.4 - Redéfinition de la fonction critère	162
4.5.5 - Introduction d'un écoulement pseudo-direct	163
4.5.5.1 - Modèle GRM1 de base avec introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit	163
a) dérivation avant rendement par le réservoir-sol	164
b) dérivation après rendement par le réservoir-sol	164
4.5.5.2 - Peut-on fixer le pourcentage de la fraction de pluie participant directement à l'écoulement ?	167
4.6 - GENERALISATION DU MODELE AVEC INTRODUCTION D'UN TAUX FIXE DE PLUIE PARTICIPANT DIRECTEMENT A L'ECOULEMENT	170
4.6.1 - Détermination du taux d'écoulement pseudo-direct sur les 68 B.V.	171
4.6.2 - Analyse des paramètres et de leur efficacité	172
4.6.2.1 - Paramètre A	172
4.6.2.2 - Paramètre B	178
4.6.2.3 - Paramètre C	181
a) essai de couplage de la neutralisation pluie-évaporation et de l'écoulement pseudo-direct	183
b) rôle complémentaire pour C : fixer l'écoulement pseudo-direct	183
4.6.3 - Conclusion.....	187

4.7 - COMPARAISON DU MODELE GRM3 AVEC D'AUTRES MODELES	188
4.7.1 - Nouvelle initialisation du réservoir S	188
4.7.2 - Comparaison du modèle GRM3 avec d'autres modèles	189
4.7.2.1 - Procédure adoptée dans la comparaison des modèles	189
4.7.2.2 - Comparaison des résultats	191
4.7.3 - Conclusion	193
4.8 - TESTS COMPLEMENTAIRES SUR LE MODELE GRM3	193
4.9 - RECHERCHE DE LA MEILLEURE ARCHITECTURE A TROIS PARAMETRES ...	195
4.9.1 - Taux d'écoulement pseudo-direct variable	196
4.9.2 - Neutralisation pluie-évaporation	199
4.9.3 - Modification du rendement de la pluie	200
4.9.4 - Modification du rendement de l'évaporation potentielle	201
4.9.5 - Adaptation de l'évaporation potentielle	203
a) correction multiplicative globale	
b) correction additive globale	
4.9.6 - Correction des 2 entrées du modèle	206
4.9.6.1 - Correction simultanée des 2 entrées du modèle dans des sens opposés	207
4.9.6.2 - Diminution de l'une des entrées : pluie ou évaporation potentielle	208
4.9.7 - Conclusion	209
4.10 - VALIDATION DU MODELE GR3M ET DE SES PARAMETRES	209
4.11 - MODELE RETENU POUR L'ESTIMATION DES APPORTS DES COURS D'EAU DE L'ALGERIE DU NORD	210
4.12 - ESSAI DE REGIONALISATION DES PARAMETRES DU MODELE GR3M	211
4.12.1 - Paramètre A	216
4.12.2 - Paramètre B	216
4.12.3 - Paramètre C	217
4.12.4 - Conclusion	217
CONCLUSION GENERALE	219

	Pages
REFERENCES	221
LISTE DES FIGURES	225
LISTES DES TABLEAUX	229
ANNEXES 1 à 3 - Modélisation linéaire	235
ANNEXE 4 - Irrégularité des débits du CHELIFF	249
ANNEXE 5 - Apports interannuels simulés par le modèle SMAP	251
ANNEXE 6 - Programme FORTRAN pour le modèle GR3M	255
ANNEXE 7 - Modèle mensuel avec écoulement pseudo-direct	271
ANNEXE 8 - Détermination de l'écoulement pseudo-direct pour 6 BV tests	273
ANNEXE 9 - Comparaison de deux utilisations du troisième paramètre	275
ANNEXES 10 à 14 - Subroutines des modèles SMAP, GARDENIA, MNL, $\tau\alpha$ et ABCD	279
ANNEXES 15 à 19 - Résultats des modèles SMAP, GARDENIA, MNL, $\tau\alpha$ et ABCD	289
ANNEXE 20 - Tests complémentaires sur GRM2	309
ANNEXE 21 - Résultats du modèle GR3M	315

INTRODUCTION GENERALE

Il peut paraître trivial de rappeler l'importance que revêt la connaissance de la ressource en eau dans un pays comme l'Algérie où le déséquilibre des pluies et des évaporations est très prononcé en faveur de ces dernières. Ce problème de la connaissance de la ressource devrait avoir la priorité sur le problème du calcul des crues dont la prééminence est traditionnelle dans les pays à climat tempéré. On pourrait croire que la connaissance de la ressource, à une échelle de temps très large, est un problème quasiment résolu. En fait, il n'en est rien, et les hydrologues se retrouvent, encore maintenant, avec des outils assez incertains pour apprécier ne serait-ce que des écoulements annuels dans les régions dépourvues de longues séries de mesures. C'est avec le souci de contribuer ne serait-ce que modestement, au progrès en cette matière que j'ai entrepris la présente recherche sur la prédétermination des écoulements mensuels et annuels en Algérie septentrionale.

PREMIERE PARTIE : DEMARCHES USUELLES POUR L'ESTIMATION DES APPORTS ET OPTIONS CHOISIES

Les apports annuels peuvent, en général, être valablement estimés avec une précision plus ou moins grande suivant que l'on dispose de données hydrométriques, pluviométriques ou climatiques. Les erreurs faites sur ces estimations peuvent entraîner, soit une mauvaise utilisation de la ressource, soit une dépense inutile.

Selon la disponibilité des données, la méthode utilisée est différente. Nous allons exposer brièvement les principales méthodes dans les différents cas rencontrés.

1.1 - DEMARCHES USUELLES POUR L'ESTIMATION DES APPORTS

1.1.1 - Cas où les données hydrométriques sont en nombre suffisant : études statistiques directes :

Le débit moyen annuel, peut être considéré a priori comme une variable aléatoire qui suit une loi de répartition statistique "normale" ou de GAUSS. La vérification de cette hypothèse est conseillée.

Lorsque l'on dispose d'une série de mesures suffisamment longue, on pourra calculer les apports en fonction de la fréquence de satisfaction choisie.

On considère que pour avoir un ajustement statistique significatif, il faut disposer d'un nombre de données d'observations supérieur à 15 ou 20. On peut parfois avoir un ajustement acceptable avec un nombre de données compris entre 10 et 15. L'étude statistique sera peu valable si l'échantillon contient des valeurs d'une fréquence réelle très différente de la fréquence expérimentale. On peut en effet observer plusieurs valeurs de fréquence réelle bien inférieures à 1/10 sur une période observée de 10 ans, par exemple, si le hasard a fait que ces 10 ans aient connu des années exceptionnellement sèches ou humides [MINISTERE DE L'AGRICULTURE FRANCAIS, 1977].

1.1.2 - Cas où les données hydrométriques sont en petit nombre et où il existe des stations voisines de longue durée : extension des séries par corrélation :

Lorsque la série de données hydrométriques est trop courte pour permettre une étude statistique directe, on s'efforce d'étendre l'information en tenant compte d'autres données.

S'il existe une (ou plusieurs) station(s) voisine(s) sur laquelle la série de mesures hydrométriques est nettement plus longue, on étudie la corrélation qui peut exister entre cette station et celle du bassin versant considéré sur les k années communes.

1.1.3 - Données hydrométriques peu nombreuses sans station longue durée comparable : modélisation pluie-débit :

C'est le cas le plus fréquent pour les petits et moyens bassins versants. On recherche alors à déterminer l'écoulement d'un cours d'eau à partir de données physiques : la pluie, la température, le vent et des caractéristiques du bassin. Cet écoulement est non seulement requis pour la prévision des crues, mais aussi pour la prédiction d'un effet d'un changement intervenu sur un bassin, et en général pour l'aménagement des ressources en eau [RAUDKIVI, 1979]. La détermination des débits par transformation des pluies peut être définie à l'aide d'une modélisation mathématique. C'est le sujet abordé dans la présente recherche.

Un modèle hydrologique devrait constituer un outil efficace pour résoudre des problèmes pratiques sur les ressources en eau. Il s'agit d'une représentation volontairement simplifiée, peut être commode d'emploi, d'un phénomène ou d'un ensemble de phénomènes [JACQUET, 1971].

Il existe déjà, dans la littérature hydrologique, de nombreux modèles pour déterminer la réponse d'un bassin versant à la précipitation. Beaucoup d'adjectifs sont disponibles pour les caractériser : déterministe, physique, stochastique, statistique, probabiliste, conceptuel, empirique, linéaire, non-linéaire, global, distribué, continu, événementiel, ...etc [JACQUET, 1971 ; ROCHE, 1971 ; CLARK, 1973 ; VAN DE GRIEND, 1979 ; RAUDKIVI, 1979 ;

LINSLEY, 1982 ; LARSON et al, 1982, WOOLHISER et al, 1982 ; MICHEL, 1989, ...].

Parmi les modèles existants, on peut citer les noms des modèles suivants CREC, SMAP, BOUGHTON, le modèle non linéaire de M.L. KAVVAS, T_{α} , ABCD, ... etc. Chacun à son interprétation des cheminements de l'eau et de leur représentation plus ou moins compliquée. Ils demandent en général une certaine expérience de la part de l'utilisateur pour les comprendre et les appliquer.

1.2 - OPTIONS CHOISIES DANS LE CADRE DE LA PRESENTE RECHERCHE :

Comme on vient de le voir, il existe un large éventail de relations empiriques et de modèles mathématiques. Cette profusion de moyens mis à disposition des ingénieurs déconcerte néanmoins nombre d'utilisateurs potentiels dans la mesure où certains des "outils" qui leur sont proposés à l'heure actuelle sont trop sophistiqués et difficilement exploitables.

Ce sentiment se trouve renforcé en Algérie, chez les ingénieurs qui ont à s'occuper d'études hydrologiques de petits et moyens bassins versants agricoles et où le problème de la transformation des pluies en débits et de sa modélisation n'a jamais été résolu si ce n'est sous la forme de quelques relations empiriques établies. L'utilisation de modèles qui n'ont pas été élaborés pour un climat semi-aride risque fort de ne pas donner satisfaction.

Or que veulent en fin de compte les utilisateurs, si ce n'est un outil simple à utiliser et qui permet d'avoir des débits les plus proches possibles de ceux réellement ou potentiellement observables sur un bassin versant.

Vu la complexité de certains modèles, on peut se demander "peut-on construire un modèle plus simple ? S'il y a vraiment un chemin plus court et plus simple, pourquoi doit-on passer par des chemins plus compliqués pour atteindre un but donné. Il n'est pas nécessaire de s'attacher à décrire tous les phénomènes physiques qui ont lieu dans un bassin, et il est même très souhaitable d'éviter une telle conformité exhaustive et fidèle [EDIJATNO, 1990].

La plupart des modèles existants s'attachent à l'analyse plus ou moins fine des phénomènes physiques se produisant dans un bassin versant, par exemple : les

lois de l'infiltration, de l'évaporation, de la percolation, des transferts latéraux,...

Lorsque l'on désire améliorer un modèle du type ci-dessus, qui peut être classé parmi les modèles physiques, on est logiquement poussé à le rendre plus complexe pour de plus en plus de fidélité à la réalité, en tenant compte de la morphologie (forme, relief, réseau de drainage, ...), de la nature des sols (perméabilité, hétérogénéité, épaisseurs, ...) et de la couverture végétale (savane, savane boisée, pseudo-steppe saharienne, forêt primaire, ...) [ROCHE, 1963].

Cette façon de procéder nous apparaît comme une impasse. Puisque l'approche qui détaille tous ces phénomènes conduira à la quasi-impossibilité d'acquérir les caractéristiques physiques à introduire dans les équations représentant les mouvements de l'eau. On aboutit ainsi à un modèle lourd et extraordinairement couteux pour l'acquisition de la description physique.

En fait, on peut imaginer une approche beaucoup plus empirique en recherchant un modèle conceptuel très simple, global, libéré des préjugés issus de déductions physiques injustifiées du fait de la méconnaissance inévitable du système.

C'est dans cet esprit que nous chercherons à établir un modèle conceptuel global de transformation pluie-débit. Mais auparavant, nous allons aborder le problème par une autre approche beaucoup plus simple que la modélisation conceptuelle: il s'agit de l'approche classique qu'on a toujours utilisée et qui est le modèle linéaire entre variables.

Cependant dans les deux approches de modélisation que nous nous proposons d'entreprendre dans le cadre de cette recherche, nous nous efforcerons de respecter certaines contraintes qui donneront un caractère particulier à nos modèles :

- l'utilisation de trop nombreux paramètres provoque souvent des difficultés dans le calage. Il est donc nécessaire d'être le plus parcimonieux possible ;
- l'application au plus grand nombre possible de bassins conduit à l'élaboration d'un modèle général et robuste ;

- le fonctionnement doit être clair et facile à comprendre, ce qui peut être atteint avec un modèle très simple ;
- la possibilité d'appliquer le modèle à des bassins non jaugés nécessite des estimations a priori des paramètres d'un modèle. On n'y parviendra guère s'ils sont plus de quatre.

DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE ET TRAITEMENT DES DONNEES HYDRO-PLUVIOMETRIQUES

2.1 - PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE :

Notre recherche s'étend à la partie septentrionale du pays, plus boisée et économiquement plus développée que le reste du territoire de l'Algérie. C'est aussi dans cette partie que sont pratiquement concentrées la population et l'économie du pays.

2.1.1 - Les conditions de formation et le régime des débits des cours d'eau de l'Algérie septentrionale :

L'Algérie septentrionale d'une superficie de 150 000 km² environ, limitée au Nord par la Mer Méditerranée et au Sud par l'Atlas Saharien, se divise en deux régions hydrographiquement bien distinctes. Ce sont les bassins versants dont les cours d'eau se jettent en mer Méditerranée (superficie : 130 000 km²) et les bassins endoreïques (superficie : 20 000 km²).

L'Algérie septentrionale occupe la partie centrale des Atlas. C'est un pays de montagnes basses et moyennes, de hautes plaines et de plateaux. L'altitude moyenne ne dépasse pas 900 m.

La partie cotière est occupée par des plaines basses petites et d'anciens massifs cristallins très démembrés. En limite sud se trouve le système montagneux de l'Atlas-Tellien, dont certains sommets atteignent ou dépassent 2000 m d'altitude. Ces montagnes sont coupées de gorges profondes où s'intercalent d'importantes cuvettes.

Plus au Sud, s'étend la région des hauts-plateaux atteignant 800 à 1200 m d'altitude. Dans les parties les plus basses de ces derniers, généralement les parties centrales, s'encastrent les lacs salés. Au sud les hauts-plateaux sont encadrés par les chaînes de l'Atlas Saharien et par le massif des Aurès, dont certains sommets dépassent 2300 m d'altitude.

Du point de vue géologique les dépôts du tertiaire et du crétacé dominant, mais on peut trouver aussi des dépôts jurassiques, paléozoïques et quaternaires. Dans les calcaires du jurassique, les karsts sont très répandus.

Le climat de l'Algérie septentrionale est subtropical méditerranéen, se caractérisant par un été très chaud et sec et un hiver relativement chaud et pluvieux. Dans les hauts-plateaux le climat est plus sec et plus continental. Le facteur prédominant dans la formation de l'écoulement des cours d'eau est évidemment la précipitation, qui est très irrégulière dans l'année.

L'altitude et l'orientation des chaînes montagneuses vis-à-vis des vents dominants, l'éloignement de la mer et la nature de la couverture des sols ont une grande influence sur les précipitations et leur répartition spatiale.

C'est pour cela que les précipitations moyennes annuelles en Algérie septentrionale varient très fortement d'une région à l'autre. Elles s'échelonnent de 1600 voire 1900 mm sur les cîmes des montagnes de grande et petite Kabylie jusqu'à 200 mm dans les régions intérieures du pays.

En hiver, une partie de ces précipitations tombe sous forme de neige. Dans les plaines, la neige ne s'observe pas systématiquement tous les ans. Son épaisseur n'est jamais importante mais peut atteindre 30 cm et plus en montagne.

Les températures moyennes annuelles de l'air sont de l'ordre de 18°C dans les régions côtières et de 14°C plus au Sud.

Le couvert végétal naturel est méditerranéen ou semi-désertique et obéit à la loi de l'étagement en montagne.

Le réseau hydrographique de l'Algérie septentrionale se compose des cours d'eau des bassins tributaires de la Méditerranée et des oueds des bassins endoréïques.

La terminologie d'oued ne définit pas du tout la vallée, mais le cours d'eau lui-même, ce qui permet de parler de lits d'oueds, de débits d'oueds, etc...

Selon la classification des régimes des rivières, les cours d'eau algériens entrent dans le type méditerranéen. Leur régime d'écoulement est conditionné par le caractère des précipitations atmosphériques et se distingue par une forte irrégularité saisonnière et interannuelle [PADOUN, 1974].

Pour les bassins versants moyens, la lame écoulée s'étale de 5 à 350 mm environ. En été, la plupart des cours d'eau sont à sec. Cependant les cours d'eau drainant des régions karstiques, ou les bassins versants possédant des particularités géologiques et hydrogéologiques favorisant leur alimentation continue en eaux souterraines, ne tarissent pas, même en été.

Pour les oueds, l'écoulement ne s'observe qu'après d'abondantes chutes de pluie. Les crues s'écoulent très rapidement, très souvent en l'espace de quelques heures, et se caractérisent par une grande vitesse de montée de l'hydrogramme. Pendant la majeure partie de l'année les lits des oueds sont à sec ou sont démembrés en de multiples bras.

Les cours d'eau algériens se caractérisent aussi par une grande quantité de transport solide. La turbidité moyenne annuelle de certains d'entre eux dépasse 30 kg/l [DEMMAK, 1983].

2.1.2 - Les stations de jaugeages disponibles :

Les données hydrométriques utilisées sont celles issues de la banque de données de l'A.N.R.H. à Alger. La sélection des bassins versants nécessaire pour cette recherche, a été faite sur la base de deux critères :

- a) bassins versants de superficie moyenne : on entend par là, ceux dont la taille est comprise grossièrement entre 20 et 2000km²;
- b) une durée d'observation minimale assez basse : toutes les stations fournissant au moins 5 années d'observations ont été retenues.

Ces critères ont conduit à 70 stations dont la liste et les principales caractéristiques figurent dans le tableau 1 ci-après.

La localisation des 70 stations hydrométriques sélectionnées figure sur la carte schématique, fig. 1, préparée dans le cadre de cette recherche. Du fait du fort allongement de la région étudiée, l'Algérie du Nord a été subdivisée en deux parties représentées l'une en-dessous de l'autre sur une même feuille : la première partie englobe la région ouest et la région centre, allant des côtières Oranais jusqu'aux côtières Algérois. La deuxième partie comprend les bassins versants allant de l'Isser jusqu'à la Medjerdah, à l'est du pays.

Les bassins versants ont été numérotés de 1 à 70 en allant d'Ouest en Est et d'amont en aval.

2.1.3 - Répartition des bassins par région hydrologique :

Nous présentons la répartition géographique de ces bassins dans le tableau 2.

N° d'ordre	CODE HYDRO LOCAL	NOM STATION	NOM COURS D'EAU	COORDONNEES LAMBERT		SURFACE (km ²)
				X	Y	
1	04.01.01	GHAZAOUET	TLATA	88.65	205.30	100
2	04.04.01	TLELAT Defluent	TLELAT	220.00	245.80	108
3	16.04.01	SEBDOU	SEBDOU	131.25	158.57	195
4	16.06.01	CHOULY RN7	CHOULY	149.63	181.06	170
5	16.07.02	BEN SEKRANE	ISSER	142.45	204.65	1230
6	16.07.04	AIN YOUCEF	SIKKAK	131.70	201.70	320
7	16.07.03	REMCHI	ISSER	122.90	208.85	1935
8	11.01.01	EL HACAIBA	MEKERRA	183.70	161.35	955
9	11.02.01	SIDI ALI BEN YOUB	MEKERRA	186.55	192.20	1890
10	11.12.20	DOMAINE BOUCHIKHI	HASNA	276.80	194.10	77
11	11.14.03	AIN FEKANE	FEKANE	254.30	217.00	1160
12	01.09.07	SEBAIN	Nahr Ouassel	401.10	239.75	515
13	01.10.01	COLONEL BOUGARA	Nahr Ouassel	432.45	251.95	1000
14	01.15.01	TAMESGUIDA	HARBIL	497.00	323.90	157
15	01.16.02	SIDI MOKREFI	DEURDEUR	462.92	302.30	500
16	01.17.15	EL ABABSA	HARREZA	443.90	318.50	102
17	01.18.01	ARIB	EBDA	439.65	335.55	270
18	01.19.06	ROUINA MINE	ROUINA	421.50	324.50	865
19	01.23.11	OULED BEN A.E.K.	SLY	372.55	301.70	1225
20	01.26.01	AMMI MOUSSA	RHIOU	357.40	286.35	1890
21	01.27.01	DJIDIOUIA	DJIDIOUIA	332.60	293.95	835
22	01.29.09	SIDI ALI BEN AMAR	MINA	357.30	225.85	1200
23	01.30.01	KEF MAHBOULA	TAHT	331.60	224.25	680
24	01.33.01	TAKHMARET	EL ABA	312.75	202.75	1550
25	01.34.01	SIDI A.E.K. DJILLALI	HADDAD	309.00	244.50	470
26	02.02.07	SIDI AKACHA	ALLALAH	375.75	354.30	295
27	02.03.01	BORDJ GHOBRINI	EL HACHEM	460.65	367.00	213
28	02.03.18	HADJOUT	BOURKIKA	475.80	358.80	72
29	02.10.07	EL AFROUN	DJER	490.45	350.70	395
30	02.10.02	TAKZOULT	BOU ROUMI	495.30	347.90	215
31	02.10.11	ATTATBA	BOUROUMI	498.60	362.85	680
32	02.11.26	LES GORGES	CHIFFA	506.15	342.30	314
33	02.12.01	FER A CHEVAL	MAZAFRAN	510.05	373.20	1900
34	02.13.01	ROCHER DES PIGEONS	EL HARRACH	532.05	354.75	387
35	02.06.09	KEDDARA II	BOUDOUAOU	564.15	372.55	93
36	02.16.05	FREHA	DIS	642.95	384.25	100
37	02.18.03	BELLOUA	SEBAOU	623.30	381.20	1490
38	02.19.05	AIN ZAOUIA	EL HAMMAN	607.10	363.50	71
39	02.19.09	RN 25	BOUGDOURA MALAH OUEST	610.20	375.81	300

41	09.03.09	DECHMYA	ZEROUA	578.25	316.45	73
42	09.03.05	BENI SLIMANE	MALAH EST	557.55	322.25	273
43	15.01.14	AIN TASTA	LEKHAL	591.4	329.6	190
44	15.01.06	TILESDIT I	ED DOUS	626.38	340.58	840
45	15.02.04	EL ASNAM	ZAIANE	620.40	335.50	800
46	15.04.01	PORTES DE FER	AZEROU	-	-	505
47	15.06.01	FERMATOU	BOUSSELAM	742.02	329.40	105
48	15.07.01	AIN ZADA	BOU SELLAM	721.05	320.8	1800
49	10.01.09	DOUAR TASSADANE	EL KEBIR	785.70	359.40	960
50	10.03.01	OUED ATHMANIA	RHUMEL	822.00	322.10	1130
51	10.05.01	EK KHROUBS	BOU MERZOUG	858.25	337.80	1600
52	10.07.02	EL MILIA	BOUSIABA	819.05	391.90	465
53	03.07.01	GUENITRA	FESSA	852.00	386.00	202
54	03.07.02	SIDI MEZGHICHE	KHENGA	856.20	382.40	100
55	03.09.01	KHEM AKHEM	SAF SAF	878.95	370.30	322
56	03.11.02	BEKOCHE LAKHDAR	HAMMAN	911.65	387.45	485
57	03.11.01	AIN CHARCHAR	KEBIR OUEST	909.60	393.15	1130
58	03.16.01	AIN EL ASSEL	KEBIR EST	1005.55	400.00	680
59	14.02.02	MOULIN ROCHEFORT	CHERF	922.35	319.80	1710
60	14.03.01	MEDJEZ AMAR II	BOUCHAMDANE	912.30	358.75	1105
61	14.05.01	BOUCHEGOUF	MELAH	949.60	362.10	550
62	14.06.02	AIN BERDA	RESSOUL	938.20	387.00	103
63	12.01.01	SOUK AHRAS	MEDJERDAH	967.7	342.2	217
64	07.07.02	FOUM.EL.GUEIS	GUEIS	885.20	247.30	144
65	07.04.03	REBOA	REBOA	848.20	250.20	296
66	07.03.01	FESDIS	EL MAHDER	816.35	259.00	305
67	05.11.01	SIDI OUADAM	SOUBELLA	721.60	269.45	176
68	05.09.01	MEDJEZ	KSOB	673.35	289.65	1330
69	05.08.01	CED FAGUES	LOUGMANE	657.10	277.90	334
70	05.01.01	AIN NESSISSA	EL HAM	583.25	290.35	470

Tableau 1 - Liste de 70 stations hydrométriques

Nom des grands B.V	Nombre de stations	Superficie(Km ²) du grand BV	Densité
COTIERS ORANAIS	2	5831	2916
TAFNA	5	7245	1449
MACTA	4	14389	3597
CHELIFF	14	43750	3125
COTIERS ALGEROIS	14	11972	855
ISSER	3	4149	1383
SOUMMAN	6	9125	1520
KEBIR RHUMEL	4	8815	2204
COTIERS CONSTANTINOIS	6	11570	1928
SEYBOUSE	4	6475	1619
MEDJERDAH	1	7785	7785
HAUTS PLATEAUX CONTANTINOIS	3	9578	3193
HODNA-NORD	4	12922	3231

Tableau 2 : Répartition des bassins par région

A partir de l'analyse du tableau 2, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- la répartition des stations est assez irrégulière. Il apparaît que dans certains bassins versants, tel que le côtier Algérois, il existe plus de stations que dans d'autres ;

- en moyenne un poste hydrologique en Algérie du Nord, contrôle une superficie de 2100 km² dans le bassin méditerranéen et de 3200 km dans les régions endoréïques.

2.1.4 - Répartition des stations selon la superficie du bassin:

Il est également intéressant d'avoir une idée concernant la répartition des superficies des bassins versants sélectionnés. Pour ce faire nous avons établi le tableau 3 suivant :

Classes des surfaces en km ²	50-120	120-300	300-800	800-2000	TOTAL
nombre de stations	12	16	22	20	70
% du total	17	23	31	29	100

Tableau 3 : répartition des stations en fonction des superficies des bassins versants

Il apparaît qu'un effort est à entreprendre sur les bassins versants dont la taille est inférieure à 300 km².

2.1.5 - Périodes d'observation des stations hydrométriques :

Les périodes de fonctionnement des 70 stations hydrométriques sont mentionnées dans la figure 2.

Période d'observation

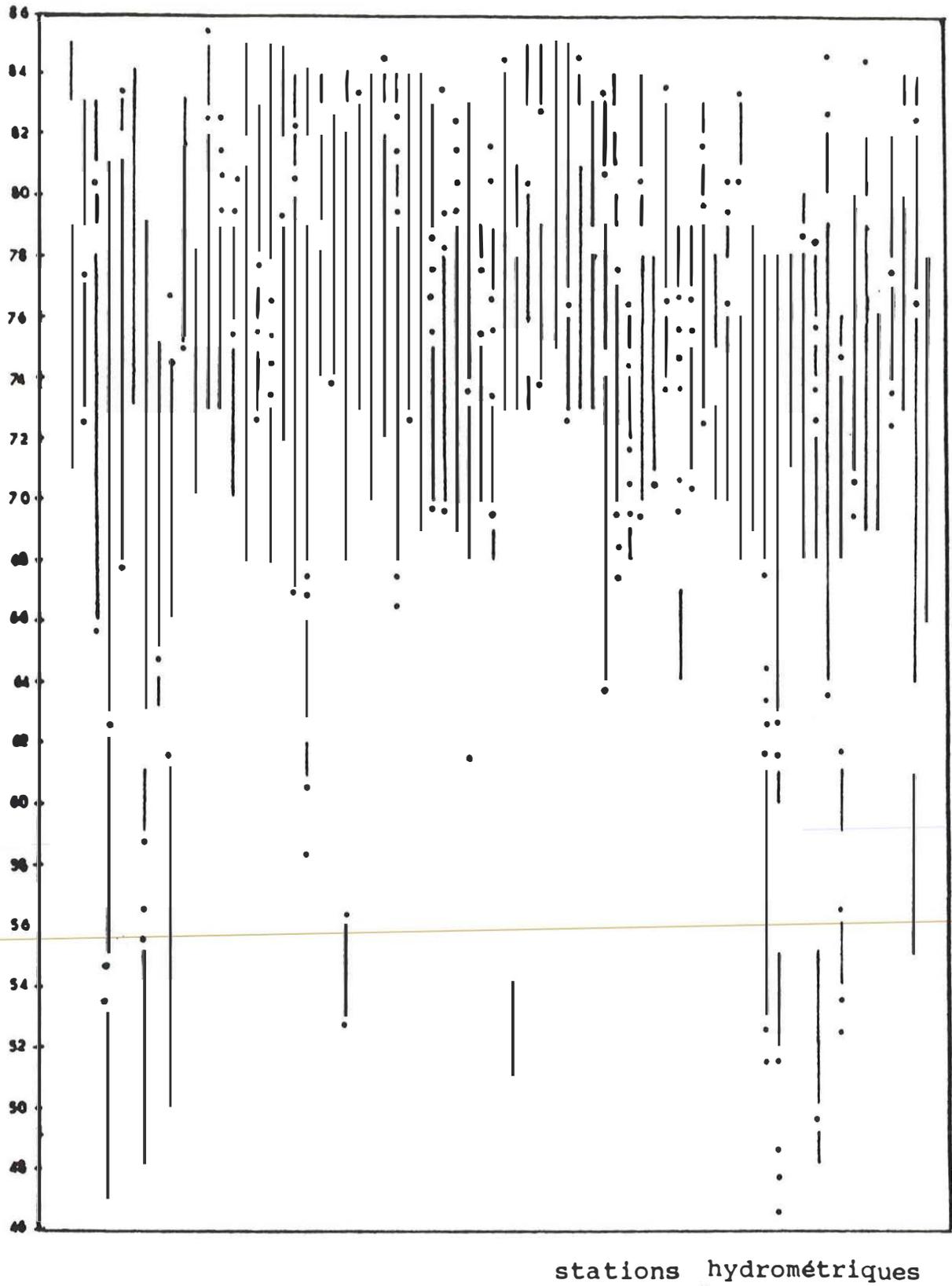


Figure 2 - Période d'observation des 70 stations hydrométriques sélectionnées

Chaque colonne représente une des 70 stations sélectionnées. La présence d'un trait continu indique que le débit a été observé pour les 12 mois de l'année de la station considérée. La présence d'un point indique que la station a au plus trois lacunes pour cette année là.

Nous constatons, que les débits des cours d'eau ont été observés ou étalonnés depuis la fin des années 40 jusqu'à 1985. Le réseau s'est développé très lentement de 1946 à 1968 (15 stations), à partir des années 70, la taille du réseau a pratiquement été multipliée par 4. Les données disponibles vont jusqu'en 1985.

Bien sûr, les durées d'observation sont très variables : de quelques années à plus de 20 ans pour certains bassins versants; 15% des stations ont une durée d'observation inférieure à 10 ans, 72% ont une durée comprise entre 10 et 20 ans et seulement 12% ont une durée de 20 à 30 ans, (durée considérée statistiquement comme valable), une seule station a été observée pendant plus de 30 ans (34 ans).

2.1.6 - Conclusion :

Cette présentation de la région d'étude, montre que malgré certaines insuffisances relatives au nombre des stations disponibles ou leur durée d'observation, l'échantillon ainsi retenu est assez représentatif des conditions hydroclimatiques de l'Algérie du Nord.

Nous nous attacherons à exploiter au maximum les informations disponibles dans le cadre d'un outil simple et robuste pour l'estimation de la ressource en eau de cette région de l'Algérie de grande importance économique.

2.2 - TRAITEMENT DES DONNEES HYDRO-PLUVIOMETRIQUES :

Comme on vient de le voir dans la première partie, les problèmes posés à l'hydrologue sont des problèmes sur les débits des cours d'eau. Une démarche naturelle consiste, dans un souci d'explication mécaniste, à remonter aux évènements qui sont à l'origine de ces débits.

Dans tous les pays d'Afrique du Nord, situés en zone subtropicale semi-aride, le régime des cours d'eau est très lié à la pluviométrie. En Algérie en particulier, la pluviométrie est le paramètre climatique dominant, beaucoup plus variable que la température.

En effet, l'entrée principale dans la plupart des modèles hydrologiques est constituée par une estimation de la pluie moyenne spatiale. La connaissance assez précise de cette variable est donc une opération très importante.

On dispose, à cet égard en Algérie, de plusieurs études, parmi lesquelles on peut citer chronologiquement :

- La carte de répartition des pluies en Algérie
par DE FLOTTE DE ROIQUEYAIR (1926)

- La carte pluviométrique de l'Algérie
par P. SELTZER (1938) au 1/1 000 000 ème d'après les moyennes brutes de vingt-cinq années agricoles du 01.09.1913 au 31.08.1938

- La carte des précipitations annuelles moyennes par M. CHAUMONT (1963) au 1/500 000 ramenée à la période de cinquante ans du 01.09.1913 au 31.08.1963

Mais, comme n'ont pas manqué de le souligner les auteurs, de très nombreuses stations ne fournissaient, à l'époque de leurs travaux, que des séries réduites de relevés annuels, et le réseau hydrométrique Algérien s'est considérablement développé après les années 70.

D'autre part, dans le problème qui nous préoccupe, la connaissance de la pluie moyenne sur le B. V. n'est intéressante que pour lui rattacher les débits mensuels et annuels. Ces variables, exprimées sous forme de lame d'eau moyenne tombée sur le bassin versant considéré, ne sont pas directement accessibles mais

nécessitent une estimation à partir d'un certain nombre de mesures ponctuelles et représentatives. C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans ce chapitre.

Le calcul de ces lames d'eau par la méthodologie que nous proposons exige 4 phases successives :

- Rassemblement et mise en forme des données observées aux postes du réseau ;
- Homogénéisation de ces données (comblement des lacunes) ;
- Etude de la compatibilité des résultats débit-pluie, éventuellement restauration de cette compatibilité ;
- Calcul à partir de ces données ainsi préparées et homogénéisées des hauteurs de pluie mensuelles et annuelles moyennées sur chaque bassin versant de l'étude.

2.2.1 - Présentation de la banque de donnée :

2.2.1.1 - Définition et choix des variables à utiliser :

Une précipitation se caractérise en tout premier lieu par sa nature selon qu'elle se fait sous forme solide ou liquide. Dans le cas de l'Algérie septentrionale, les précipitations se font essentiellement sous forme liquide.

Dans le problème qui nous préoccupe, on caractérise les précipitations par des hauteurs de pluie sur une durée Δt . Le pas de temps Δt que nous retiendrons est le mois car nous nous intéressons essentiellement à la variabilité interannuelle des débits, et une répartition mensuelle de la pluie devrait être suffisante pour connaître de façon approchée les écoulements annuels.

2.2.1.2 - Elaboration des fichiers et traitement préliminaire :

Les données de base utilisées sont les informations hydroclimatiques du réseau d'observation de l'agence nationale des ressources hydrauliques (A-N-R-H) où elles sont archivées dans deux types de fichiers :

- Fichiers manuels (support papier) ;
- Fichiers informatisés (support magnétique).

a) les fichiers manuels : il y 3 fichiers manuels principaux :

- Les cartes du 1/50 000 de localisation des stations hydrométriques et des postes pluviométriques. Il s'agit de calques de cartes d'état major existantes ;

- Des documents descriptifs traçant l'historique des stations et dans lesquels on peut trouver des renseignements quantifiés tirés des cartes au 1/50 000 du réseau topographique ;

- Les listes de pluies et surtout de débits éditées par le ministère de l'hydraulique :

Avant 1981, la banque de données était stockée sur UNIVAC au sein du ministère de l'hydraulique. Après transfert de cette dernière sur mini 6 à l'ANRH, on continue à utiliser les anciennes sorties d'UNIVAC considérées comme fichiers manuels car les données sont prises à partir de ces derniers. Ces fichiers très importants, sont considérés comme d'origine et nous les avons utilisés pour le contrôle lors de l'élaboration des programmes de calcul des débits mensuels et annuels.

b) Fichiers informatisés : L'une des caractéristiques essentielles d'un système informatique est d'être ouvert sur l'extérieur afin de pouvoir fournir rapidement des données sur support informatique.

Dans sa version initiale, le système de gestion des données hydrologiques tel qu'il était mis en place n'était pas un serveur de données pour plusieurs utilisateurs mais un serveur de données pour le seul utilisateur local, l'A.N.R.H. Les données d'observation étaient disponibles uniquement sur listing.

Il était, par suite, difficile d'obtenir un grand nombre d'informations dans un délai rapide. Ces contraintes ont beaucoup ralenti la collecte des données.

L'élaboration des fichiers informatisés de travail concernant la zone d'étude s'est déroulée en trois étapes principales :

- mise au point d'un programme de calcul des débits mensuels et annuels : après transfert de la banque de données hydroclimatiques de l'UNIVAC du ministère de l'hydraulique sur le mini 6 à l'A.N.R.H., l'information hydrométrique n'était

pas accessible. En effet jusqu'en 1986, on a continué à utiliser les séries temporelles issues d'UNIVAC autrement dit les données des anciens listings qu'il fallait recopier. C'est ainsi que quatre jeux successifs de tableaux des débits mensuels et annuels ont été édités (entre 1986 et 1987) et contrôlés avec les originaux (anciens listings d'UNIVAC) afin de mettre au point le programme de calcul des débits.

- adaptation d'un programme d'interconnection des 2 systèmes disponibles à l'ANRH : mini 6 et micro-ordinateur compatible IBM-PC (OLIVETTI M24). L'information n'était disponible que sur listings. Contrairement aux études ponctuelles effectuées jusqu'à présent, cette forme de données n'est plus utilisable quant il s'agit d'une masse importante d'informations. C'est pourquoi un programme de connection des deux systèmes a été adapté.

Le programme commence par charger à partir d'un fichier séquentiel une petite base de données contenant le répertoire des stations à extraire. Les stations choisies par l'utilisateur sont identifiées non pas par le nom mais par leur code numérique (code hydrologique local). Dans le cas de demande de station inconnue, le programme ignore cette dernière et continue le traitement.

Un contrôle immédiat est réalisé par visualisation sur écran de l'information extraite. L'utilité principale de cette opération est la disponibilité de l'information hydro-climatologique sur support informatique directement utilisable sur micro-ordinateur ; ce qui a permis une large utilisation des données avec les meilleurs délais.

L'exploitation de ce programme nous suggère les remarques suivantes :

- Pour avoir des copies correctes, sans perte d'information, l'expérience a montré, qu'on ne peut extraire à la fois qu'un nombre limité de stations, une dizaine environ ;

- Une structure unique pour tous les paramètres (pluies, débit) est conseillée : En effet, les valeurs mensuelles et annuelles d'une même année sont écrites sur 2 lignes avec présence de caractères non numériques. La normalisation du fichier pluviométrique est nécessaire.

- L'utilisation du programme nécessite au préalable deux corrections. La première est la suppression "manuelle" des lignes blanches et des caractères de contrôle dans les fichiers. La seconde est relative à la présentation de l'information manquante. Deux symboles différents du point de vue informatique ont été utilisés simultanément - 999.9 et les étoiles. Pour des raisons de commodité de travail (en informatique) et de logique, nous avons uniformisé l'absence d'information non pas par des étoiles mais par le nombre - 999.9 facile à lire avec le même format que la donnée complète.

Deux autres programmes viennent clôturer la chaîne informatique élaborée à l'occasion de la collecte des données nécessaires pour la zone d'étude. Il s'agit du programme EXP.FOR et EXD.FOR (les lettres P et D rappellent qu'il s'agit d'extraction respectivement de pluie et de débit) permettant d'extraire du fichier séquentiel précédemment préparé la station choisie. Pour ce faire, deux identifiants seulement sont nécessaires : le nom du fichier contenant la station en question et le code numérique de cette dernière.

Une fois que les outils informatiques nécessaires à une gestion rationnelle de la banque de données hydropluviométriques (programme d'estimation des débits mensuels et annuels, connexion entre les 2 matériels informatiques, (très important), programmes de normalisation et de mise en forme des données etc .. ont été entièrement mis au point, un certain nombre de fichiers de travaux seront issus au fur et à mesure des besoins de la recherche.

2.2.1.3 - Conclusion :

Une banque de données relative aux ressources en eau à l'échelle nationale est un outil important que l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.) met à la disposition du pays. Pour pouvoir exploiter pleinement et efficacement cet outil, la poursuite d'un effort d'amélioration de la banque de données hydropluviométriques est souhaitable en ce qui concerne l'acquisition, l'archivage, le traitement et la diffusion des données, cette dernière permet, en retour, de bénéficier du travail de critique des données effectué par les utilisateurs. La présente recherche est redevable des patients efforts qui ont permis l'établissement de cette banque de données.

2.2.2 - Sélection des données pluviométriques :

Les postes pluviométriques sont relativement nombreux dans la zone d'étude. Ils ont tout au moins une densité suffisamment forte pour l'utilisation que l'on compte en faire ici.

De cet ensemble de données, il faut choisir les pluviomètres les plus représentatifs pour l'estimation des apports des bassins versants. Nous avons procédé en deux temps :

La première étape consiste à sélectionner le maximum de postes en respectant simultanément les deux critères suivants :

- la représentativité spatiale ou géographique : en effet, pour des estimations de débit à partir des précipitations, les postes ne devraient pas être répartis uniformément sur le terrain, mais disposés de façon à contrôler, chacun une zone présumée d'égal débit pluviométrique (ROCHE, 1963). Dans tous les cas où cela était possible, on a donc augmenté leur densité dans les parties hautes et bien arrosées du bassin versant.

- la représentativité temporelle : de préférence, on a retenu les postes présentant la plus longue période d'observation commune avec la série débitimétrique.

La seconde étape est complémentaire de la première. Elle doit permettre de mettre en évidence, à partir de la première sélection, les pluviomètres qui représentent le plus grand intérêt pour l'estimation de l'écoulement du bassin. C'est ce que nous verrons plus tard.

Pour l'Algérie du Nord, nous avons ainsi sélectionné près de 200 pluviomètres pour les 70 bassins versants, soit en moyenne 3 postes pluviométriques par bassin. La majorité de ces postes pluviométriques est située à l'intérieur des bassins étudiés. Lorsqu'il n'y a pas de poste à l'intérieur d'un bassin, on cherche un ou plusieurs postes à proximité, en ne perdant pas de vue que ces équipements doivent être situés dans des conditions géographiques (altitude moyenne, exposition, etc ...) assez similaires à celle du bassin en question.

Ce choix de données pluviométriques a été effectué à partir de deux documents :

- des cartes (topographiques à l'échelle 1/200 000ème) de localisation du réseau hydropluviométrique de l'A.N.R.H. Sur ces cartes sont mentionnés tous les bassins versants dont l'écoulement est contrôlé par des stations hydrométriques ainsi que tous les postes pluviométriques (ou pluviographiques (PG)) quelle que soit l'époque ou la durée de fonctionnement de ces derniers. Le premier critère de représentativité spatiale du poste étant ainsi respecté, reste à voir la représentativité temporelle ;

- un catalogue par région hydrologique est disponible à la division climatologique de l'A.N.R.H. Il devrait constituer une base de données sur le contenu du fichier des observations pluviométriques et les données annexes de correspondance des codes, paramètre des sites ou appareils, date de mise de fonctionnement et qualité de certaines observations. L'utilité d'un tel document serait grande dans la mesure où il serait actualisé périodiquement. Cette tâche serait facilitée par une mise sous forme informatisée facilement accessible et maniable. Dans le cas contraire, il pourrait être source d'erreur dans le choix des postes pluviométriques. Par exemple, un fichier qui ne contiendrait que la date de début de fonctionnement de l'appareil, peut conduire à choisir un poste supposé avoir une longue durée d'observation mais qui serait arrêté depuis longtemps.

2.2.3 - Analyse des séries d'observations pluviométriques:

Le fichier pluviométrique contient tous les relevés parvenus sous forme d'observations originales à l'Agence Nationale des ressources hydrauliques. Les données intéressant notre domaine sont représentées par des hauteurs mensuelles et annuelles et n'ont subi aucun traitement pour en améliorer la qualité : il s'agit de données brutes.

Devant la dispersion et l'hétérogénéité des données de base, le service gestionnaire a réalisé dans les années 1980 un important travail de critique des originaux. En particulier, un code qualité a été attribué à la majorité des postes (douteux, bon) avec comblement de certaines lacunes par recherche d'information dans les bordereaux d'origine. Il est tout à fait dommage que les améliorations obtenues soient restées sur le fichier manuel original qui rend fastidieux son utilisation.

Ainsi l'absence de fichier opérationnel associé aux difficultés de non-disponibilité de la banque de données a rendu particulièrement difficile une telle recherche nécessitant une masse de données importante.

Malgré ces difficultés, l'opération de critique s'est déroulée de façon satisfaisante sur le plan des résultats collectés, mais au prix d'un temps de travail important.

On disposait donc, au début de nos travaux, d'un fichier pluviométrique contenant des stations avec des périodes d'observations et une qualité variant énormément d'un département à l'autre et d'un poste à l'autre. On remarque, par exemple, que les régions Est et plus particulièrement les bassins versants du constantinois et de Kebir Rhumel ont des données de moins bonne qualité que le reste de la zone.

Les lacunes sont particulièrement fréquentes, certains postes n'ont fonctionné qu'un mois sur douze, beaucoup d'autres sont arrêtés depuis longtemps sans qu'il en soit fait état dans le catalogue d'informations sur la base de données pluviométriques.

Les stations pluviométriques sélectionnées, serviront à une première estimation de la pluie sur chaque bassin versant et seront éventuellement complétées en utilisant un plus grand nombre de pluviomètres (environ 250).

L'examen des fichiers et des périodes de fonctionnement et la qualité des pluviomètres mesurant la pluie montre que la majorité des postes dispose de séries d'observations discontinues. Très peu de postes ont fonctionné sans interruption pendant les mêmes périodes que les stations de jaugeage des bassins respectifs. Il arrive souvent que des années entières soient sans observations. En particulier, la période 1954-1968 présente des données de mauvaise qualité et des lacunes fréquentes.

Dans ces conditions et pour aboutir à des données de pluies utilisables, il est nécessaire de reconstituer certaines valeurs manquantes. Il nous semble peu dangereux de combler des lacunes de faible durée. Cependant nous avons décidé

de compléter les observations sur les stations pluviométriques pour lesquelles les lacunes sont inférieures ou égales à six mois dans l'année.

Cette opération a débouché sur la mise au point d'une méthodologie de comblement des lacunes et l'élaboration d'un fichier opérationnel de données mensuelles et annuelles. C'est ce que nous proposons d'explicitier dans le paragraphe qui suit.

2.2.4 - Mise au point d'une méthodologie de comblement des lacunes mensuelles et annuelles :

L'élaboration de la technique de comblement des lacunes par corrélation entre stations a été effectuée en deux étapes :

a) tout d'abord, nous avons cherché à augmenter la longueur des séries. Pour tester cela nous avons réalisé trois essais : le mois comportant des lacunes est reconstitué à partir du même mois d'une station voisine, puis en utilisant la corrélation pour deux ou trois mois de la même station. Dans ce dernier cas, il existe également trois possibilités selon la place du mois concerné dans le triplet des 3 mois utilisés pour la corrélation.

L'essai de ces différents tests sur un poste pluviométrique de la région de la TAFNA (code : 160602 compléter par le poste 160701) a montré qu'il est préférable d'une part de reconstituer le mois manquant par l'application du modèle sur trois mois consécutifs et d'autre part de placer le mois défaillant au milieu de ces 3 mois.

b) la deuxième étape a consisté à utiliser une, deux ou trois stations explicatives. Les résultats obtenus sont d'autant meilleurs que le nombre de stations explicatives est plus important, cependant nous nous limitons à trois variables.

Le programme ainsi établi est facile d'utilisation puisqu'il suffit d'introduire successivement les informations suivantes :

- . nom ou code du poste à compléter ;
- . nombre de stations utilisées comme variables explicatives ;
- . code respectif de chacune des stations explicatives ;
- . nom à donner au poste complété.

Les résultats de la corrélation (coefficient de détermination et erreur standard pour chacun des mois reconstitués) sont affichés sur l'écran, ce qui permet de faire une première critique de la reconstitution. Les mois reconstitués sont écrits directement dans le fichier complété.

2.2.5 - Principe adopté dans la critique des données :

La caractéristique majeure des données hydro-météorologiques est d'être issues de mesures effectuées sur le terrain, dans des conditions naturelles. Contrairement au laboratoire où le milieu ambiant et les mesures sont relativement bien contrôlées, les facteurs qui influencent la grandeur à mesurer dans les conditions naturelles sont très nombreux et parfois indésirables.

Les données fournies sont aussi susceptibles d'être entachées d'erreurs, qui peuvent être accidentelles ou systématiques.

Les erreurs accidentelles sont surtout des erreurs d'exploitation : erreurs d'observation, de transcription, de copie et d'impression ou erreurs d'imprécision relatives à la conception même des appareils de mesure et à leur installation.

Les erreurs systématiques peuvent survenir à l'occasion d'un changement d'observateur, d'une déféctuosité progressive d'un appareil, d'un changement de type d'appareil, d'un changement de méthode de mesure ou de modifications de l'environnement.

Si les erreurs accidentelles se compensent plus ou moins statistiquement, il n'en est pas de même des erreurs systématiques qui entraînent une rupture de l'homogénéité de la série observée et peuvent alors fausser l'exploitation ultérieure des données.

L'existence éventuelle de ces deux types d'erreurs nécessite un contrôle de qualité des données à utiliser.

Les diverses méthodes de critique des données sont fondées sur la recherche de l'homogénéité des variables aléatoires (BOIS, 1976). Pour les données pluviométriques, on cite essentiellement les méthodes

suivantes: méthode des écarts cumulés par rapport à la moyenne, méthode des écarts à la droite de régression et méthode des doubles cumuls.

Quand la vérification de l'homogénéité des séries d'observations concerne toutes les stations de plusieurs régions, la comparaison des postes deux à deux devient fastidieuse. Notre intention ici n'est pas de procéder à une critique systématique de tous les postes mais à chercher un moyen de contrôle rapide qui n'examinera pas systématiquement les données disponibles mais permettra de détecter, parmi cette masse d'informations, les données qui apparaissent extrêmement douteuses.

Une partie importante du travail a été consacrée à l'élaboration de données plus complètes sur lesquelles la recherche de modèle s'effectuera.

En gros, cette opération s'est déroulée en deux étapes : tout d'abord nous avons effectué un premier dégrossissage des données afin de déceler certaines erreurs accidentelles puis nous avons déterminé les postes qui semblent être le moins susceptibles de souffrir d'hétérogénéité et les plus à même d'être utilisées pour l'estimation des écoulements mensuels et annuels.

Par la même occasion nous procédons aussi à un contrôle des données de débits.

2.2.5.1 - Première vérification des données :

Avant de vérifier l'homogénéité des séries on a essayé de détecter toutes les erreurs grossières dont la correction peut parfois être faite avec un peu de bon sens mais qui pourraient passer inaperçues si l'on se contentait d'examiner des totaux annuels ou même mensuels [DUBREUIL, 1974].

A cet effet, nous avons procédé à un premier examen sommaire. Il consiste à comparer les listings de pluies mensuelles et annuelles des stations proches : mis à part le côtiers Oranais, les stations identifiées par les numéros (1) et (2) et les bassins (63) et (67), on dispose en général pour chaque station hydrométrique d'au moins deux pluviomètres proches. Cette première visualisation permet de vérifier la vraisemblance des données en contrôlant particulièrement :

- les grandeurs annuelles par rapport à ce qu'on trouve en général dans la région : par exemple, vérifier que des valeurs localement fortes de la pluviométrie moyenne ou de l'écoulement ne sont pas dues à des erreurs de transcription mais bien à des particularités locales ou météorologiques ;
- la durée et le nombre approximatifs des séquences pluvieuses et sèches comparées à l'écoulement de même période pendant une année et d'une année sur l'autre ;
- la fréquence d'apparition du chiffre zéro comme dernier chiffre de la mesure peut détecter par exemple une erreur de transcription ;
- recensement des pluviomètres présentant des lacunes d'observation trop importantes et recherche des pluviomètres de complément.

2.2.5.2 - Méthode de détection des anomalies :

Dès le départ, nous étions conscients de la nécessité de chercher une méthode rapide et efficace pour la critique des données anciennes. Nous allons voir comment il est possible de détecter, dans les séries anciennes, des valeurs qui paraissent anormales et qui méritent d'être vérifiées.

En effet détecter des erreurs est une opération hasardeuse, mais nous pouvons signaler les observations qui paraissent en fort désaccord par rapport à un modèle adapté à la région.

Pour ce faire, une première façon de procéder aurait consisté à vérifier systématiquement l'homogénéité de l'ensemble des pluviomètres à utiliser quelle que soit la qualité des données, puis choisir les postes les plus représentatifs. On se serait heurté alors à plusieurs difficultés : en premier lieu, le fichier contenant environ 200 postes, il aurait fallu traiter une masse moyenne de 36.000 observations mensuelles pendant un temps relativement court ! En second lieu, une fois les discontinuités chronologiques détectées, on n'aurait pas été sûr d'être en mesure de rectifier les erreurs (si ce sont réellement des erreurs). Seuls les services gestionnaires des stations pourraient éventuellement porter un jugement et corriger certaines erreurs après vérification des originaux et en interrogeant les observateurs.

Pour ces raisons, nous avons préféré rejeter cette première façon et adapter à notre problème une technique très classique qui nous permettra de déterminer, parmi les postes sélectionnés au chapitre (2.1) ceux qui sont à la fois le moins entachés d'hétérogénéité et le plus représentatifs des apports des différents bassins versants. Autrement dit, une méthode utilisée à des fins de correction et de sélection. Nous proposons d'utiliser les corrélations linéaires.

Notre démarche est la suivante : par analyse des corrélations établies entre les pluies mesurées et les débits concomitants nous essayons de dégager deux groupes de données :

- le groupe des postes "fiables"
- le groupe des postes "douteux"

Le groupe des postes "fiables" correspond aux séries présentant des liaisons positives significatives. Le degré de liaison entre ces 2 variables (pluie et débit) est un indicateur à la fois de la qualité et de la représentativité des postes considérés. Pour chaque bassin versant on indiquera le coefficient de corrélation, la taille de l'échantillon, et la valeur du test de Student. Lorsque le coefficient de corrélation est significatif nous avons admis que les données hydropluviométriques correspondantes ne sont pas affectées d'anomalies importantes.

Par contre, si les séries des deux variables considérées sont complètement indépendantes ou présentent des coefficients de corrélation faibles, le groupe de postes est considéré comme "douteux". On recherche alors les causes d'un tel résultat. Trois hypothèses sont possibles :

- d'abord on examine les débits : pour des raisons de conditions de mesure et d'interpolation, les débits sont généralement plus susceptibles d'être douteux que les précipitations. On peut commencer par comparer cette station avec toutes les autres qui peuvent raisonnablement lui être corrélées, c'est-à-dire avec celles qui se situent sur le même cours d'eau (en amont ou en aval) ou à proximité.
- puis on procède de la même façon que précédemment pour détecter les pluviomètres défectueux. On peut aussi détecter des erreurs d'unités, des erreurs de saisie et améliorer ainsi la qualité des données. Mais lorsque la cause d'une

mauvaise corrélation n'est pas clairement déterminée, aucune correction n'est effectuée.

- enfin on peut accuser le modèle : pour certaines régions le modèle peut rendre moins bien compte de la transformation de la pluie en débit.

2.2.6 - Amélioration de l'information des B.V. à série d'observation courte :

Au paragraphe (2.1.2) traitant de la présentation des bassins versants, nous avons préféré, dans un premier temps ne pas faire de choix a priori et retenir l'ensemble des stations de jaugeage présentant des observations, puis si nécessaire nous envisageons d'éliminer certaines stations dans le cas d'insuffisance de leur durée d'observation commune avec celle de la pluviométrie.

On constate, sur la période commune aux débits et aux pluies que parmi les 70 B.V. jaugés de moins de 2000 km² plus d'un quart présentent des durées d'observations de moins de 7 années d'observations, ce qui est peu satisfaisant.

Nous nous trouvons alors devant un choix difficile entre un petit nombre de stations connues sur une période suffisante, avec des données mesurées, et un plus grand nombre de stations mais avec une partie des données reconstituées et donc moins dignes de confiance.

Notre choix a été guidé par le fait que parmi les stations qui présentaient des lacunes d'observations, il ne manquait à certaines que quelques mois. Il était dommage de rejeter ces stations alors qu'il était raisonnablement possible de combler les observations de faible durée. Nous avons donc décidé de compléter les observations sur les stations pour lesquelles il ne manquait pas plus de 3 mois par an.

2.2.6.1 - Essai de récupération des séries débitométriques courtes :

Cette opération s'est effectuée en 2 temps : tout d'abord, nous avons établi la matrice des coefficients de corrélation entre les 70 stations prises 2 à 2, puis pour chacune des 13 stations présentant des lacunes, nous avons retenu les 3 stations

qui lui étaient le mieux corrélées. Par régression simple ou multiple nous avons reconstitué les lames d'eau mensuelles pour chaque période d'absence d'information.

Globalement, les coefficients de corrélation linéaire étaient nettement supérieurs à 0.80. Les données ainsi reconstituées paraissent devoir être suffisamment fiables pour ne pas entraîner de graves anomalies dans l'exploitation ultérieure.

Parmi les stations présentant des séries courtes, ce traitement a permis de récupérer une dizaine de stations qui initialement étaient à éliminer. Il s'agit des stations : de AIN FEKANE (11), COLONEL BOUGARA (13), ROCHER DES PIGEONS (34), KEDDARA II (35), PORTE DE FER (46), DOUAR TASSADANE (49), OUED ATHMANIA (50), EL KHROUBS (51), SIDI MEZGHINE (54) et BOUGHEGOUF (61).

Nous remarquons que pour deux stations : SOUK AHRAS (63) et SIDI OUADAH (67) nous ne disposons pas de données de pluies ni sur le bassin ni aux environs. Par conséquent ces 2 bassins ne seront pas utilisés dans la présente étude.

Après cette phase de comblement des lacunes des séries courtes, nous disposons de données mensuelles pour 68 bassins (puisque pour 2 stations, la pluviométrie est inconnue) dont la durée d'observation minimale commune avec la pluie est de 7 ans, sauf pour le bassin de GUENITRA (53) et le bassin de FESDIS (66) dont la durée respective est de 5 et de 6 ans. Bien que ces 2 séries présentent des durées d'observations considérées comme insuffisantes, il serait dommage de les rejeter alors qu'on peut les garder tout en émettant quelques réserves sur leur utilisation.

2.2.6.2 - Vérification des données :

Avant d'étudier la représentativité des postes pluviométriques, nous avons voulu mettre en relief d'éventuelles anomalies.

Pour ce faire, on a utilisé la méthode des régressions et on a effectué pour chacun des 13 bassins versants la corrélation linéaire simple entre les débits et la pluie moyenne.

L'analyse des résultats des corrélations sur ces données montre que globalement les coefficients sont faibles. En particulier pour les bassins suivants : COLONEL BOUGARA (13), ROCHER DES PIGEONS (34), KEDDARA II (35) et PORTE DE FER (46) où le coefficient n'atteint pas 0.60.

Un examen de la compatibilité des données "apports-précipitations" sur chacun des bassins présentant des résultats non satisfaisants laisse apparaître des anomalies dans deux séries débitmétriques voisines : la station ROCHER DES PIGEONS (34) et celle de KEDDARA II (35) situées dans les cotiers Algérois.

La station ROCHER DES PIGEONS (34) comporte une année douteuse, de 1971, où l'écoulement est aussi important que la précipitation moyenne ($Q_{a71} = 823.7$ mm et $P_{a71} = 816.7$ mm). Si on réalise une régression sans prendre en compte l'année douteuse, on constate que non seulement les caractéristiques de la corrélation (R, TS) deviennent significatifs mais que l'erreur standard est diminuée de moitié comme on peut le voir sur les tests 1 et 2 du tableau 4.

Le même traitement a été effectué pour la station KEDDARA (35).

N°test	taille de l'éch.	Nbre de PV	R	T.S	ES	Observation
1	9	5	0.591	2.5	19.3	avec 1971
2	8	5	0.949	7.3	10.9	sans 1971

Tableau n° 4 : Exemple de détection d' anomalies

2.2.6.3 - Détermination des postes pluviométriques les plus représentatifs pour les séries courtes :

Après la phase de comblement des lacunes et celle de détection de certaines anomalies, nous allons essayer de déterminer les postes pluviométriques les plus représentatifs des apports, espérant ainsi accroître la qualité des données d'entrée dans les modèles à utiliser.

La représentativité du poste se traduit naturellement par la meilleure corrélation obtenue entre les pluies qui y sont mesurées et les débits concomitants. Ainsi pour chacun des 13 BV où la pluie moyenne est mesurée à différents postes, nous

avons effectué plusieurs corrélations entre les pluies et les débits observés. A ce sujet deux constatations importantes sont à faire :

- le fait que la pluie de bassin soit estimée à partir d'un nombre plus important de postes pluviométriques n'est pas un gage de représentativité. Ceci peut être illustré par l'exemple du bassin de PORTE DE FER (46) (cf tableau 5, test 1 et 2): deux tests ont été réalisés pour déterminer le (ou les) poste(s) le(s) plus intéressant(s) pour leur liaison avec l'écoulement. Le test 1 correspond à la pluie moyenne de 3 pluviomètres bien répartis sur l'ensemble du bassin versant, le test 2 à la pluie issue d'un seul poste.

Comme on peut le remarquer, la corrélation devient nettement plus significative dans le second cas. Cet exemple n'est pas unique, les stations de DOUAR-TASSADANE (49), BOUCHEGOUF (61) et FESDIS (66) (cf tableau 5) présentent généralement des corrélations plus satisfaisantes avec une précipitation estimée à partir d'un nombre de postes pluviométriques moins important que le nombre total disponible.

- Le poste pluviométrique le plus représentatif des apports n'est pas forcément le plus proche du bassin. Ceci peut-être illustré par l'exemple du bassin de SIDI MEZRICHE (54) (cf tableau 5 test 9 à 12) : dans un premier temps, nous avons sélectionné les postes susceptibles de mieux représenter la pluviométrie (3 postes à l'intérieur du B.V. : deux en amont et un en aval (test 9)). On peut constater que le test 10, dans lequel le poste aval a été éliminé, améliore sensiblement la corrélation sans qu'elle soit encore significative. Nous avons ensuite cherché à améliorer ce résultat en rajoutant un poste pluviométrique extérieur au bassin (03-07-06) qui semblait initialement sans intérêt. La corrélation correspondante (cf tableau 5, test 11) donne un coefficient supérieur aux tests 9 et 10 précédents. L'amélioration apportée par l'introduction de ce poste nous a conduits à réaliser le test 12 où la pluviométrie est estimée par ce seul poste pluviométrique. On obtient alors les résultats les plus satisfaisants avec une erreur standard diminuée de moitié par rapport au test 9 rassemblant les 3 pluviomètres situés à l'intérieur du bassin.

D'autres cas similaires existent, par exemple la station GUENITRA (53) où l'introduction d'un poste extérieur au bassin améliore significativement la corrélation.

N° d'ordre	N°test	Nombre de PV	R	T.S. ^t	E.S.	Observations
46	1	3	0.501	1.7	6.66	3PV à l'intérieur du bassin
	2	1	0.850	4.3	3.30	le plus en amont
49	3	4	0.640	3.5	4.85	
	4	1	0.930	4.6	2.91	
61	5	3	0.884	4.7	11.9	
	6	2	0.891	4.9	11.0	
66	7	4	0.352	0.8		
	8	1	0.869	2.3	1.70	
54	9	3	0.689	2.0	6.30	3 postes à l'intérieur du bassin
	10	2	0.701	2.1	5.64	Idem mais en enlevant le poste le plus en aval
	11	3	0.848	2.9	4.76	Comme en 10 avec introduction d'1 poste ext. au bassin
	12	1	0.950	5.9	3.09	Poste ext. uniquement
53	13	4	0.741	2.4	3.80	
	14	2	0.859	2.9	2.80	introduction d'1 poste ext.

Tableau 5 : Représentativité des postes pluviométriques

2.2.6.4 - Premières conclusions de l'étude des séries courtes :

L'étude des séries courtes a permis :

- d'élaborer un programme de reconstitution des observations manquantes et donc d'augmenter la taille des observations de débits et ainsi de pouvoir intégrer plus de stations dans l'étude.

- de montrer que la représentativité d'une pluie moyenne n'est pas forcément liée à la proximité du bassin des postes utilisés ou encore au nombre important de ces postes.

Un nombre moins important de postes pluviométriques mais mieux choisis peut donner une pluie de bassin mieux liée à l'écoulement. Plus encore, un poste extérieur au bassin peut parfois être plus intéressant que ceux situés à l'intérieur.

- d'effectuer une première critique des données et d'émettre des réserves sur la possibilité d'exploiter les données de certaines stations.

- de constater que contrairement à ce que l'on pouvait attendre, les séries pluviométriques comportent plus de lacunes que les séries de débits. On a été amené à ne pas prendre en compte certaines stations de débits parce que la pluie correspondante n'était pas connue. Ainsi 2 stations (SOUK AHRAS (63) et SIDI OUADAH (66)) ont été éliminées parce qu'on ne dispose pas de pluviomètres ni dans les bassins ni dans les environs proches.

Cette première étude critique doit être généralisée à l'ensemble des stations et non plus seulement aux seules stations de courte durée.

2.2.7 - Généralisation de la critique sur l'ensemble des stations :

Arrivés à ce stade, nous disposons de 68 stations de jaugeages dont les données n'ont été critiquées que pour les stations présentant des périodes d'observations "insuffisantes", c'est-à-dire inférieures à 7 années.

Nous n'avons pas de raisons de penser que les séries d'observations plus longues soient moins entachées d'erreurs que les séries plus courtes. Il nous reste donc à

vérifier les données hydrométriques de 55 bassins (puisque 13 stations ont été étudiées précédemment) et à améliorer la connaissance de la pluviométrie.

Pour ce faire, nous avons adopté la même démarche que celle utilisée au paragraphe (2.2.6) et nous avons pratiqué d'une façon systématique une analyse de corrélation entre données hydrométriques et pluviométries moyennes.

On constate que les corrélations sont en général acceptables même parfois pour des séries courtes. La plupart des coefficients de corrélation sont significatifs au seuil de 1%, ce qui signifie qu'il y a moins d'une chance sur cent pour que le signe de la relation soit le fait du hasard. Les données correspondant à ces régressions pourront être considérées comme "fiables", et seront améliorées en prenant en considération les remarques effectuées lors de l'étude des stations à série courte (cf 2.6.4).

Par contre certains coefficients de corrélation sont moins bons. Dans 17 cas, les valeurs du test de Student ne sont pas significatives et deviennent aberrantes pour quelques régressions. Ces mauvais résultats pourront être mis sur le compte :

- de la qualité des données hydro-pluviométriques utilisées, particulièrement les débits ;
- d'une mauvaise estimation de la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant : en effet les postes pluviométriques utilisés sont ceux qui ont été sélectionnés au chapitre 2.2.2, selon les 2 critères de représentativité spatiale et de représentativité temporelle. Or l'analyse des résultats des séries courtes a permis de mettre en évidence que les pluviomètres présentant le plus grand intérêt pour l'estimation des apports ne sont pas forcément les plus proches du centre du bassin et qu'un nombre plus important de postes n'est pas toujours garant d'une meilleure estimation de la lame précipitée sur le B.V.

Dans un premier temps, nous allons essayer de rechercher les causes de la faiblesse de certains coefficients de corrélation obtenus sur les 17 B.V.

Puis, pour les B.V. présentant des corrélations satisfaisantes, compte-tenu des remarques faites précédemment au paragraphe 2.2.6.3, nous essayerons d'améliorer la qualité des données correspondantes en déterminant les postes pluviométriques les mieux liés aux apports.

Nous avons vu dans le paragraphe 2.2.6.1 du présent chapitre, qu'il est possible d'augmenter la durée d'observation de certaines stations hydrométriques en reconstituant uniquement les lacunes de faible durée. Il est donc intéressant de tester l'apport des comblements de lacunes non seulement sur les séries de durée insuffisante mais aussi pour l'ensemble des stations présentant des lacunes qui ne dépassent pas 3 mois par an.

2.2.7.1 - Comblement des lacunes des débits à série d'observations considérée suffisante :

La première constatation est que la reconstitution des observations manquantes des séries hydrométriques améliore significativement les corrélations entre les 2 séries de variables débits et pluies. A titre d'exemple, le tableau 6 illustre pour 5 BV les améliorations des critères d'appréciation des corrélations établies avec et sans comblement des lacunes.

N°d'ordre	Nbre de P.V	taille de l'éch.	R	T.S
40	4	8	0.726	2.6
	4	9	0.956	5.6
43	2	9	0.699	2.6
	2	10	0.899	3.9
45	5	9	0.791	3.4
	5	10	0.896	3.8
47	3	9	0.606	2.0
	3	11	0.872	3.5
42	3	7	0.781	4.2
	3	11	0.882	5.3

Tableau 6 : Amélioration des corrélations par augmentation des séries débitométriques

On remarque que parmi les 17 BV présentant des corrélations non satisfaisantes, 5 d'entre eux ont pu être récupérés par une extension de faible importance. Ce

résultat vient confirmer les remarques établies lors de l'étude des stations de durée "insuffisante".

2.2.7.2 - Vérification des données :

Il nous reste donc à vérifier les données d'une douzaine de BV (puisque on vient d'améliorer 5 sur 17 BV à problèmes) présentant des coefficients de corrélation faibles. En particulier, dans le bassin versant du Chéouiff, pour trois stations de jaugeages : DJIDIOUIA (21), SIDI ALI BEN AMAR (22) et ARIB (17), disposant cependant d'une durée d'observation suffisante (respectivement de 9, 10 et 11 ans) et d'une pluviométrie en général bien observée (sauf pour le bassin DJIDIOUIA (21)), les coefficients de corrélations sont anormalement faibles. Dans de pareils cas, il s'agit probablement moins d'une mauvaise estimation de la pluviométrie que de données de débit suspectés.

Nous exposerons notre démarche de clarification en traitant la station la plus défectueuse : ARIB (17).

Tout d'abord, il faut orienter la recherche de l'erreur : nous avons comparé les valeurs de deux grandeurs obtenues en utilisant les données dont on dispose à celles tirées de la bibliographie [DEMMAK, 1983, I.N.R.H., 1972]. Ces grandeurs sont la lame écoulée annuelle moyenne et la pluie annuelle moyenne sur le BV. On constate bien que la valeur de la pluviométrie tirée de la bibliographie est plus élevée ($P_a = 737$ mm) que celle estimée dans cette étude ($P_a = 600$ mm), la lame écoulée annuelle moyenne tirée de la bibliographie est nettement moins importante que celle calculée par nos soins. Par conséquent, on peut conclure que c'est plutôt la série des débits qui comporte des anomalies.

Deux années, l'année 1979 et 1980, présentent des débits mensuels non seulement supérieurs aux précipitations correspondantes mais aussi beaucoup plus forts que ce que l'on trouve dans la région. Les résultats des corrélations établies en tenant compte des 2 années et en les supprimant sont présentés respectivement dans le test 1 et 2 du tableau 7. On remarque que la régression correspondant au test 2, où les 2 années douteuses sont éliminées devient très significative et que la lame interannuelle Q_a (337 mm) est égale à celle des études antérieures (338 mm). Ces 2 années de précipitations manifestement fausses ont été éliminées.

N°du test	taille de l'échant.	R	T.S.	E.S.	Pa	Qa
1	effectif contenant les années 79 et 80	0.353	1.1	57.0	600	460
2	effectif précédant moins les années 79 et 80	0.835	5.00	13.0	600	337
3	années 79,80 éliminées années 72,73,83 corrigées	0.942	6.2	12.3	600	315

Tableau 7 : critique de la station ARIB (17)

La série ARIB (17) comporte également d'autres observations douteuses. On constate que les lames mensuelles du mois de juin des années 72, 73 et 83 ainsi que celles du mois de juillet de l'année 83 sont anormalement fortes pour une période d'étiage.

Nous avons pensé qu'il serait regrettable d'éliminer les années correspondantes alors qu'il est peut être possible de les corriger d'autant plus que ces mois estivaux pèsent peu dans l'écoulement annuel.

Pour ce faire, nous avons considéré que les observations correspondantes à ces 4 mois douteux (3 mois de juin et 1 mois de juillet) sont manquantes et nous les avons reconstituées par corrélation avec les stations voisines. La corrélation pluie-débit effectuée après élimination des 2 années fausses (79 et 80) et correction de certaines observations douteuses (4 mois) est la plus satisfaisante comme on peut le constater dans le test 3 du tableau 7 où le coefficient de corrélation passe de 0.353 (test 1 du tableau 7, sans aucune correction) à 0.942 (test 3 du tableau 7, avec corrections). Nous utiliserons donc les données relatives à ce dernier test.

La même procédure a été utilisée pour la critique des données des stations de jaugeage de DJIDIOUIA (21) et SIDI ALI BEN AMAR (22).

Deux années semblent être douteuses dans la série de débits DJIDIOUIA (21) : il s'agit des années 73 et 82. Une amélioration significative est apportée en supprimant ces 2 années. Le coefficient de corrélation est supérieur à 0.850 (test

2 du tableau 8 relatif à la correction) alors qu'il était inférieur à 0.350 (test 1 du tableau 8) en incluant ces 2 années).

N°d'ordre du BV	N°du test	taille de l'échantillon	R	T.S. ^t	E.S.
21	1	effectif contenant années 73 et 82	0.342	1.0	3.64
	2	effectif moins années 73 et 82	0.851	2.4	2.17
22	3	contient l'année 80	0.661	1.4	2.62
	4	moins l'année 80	0.876	3.2	1.06

Tableau 8 : Critique des stations de DJIDIOUIA (21) et de SIDI ALI BEN AMAR (22)

De même les observations de l'année 1980 correspondant à la série de SIDI ALI BEN AMAR (22) sont critiquables. En effet, la corrélation devient plus significative en absence de cette année. Le test 3 et 4 du tableau 8 résume les résultats obtenus respectivement en tenant compte de l'année douteuse (1980) et en la supprimant.

2.2.7.3 - Détermination des pluviomètres les plus représentatifs:

Aussi donc, les données d'une dizaine de stations ayant pu être améliorées soit par comblement de lacunes, soit par détection et correction de certaines valeurs erronées. Il reste 9 BV pour lesquelles le coefficient de corrélation reste faible. Nous allons essayer d'améliorer l'information correspondante à ces BV en analysant la pluviométrie moyenne de chaque BV.

Pour ce faire, nous avons procédé à la recherche du (ou des) pluviomètre(s) le(s) plus représentatif(s) des apports. Aussi a-t-on effectué, pour chacun des bassins un certain nombre de corrélations utilisant des pluies mesurées à différents postes pluviométriques. La représentativité d'un poste est traduite par la meilleure corrélation obtenue.

Certains postes pluviométriques ont été éliminés : comme dans le cas des BV de TLETAT DEFLUENT (02) et de SIDI.A.E.K. DJILLALI (25) où les corrélations deviennent significatives avec un nombre de pluviomètres moins important. Ceci est illustré par le groupe de test (1 et 2) du tableau 9 relatif à la station TLETAT DEFLUENT (02) où le coefficient de corrélation passe de 0.431 à 0.932 en éliminant uniquement un poste. On peut faire la même remarque concernant la station de SIDI A.E.K. DJILLALI (25) (cf test 3 et 4 du même tableau).

Dans d'autres cas (5 BV) la prise en compte d'un poste extérieur au bassin a pu améliorer considérablement les résultats. L'exemple des stations d'EL ABABSA (16) et KHEM AKHEM (55) et de MEDJEZ AMAR II montre que le pluviomètre présentant le plus grand intérêt pour l'écoulement peut ne pas être le plus proche du bassin. Les 3 groupes de tests (5,6),(7,8) et (9,10) du tableau 9 montrent l'amélioration obtenue par l'introduction d'autres postes éloignés qui semblent être a priori peu intéressants pour les apports.

N°d'ordre	N°du test	N°de PV	R	TS	ES	Observations
02	1	3	0.431	1.3	2.65	meilleure re-présentativité avec moins de pluviomètres
	2	2	0.932	5.3	1.92	
25	3	3	0.343	1.9	1.50	
	4	2	0.888	3.6	0.966	
16	5	2	0.325	1.9	6.47	corrélations améliorées par l'introduction d'un poste extérieur au B.V
	6	3	0.883	3.5	4.30	
55	7	2	0.545	1.3	10.9	
	8	3	0.916	4.4	6.89	
60	9	2	0.665	1.6	9.94	
	10	2	0.840	3.0	6.38	

Tableau 9 : Postes pluviométriques les plus représentatifs

Pour la majorité des stations, ce traitement a permis de retrouver des corrélations pluie-débit utilisables là où les fichiers d'origine semblaient être douteux.

Mais il est dommage de constater que par manque d'observation des précipitations on a été amené à :

- éliminer des stations : SOUK AHRAS (63) et SIDI OUADAH (67) ;
- émettre des réserves sur l'utilisation d'autres stations : EL HACAIBA (8).

2.2.7.4 - Essai d'amélioration des données "fiables" :

L'analyse des données des bassins versants présentant des problèmes à cause du faible nombre d'observations communes aux débits et aux pluies, ou à cause d'une mauvaise représentation de la pluviométrie moyenne ou encore à cause de l'existence de valeurs erronées, étant arrivée à sa fin, nous terminons l'étude critique par une généralisation de ce traitement à l'ensemble des bassins, c'est-à-dire à ceux qui a priori disposent de données hydro-pluviométriques considérées comme "fiables" et dont les corrélations correspondantes sont satisfaisantes.

Principalement deux opérations ont été effectuées : d'abord nous avons procédé au comblement des lacunes pour les années où il ne manquait pas plus que 3 mois, puis nous avons déterminé les postes pluviométriques les plus intéressants.

Sur les données des 38 BV "fiables" une douzaine de stations ont été améliorées en reconstituant les valeurs manquantes. Dans la plupart des cas, le coefficient de corrélation est excellent et supérieur à 0.9 (sauf pour le bassin LES GORGES (32) où $R = 0.829$) comme on peut le constater sur le tableau 10.

N° d'ordre des BV	Nbre de PV	Nbre d'années communes	R	T.S
14	2	8	0.860	4.2
	2	10	0.936	5.90
19	4	10	0.896	5.7
	4	12	0.942	6.1
24	4	9	0.858	3.2
	4	10	0.903	4.0
26	2	11	0.930	7.6
	2	13	0.964	8.4
27	3	12	0.872	5.6
	3	15	0.933	6.4
28	2	11	0.882	5.6
	2	12	0.943	6.2
30	4	8	0.858	4.1
	4	12	0.936	5.8
31	8	7	0.956	7.5
	8	11	0.966	7.9
32	2	9	0.715	2.7
	2	12	0.829	3.0
33	19	8	0.921	5.8
	19	9	0.961	6.4
36	3	10	0.867	4.9
	3	11	0.927	5.0
44	5	12	0.899	6.5
	5	14	0.950	7.3

Tableau 10 : Amélioration des résultats par comblement des lacunes des débits pour les B.V considérés comme fiables

Quatre autres stations ont été améliorées par une meilleure estimation de la pluviométrie du BV. Le tableau 11 montre que les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.9 (sauf pour le BV de CED FAGUES (69) où $R = 0.885$).

N° d'ordre des BV	Nbre de PV	R	T.S	E.S
20	4	0.730	2.9	8.5
	5	0.927	5.3	6.0
23	4	0.858	4.7	
	3	0.951	7.1	2.3
52	3	0.819	3.5	4.9
	2	0.959	5.7	3.1
69	3	0.698	3.5	6.8
	2	0.885	5.6	5.9

Tableau 11 : Amélioration par détermination des postes pluviométriques représentatifs

On voit donc qu'un certain nombre d'analyses entreprises pour faire face à des problèmes évidents sur certaines stations ont été généralisées avec profit à l'ensemble des données pluviométriques et débitométriques. On accroît ainsi la cohérence de l'ensemble des données et parallèlement les chances de succès des traitements ultérieurs.

TROISIEME PARTIE : MODELISATION LINEAIRE

INTRODUCTION

Cette troisième partie est une première approche de la modélisation des écoulements sur les petits et moyens bassins versants de l'Algérie septentrionale. Pour commencer notre recherche, nous avons choisi de nous intéresser au pas de temps annuel en utilisant l'approche la plus classique dans la modélisation des séries chronologiques hydrologiques à savoir la "modélisation linéaire".

Il convient tout d'abord de rappeler le sens à donner au qualificatif "linéaire" dans l'expression "modèle linéaire" : ce qui compte c'est que le modèle soit linéaire par rapport aux paramètres (c'est-à-dire les coefficients). Cette condition n'est pas nécessaire pour les variables explicatives, rien n'interdit par exemple que la troisième variable soit le carré de la deuxième et que l'une d'elles soit une transformée logarithmique d'une variable observée, ...etc.

L'intérêt des modèles linéaires réside d'abord dans leur simplicité associée à une grande robustesse au niveau des résultats. Cependant, compte tenu de cette simplicité, les résultats sont rarement de qualité excellente, mais ont le mérite de donner une première idée de ce qui est envisageable, et constituent une base de référence, pouvant être tout à fait suffisante pour nombre d'applications.

En Algérie, l'outil mathématique principal (pour ne pas dire l'unique) utilisé dans les recherches effectuées dans le domaine de l'évaluation des ressources en eau est la technique des régressions et nous l'avons particulièrement utilisée dans le cadre de cette recherche pour traiter les problèmes suivants:

- a) reconstitution des données pluviométriques et hydrométriques;
- b) transformation pluie-débit au pas de temps annuel.

3.1 - ETUDES ANTERIEURES SUR LES DEBITS MOYENS EN ALGERIE :

En Algérie, jusqu'à nos jours, il n'existe pas d'outils mathématiques (modèle linéaire, ou autres types de modèles) permettant de prévoir un écoulement annuel. En revanche, on utilise couramment les relations pluie-écoulement pour déterminer l'écoulement annuel moyen (module). Nous nous proposons dans ce paragraphe, de présenter un aperçu des relations existantes permettant d'évaluer l'écoulement moyen interannuel en fonction de la pluviométrie moyenne interannuelle. De 1947 à la fin des années 60 près d'une trentaine de formules proposées pour l'évaluation de l'apport moyen interannuel ont été établies. Il ne s'agit pas d'études complètes, mais de réflexions ou de calculs effectués à l'occasion d'études hydrologiques particulières et qui n'utilisent guère que les mesures effectuées sur une dizaine de bassins versants algériens.

Dans les deux dernières décennies les relations établies reposaient sur des synthèses regroupant un nombre plus important de stations. Nous allons présenter dans le paragraphe suivant les cinq formulations les plus connues.

3.1.1 - Formules d'estimation du module

3.1.1.1 - Formule de G. MEDINGER (1948)

Une des plus anciennes expressions de l'écoulement moyen Q en fonction des précipitations moyennes annuelles P sur le bassin s'écrit :

$$Q = 0.75 (P - 400) \quad Q \text{ et } P \text{ en mm/an}$$

[hydrologie algérienne - recueil des observations de 1924 à 1946]

La formule de MEDINGER a été mise au point à partir de données d'une dizaine de bassins versants dont la superficie varie de 139 à 7 854 km² et la pluviométrie de 410 à 630 mm. Les longueurs des séries utilisées s'échelonnent de 4 à 22 ans (en moyenne 14 ans), les débits sont évalués dans 6 stations à partir du "mouvement du plan d'eau" sur les barrages. Les jaugeages utilisés étaient parfois trop espacés dans le temps (OUED RHUMEL) ; Pour l'OUED KSOB les débits calculés "sont à prendre seulement comme ordre de grandeur".

3.1.1.2 - Formule de COUTAGNE (1949)

Cet auteur analysant la formule de MEDINGER et en la précisant a abouti à l'équation suivante :

$$Q = 1,024 (P - 0,26)^2 \quad Q \text{ et } P \text{ en mètre /an}$$

Cette relation est encore meilleure si Q et P se rapportent uniquement à la période hivernale (Novembre-Avril). Dans ce cas, la relation s'exprime :

$$QH = 1,444 (PH - 0,19)^2 \quad Q \text{ et } P \text{ en mètre /an}$$

Enfin, presque toutes les mesures se situent dans une gamme de pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 400 et 600 mm.

3.1.1.3 - Formule de PADOUN (1974)

Cette formule a été obtenue dans le cadre de la préparation d'une thèse de troisième cycle à l'Institut de Géographie de MOSCOU. L'auteur utilisant l'information hydrologique de 42 stations hydrométriques (ayant fonctionné avant 1968) obtient les relations suivantes :

$$Q = K \text{ moy. } (0.0019P)^{3.57}$$

Pour les bassins versants dont la pluviométrie varie de 200 à 900 mm :

$$Q = K \text{ moy. } (0.0236 P - 14.2)$$

où K moy. est un coefficient caractérisant le degré d'influence de l'altitude moyenne du bassin versant sur l'écoulement pour une même valeur des précipitations ; il varie de 1.0 au niveau de la mer jusqu'à 1.70 à une altitude de 1.800 m.

h moy, M	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
K hmoy	1,00	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24	1,29
h moy, M	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	
K hmoy	1,32	1,36	1,40	1,44	1,49	1,54	1,59	1,64	1,70	

Pour les bassins versants dont la pluviométrie varie de 900 à 1800 mm Q et P sont respectivement les valeurs interannuelles de l'écoulement (en $l\ s^{-1}\ km^{-2}$) et de la pluviométrie en (mm).

3.1.1.4 - Formule de DERI :

Dans une note manuscrite établie à l'A.N.R.H. J.DERI (1977), après une revue de quelques formules utilisées dans le passé en Algérie, ajoute une relation établie à partir des informations sur 18 stations hydrométriques dont la superficie varie de 102 à 4 000 km^2 et la pluviométrie de 386 et 1 400 mm.

La relation proposée s'écrit :

$$Q = 11.8 \cdot P^{2.82} \quad P \text{ en mètre et } Q \text{ en } l\ s^{-1}\ km^{-2}$$

3.1.1.5 - Formule de ADJEL et ISMAIL (1985)

Dans le cadre de la politique de développement de la petite et moyenne hydraulique et en vue de stimuler le programme de construction de retenues collinaires, ADJEL et ISMAIL ont entrepris une étude de l'apport moyen interannuel des petits bassins versants de l'Algérie septentrionale dont la superficie est inférieure à 200 km^2 . L'originalité de ce travail réside dans le fait qu'il est certainement l'un des premiers à vouloir traiter spécifiquement l'hydrologie des petits bassins versants algériens.

Utilisant l'information hydrologique de 18 bassins versants, répartis un peu partout dans la zone d'étude, les auteurs proposent une relation exponentielle de la forme :

$$Q = 11.7 \cdot e^{3.91 \cdot 10^{-3} \cdot P}$$

Après vérification, les auteurs recommandent l'application de cette relation pour les bassins versants dans la superficie est comprise entre 70 et 200 km².

3.1.2 - Analyse de certaines formules :

Pour avoir une idée de la précision qu'on peut attendre de l'utilisation de ces formules, nous présentons dans le tableau 12 l'écoulement Q correspondant aux pluies de : 200<P<400mm, 400mm<P<500mm, 500<P<700mm, 700<P<1000mm, 1000<P<1250mm, même si ce calcul sort des bornes imposées par l'auteur. Le but est en effet de tester l'adéquation des formules à l'Algérie et non pas à certains cas particuliers.

P (mm) Formules	400mm	500mm	700mm	1000mm	1250mm
MEDINGER	0	75	225	450	638
COUTAGNE	20	59	198	561	1004
PADOUN : h = 100 m h = 700 m	12 14.5	27 32	90 107	332 382	
DERI	28	53	136	372	699
ADJEL et ISMAIL P > 350	59	95	195	424	684
Moyennes des écoulements	32	52	108	180	331
observés sur (nb. BV)	11	15	19	16	2
avec pluie annuelle dans l'inter- valle.....	200 400	400 500	500 700	700 1000	1000 1250

Tableau 12 : Comparaison de diverses formules anciennes en regard des valeurs observées

La comparaison des résultats d'application des formules, laisse apparaître une certaine dispersion. De plus, la comparaison avec des données observées montre que les formules ont tendance généralement à sur-estimer l'apport interannuel.

Nous voyons un certain nombre de causes possibles :

a) utilisation des fichiers de pluies et de débits qui ne concordent pas :

Les pluies sont des moyennes interannuelles sur une longue période, généralement tirées des cartes pluviométriques dont la plus récente date de 1963, alors que les débits ont été observés sur une courte période qui peut être non concomitante avec les observations pluviométriques.

b) Pour certaines études, utilisant les données pluviométriques, on a pris en compte l'ensemble des postes pluviométriques sans avoir le temps de chercher les postes les plus représentatifs.

c) Dans leur majorité, ces études sont basées sur un nombre limité de bassins versants, ce qui confirme leur caractère étroitement régional.

d) Les données sont toujours insuffisantes du point de vue des utilisateurs :

La banque de données hydroclimatiques comporte effectivement des lacunes voire des erreurs. Toute recherche doit au préalable critiquer et compléter l'information avant utilisation. Certaines études ont pu souffrir d'un manque de disponibilité pour traiter convenablement cette étape initiale.

3.1.3 - Conclusion :

Les formules précédentes sont encore très utilisées par tous les hydrologues effectuant des études en Algérie, en particulier les hydrologues des bureaux d'études intervenant en aménagement du territoire : généralement ces hommes de l'art préfèrent appliquer ces formules que revenir à l'étude directe des nombreuses données du réseau d'observations hydrologiques.

Pourtant, comme nous venons de le voir sur quelques stations hydrométriques, ces formules ne sont pas très bien adaptées aux calculs hydrologiques en Algérie.

C'est pourquoi il est nécessaire d'entreprendre une recherche sur la méthodologie de l'estimation des écoulements en Algérie en faisant reposer l'analyse sur l'échantillon le plus large possible.

3.2 - LES VARIABLES EN CAUSE

3.2.1 - Choix de la variable écoulement annuel :

Les paramètres auxquels s'intéresse l'hydrologue varient bien entendu avec le problème posé, mais on peut dire que l'écoulement annuel est la première grandeur à connaître pour un bassin versant donné. Sa valeur moyenne peut servir en outre à l'estimation d'autres caractéristiques hydrologiques qui lui sont liées.

On peut donner trois présentations à cette variable :

- a) un volume d'eau sur une année,
- b) un débit moyen, en divisant ce volume par la durée de l'année (en secondes),
- c) une lame d'eau, en divisant ce même volume par la superficie du bassin versant exprimée en (km^2).

C'est cette troisième forme que l'on utilisera afin de comparer directement les valeurs annuelles de l'écoulement à celle de la pluie et de faciliter les comparaisons entre bassins versants. On rappelle, que l'on a retenu comme période d'observation, l'année hydrologique s'étendant en Algérie du 1er septembre au 31 août.

3.2.2 - Choix des variables influançant l'écoulement :

A priori, la recherche des variables explicatives n'est pas simple, car beaucoup de phénomènes interviennent reliés à des caractéristiques que nous regroupons en 2 types :

les caractéristiques physiques et les caractéristiques climatiques. Dans notre approche, nous n'avons qu'un type de variable : celles liées aux conditions climatiques.

A l'issue de l'étude bibliographique, les facteurs susceptibles d'avoir une influence notable sur l'écoulement sont :

- en premier lieu la pluie, sous la forme d'une hauteur annuelle moyenne sur le bassin versant considéré et notée P.

Elle constitue le paramètre principal dans la génération de l'écoulement. Son estimation a été effectuée avec la plus grande attention dans la deuxième partie de cette recherche.

- des facteurs secondaires, agissant après la pluie annuelle moyenne ; on peut citer (MASSON, 1977) les apports annuels antérieurs et les précipitations de l'année précédente. Ces variables semblent avoir une influence certaine sur le débit de l'année en cours. On peut considérer que le fait d'intégrer les pluies ou les débits antérieurs constitue une façon simple de tenir compte de l'humidité du sol.

- autres facteurs climatiques, il est probable que la pluie annuelle moyenne sur le bassin versant ne permet pas à elle seule une bonne connaissance de l'écoulement et en particulier pour certaines régions caractérisées par une forte irrégularité dans le temps des précipitations et des débits. Dans ces conditions des descripteurs de cette irrégularité seront probablement utiles dans l'explication des lames écoulées.

3.3 - RECHERCHE DE RELATIONS ECOULEMENT-FACTEURS EXPLICATIFS :

3.3.1 - Premier ensemble de modèles linéaires :

Il est rare qu'au début de la construction d'un modèle hydrologique on ait en main tous les éléments de sa réalisation, sans parler bien entendu des données hydrologiques qui serviront à le faire fonctionner. Il est donc presque inévitable que l'élaboration d'un tel modèle donne lieu à de nombreux tâtonnements et nécessite le passage par plusieurs phases. C'est ce qui s'est passé pour la mise au point du modèle de prédétermination des écoulements.

Dans un premier temps, il nous a semblé important, d'une part, d'avoir une idée des performances que l'on peut attendre de modèles linéaires et d'autre part de

déterminer les grandes lignes des relations écoulements-facteurs explicatifs permettant de mieux orienter la recherche.

A l'issue de cette première phase d'analyse des facteurs susceptibles d'être explicatifs, nous serons amenés à faire un tri parmi les modèles proposés.

Nous partons de modèles que l'on pose a priori en fonction des connaissances acquises à l'issue de l'étude bibliographique. Les variables explicatives intervenant dans ces modèles sont :

- la précipitation annuelle moyenne tombée sur le bassin versant notée : P ;
- la précipitation annuelle antérieure notée : P(-1) ;
- l'écoulement annuel antérieur noté : Q(-1) ;
- l'écoulement d'une station voisine noté : Qv

Une règle de bon sens est de partir d'une conception la plus simple possible et de n'introduire d'autres éléments que si l'on en ressent la nécessité après analyse des résultats du modèle simple précédent.

Dans cette logique, la relation la plus simple est celle qui consiste à déterminer l'écoulement en fonction de la pluie annuelle moyenne du bassin versant et dont l'équation s'écrit :

$$Q = A_0 + A_1 P \quad \text{modèle (1)}$$

Bien que la variable pluie soit le principal facteur de l'écoulement, il est probable qu'à elle seule, elle n'arrive pas à expliquer totalement l'écoulement. Dans ces conditions on peut penser qu'il est possible d'améliorer la connaissance de la lame écoulée en intégrant d'autres facteurs secondaires. Les modèles (2) à (5) ci-après nous permettront de mieux cerner les facteurs importants :

modèle (2) : le deuxième modèle que l'on peut imaginer est à deux variables explicatives. On introduit dans le modèle (1) la pluie annuelle antérieure. La régression est de la forme :

$$Q = A_0 + A_1 P + A_2 P(-1) \quad (2)$$

modèle (3) : par analogie au modèle (2), il est intéressant de voir l'influence de l'écoulement annuel antérieur. L'équation est alors :

$$Q = A_0 + A_1 P + A_2 Q(-1) \quad (3)$$

modèle (4) : il est proposé dans le seul but d'analyser l'apport associé de P(-1) et Q(-1) et représenté par l'équation ci-dessous :

$$Q = A_0 + A_1 P + A_2 P(-1) + A_3 Q(-1) \quad (4)$$

modèle (5) : contrairement aux modèles précédents, le modèle (5) intègre une variable exogène au bassin versant. Son principe est d'établir une régression linéaire entre l'écoulement annuel du bassin versant à étudier et la pluie annuelle relative à ce bassin et l'écoulement concomitant d'une station voisine.

Compte tenu de la faible durée d'observation, il est nécessaire de se limiter à une seule station explicative. L'étude du choix de cette station avec laquelle la corrélation aura lieu s'est effectué en respectant deux critères :

- la station doit obligatoirement avoir une période concomitante assez longue avec la station à étudier ;

- la station débitmétrique explicative n'est pas forcément la station la plus proche de la station à étudier. Nous avons choisi une station au hasard. Par ce choix nous avons voulu nous mettre dans les conditions où effectivement, dans la pratique et pour un bassin non jaugé, nous n'avons pas la possibilité de choisir entre les stations disponibles, celle qui serait la plus semblable par ses écoulements au bassin étudié.

Le modèle (5) s'écrit :

$$Q = A_0 + A_1 P + A_2 Q_v \quad (5)$$

Le choix des variables explicatives et des modèles étant fait, il nous reste à vérifier leur adéquation sur un ensemble de bassins versants. C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans le paragraphe suivant.

3.3.2 - Application à un ensemble de B.V. :

Après avoir déterminé les facteurs probables de l'écoulement et les modèles qui en découlent, nous nous proposons de vérifier leur adéquation en les appliquant sur le plus grand nombre de bassins versants disponibles. A ce moment là, nous disposons de données hydropluviométriques traitées de 41 bassins versants. En effet, comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre 2.2, l'acquisition et la critique des données a été une tâche très lourde et nous avons dû la faire par étapes et nous contenter d'un nombre de bassins inférieur à celui dont nous disposerons à la fin de notre recherche.

3.3.2.1 - Analyse des résultats des 5 modèles proposés :

Il nous paraît nécessaire, afin de pouvoir procéder à une comparaison efficace de ces modèles et de ceux qui vont être retenus de définir des critères d'appréciation:

- sur le modèle lui-même : les moyens classiques pour juger de la qualité des résultats sont :
 - . E.S : erreur standard du modèle, que nous exprimerons en pourcentage de la pluie annuelle moyenne ;
 - . T.S : les rapports de STUDENT pour chacun des coefficients de régression.
- par rapport à un modèle de base auquel seront comparés tous les autres modèles, ce modèle doit être le plus simple possible, autrement dit ne dépendre que de deux paramètres : la constante et le paramètre relatif à la variable explicative qui dans ce cas correspond évidemment à la pluie annuelle moyenne ; il s'agit du modèle (1).

Les résultats de ces premiers essais de modélisation (coefficient de corrélation, erreur standard et rapports de STUDENT), sont regroupés en annexe 1 et leur

analyse nous permet de faire plusieurs remarques sur la sélection des variables explicatives et le comportement des différents modèles dans les situations rencontrées.

a) modèle de base (1) :

L'examen des coefficients de corrélation entre lame écoulee observée et lame calculée des 41 bassins versants modélisés permet de distinguer des coefficients variant dans une large gamme de 0.25 à 0.95. Cette grande hétérogénéité de comportement est traduite également par les valeurs prises par le test de STUDENT de la variable pluie annuelle moyenne, dont les valeurs varient de 8.4 à moins de 2.5. On remarque que parmi les 41 bassins versants, 6 donnent des résultats décevants puisque le rapport de STUDENT de la variable explicative y prend une valeur inférieure à 2.5 et que le coefficient de corrélation est inférieur à 0.75.

Nous trouverons dans le tableau 13, les paramètres d'appréciation de la régression (coefficient de corrélation, rapport de STUDENT, erreur standard, écoulement interannuel et pluie interannuelle pour les bassins où le modèle (1) est inadéquat.

N° des BV	Pa (mm)	Qa (mm)	R	TS	ES (%deP)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
11	424	16	0.65	2.1	0.4
12	382	16	0.25	0.7	1.9
13	361	17	0.35	1.6	1.1
21	359	27	0.72	2.4	2.2
22	409	32	0.44	1.4	3.4
48	540	9	0.65	1.9	1.2

Tableau 13 : Bassins versants où le modèle (1) est inadéquat

Il apparaît ainsi que les 6 bassins ont tous les caractéristiques suivantes :

- pluie interannuelle faible ;
- écoulements très faibles, inférieurs à 10% de la pluie et peut être même inexistant. C'est le cas du bassin n°48 où l'on a 9 mm d'écoulement pour 540 mm de pluie ;
- un écoulement qui peut être différent d'un bassin versant à l'autre pour une pluviométrie voisine ; de plus, il arrive qu'une hauteur de pluie plus importante conduise à un écoulement nettement plus faible.

L'échec du modèle (1) sur ces 6 bassins apparaît compréhensible: il semble que la lame précipitée annuelle n'est pas suffisante pour prédéterminer la lame écoulee en tout point de la région étudiée. Dans ces conditions, on ne peut pas parler de relation précise entre l'écoulement et la précipitation annuelle sans faire intervenir d'autres facteurs tels que la variation spatiale et/ou temporelle des pluies ou encore des variables explicatives débitométriques. Cela justifie l'intérêt porté aux autres modèles.

Nous allons tenter d'abord de déceler le deuxième facteur explicatif de l'écoulement puis éventuellement de rechercher la forme la plus adéquate pour représenter les variables explicatives.

Pour cela, nous allons examiner les résultats obtenus par les modèles 2 à 5 définis précédemment (3.3.1) et nous nous attacherons principalement à comparer l'apport des nouvelles variables explicatives introduites c'est-à-dire la pluie annuelle antérieure, le débit annuel antérieur et le débit d'une station voisine.

b) Modèle (2) : $Q = A_0 + A_1 P + A_2 P(-1)$:

Précédemment, nous avons constaté que la relation entre l'écoulement annuel et la pluie annuelle est insuffisante et devient inexistante pour 6 bassins versants. Etant donné que la variation spatiale des précipitations a été étudiée lors de la critique des données (2.2), on peut penser alors que la prise en compte de la répartition dans l'année de la pluie annuelle pourrait éventuellement améliorer la connaissance de la lame écoulee et plus particulièrement augmenter la significativité de la variable pluie annuelle pour les bassins versants mal simulés. L'application de ce modèle aux 41 stations permet de faire les remarques suivantes :

- le passage d'une variable explicative à deux variables améliore significativement le résultat, puisque l'erreur standard moyenne est passée de 6.9 pour le modèle (1) utilisant comme variable explicative la pluie annuelle moyenne sur le bassin versant, à 6.4 pour le modèle (2) introduisant la pluie annuelle antérieure ;

- bien que la régression ne soit significative que dans un seul cas (le bassin n°43), on note que pour une quinzaine de bassins versants, l'ajout de la variable explicative pluie annuelle antérieure a conduit à augmenter la significativité de la variable pluie annuelle et plus particulièrement pour les bassins versants mal simulés, à l'exception du bassin n°12 ;

- la première variable explicative de l'écoulement est la pluie annuelle suivie dans ce cas de la pluie annuelle antérieure comme variable secondaire, puisque pour l'ensemble des bassins versants modélisés, excepté le n°12, le rapport de STUDENT de la variable pluie annuelle est systématiquement supérieur à celui de la variable pluie annuelle antérieure.

c) le modèle (3) : $Q = A_0 + A_1 P + A_2 Q (-1)$

L'essai de ce modèle sur les 41 bassins versants disponibles, nous conduit aux mêmes remarques que celles établies lors de l'analyse du modèle (2) (où la variable explicative secondaire correspond à la pluie annuelle) à savoir :

- la prise en compte du facteur écoulement annuel antérieur conduit à une amélioration sensible de l'erreur standard puisque le gain est de 0.7% ;

- la variable explicative pluie annuelle devient plus significative dans douze cas sur 41 ;

- excepté deux bassins versants (N°12 et 21) la variable pluie annuelle demeure le premier facteur de l'écoulement.

Si le diagnostic des résultats des modèles (2) et (3) testés sur les 41 bassins versants conduit à des remarques similaires, l'examen des résultats bassin par bassin permet de noter deux différences : d'abord en analysant les valeurs des rapports de STUDENT, on constate que la variable pluie annuelle antérieure est plus significative que la variable écoulement annuel antérieur. Ensuite on constate que généralement, l'introduction de la pluie annuelle antérieure ou de

l'écoulement annuel antérieur produisent des améliorations dans des bassins différents. A partir de cette observation on peut penser que la prise en compte de ces 2 facteurs simultanément pourrait améliorer la connaissance de l'écoulement annuel. C'est ce que fait le modèle (4).

d) le modèle (4) : $Q = A_0 + A_1 P + A_2 P(-1) + A_3 Q(-1)$

Contrairement à l'attente précédente, l'essai de ce modèle sur l'échantillon disponible, laisse apparaître que ce modèle est de peu d'intérêt puisque d'une part l'amélioration de l'erreur standard moyenne peut être considérée comme négligeable par rapport à la lourdeur du modèle, et d'autre part le rapport de STUDENT relatifs aux 3 variables explicatives est très faible et atteignent rarement le seuil de significativité pour les deux variables explicatives secondaires.

e) le modèle (5) : $Q = A_0 + A_1 P + A_2 Q_v$

la comparaison de cette version avec les modèles (1), (2) et (3) introduisant respectivement la pluie annuelle, la pluie annuelle antérieure et le débit annuel antérieur nous amène à faire les observations suivantes :

- il apparaît que l'introduction du débit d'une station voisine comme deuxième variable explicative de l'écoulement, conduit aux meilleurs résultats, puisque l'erreur standard moyenne sur les 41 bassins versants est la plus faible. Les gains respectifs par rapport au modèle (1) et aux modèles (2) et (3) sont de : 2.9, 2.4 et 2.2,

- contrairement aux résultats obtenus dans les modèles (2) et (3) où l'introduction d'une deuxième variable (la pluie annuelle antérieure ou le débit annuel antérieur) a permis généralement d'augmenter la significativité de la pluie annuelle moyenne par rapport à ce qu'elle était dans le modèle de base, (modèle 1), l'ajout de la variable débit d'une station voisine a conduit à diminuer l'intérêt de la variable pluie annuelle qui passe au deuxième plan derrière le débit d'une station voisine. En effet pour la grande majorité des bassins versants modélisés la valeur du rapport de STUDENT du coefficient de la pluie annuelle est nettement inférieur à celle relative au débit de la station voisine et dépasse rarement la valeur 2.

3.3.2.2 - Synthèse des résultats :

D'une manière générale, ces premiers essais de modélisation de l'écoulement annuel d'un ensemble de bassins versants contrastés par leurs situations physiques et hydroclimatiques montrent bien la difficulté d'établir un modèle "général" dépendant d'un nombre très limité de paramètres, au plus 3, et dont les performances soient acceptables.

Nous présentons dans le tableau 14, les principaux résultats et remarques issues de l'application des 5 modèles aux 41 bassins versants disponibles.

N°	Modèles linéaires	E.S'/j (moyenne sur 41 B.V)	Premier facteur de l'écoulement	observations
1	$Q=A_0+A_1 P$ ou de base	6.9	P	
2	$Q=A_0+A_1 P+A_2 P(-1)$	6.4	P	- régression non significative - mais (P-1) augmente la significativité de P par rapport au modèle (1)
3	$Q = A_0+A_1 P+A_2 Q(-1)$	6.2	P	- même conclusions que pour le modèle - Q(-1) paraît moins bien perçu que P(-1)
4	$Q=A_0+A_1 P+A_2 P(-1)+A_3 Q(-1)$	5.2 (sur 39 BV)	P	sans intérêt
5	$Q=A_0+A_1 P+A_2 Q_v$	4.0	Q_v	- apparaît facultatif

Tableau 14 - Synthèse des principaux résultats de 5 modèles linéaires

Si les résultats de cette première étude des relations entre l'écoulement et les facteurs explicatifs sont ainsi de prime abord assez décevants, cela permet cependant de mieux orienter notre recherche.

Il ressort les conclusions principales suivantes :

a) nous constatons une grande disparité des facteurs explicatifs de la lame écoulée d'un bassin versant à l'autre. Cependant, excepté le modèle (5) la lame précipitée annuelle moyenne sur le bassin versant demeure le principal facteur de l'écoulement ;

b) il semble souhaitable et possible d'améliorer le modèle (1) n'utilisant que la pluie annuelle dans l'explication de la lame écoulée et plus particulièrement pour les bassins à faible écoulement ;

c) le passage d'une à deux variables explicatives par ajout dans le modèle de base de la variable pluie annuelle antérieure (modèle (2)) ou débit annuel antérieur (modèle (3)) ne conduit pas systématiquement à de meilleurs résultats : nous avons constaté que très peu de bassins versants font intervenir significativement les deux variables explicatives c'est-à-dire P et P(-1) ou P et Q(-1) selon le modèle testé ;

Par contre les modèles (2) et (3) ne sont pas sans intérêt si l'on remarque que l'introduction de l'une ou de l'autre variable explicative (P(-1) ou Q(-1)) permet d'augmenter la significativité de la pluie annuelle ;

d) contrairement aux modèles (2) et (3), la variable pluie annuelle dans le modèle (5) n'est plus le premier facteur de l'écoulement, le débit de la station voisine devient la variable prépondérante.

Après le dégrossissage permis par l'analyse des 5 modèles précédents il apparaît nécessaire soit de pratiquer à des regroupements de variables soit de faire intervenir de nouvelles variables.

3.3.3 - Deuxième ensemble de modèles linéaires :

3.3.3.1 - Formulations étudiées :

a) modèle (6) :

En regard de la conclusion c) du paragraphe précédent, une solution possible pour prendre en compte les conditions antérieures (pluie annuelle antérieure ou écoulement annuel antérieur) est de les associer à la pluie annuelle moyenne. Cette démarche est tout à fait intéressante puisqu'elle a le double avantage d'introduire d'autres facteurs explicatifs de la lame écoulée tout en économisant le nombre de variables en jeu.

Trois régressions sont possibles :

$$Q = A_0 + A_1 [P + P(-1)]$$

$$Q = A_0 + A_2 [P + Q(-1)]$$

$$Q = A_0 + A_2 [P + P(-1) + Q(-1)]$$

Nous allons tout de suite éliminer la dernière, puisque nous avons constaté précédemment lors de l'analyse du modèle (4) que la pluie annuelle antérieure et le débit annuel antérieur introduits simultanément n'ont rien apporté. Il nous reste donc à sélectionner l'une des deux premières régressions. Le choix du meilleur modèle et par conséquent de la variable associée est celui qui conduit d'une part à la meilleure amélioration de l'erreur standard et d'autre part à une augmentation de la significativité de la variable pluie annuelle par comparaison avec le modèle de base. On constate que l'erreur standard moyenne est comparable aux 2 modèles : 6.4 et 6.2, avec un léger avantage en faveur du débit annuel antérieur. Cependant si on examine en détail l'influence de chacune des deux variables explicatives sur la pluie annuelle, on constate que la pluie annuelle antérieure conduit à la meilleure amélioration de la significativité de la première variable explicative en particulier pour les bassins mal simulés.

Dans ces conditions, nous proposons le modèle (6) :

$$Q = A_0 + A_1 [P + P(-1)]$$

b) modèle (7) :

Par ailleurs la conclusion b) effectuée au paragraphe 3.3.2.2 fait ressortir le problème de la répartition temporelle, dans l'année, des précipitations.

En effet le régime des précipitations dans la région d'étude étant caractérisé par une répartition très inégale dans l'année, il nous paraît intéressant d'en tenir compte. Parmi les variables traduisant cette irrégularité, la pluie mensuelle maximale d'une année semble être intéressante.

La première expression que nous proposons est inspirée de la formule de FOURNIER et correspond au rapport du carré de la pluie mensuelle maximale notée P_{mx} et de la pluie annuelle sur le bassin versant considéré (P) ; soit I cet indice.

Le modèle s'écrit :

$$Q = A_0 + A_1 P + A_2 I \quad \text{modèle (7)}$$

avec :

$$I = \frac{P_{mx}^2}{P}$$

c) modèle (8) :

A titre de comparaison on peut considérer le modèle utilisant les débits d'une station voisine malgré sa moins grande généralité.

$$Q = A_0 + A_1 Q_v \quad \text{modèle (8)}$$

Q_v : débit concomitant en une station voisine.

3.3.3.2 - Application des modèles (6), (7) et (8) aux 41 bassins versants :

Nous nous proposons de comparer d'abord les résultats des modèles (6) et (7) intégrant respectivement un facteur de persistance des pluies et une variable d'irrégularité de la pluie dans l'année au modèle (1) ne dépendant que de la pluie annuelle moyenne, qui nous a servi jusqu'ici de référence. Le critère de comparaison est toujours l'erreur standard.

Pour faciliter la comparaison, nous présentons dans le tableau 15, l'erreur standard moyenne sur les 41 bassins versants pour chacun des modèles (6) et (7) en regard du modèle de base. L'ensemble des résultats pour les 2 modèles sont présentés dans le tableau en l'annexe 2.

modèle utilisé	$Q=A_0+A_1P$ modèle (1)	$Q=A_0+A_1[P+P(-1)]$ modèle (6)	$Q=A_0+A_1P+A_2I$ modèle (7)
Erreur standard moyenne sur les 41 BV	6.9	7.6	5.9
Erreur standard moyenne sur les BV mal simulés	2.3	1.8	1.6

Tableau 15 : Comparaison de 2 nouveaux modèles climatiques

Le tableau 15 appelle quelques remarques :

- la prise en compte d'une variable descriptive de l'irrégularité de la pluie dans l'année semble être intéressante puisque l'erreur standard moyenne est passée de 6.9 à 5.9% ;

- l'association à parts égales de la pluie annuelle et de la pluie annuelle antérieure, n'est pas meilleure que l'emploi de la pluie annuelle seule. (l'erreur standard moyenne est passée de 6.9 à 7.6) ;

- malgré la supériorité du modèle (7) sur le modèle (6), on remarque que pour les bassins versants mal simulés, l'apport des 2 modèles (P(-1) ou I) est comparable, ce qui nous laisse penser que la variable pluie annuelle antérieure peut être intéressante.

Bien que le tableau 15 , souligne tout l'intérêt de la variable irrégularité de la pluie, l'examen en détail des résultats obtenus sur l'ensemble des bassins versants modélisés laisse apparaître que les régressions ne font pas intervenir significativement les deux variables explicatives. On peut penser que l'expression de la variable irrégularité proposée est à améliorer et que le fait de prendre le carré de la pluie mensuelle maximale lui donne trop d'importance par rapport à la pluie annuelle.

En conclusion, nous venons de montrer l'influence non négligeable de la variable pluie mensuelle maximale annuelle. Il nous reste peut être à rechercher une forme plus adéquate.

Etudions maintenant les résultats du modèle (8)

($Q = A_0 + A_1 Q_v$) que nous comparerons au modèle (5) et au modèle de base (modèle (1)).

Nous reportons dans le tableau 16, l'erreur standard moyenne pour chacun des 3 modèles et le nombre de bassins où la régression est non significative :

modèle utilisé	$Q=A_0+A_1P$ modèle(1)	$Q=A_0+A_1P+A_2Q_v$ modèle(5)	$Q=A_0+A_1Q_v$ modèle(8)
Erreur standard moyenne(%)	6.9	4.0	4.3
nombre de BV mal simulés	6	37	1

Tableau 16 : Comparaison des résultats des modèles(1),(5)et(8)

On déduit les remarques suivantes :

- la comparaison du modèle de base (1) et du modèle (8) laisse apparaître que le remplacement de la pluie annuelle moyenne par le débit concomitant d'une station voisine conduit à une amélioration significative de l'erreur standard moyenne qui passe de 6.9 à 4.3. Par ailleurs le modèle (8) semble être plus général que le modèle de base puisque nous constatons un seul cas contre six où la régression n'est pas significative.

- la comparaison du modèle (5) et (8) montre que l'élimination de la pluie annuelle ne conduit pas à une détérioration notable de l'erreur standard moyenne.

Le modèle (8) est d'une part le plus "général" et d'autre part le plus performant puisqu'il présente une erreur standard moyenne la plus faible de l'ensemble des modèles que nous avons utilisés jusqu'à présent. Cependant son utilisation est conditionnée par l'existence d'une station hydrométrique proche et d'autre part il est peu probable que l'on puisse aisément choisir les coefficients de régression sans calage, ce qui est le cas pour des bassins non jaugés. Dans ces conditions on conservera ce modèle essentiellement comme référence pour les modèles pluie-débit qui se placeront, par leurs performances, entre le modèle le plus fruste (le modèle (1)) et le modèle débit-débit (le modèle (8)).

3.3.3.3 - Amélioration de la prise en compte de la répartition des pluies :

Les résultats obtenus avec l'introduction de la pluie mensuelle maximale sont encourageants. Essayons de les améliorer.

Pour cela, dans une première étape, nous nous proposons de rester à 3 paramètres : le paramètre constant et les deux autres relatifs à la pluie annuelle et à une variable d'irrégularité. Puis nous essayerons d'économiser un paramètre en associant les deux variables explicatives.

a) Modèles à 2 variables :

Pour tenir compte de l'inégale répartition temporelle de la pluie annuelle, nous avons proposé une expression similaire à celle employée par FOURNIER pour l'estimation des transports solides (1960). Nous allons voir si d'autres formes ne permettent pas de mieux expliquer l'écoulement.

Pour ce faire, nous nous proposons deux expressions : la première est d'attribuer moins de poids à la pluie mensuelle maximale que dans la version de départ et I devient alors :

$$I = \frac{P_{mx}}{P}$$

la deuxième est de ne considérer que la pluie mensuelle maximale :

$$I = P_{mx}$$

Nous allons tester successivement ces deux nouvelles expressions dans les modèles (9) et (10) :

$$Q = A_0 + A_1 P + A_2 \frac{P_{mx}}{P} \quad (9)$$

et

$$Q = A_0 + A_1 P + A_2 P_{mx} \quad (10)$$

Pour analyser l'apport effectif de la pluie mensuelle maximale, il nous paraît intéressant d'avoir comme référence le modèle (11) :

$$Q = A_0 + A_1 P_{mx} \quad (11)$$

Nous présentons dans le tableau 17, l'erreur standard moyenne correspondant à chacun des trois modèles : (9), (10) et (11) introduisant une forme différente de la variable d'irrégularité. L'ensemble des résultats (R, TS et E.S) est regroupé dans le tableau en annexe 3.

Modèles utilisés	$Q = A_0 + A_1 P + A_2 \frac{P \cdot P_{mx}}{P}$ (7)	$Q = A_0 + A_1 P + A_2 \frac{P_{mx}}{P}$ (9)	$Q = A_0 + A_1 P + A_2 P_{mx}$ (10)	$Q = A_0 + A_1 P_{mx}$ (11)
Erreur standard moyenne	5.9	6.0	5.8	7.8

Tableau 17 : Différentes modalités d'introduction de la pluie mensuelle maximale

L'examen de ce tableau 17 montre que les erreurs standards moyennes obtenues avec les 3 expressions de la variable d'irrégularité sont comparables mais en faveur de l'expression (10). En effet l'examen en détail des résultats laisse apparaître que l'expression (10) est plus efficace, en particulier pour les bassins versants caractérisés par une plus grande irrégularité interannuelle des précipitations tels que les bassins versants du Chélif et de l'Isser.

Toutefois, les rapports de STUDENT de la variable P_{mx} ne confirment pas toujours la significativité de cette variable. Il est nécessaire d'économiser un paramètre en liant les 2 variables P et P_{mx} .

b) Création d'une variable pluviométrique synthétique :

Après quelques essais préalables, nous nous proposons de comparer les formes d'association suivantes :

$$Q = A_0 + A_1 [P + P_{mx}] \quad (12)$$

$$Q = A_0 + A_1 \sqrt{P * P_{mx}} \quad (13)$$

$$Q = A_0 + A_1 [P + C P_{mx}] \quad (14)$$

Dans l'équation (14) C est un facteur fixe de pondération des 2 variables P et Pmx. Il nous a semblé intéressant de tenir compte pour sa détermination de la variabilité des débits.

Parmi les variables descriptives de l'irrégularité de l'écoulement, il nous paraît plus intéressant de procéder comme suit :

D'abord déterminer une variable annuelle :

$$IQ_i = \frac{12 (Q_{xi} - Q_{ni})}{Q_{ai}}$$

où

Q_{xi} : débit mensuel maximal de l'année i

Q_{ni} : débit mensuel minimal de l'année i

Q_{ai} : débit annuel de l'année i

IQ_i : irrégularité de l'année i

Puis en prendre la moyenne interannuelle :

$$IQ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} IQ_i$$

Pour avoir un ordre de grandeur de IQ, nous avons choisi une région représentative des écoulements de la zone d'étude : il s'agit du grand bassin du Chéouiff (43750 km^2) où existent 14 stations hydrométriques dont les numéros vont de 12 à 25.

L'étude a montré que IQ varie de 2 à 5 avec une moyenne de 3. Le facteur C de l'équation (14) pourrait donc être égal à 3. Nous trouverons en annexe 4, l'ensemble des résultats obtenus.

L'essai des trois modèles : (12), (13) et (14) sur l'échantillon de 41 bassins versants fait apparaître les résultats suivants : tableau 18.

Modèles	Modèle de base (1)	$Q = A_0 - A_1 [P \cdot P_{mx}]$ (12)	$Q = A_0 - A_1 \sqrt{P \cdot P_{mx}}$ (13)	$Q = A_0 - A_1 [P \cdot 3P_{mx}]$ (14)	$Q = A_0 - A_1 P - A_2 P_{mx}$ (10)
Erreur standard moyenne (%)	6.9	6.5	6.7	7.6	5.8

Tableau 18 : Comparaison de différentes variables pluviométriques synthétiques

Sur le simple examen de l'erreur standard moyenne on peut faire deux remarques essentielles :

- l'introduction d'un facteur C issu de l'analyse de l'irrégularité interannuelle n'est pas judicieuse : l'erreur standard moyenne est passée de 6.5 pour le modèle (12) à 7.6 pour le modèle (14) ;
- la comparaison des modèles (12) et (13) montre l'intérêt d'une moyenne arithmétique par rapport à une moyenne géométrique des variables P et P_{mx}.

A l'issue de ces résultats, il apparaît que la lame écoulee est sensiblement mieux expliquée par un regroupement des deux variables : pluie annuelle moyenne et pluie mensuelle maximale, que par la pluie annuelle prise isolément et que la forme additive semble être la plus performante. Il est vraisemblable que la moindre performance du modèle (13) introduisant $P \cdot P_{mx}$ soit due à la forme linéaire par rapport à Q. Cette forme peut présenter quelques inconvénients du fait qu'elle introduit la valeur nulle pour Q chaque fois que l'expression conduit à un résultat négatif. D'autre part, la précision du modèle reste la même en valeur absolue pour des bassins aux écoulements très dissemblables. Nous allons examiner ces différents points dans une dernière étape qui nous conduira à l'expression définitive de notre modèle "linéaire".

3.4 - MISE AU POINT DEFINITIVE DU MODELE LINEAIRE :

L'analyse de la distribution des résidus de modèles précédents montrent que la loi normale est très mal adaptée du fait d'une asymétrie très importante que nous avons appréciée en la comparant à l'écart-type de la distribution d'échantillonnage de l'asymétrie d'un échantillon réputé issu d'une population à répartition gaussienne. Si μ_3 désigne le moment centré d'ordre 3, d'une loi normale, $\text{var}(\mu_3) = 6 s^6/N$, N étant la taille de l'échantillon.

Parmi les résultats annexes, nous avons sorti pour chaque modèle le rapport :

$$\frac{N}{6} * \frac{|\mu_3|}{s^3}$$

Lorsque ce rapport est supérieur à 2 on peut suspecter la non-normalité du résidu ou, avec une présentation différente, son hétéroscédasticité.

Or l'on constate trop souvent que le rapport précédent est très élevé et cela nous a conduit à préférer rechercher une estimation du logarithme de l'écoulement plutôt que de l'écoulement lui-même.

Cependant un désavantage parfois attribué au modèle linéaire portant sur le logarithme du débit est le biais qu'il introduit dans l'estimation des volumes écoulés moyens. En fait cette critique est sans objet si l'on tient compte explicitement de l'erreur du modèle soit dans une simulation soit dans le calcul des valeurs moyennes et extrêmes.

Par contre les avantages du modèle logarithmique sont essentiellement, d'une part, le fait que l'on satisfait tout naturellement la contrainte de non-négativité des apports et d'autre part, que l'on considère une erreur relative et non pas absolue, ce qui permet de traiter avec une même précision relative les faibles et forts apports. Si l'on adopte le recours au modèle linéaire sur les logarithmes il nous faut réexaminer le problème de la pondération de P et de Pmx sous la forme $\ln(P) + C \ln(Pmx)$.

Nous allons tester deux valeurs de C : 0.25 et 0.50. Les résultats seront comparés au modèle de base et au modèle utilisant les deux variables explicatives avec le même poids.

Contrairement aux essais précédents, l'application de ces modèles a été effectuée sur l'ensemble des bassins versants retenus dans le chapitre (2.2) soit 68. En effet, parallèlement à la recherche des relations Ecoulement-Facteurs explicatifs sur les premiers bassins versants disponibles (c'est-à-dire les 41 bassins) nous avons continué à compléter notre fichier opérationnel des données pluviométriques et hydrométriques nécessaires à l'étude.

A partir du moment où nous effectuons une transformation de la variable à expliquer il faut veiller à conserver le même critère de comparaison entre les modèles qui est l'erreur quadratique moyenne sur les débits annuels exprimée en pourcentage de la pluie, différente de l'erreur standard du modèle (laquelle porte sur $\ln(Q)$).

Nous avons reporté dans le tableau 19, les erreurs standards moyennes sur Q correspondant à ces essais :

modèles utilisés	modèle de base (1)	$\ln Q = A_0 + A_1 [\ln P + C \ln P_{mx}]$		
		C = 1	C = 0.25	C = 0.50
erreurs standard moyenne	7.0	6.7	6.6	6.9

Tableau 19 : Détermination de la pondération optimale de P_{mx}

P : pluie annuelle moyenne (mm)

P_{mx} : pluie mensuelle maximale annuelle (mm)

Q : écoulement annuel (mm)

A_0, A_1 : coefficients de régression

C : pondération fixe à attribuer à P_{mx}

$\ln()$: logarithme népérien

L'examen du tableau 19 nous permet de faire les remarques suivantes :

- la pondération de la pluie mensuelle maximale conduisant à l'erreur standard moyenne la plus faible est de 0.25 ;

- le groupement des deux variables explicatives est sensiblement plus efficace que la pluie annuelle prise isolément.

Ces résultats globaux peuvent être complétés par une analyse plus détaillée du modèle le plus performant :

Bien que l'amélioration globale apportée par cette nouvelle version ne soit pas très significative, on constate que pour les bassins versants mal simulés par le modèle de base, le rapport de STUDENT a été augmenté.

Cependant pour onze bassins (les n°2, 8, 10, 11, 12, 13, 21, 22, 40, 48 et 50) sur 68, ce modèle donne des résultats décevants puisque le rapport de STUDENT de la variable explicative y prend une valeur inférieure à 3.

Il est également intéressant d'exprimer l'erreur moyenne en pourcentage du module (débit annuel moyen Q_a). Si l'on procède ainsi on obtient une erreur variant très largement entre 10 et 120% de Q_a , avec pour valeur moyenne 43%.

Cela permet une détermination du module, certes intéressante mais encore bien incertaine pour nombre d'applications. En ce qui concerne le coefficient A1 relatif à la variable explicative pluviométrique, on a constaté qu'il était assez variable, en gros de 0.5 à 4 avec une médiane égale à 2. Cette grande variabilité peut paraître quelque peu inquiétante.

L'équation du modèle linéaire proposé est :

$$\ln Q_a = A_0 + A_1 (\ln P + 0.25 \ln P_{mx}) + e$$

Devant ces résultats relativement pauvres nous allons rechercher une modélisation moins radicale que la boîte noire linéaire.

QUATRIEME PARTIE : MODELISATION CONCEPTUELLE

INTRODUCTION

On rappelle que le problème que nous cherchons à résoudre est de simuler les débits en un point d'une rivière à partir de la connaissance de la pluie reçue par le bassin versant relatif au point considéré.

Pour ce faire, une première phase de modélisation a consisté en l'élaboration d'un modèle linéaire de transformation pluie-débit. Cette approche considérant le système comme une "boite noire" fournit une image très simplificatrice du fonctionnement du bassin versant.

Il s'agit d'une description purement mathématique sans respect des bilans en eau, avec pour unique but d'obtenir des sorties les plus proches possibles des débits d'un bassin versant réel.

Bien que la modélisation à base de regressions multiples soit très utile et utilisée pour décrire globalement le comportement d'un bassin versant, l'ensemble de ces limites nous invite à aborder le problème de la modélisation pluie-débit par une autre approche plus acceptable que la modélisation linéaire tout en restant plus simple que la modélisation d'inspiration physique. On recherche une solution intermédiaire qui permet de mieux représenter le fonctionnement d'un bassin par une simulation plus conforme au respect de l'équation de continuité, assimilant le bassin à un assemblage de réservoirs. C'est ce type de modèles que nous nous proposons d'aborder dans cette quatrième partie et que nous aurions préféré nommer modèles empiriques plutôt que modèles conceptuels, puisque nous essaierons de nous affranchir de présupposés physiques.

L'élaboration du modèle conceptuel sera effectuée sur les données de près de 60 bassins versants de la région étudiée et les performances seront comparées à l'approche linéaire ainsi qu'à d'autres modèles de même type relevés dans la littérature hydrologique.

4.1 - RECHERCHE D'UN MODELE CONCEPTUEL SIMPLE

4.1.1 Généralités

De longues discussions pourraient s'entamer sur la notion de conceptualité. Le qualificatif conceptuel indique que le modèle s'inspire de la réalité physique, mais qu'il en reste assez éloigné, ses éléments (réservoirs par exemple) ne pouvant être identifiés à des éléments réels.

Ainsi la structure d'un modèle conceptuel est fondée sur une "pseudo-connaissance" des phénomènes en jeu dans le cycle hydrologique. On essaie de

bâtir un système qui réalise les opérations de réduction et de modulation dans le temps appliquées aux entrées pluviométriques. La sortie résultante, en l'occurrence la série de débits calculés, est comparée à la sortie observée dans le système réel, c'est à dire la série des débits observés à l'exutoire du bassin correspondant.

On essaie de corriger le sous-système si la concordance ne semble pas satisfaisante, on modifie les paramètres des fonctions qui semblent être responsables de cet état de fait de façon à obtenir une meilleure correspondance entre les séries calculées et observées.

Ci-après, nous présenterons les idées qui nous ont guidés pour le choix d'un modèle conceptuel servant comme point de départ à la recherche.

4.1.2 - Quelques exemples de modèles

Comme il a été dit précédemment, notre recherche consiste d'une part, à mettre au point et à appliquer un modèle conceptuel sur l'ensemble de la zone d'étude, et d'autre part, de guider l'utilisateur dans son choix face à la panoplie d'outils disponibles.

Au pas de temps mensuel, la plupart des modèles sont des modèles linéaires. Pour ne pas limiter notre choix, il est également possible de considérer un modèle journalier comme point de départ de la recherche.

A la variété des modèles existants (surtout journaliers), s'ajoute celle encore plus grande des situations particulières d'application. Il est donc hors de question de traiter de façon exhaustive les uns ou les autres, il a donc fallu faire un choix.

Ce choix s'est effectué à deux niveaux :

- d'une part celui du type de modèle, et pour cela un rappel bibliographique préalable permet d'avoir une idée des différentes approches de détermination des apports, et ainsi de nous fixer sur la classe de modèles à utiliser,

- d'autre part, la recherche dans cette classe de modèles, d'un modèle servant de point de départ à l'élaboration d'un modèle de simulation des débits mensuels. Nous présenterons ci-après une première série d'exemples de modèles mensuels utilisés dans la région d'étude où ailleurs dans le monde.

4.1.2.1 - Le modèle SMAP

Le modèle SMAP c'est-à-dire "Soil Moisture accounting procedure" [DIB et CANEDO,1985] et testé en Italie (sur un petit bassin du fleuve FARTURA, affluent du fleuve PARDO), a été utilisé en Algérie essentiellement pour les études de faisabilité des barrages [PROMON, 1987].

Ce modèle réalise le bilan en teneur en eau du sol sur la base de deux réservoirs matérialisant la fonction de rendement et la fonction de transfert et de onze paramètres (fig 3). Il est utile de décrire le fonctionnement du modèle SMAP, car, il est le seul modèle utilisé en Algérie en ce qui concerne la modélisation mensuelle et à ce titre ses performances devront être comparées aux modèles élaborés dans le cadre de cette recherche.

a) Réservoir - sol :

Le taux de la teneur en eau du sol a été défini, à chaque instant par le rapport : $TU = RSOL/STR$, où RSOL est le niveau du réservoir en mm et STR est la capacité de saturation en mm.

Une fraction de la pluie est transférée directement comme écoulement superficiel (ES). La partie restante, alimente le réservoir-sol : Cette dernière fraction ES est égale à :

$PP \times TU^{E2}$ où PP est la pluie et E2 un des paramètres du modèle;

Dans le réservoir-sol, une partie de l'eau est extraite par l'évaporation potentielle selon l'équation :

$ER = EE * TU^{E1}$ où EE est l'évaporation potentielle et E1, un paramètre du modèle.

b) Réservoir-souterrain :

La recharge du réservoir-souterrain est calculée en fonction du niveau de la teneur en eau du réservoir-sol par l'équation suivante :

$REC = RSOL * ACREC * TU^4$

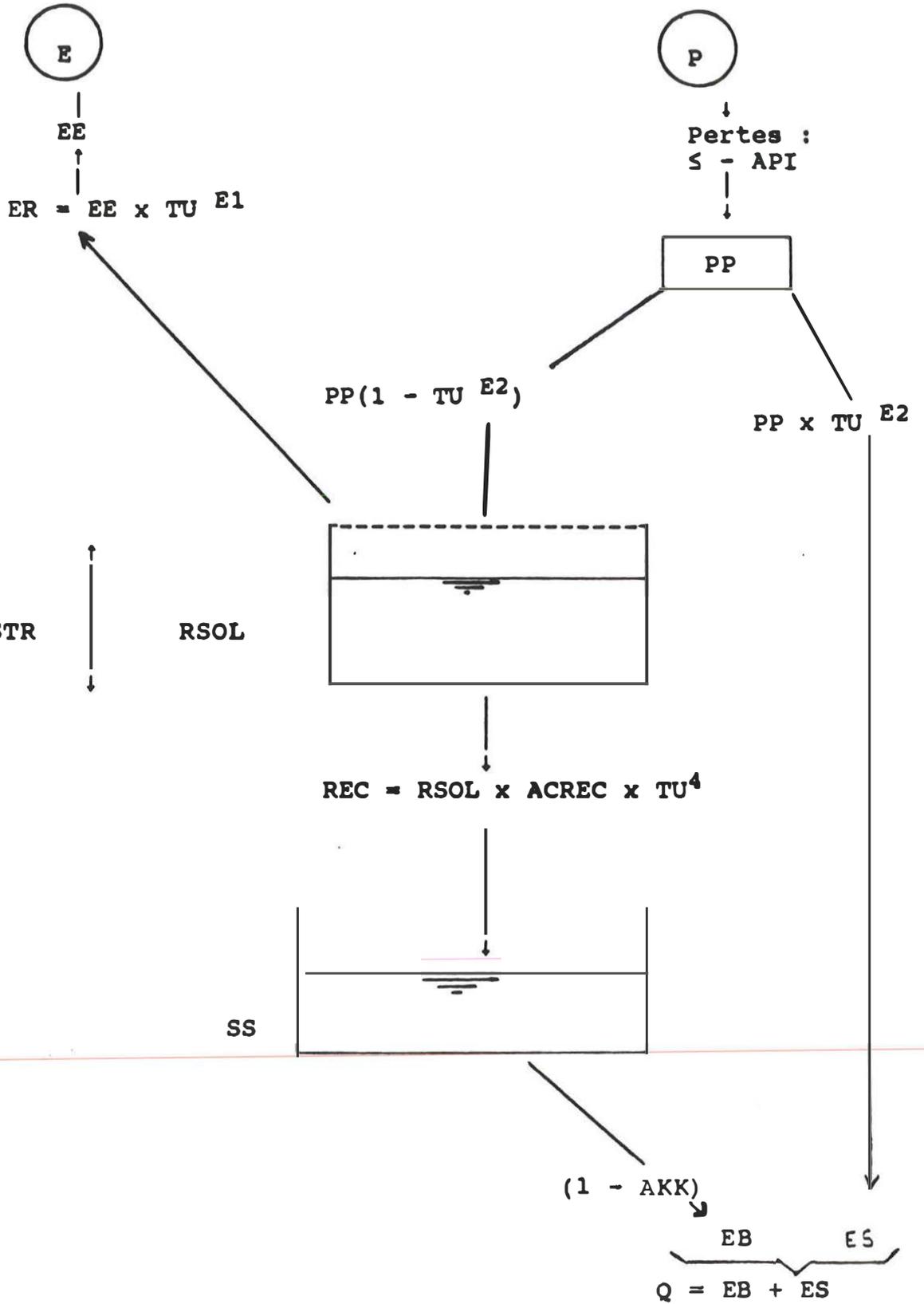


Figure 3 - Le modèle SMAP

où REC est la recharge en mm et ACREC est un paramètre de modèle.

Le niveau du second réservoir est représenté par SS, il délivre l'écoulement de base (EB) selon une loi linéaire :

$$EB = SS (1-AKK)$$

où AKK est un paramètre du modèle.

Enfin le débit à l'exutoire de la rivière est déterminé par sommation des écoulements superficiels (ES) et de base (EB) ce qui permet d'écrire :

$$Q = ES + EB$$

Ces paramètres, en nombre important, sont actuellement ajustés non pas par une technique d'optimisation automatique mais par approximations successives, en s'aidant des caractéristiques météorologiques et physiques du bassin, ce qui alourdit considérablement son utilisation.

Des artifices sont utilisés pour corriger quelques fortes surestimations intempestives, vraisemblablement conséquentes à la conceptualisation des phénomènes en jeu.

L'application de SMAP dans sa version opérationnelle actuelle sur l'ensemble des bassins versants de la région d'étude a montré sa difficulté à simuler correctement les débits et cela même au niveau annuel. Pour illustrer cela, nous présentons quelques résultats dans le tableau 20 (l'ensemble des résultats est représenté en annexe 5).

N° d'ordre des B.V	Nom de la station Hydrométrique	Apport interannuel simulé (mm)	Apport interannuel observé (mm)
5	BEN SEKRANE	29.6	50.1
24	TAKHMARET	2.4	6.3
26	SIDI AKACHA	103.1	108.6
29	EL AFROUN	103.0	105.1
58	AIN EL ASSEL	278.0	297.6
69	CED FAGUES	12.9	23.3

Tableau 20 : Exemple de simulation du modèle SMAP

Ce modèle présente quelques maladresses de conception et comporte un trop grand nombre de paramètres bien que trois seulement soient calés sur un bassin donné.

D'ailleurs, la complexité n'est pas obligatoirement un gage de qualité. Comme le souligne MICHEL (1983), outre la difficulté de mise en oeuvre, il est difficile de maîtriser le fonctionnement réel des modèles complexes où certaines fonctions du modèle ne réagissent pas dans les conditions pour lesquelles elles ont été créées et perdent donc de leur intérêt. Cette remarque n'est pas spécifique à SMAP mais concerne tous les modèles dont le nombre de paramètres dépasse la demi-douzaine. La procédure qui consiste à introduire de nouvelles fonctions pour remédier aux défaillances antérieures accentue encore ce phénomène et rend l'analyse du modèle très difficile.

4.1.2.2 - Le modèle CREC

Un modèle très utilisé en France est le modèle CREC (SAMER RIFAAT, 1980). Schématiquement, ce modèle est constitué de trois réservoirs S, H et G (fig.4). Il fonctionne au pas de temps journalier, et les résultats sont agrégés pour fournir les débits mensuels.

Si la pluie est supérieure au seuil absorption, on a du ruissellement direct. La quantité non ruisselée se répartit entre : le réservoir sol S et le réservoir hypodermique H selon le taux de remplissage de S.

- le réservoir S est un réservoir superficiel non limité, diminué par l'E.T.P., et alimenté par la pluie.

- le réservoir H est alimenté par la pluie non absorbée par S. Il se vidange, d'une part, directement dans la rivière et d'autre part en passant par le réservoir profond G qui se vidange selon une loi linéaire.

Le modèle CREC a été utilisé pour la reconstitution des débits moyens mensuels de la station hydrométrique du THEIL (ru de l'ORGEVAL, en Ile de France). Il comprend 8 paramètres :

X_1 : paramètre de vidange dans la rivière du réservoir H.

X_2 : paramètre de vidange linéaire du réservoir G.

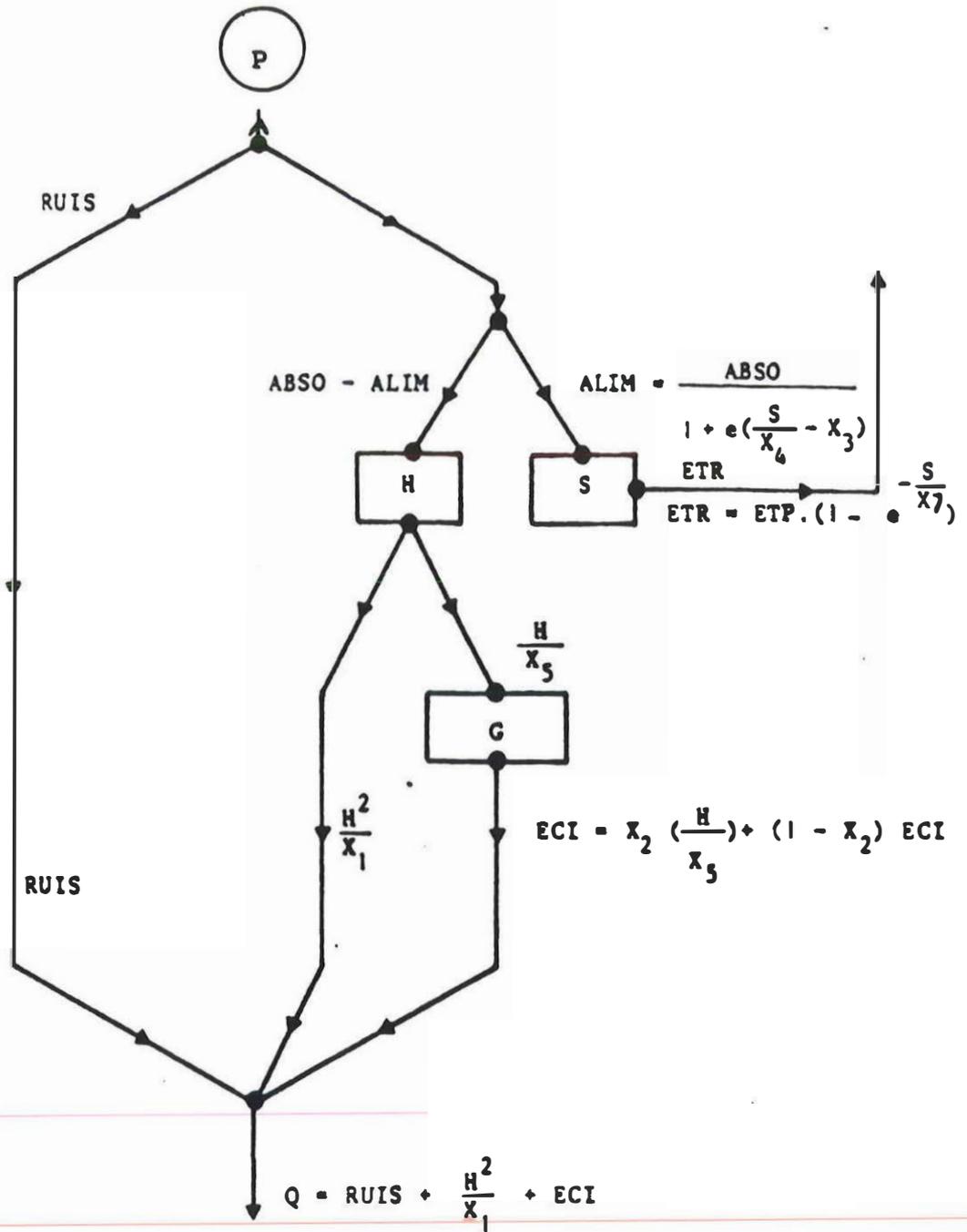


Figure 4 - Organigramme du modèle CREC

X3,X4 : paramètre contrôlant la répartition de la pluie entre les réservoirs S et H.
 X5 : paramètre de percolation linéaire du réservoir H dans le réservoir G.
 X7 : paramètre de réduction de l'évapotranspiration potentielle estimée grossièrement par l'évaporation PICHE et permettant le calcul de l'ETR puisée dans le réservoir S.
 X6,X8 : paramètre caractérisant la quantité maximale infiltrable.

Plusieurs versions du modèle CREC ont été élaborées, nous présentons en figure 5 une version à 10 paramètres [SERVAT, DEZETTER et LAPETITE, 1989].

4.1.2.3 - Modèle BOUGHTON

Le Modèle de BOUGHTON [MEIN et BROWN,1978], mis au point par BOUGHTON. Il s'agit d'un modèle mensuel à trois réservoirs interconnectés (fig 6) mais dépendant d'un nombre très important de paramètres, treize, évalués par une technique d'optimisation automatique.

Ces paramètres sont :

IMAX : capacité du réservoir d'interception
 USMAX : capacité du réservoir sol supérieur
 SSMAX : capacité du réservoir sol inférieur
 SDRMX : proportion de SSMAX avec le débit de base primaire
 DRMAX : capacité de drainage du réservoir supérieur
 FO : valeur d'infiltration journalière quand le réservoir inférieur est vide
 FC : valeur d'infiltration journalière quand le réservoir inférieur est plein
 AAK : paramètre empirique de la fonction d'infiltration
 PCUS : pourcentage d'évapotranspiration du réservoir supérieur
 KREC : constante de récession du débit de base primaire
 H : valeur maximale possible d'évapotranspiration
 DESEEP: proportion de l'eau du réservoir inférieur qui s'infiltré
 AAR : constante secondaire de récession du débit de base.

Une étude de sensibilité des paramètres a montré que quelques uns seulement des treize paramètres sont sensibles. Une première explication serait que le modèle a probablement plus de paramètres qu'il n'en faut pour simuler le

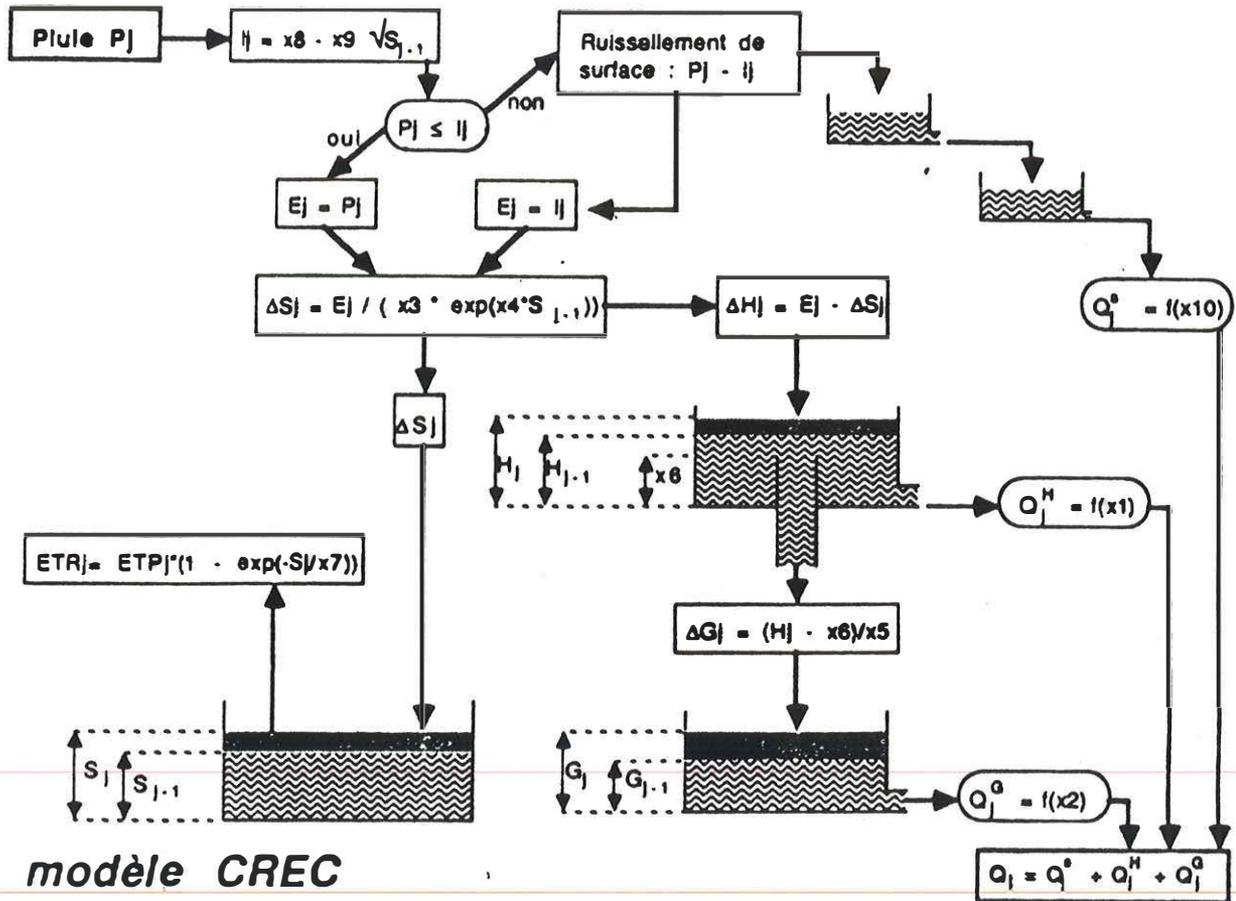


Figure 5 - Modèle CREC - version à 10 paramètres

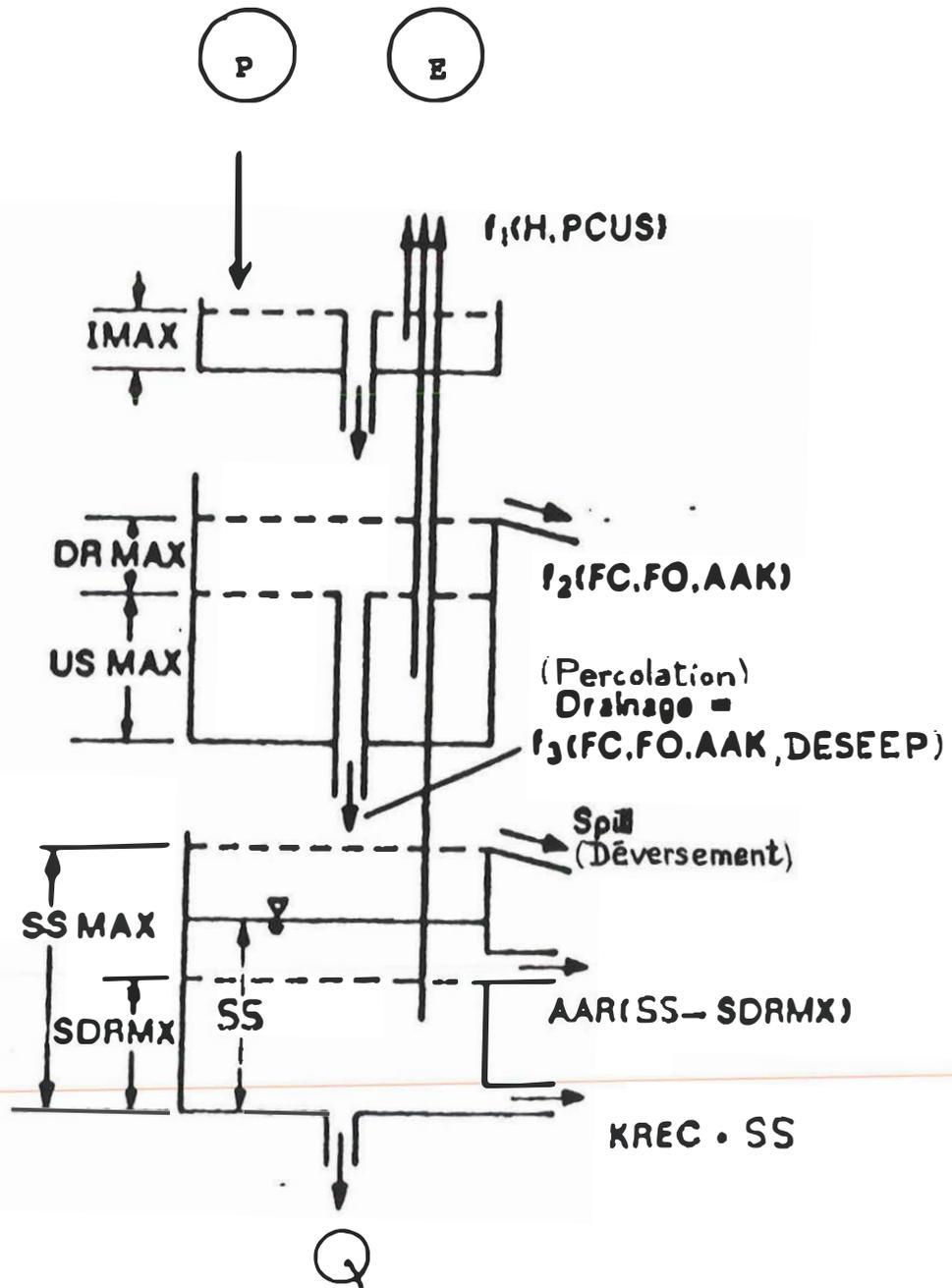


Figure 6 - Modèle de BOUGHTON

comportement hydrologique des bassins versants, la deuxième est à rechercher dans la difficulté d'optimiser un nombre important de paramètres.

Pour vérifier cette hypothèse, les auteurs simplifient le modèle, soit, en supprimant certaines fonctions, soit en attribuant des valeurs fixes à certains paramètres et teste le modèle successivement avec treize, dix, sept et trois paramètres. On peut voir dans le tableau 21 que malgré la réduction drastique du nombre de paramètres (lorsque l'on en retient seulement trois), le modèle ne perd pas beaucoup de ses performances.

Parameter	13-Parameter Model		10-Parameter Model		Seven-Parameter Model		Three-Parameter Model	
	Value	CV*	Value	CV	Value	CV	Value	CV
IMAX	3.8	2.9	3.9	2.9	0		0	
USMAX	165	0.38	164	0.30	0		0	
SSMAX	382	0.057	297	0.082	348	0.078	345	0.055
SDRMX	74	0.33	73	0.46	0		0	
DRMAX	8.5	0.61	8.48	0.57	9.1	0.36	0	
FO	123	2.2	123	2.2	129	1.52	250	
FC	12.3	0.47	12	0.37	13.7	0.28	250	
AAK	0.0013	1.2	0.0013	1.0	0.0011	0.87	0	
PCLS	72	0.32	72	0.29	0		0	
KREC	0.0137	0.17	0.0139	0.16	0.0069	0.14	0.007	0.093
H	8.9	0.62	8.9		8.9		8.9	
DESEEP	0.00102	0.59	0		0.00114	0.55	0.00113	0.33
AAR	0.00499	0.45	0.005		0		0	
Σ (observed minus predicted flow) ²	19.350		21.290		24.500		31.600	
Percent of total sum of squares accounted for	95.3		94.8		94.0		93.6	

Tableau 21 : Application du modèle de BOUGHTON avec 13, 10, 7 et 3 paramètres [MEIN et BROWN]

En conclusion, les auteurs signalent que si les paramètres d'un modèle ne sont pas déterminés avec assez de précision, c'est-à-dire s'ils ne sont pas significatifs, l'espoir d'expliquer ces paramètres est voué d'avance à l'échec et par conséquent l'application d'un tel modèle à des bassins versants non jaugés paraît compromis.

4.1.2.4 - Modèle T d'ALLEY (1985) :

Le modèle T est issu des travaux de [THORNTHWAITE et MATHER, 1955] pour lequel le sol est considéré comme ayant une capacité maximale d'humidité Φ .

L'humidité du sol à la fin du mois i est désignée par S_i .

L'humidité est additionnée ou soustraite au sol selon que la précipitation du mois i est supérieure ou inférieure à l'évaporation potentielle E_i .

Dans le premier cas quand $P_i > E_i$ on a :

$$S_i = \text{Min} \{ (P_i - E_i) + S_{i-1}, \Phi \} \quad (1)$$

dans le second cas quand $P_i < E_i$, le déficit d'humidité du sol apparaît ou s'accroît et :

$$S_i = S_{i-1} \exp \left(-(E_i - P_i) / \Phi \right) \quad (2)$$

quand la précipitation du mois est supérieure à l'évaporation potentielle et l'humidité du sol atteint sa capacité Φ , alors l'excès d'eau contribue à l'écoulement :

$$\Delta R = P_i - E_i + S_{i-1} - \Phi \quad \text{et si} \quad \Delta R > 0$$

Sinon

$$\Delta R = 0$$

Une fraction λ de ΔR reste dans le stock souterrain qui se vidange selon une loi linéaire :

$$R_i = \lambda (R_{i-1} + \Delta R)$$

Le débit du mois i est alors égal à :

$$Q_i = (1 - \lambda) (R_{i-1} + \Delta R)$$

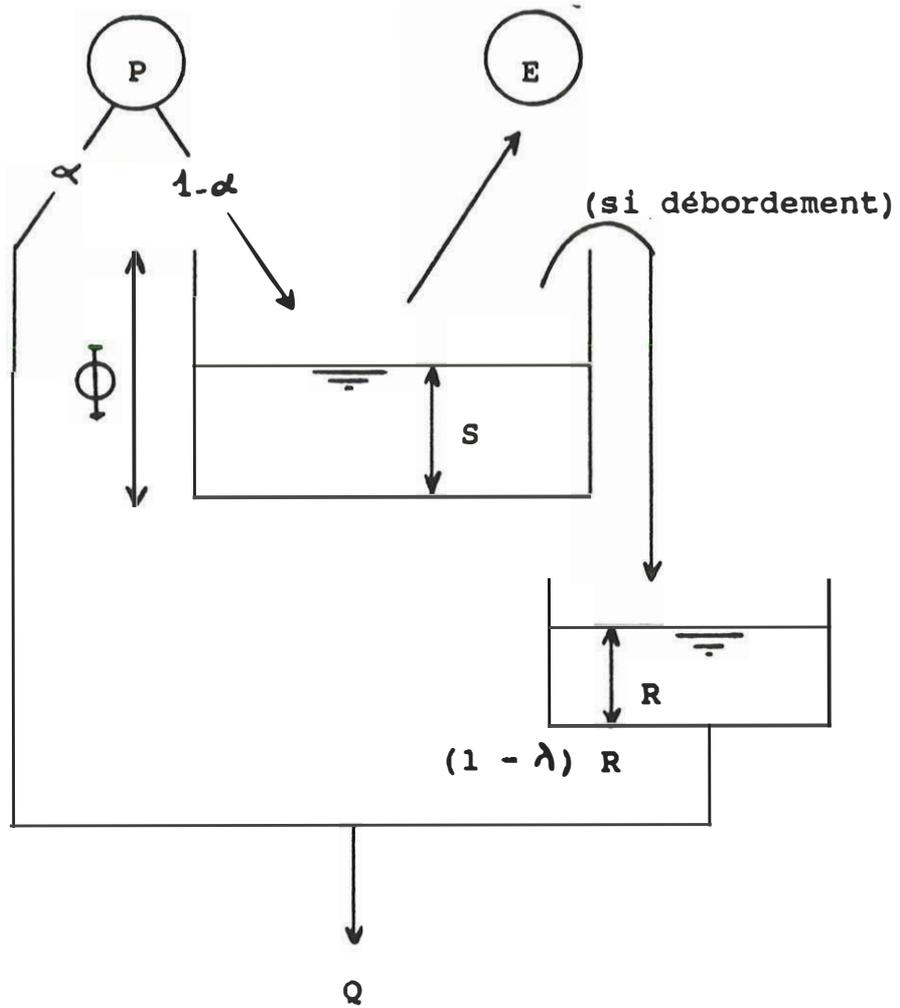


Figure 7: Modèle T_α d'ALLEY

Par rapport au modèle de THORNTHWAITE, le modèle T_{α} introduit la possibilité d'un écoulement direct d'une fraction de la pluie, ce qui rend l'écoulement moins intermittent et a donné de bons résultats sur 6 bassins du New-Jersey. Son architecture est présentée en figure 7.

4.1.2.5 - Modèle non linéaire : MNL [SCHAAKE et CHUNZHEN, 1989]

Dans une publication récente (mai, 1989), les auteurs cités ci-dessus avaient étudié le fonctionnement d'un modèle linéaire et d'un modèle non linéaire sur des bassins versants à climat humide de l'est de la Chine et sur un bassin de l'Oklahoma à climat semi-aride.

Le modèle linéaire dépendant de 3 paramètres : αk , S^* est représenté sur la figure 8.

L'application de ce modèle aux régions citées plus haut, a montré la difficulté de ce type de modèle à simuler les débits de bassins versants semi-arides. La principale raison, selon les auteurs, est que α n'est pas constant, mais dépend de la précipitation P , et du stock d'humidité S .

Compte tenu des résultats obtenus par le modèle linéaire, on a proposé un modèle non linéaire dont l'architecture est composée d'un seul réservoir mais qui dépend de cinq paramètres : Dx , θ , ZD , Sx et K où :

Dx : est le déficit maximal lors d'une sécheresse extrême ;

θ : est la fraction de l'évaporation réelle de la précipitation qui va s'exercer directement sur la pluie. Le reste de la pluie est partagé entre le réservoir et l'écoulement direct.

ZD : c'est la partie de la pluie qui sert à combler le déficit d'humidité D .

Sx : est le stockage maximal disponible pour l'écoulement.

K : la constante de vidange du réservoir linéaire de contenu $Sx - D$.

Les différents paramètres sont repris dans l'organigramme de la figure 9.

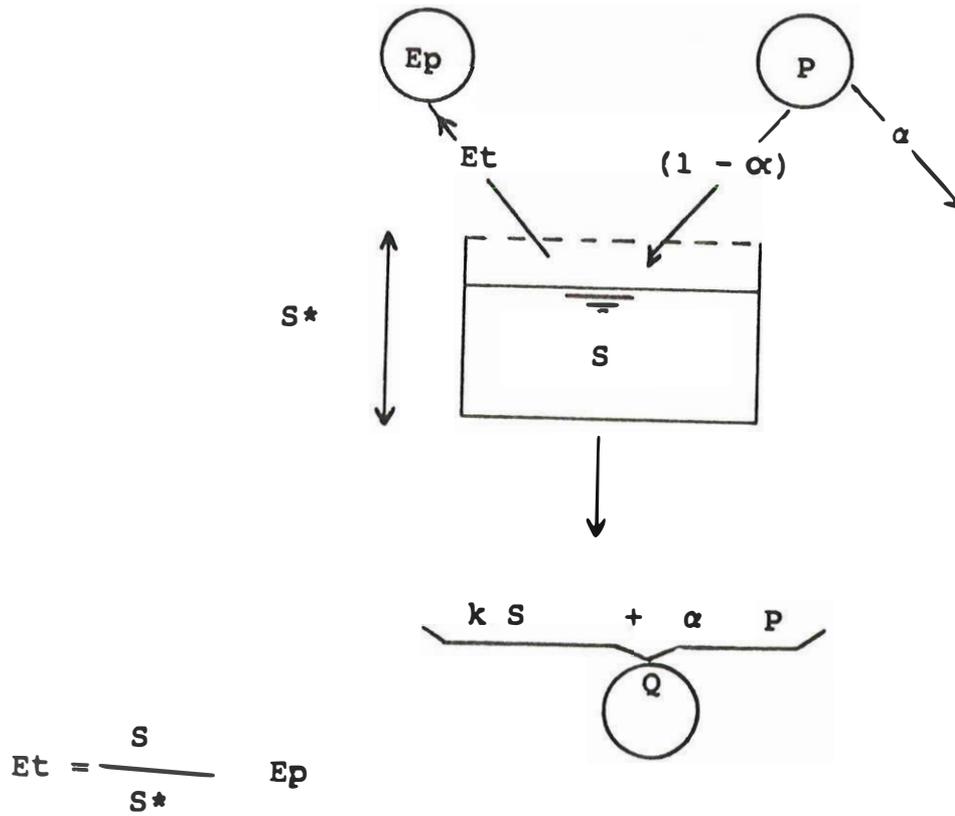


Fig 8 : Architecture du modèle linéaire
[SHAAKE Jr et CHUNZHEN, 1989]

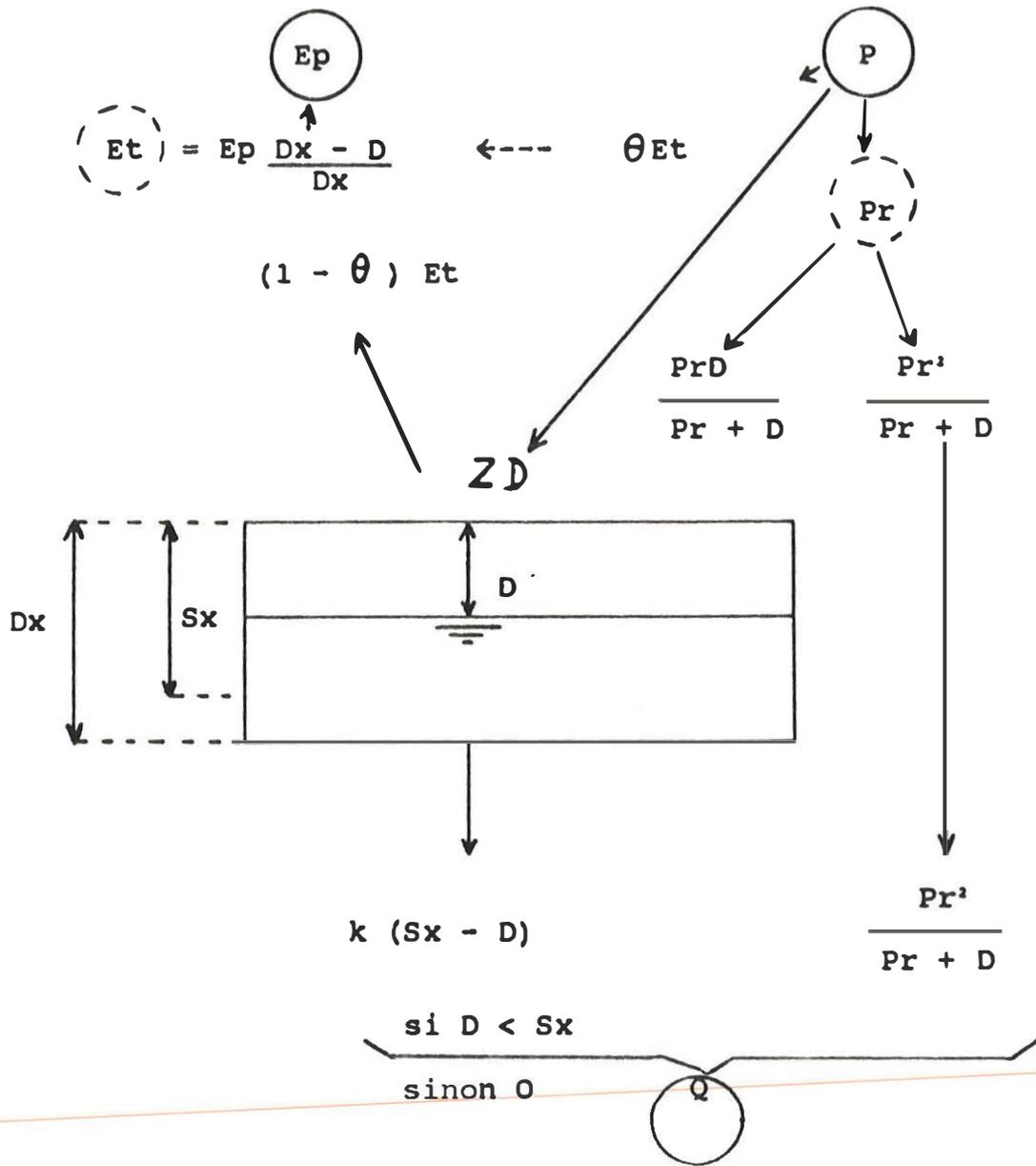


Fig 9 : Architecture du modèle non linéaire
 [SHAAKE Jr et CHUNZHEN, 1989]

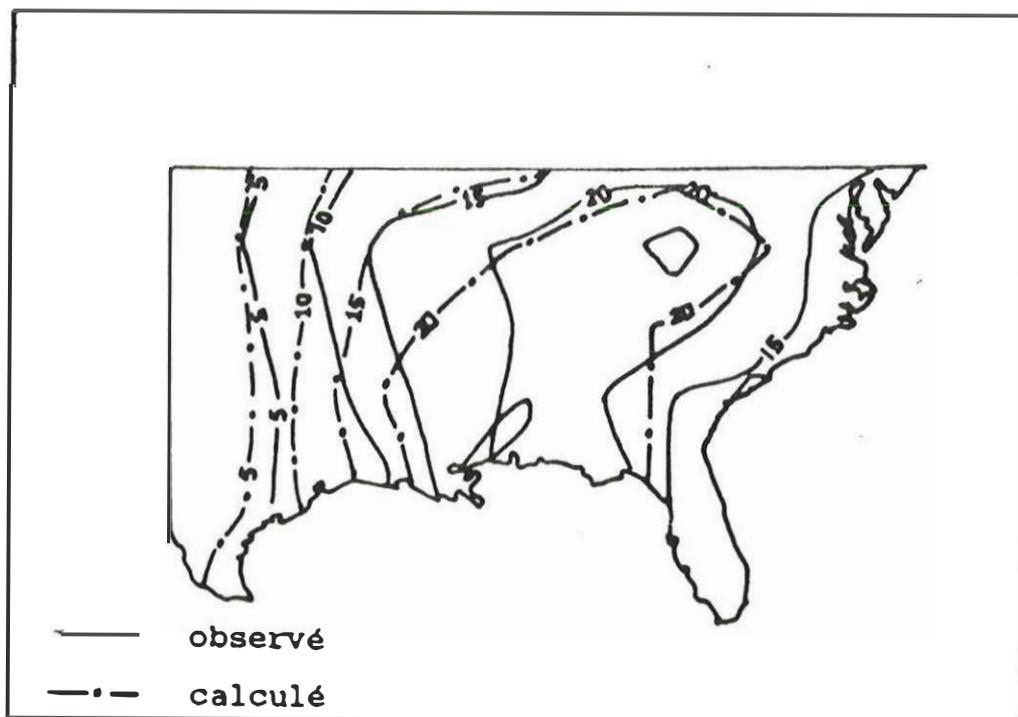


Fig 10 : Module observé et calculé par le modèle non linéaire de [SHAAKE Jr et CHUNZHEN, 1989]

Le modèle proposé a été calé sur 50 bassins versants, les débits annuels moyens observés et calculés par le modèle non linéaire sont représentés dans la figure 10.

Par ailleurs, les auteurs ont étudié la sensibilité des ressources en eau à des changements climatiques. Pour ce faire, ils ont étudié l'influence d'une modification de la précipitation ou de l'évaporation potentielle.

Une altération de 10% de la pluie a conduit à une altération du module de 20 à 45% contre 15 à 30% pour une modification de même ampleur de l'évaporation potentielle.

4.1.2.6 - Modèle ABCD (THOMAS, 1981):

THOMAS (1981) a présenté un modèle de bilan en eau appelé ABCD dépendant de quatre paramètres :

La partie rendement dépendant de 2 paramètres est définie comme suit :

$$w_i = P_i + S_{i-1}$$

et

$$Y_i = E'_i + S_i$$

où

w_i : est la quantité d'eau totale " disponible"

P_i : est la pluie du mois (i)

S_i : est le stock d'humidité du mois (i)

E'_i : est l'évapotranspiration réelle du mois (i)

Y_i : est par définition la somme de S_i et de E'_i ; Y_i rassemble l'eau stockée dans le bassin et l'eau perdue par évaporation.

y_i est déterminé en fonction de w_i (cf figure 11) par la relation:

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \sqrt{\frac{(W_i + b)^2}{2a} - \frac{W_i b}{a}}$$

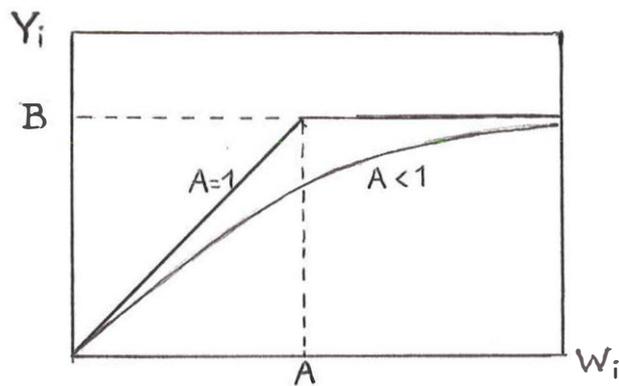


Fig 11 : Relation entre Y_i et W_i du modèle ABCD de THOMAS

Le stock d'humidité à la fin du mois est déterminé par :

$$S_i = Y_i e^{\left(- \frac{E_i}{b} \right)}$$

où E_i désigne l'évaporation potentielle

La partie transfert (dépendant de 2 paramètres) concerne l'eau disponible pour l'écoulement à savoir : $W_i - Y_i$.

Une partie donne lieu à l'écoulement direct $(dR)_i$ et le complément sert à la recharge de la nappe souterraine $(GR)_i$:

$$(GR)_i = C (W_i - Y_i)$$

$$(dR)_i = (1 - C) (W_i - Y_i)$$

L'eau souterraine est routée à travers un réservoir linéaire de paramètre D.

Si G_i désigne le stock souterrain, le débit est DG_i et l'évolution du stock est donc donnée par :

$$G_i = [GR_i + G_{i-1}] (1 + D)$$

L'auteur attribue à chacun des 4 paramètres une certaine signification physique.

L'architecture du modèle est présentée en figure 12.

4.1.2.7 - Enseignements

Cette première revue de modèles montre bien les inconvénients d'une modélisation trop conceptuelle.

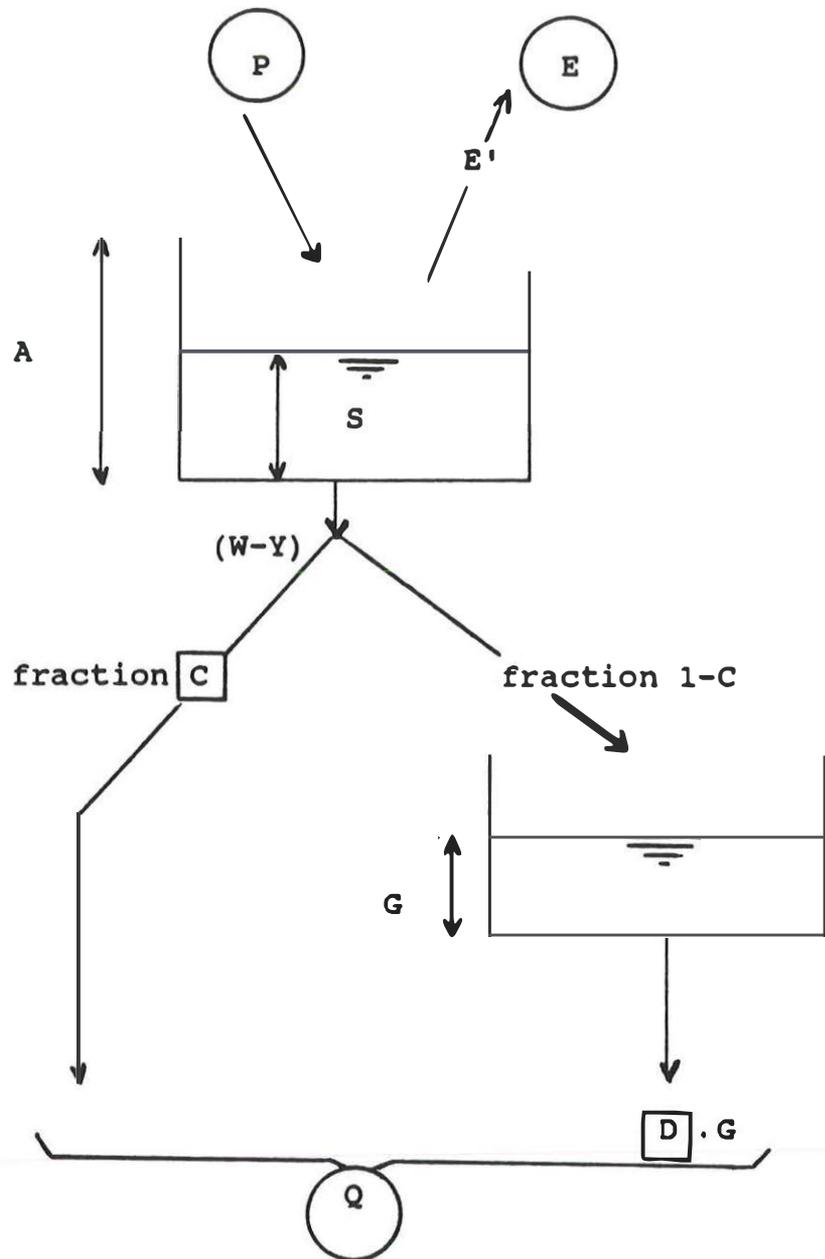
Pour essayer d'éviter ces inconvénients, et pour garder une chance de pouvoir relier les paramètres du modèle aux caractéristiques physiques et climatiques des bassins versants, il semble donc nécessaire de partir d'un modèle conceptuel aussi simple que possible, d'en analyser les défaillances et de n'introduire des modifications que lorsqu'elles sont justifiées par les performances qu'elles permettent d'obtenir.

Pour cela quatre critères principaux nous ont guidés dans le choix du modèle à adopter, à savoir :

- Le modèle doit faire intervenir le moins de paramètres possible. Cette qualité n'est pas seulement satisfaisante pour l'esprit, elle permet d'augmenter nos chances de pouvoir répondre à une ambition permanente en hydrologie, qui est de pouvoir estimer a priori les paramètres, sur un bassin sans données.

C'est pourquoi nous tenons à respecter cette condition essentielle dans l'élaboration de notre modèle.

- Le modèle doit être intelligible, c'est à dire qu'il doit être facile de comprendre comment il peut fonctionner réellement, ce qui permet de juger de la cohérence des résultats, d'élucider les cas de défaillance et de proposer des améliorations.



avec :

$$W - Y = P + S - \frac{P + S + b}{2a} + \sqrt{\left(\frac{P + S + B}{2a}\right)^2 - \left(\frac{P + S}{a}\right)b}$$

Fig 12 : Architecture du modèle ABCD de THOMAS

- Il est intéressant, à la fois scientifiquement et économiquement qu'un modèle soit valable dans des conditions très diverses : climat, superficie de bassin versant, géologie, etc...

- enfin le modèle doit être robuste, c'est à dire que, en cas d'informations très limitées, le modèle doit conserver une qualité minimale et donner des résultats vraisemblables.

C'est dans cet état d'esprit, que les chercheurs du CEMAGREF [EDIJATNO et C. MICHEL, 1989] ont développé un modèle très simple au pas de temps journalier, dénommé GR3j. Son caractère prometteur, révélé par son bon comportement dans des régions très variées, et le très faible nombre de ses paramètres (seulement trois) réunissait d'excellentes conditions pour servir de modèle de départ pour notre recherche.

Si notre choix s'est porté sur GR3j, c'est à cause de son extrême simplicité, et de sa portée assez générale puisqu'il représente la transformation pluie-débit pour des bassins allant de quelques ha à quelques milliers de km².

Le modèle utilisé est dérivé du modèle GR2, à deux paramètres, (Michel, 1983), et qui est lui même une simplification du modèle CREC, à 8 paramètres élaboré par le laboratoire d'hydraulique de CHATOU, puis revu et corrigé en 1969 par l'équipe de CORMARY du laboratoire d'hydrologie de MONTPELLIER [CORMARY et al, 1970].

Le modèle GR3j est un modèle dit global car on ne cherche pas à prendre en compte les irrégularités dans la répartition spatiale des pluies.

Le choix du modèle sur lequel portera notre recherche étant fait, il convient de l'adapter pour fonctionner avec des données mensuelles au lieu de données journalières.

Cette opération débouchera sur l'élaboration d'un modèle de simulation des débits mensuels sur les moyens bassins de l'Algérie septentrionale, mais avant d'aller plus loin, nous allons d'abord décrire le modèle de départ GR3j.

4.1.3 - Description du modèle GR3j : ¹¹²

L'architecture de cet algorithme repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire :

- le réservoir-sol ayant comme seule sortie le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Ce réservoir commande la répartition de pluie nette entre lui-même et le sous-modèle de routage :
- Un hydrogramme unitaire, décrivant la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir qui est :
- Le réservoir-eau gravitaire. Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie le débit de la rivière.

Cet ensemble de trois opérateurs dont chacun dépend d'un seul paramètre semble être à l'heure actuelle, le schéma le plus simple pour rendre compte de façon acceptable de la transformation pluie-débit.

Nous allons présenter d'abord successivement les deux réservoirs du modèle GR3j.

4.1.3.1 - Le réservoir-sol.

Il est caractérisé par sa capacité A, premier paramètre du modèle GR3j. Son niveau S est soumis soit à la pluie (P-E) soit à l'évaporation potentielle (E-P), selon que ces termes sont positifs. Dans ce qui suit P et E désigneront ces différences positives.

Compte tenu de l'extrême simplicité du modèle, l'évaporation potentielle est une simple moyenne interannuelle de l'évaporation calculée selon la formule de HL.PENMAN.

Le niveau S du réservoir-sol permet de définir la fraction de la pluie qui accedera au réservoir-eau gravitaire. Cette fraction peut être approchée par le rapport :

$$K = \left[\frac{S}{A} \right]^2 \quad (1)$$

Le complément à 1 de cette fraction entre dans le réservoir-sol. Cette relation en valeur instantanées peut être intégrée sur le pas de temps sans complication

notoire. Cela permet de tenir compte de l'évolution de S au cours du jour où il reçoit la pluie P. On obtient ainsi

$$\Delta S = A \tanh (P/A) \left[\frac{1 - (S/A)^2}{1 + (S/A) \tanh (P/A)} \right]$$

Le niveau du réservoir-sol permet également de définir l'évaporation réelle qu'il pourra délivrer. Cette évaporation réelle est une fraction de l'évaporation potentielle ayant des caractéristiques symétriques de la fraction représentée par (1).

$$H = \frac{S}{A} \left[2 - \frac{S}{A} \right]$$

Cette relation est appliquée en l'intégrant sur le pas de temps Δt :

$$d s = - \frac{S}{A} \left[2 - \frac{S}{A} \right] d E$$

qui donne approximativement :

$$s = - E \frac{S}{E + A / (2 - S / A)}$$

Les deux fractions concernant le rendement de la pluie et le rendement de l'évaporation illustrent la différence majeure entre les deux processus : le rendement des pluies n'approche l'unité que tardivement, lorsque S est proche de A. Le rendement de l'évaporation réelle n'approche la valeur 0 que lorsque S est proche de 0. Ces deux courbes sont symétriques par rapport au point (A/2, 1/2) (cf figure 13).

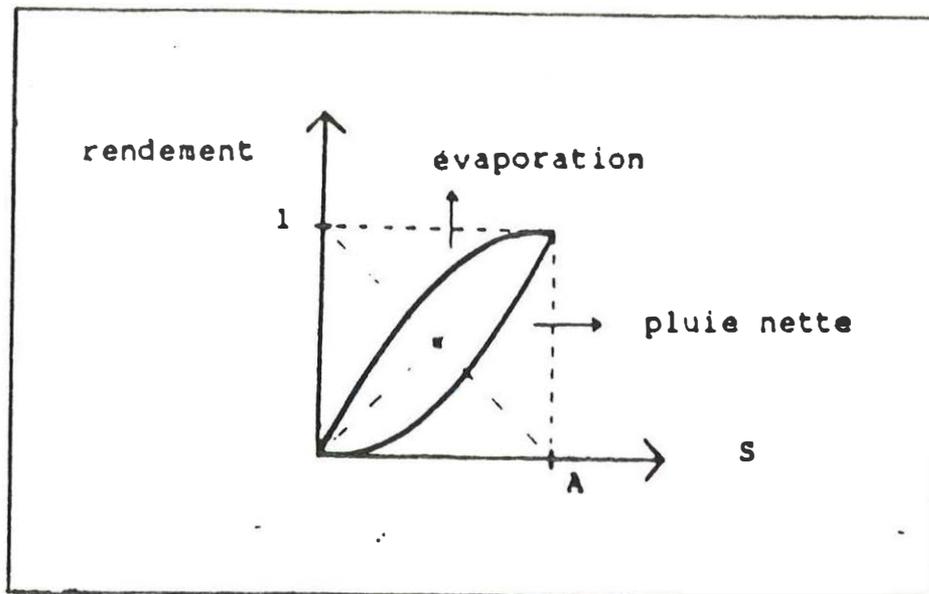


Figure 13 - Rendement de la pluie et de l'évaporation
[EDIJATNO et C. MICHEL, Houille Blanche, 1989]

4.1.3.2 - Le réservoir-eau gravitaire : R

C'est un réservoir de type quadratique qui délivre le débit journalier de la rivière. Il est caractérisé par sa "rétention maximale à un jour" B, deuxième paramètre du modèle.

Ce réservoir reçoit, en début de pas de temps, la pluie nette. Le niveau R du réservoir eau gravitaire détermine le débit Q qu'il peut relâcher :

$$Q = \frac{R^2}{R + B}$$

Cependant, ce schéma ne permet pas de simuler une montée de crue, une solution possible à ce problème était l'introduction en amont de ce réservoir d'un opérateur hydrogramme unitaire.

4.1.3.3. Hydrogramme unitaire :

Pour traduire la part de la fonction de transfert qui ne peut pas être prise en compte par la vidange du réservoir eau-gravitaire, on a introduit l'opérateur classique qu'est l'hydrogramme unitaire, dépendant d'un seul paramètre, sa durée C : c'est donc le troisième et dernier paramètre du modèle GR3j. Les trois opérateurs du modèle, une fois rassemblés, conduisent à la figure 14 du modèle GR3j de référence pour notre recherche, dans laquelle on a omis la fraction constante d'écoulement pseudo-direct, adoptée dans la version actuelle du modèle.

A l'issue de cette analyse, nous allons pouvoir concevoir le modèle mensuel de base à partir du modèle GR3j tout en essayant de conserver le même nombre de paramètres.

4.2 - STRUCTURE INITIALE DU MODELE MENSUEL : GR M1

4.2.1 - La référence à GR3J

Le point de départ de la recherche est le modèle de transformation pluie-débit au pas de temps journalier GR3j comme il a été déjà dit précédemment. Il convenait donc tout d'abord de l'adapter pour fonctionner avec des données mensuelles au lieu des données journalières.

Pour ce faire, nous allons procéder en deux étapes : tout d'abord, nous allons concevoir l'architecture du modèle mensuel en nous inspirant du modèle de référence.

Puis, après essais, des lacunes pourront apparaître et nous conduire probablement soit à proposer des modifications de l'architecture initiale soit à redéfinir certaines fonctions. La construction du modèle mensuel se fait ainsi par étapes, au cours desquelles on s'attachera à suivre de près le fonctionnement réel du modèle et à n'introduire de modifications que sur une base objective, après application du modèle et diagnostic sur les résultats obtenus.

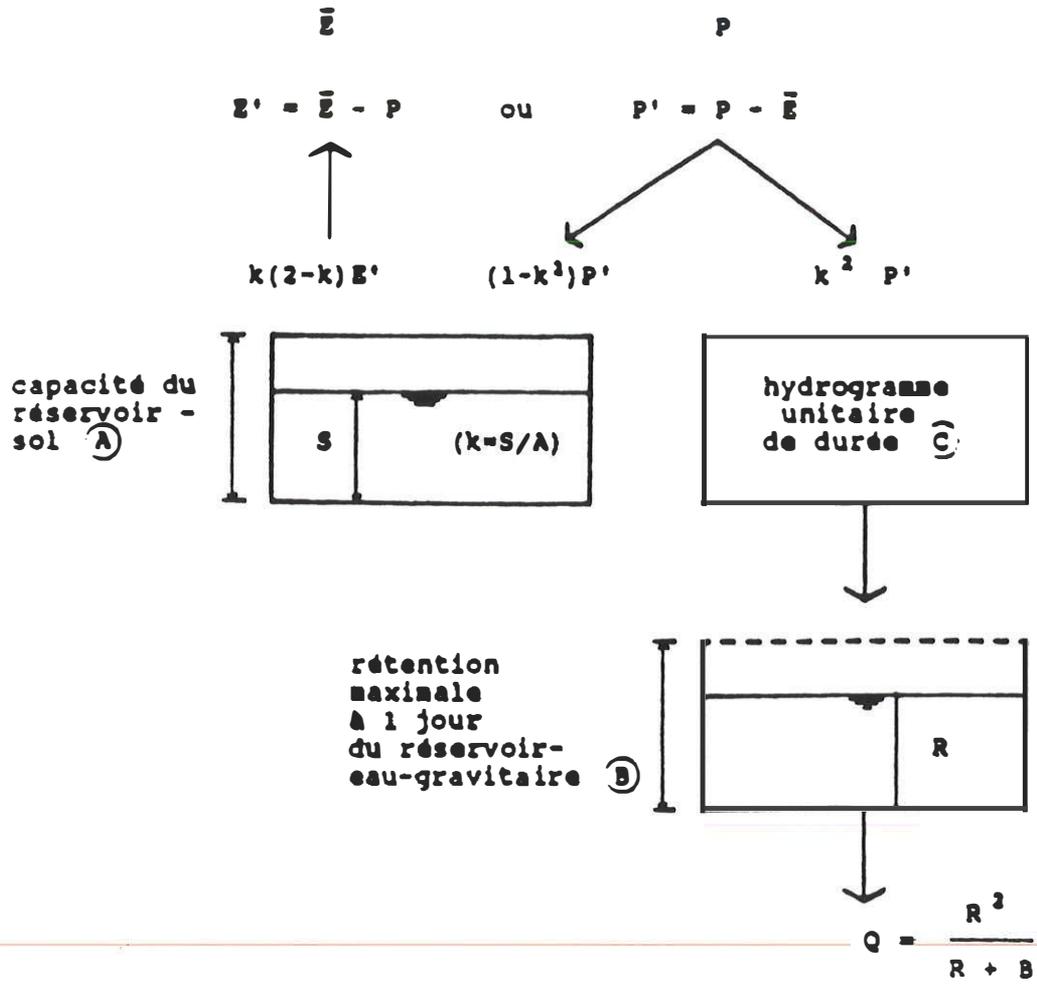


Figure 14 - Schéma d'ensemble du modèle de référence GR3j

Le modèle GR2 (MICHEL C, 1983) père de GR3, se contentait de deux paramètres A,B :

- le premier paramètre A : relatif à la fonction de rendement; il caractérise la capacité maximale de remplissage du réservoir-sol. Ce dernier assurant le bilan hydrologique, est nécessaire dans les deux modèles GR3j et GRM1 ,

- un deuxième paramètre B : relatif à la fonction de transfert; il correspond au contenu maximum du réservoir-eau-gravitaire assurant le routage des débits. Comme pour le paramètre A, le paramètre B, est maintenu. L'introduction d'un troisième paramètre dans le modèle GR3j était nécessaire pour simuler le "décalage" séparant la formation d'une pluie nette et sa sortie en débit dans la rivière. L'objectif de cette nouvelle fonction était donc de simuler un temps d'accès au réservoir eau-gravitaire. Ce décalage, sensible au pas de temps journalier, est inexistant au pas de temps mensuel et cette fonction n'a donc plus lieu d'être au pas de temps mensuel.

Cette remarque nous conduit à envisager la transformation de l'opérateur en question. Deux voies sont alors possibles :

- l'idée de départ, afin de conserver un modèle qui soit le plus simple possible, est de simplifier le modèle GR3j en supprimant la fonction de l'hydrogramme unitaire. On se limite alors à deux paramètres. Cependant, l'essai d'un tel modèle a conduit à des résultats médiocres. L'architecture s'est révélée un peu trop simple pour imiter le fonctionnement des bassins ruraux.

- Une autre idée est d'utiliser le troisième paramètre disponible pour essayer d'améliorer la modélisation. On peut penser ainsi à affiner le comportement de l'une des deux fonctions : transfert ou rendement.

Il nous a paru préférable de suivre cette deuxième idée.

Pour cela on doit identifier la fonction la plus importante dans la modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel, c'est celle dont nous améliorerons la modélisation.

4.2.2. - Faut-il améliorer la fonction de production ou la fonction de transfert ?

La fonction de production constitue l'élément essentiel des relations pluie-débit, la fonction de transfert quoique nécessaire est moins importante pour la modélisation des écoulements surtout au pas de temps mensuel. Ainsi on pourrait souvent simplifier à l'extrême cette fonction sans beaucoup diminuer la qualité de la simulation. (GUILLOT, 1971).

Il est donc préférable d'affiner davantage la fonction de production que celle de transfert, car c'est de cette fonction que dépend une part importante de la qualité de simulation.

Le transfert de la pluie nette, c'est-à-dire la répartition temporelle de la quantité d'eau susceptible de participer à l'écoulement est peu sensible.

L'opération de transfert ne conditionnant que la forme de la crue, cette fonction est moins importante que la fonction de production, au pas de temps mensuel.

A partir du moment où la fonction de production est bien simulée, la fonction de transfert peut prendre une forme très simple et toute recherche visant à améliorer cette fonction ne semble pas, dans un premier temps, capitale. Les efforts doivent plutôt tendre d'abord à l'amélioration de la fonction de production, dont les imperfections sont beaucoup plus manifestes.

La fonction de transfert du modèle GR3j a nécessairement deux paramètres par contre, la fonction de production ne dépend que d'un seul paramètre.

On propose donc de transformer un paramètre de la fonction de transfert de GR3j en un paramètre de la fonction de rendement et plus précisément on cherchera à réutiliser le paramètre de l'hydrogramme unitaire.

Il faudrait donc construire un troisième opérateur qui contribuera à une meilleure modélisation de la fonction de production.

4.2.3 - Enrichissement de la fonction de production

Dans le modèle de référence GR3j, pour transformer la pluie brute P en pluie nette Pn disponible pour l'écoulement, on a procédé à une neutralisation complète pluie-évaporation.

Cette démarche, tout à fait justifiée au pas de temps journalier, est inacceptable au pas de temps mensuel puisqu'elle interdit toute pluie nette pendant les nombreux mois où l'évaporation est majoritaire.

Il s'agit donc d'approfondir ce point essentiel, partie intégrante de la fonction de production et qui correspond à la fraction de pluie que le sol va laisser s'écouler ou s'infiltrer après satisfaction de l'évaporation.

Notre démarche est de modifier la neutralisation initiale présente dans GR3j en considérant que la pluie P est confrontée de façon limitée à l'évaporation potentielle.

Pour cela on propose qu'une fraction seulement de l'évaporation potentielle puisse se neutraliser avec la pluie brute, la pluie est donc soumise directement à cette fraction de l'évaporation, à la suite de cette opération, la pluie restante est notée P' et l'évaporation potentielle restante E'p.

L'entrée du réservoir-sol sera alors la pluie restante P' à laquelle on a soustrait la pluie nette destinée à l'écoulement avec $P_n = P' * K$, où $K = S/A$; la sortie sera constituée des prélèvements occasionnés par l'évaporation réelle qui est fonction de l'évaporation potentielle restante (après la réduction conjointe de P et de E) fonction dépendant du même paramètre que le coefficient d'écoulement K :

$$E_r = E'p K (2-K)$$

A l'issue de cette analyse, nous nous proposons donc de remplacer dans le modèle mensuel la neutralisation totale par une réduction conjointe dépendant d'un troisième paramètre qui se substitue à celui définissant l'opérateur hydrogramme unitaire du modèle de référence GR3j.

Etant donné l'importance du troisième paramètre, un sous chapitre (4.4.1) lui est consacré dans lequel nous allons envisager différentes versions possibles, allant de la neutralisation complète à l'absence de réduction, cela afin de choisir de façon efficace cette fonction spécifique de la fonction de production.

Dans cette première phase de la modélisation, nous avons gardé les mêmes spécifications que celles utilisées dans le modèle de référence.

Avec une fonction de transfert dépendant d'un seul paramètre "B" qui caractérise la rétention maximale du réservoir-eau gravitaire, on obtient ainsi un modèle mensuel de base, très simple, à trois paramètres dont deux sont relatifs à la fonction de rendement et le troisième est relatif au transfert. Nous présentons en figure 15 l'architecture du modèle GRM1.

Une fois l'architecture et la structure du modèle définies nous essayerons de l'améliorer si nous constatons des défauts de fonctionnement lors de l'application sur les quelques 60 bassins que nous étudions.

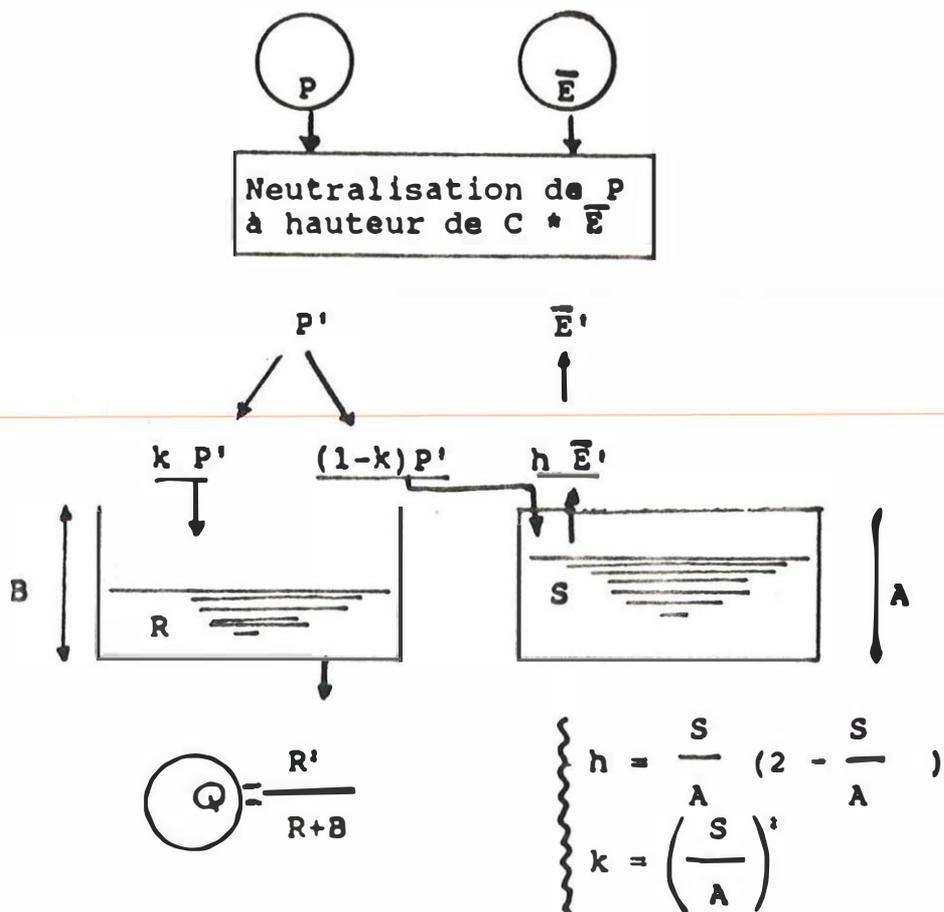


Figure 15 - Architecture du modèle GRM1 - modèle de base

4.3 - CALAGE DU MODELE GRM1¹²¹

Le modèle tel qu'il vient d'être présenté permet donc de produire une série de pluies mensuelles. Le modèle sera d'autant plus satisfaisant que les débits ainsi calculés seront proches des débits effectivement observés. Apprécier la validité du modèle consiste à juger de la proximité des deux séries chronologiques simulées et observées. Pour cela différents critères permettent de juger de l'adéquation du modèle.

tout d'abord le critère visuel : il permet de porter un jugement non objectif sur la modélisation. Cependant, il reste utile dans la plupart des cas. Le critère numérique permet de faire des comparaisons entre modèles et aussi de caler de façon automatique le modèle c'est-à-dire de trouver le jeu optimal de paramètres qui minimise ce critère numérique appelé aussi fonction critère.

4.3.1 - Fonction critère

Il existe, dans la littérature, un très grand nombre de critères. On peut vouloir différents critères afin d'apprécier les performances du modèle relativement à des aspects particuliers, cependant le calage ne peut porter que sur la minimisation d'un critère unique ce qui n'empêche pas d'en définir plusieurs pour avoir une vue plus complète des résultats du modèle.

Les différentes formulations des critères ne sont pas sans influence sur la nature et la qualité du calage, donc sur les valeurs des séries calculées - Telle fonction critère donnera un poids important aux étiages, telle autre aux pointes de crue.

Comme nous avons pour objectif la détermination des apports et comme, d'autre part, les gros écarts entre débits observés et calculés s'observent pour les plus forts volumes écoulés, il nous a paru suffisant de choisir une fonction critère qui concerne les erreurs absolues.

Nous avons retenu le critère d'optimisation le plus classique, qui est égal à la somme des carrés des écarts entre les débits observés et calculés :

Notons F cette fonction critère.

$$F = \sum_{i=1}^N \left[Q_i - \hat{Q}_i \right]^2$$

avec Q_i et \hat{Q}_i respectivement les débits observés et calculés en mm, N étant la durée de la série chronologique.

Il est utile de rendre cette quantité adimensionnelle pour faciliter la comparaison d'un bassin versant à l'autre.

Pour ce faire, il est logique d'exprimer ce critère par rapport aux pluies car elles représentent objectivement l'erreur maximale possible :

$$F_p = \frac{\sum_{i=1}^N [Q_i - \hat{Q}_i]^2}{\sum_{i=1}^N P_i^2} * 100$$

où P_i sont les pluies concomitantes aux débit Q_i :

Une telle fonction critère nous permettra de comparer d'une part les résultats obtenus par les deux grands types de modèles élaborés à savoir le modèle linéaire et le modèle conceptuel et d'autre part de pouvoir comparer également le modèle linéaire à d'autres types de modèles tirés de la littérature. On peut exprimer également ce critère, non plus par rapport aux pluies mais par rapport aux débits :

$$F_Q = \frac{\sum_{i=1}^N [Q_i - \hat{Q}_i]^2}{\sum_{i=1}^N Q_i^2} * 100$$

où Q_i est le débit observé. Si le pas de temps est mensuel on notera ce critère F_m .

Le modèle est d'autant meilleur que F_Q est proche de zéro, c'est-à-dire que les débits calculés \hat{Q}_i tendent vers les débits observés Q_i .

Cette forme de la fonction critère répond à l'objectif essentiel de l'étude que nous nous sommes fixé à savoir la reconstitution la plus précise possible des apports. Elle est essentiellement sensible aux écarts absolus. Elle sera une indication de la

plus ou moins bonne simulation des apports et sera considérée comme satisfaisante pour des valeurs inférieures ou égales à 50.

Les deux modalités F_p et F_Q ont été utilisées dans ce rapport.

Le seul examen des valeurs prises par la fonction critère à l'issue du calage peut ne pas être suffisant pour juger de la qualité de certains aspects particuliers.

D'un point de vue "hydrologique", et pour l'objectif de l'étude, le premier de ces aspects, complémentaires à la fonction critère, et qui vient à l'esprit est le bilan.

Il permet en effet d'avoir une bonne idée de la totalité de la ressource en eau disponible. Nous avons retenu le critère suivant :

$$F_b = \frac{\sum_{i=1}^N \left[Q_i - \hat{Q}_i \right]}{\sum_{i=1}^N Q_i} * 100$$

Il exprime en pourcentage l'erreur sur l'écoulement moyen interannuel.

Le choix des critères complémentaires à la fonction critère utilisée pour le calage n'est pas définitif. Nous pourrions imaginer de bâtir d'autres critères numériques en fonction des nouveaux aspects que nous voudrions contrôler.

4.3.2.- Initialisation des réservoirs

Un des problèmes de la modélisation conceptuelle est l'initialisation du système, c'est-à-dire des différents réservoirs. En ce qui concerne le modèle GRM1, le problème de l'initialisation est réduit au minimum puisque seule l'initialisation du réservoir-sol est à définir.

Le niveau du réservoir R est en effet directement lié au débit initial de la série.

Si l'on connaît le débit initial Q_0 on peut en déduire le niveau initial du réservoir eau gravitaire, en inversant la relation :

$$Q_0 = \frac{R_0^2}{R_0 + B} \quad \text{on a} \quad R_0 = \frac{Q_0}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 4B/Q_0} \right)$$

Le niveau initial du réservoir-sol doit faire l'objet d'une supputation. On pourra estimer S_0 selon le mois du démarrage de la simulation, conformément au tableau 22 ci-dessous :

mois	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
S_0/A	.10	.20	.25	.30	.40	.50	.50	.40	.30	.20	.10	.05

Tableau 22 : Initialisation du réservoir-sol du modèle GRM1

Ces indications restent très grossières et il s'ensuit qu'une erreur non négligeable peut être commise en faisant ce choix arbitraire. Cependant, au fur et à mesure que le modèle fonctionne, il s'effectue un réajustement progressif du niveau S du réservoir-sol. Ainsi, une mauvaise initialisation du réservoir-sol voit ses effets, s'atténuer au cours du temps.

Pour tenir compte d'une mauvaise initialisation éventuelle, deux solutions peuvent être adoptées :

- a) considérer le niveau initial du réservoir-sol comme un paramètre à caler ;
- b) ne pas tenir compte d'une période plus ou moins longue suivant l'initialisation, dans le critère d'appréciation des résultats fournis par le modèle.

Les deux solutions conviennent tout à fait dans le cas de GRM1. En particulier, pour la première solution a), le quatrième paramètre étant tout à fait d'une autre nature que A , B et C , son introduction dans le jeu des paramètres à caler n'entraîne pas l'apparition d'optimums secondaires. Cependant, cette solution peut localement apporter un surcalage dont il serait dangereux de tenir compte dans la fonction critère. C'est pourquoi nous avons choisi la deuxième solution b) en adoptant une période de mise en route d'une année (il faut traverser une saison de hauts débits et une saison d'étiage, pour espérer une remise à niveau correcte du réservoir-sol).

Cependant, le choix de la seconde solution ne nous empêchera pas, si cela est nécessaire, de revenir à la solution a) et d'optimiser le niveau initial du réservoir-sol afin de contrôler d'éventuelles anomalies.

4.3.3 - Optimisation des paramètres

La minimisation d'une fonction critère est un problème extrêmement fréquent en hydrologie. On le rencontre en particulier dans tous les problèmes d'optimisation des paramètres d'un modèle. On a vu [première partie], qu'en hydrologie les principaux modèles opérationnels sont des modèles globaux dont les paramètres ne peuvent pas être estimés directement par la mesure de quelques grandeurs physiques sur le terrain.

Même pour certains modèles physiques, par exemple un modèle d'écoulement en rivière, les coefficients de frottement sont des paramètres globaux dont le calage est réalisé essentiellement par ajustement des sorties du modèle sur des écoulements réels.

L'optimisation des différents paramètres consiste donc à trouver le jeu de paramètres du modèle rendant minimum la fonction critère, choisie en fonction des débits auxquels on s'intéresse. Pour cela différentes techniques d'optimisation sont disponibles. Nous nous limiterons à celles que nous avons utilisées et à rappeler les étapes suivies.

4.3.3.1 - Essai d'optimisation par la méthode de ROSENBROCK

La méthode utilisée initialement est une méthode de gradient, classique en la matière : la méthode de ROSENBROCK. Elle a été mise au point en 1960 et appliquée à des problèmes de génie chimique [A. GUILBOT, 1971]

C'est une méthode de recherche séquentielle qui permet à la fois:

- de déterminer la longueur du pas de recherche ;
- de déterminer la direction de ce pas ;
- de tenir compte des contraintes possibles imposées aux paramètres.

Cette méthode permet d'atteindre l'optimum selon le degré de précision du résultat que l'on s'attache à obtenir [MAILHOL, 1980].

Cependant, compte-tenu de quelques déboires rencontrés dans son utilisation, nous avons préféré abandonner cette technique et recourir à une méthode plus rudimentaire de recherche systématique pas à pas [CEMAGREF, 1989].

4.3.3.2 - Méthode utilisée :

La méthode utilisée ne donne pas le minimum précis d'une fonction mais en donne une solution généralement suffisante. Elle tire sa rusticité d'une transformation préalable de l'espace des paramètres, en général par la fonction logarithmique et limité dans ce cas à l'intervalle $[-10,10]$. Son principe est de rechercher le minimum en suivant la courbe de plus grande pente. La recherche commence à partir d'un point initial et se déplace sur chaque axe d'une même quantité Δx pouvant évoluer au fur et à mesure de l'avancement. On part d'un $\Delta x = 0.32$ ce qui correspond à une correction d'environ 38%. Chaque paramètre est modifié de plus ou moins Δx et l'on enregistre à chaque fois le résultat de la modification sur la valeur du critère. Lorsque les n paramètres auront été modifiés on retiendra comme point de paramètres celui qui correspond à la plus faible valeur du critère. S'il n'y a pas eu amélioration par rapport au point initial on recommence après avoir divisé Δx par 2. S'il y a amélioration successivement depuis $2n$ itérations (n étant le nombre de paramètres), on multiplie Δx par 2.

Le critère d'arrêt ne porte pas sur la fonction mais sur Δx : on arrête la recherche lorsque Δx est inférieur à 0.01.

Le sous-programme FOND présenté parmi les différents sous-programmes en annexe 6 permet une description plus précise de la procédure de recherche de l'optimum.

4.4 - CONTROLE DE LA VERSION INITIALE DE GRM1

4.4.1 - Mode opératoire et rappel des options choisies :

Après avoir choisi et adapté une version de base pour GRM1, il est nécessaire de l'appliquer à de nombreux bassins versants pour tester sa pertinence.

Mais avant de nous lancer dans une opération systématique de calage, de validation, de reconstitution et d'exploitation des résultats à différents niveaux, il nous a semblé important d'avoir un premier aperçu des performances que l'on pouvait obtenir de ce modèle, afin de mieux orienter les travaux ultérieurs.

Nous avons donc considéré un nombre réduit de bassins versants dont la sélection n'a pas été effectuée au hasard mais de façon à avoir un groupe de bassins versants qui soit autant que possible représentatif des conditions hydro-climatologiques et physiques de l'ensemble de la zone d'étude. Pour cela deux principaux critères nous ont guidés pour effectuer ce choix :

- l'importance de l'information : la qualité des données utilisées pour tester les modèles peut modifier la qualité des résultats. Etant conscients de ces difficultés et afin de mieux mesurer les performances du modèle, il nous a semblé utile, pour cette phase, d'avoir des données hydro-pluviométriques qui soient à la fois les plus fiables possibles et qui présentent des durées d'observations les plus longues.

Ce tri a été réalisé en fonction de nos propres connaissances des bassins versants et en fonction des résultats du traitement des données effectuées dans la deuxième partie de cette étude ;

- la représentativité géographique : Pour cela, nous avons utilisé les résultats de la modélisation linéaire et plus précisément le graphique d'essai de régionalisation des paramètres du modèle linéaire (Fig. 16).

A l'issue de cette analyse, et pour cette phase de calage, nous avons donc sélectionné six bassins parmi les 68. La répartition géographique de ces bassins apparaît sur la figure 17. Il s'agit des bassins versants suivants :

- BENSEKRANE dans le bassin de la TAFNA (bassin N°5)
- TAKHEMARET dans le bassin du haut CHELIFF (bassin N°24)
- SIDI AKACHA dans le bassin des CÔTIERS ALGEROIS (bassin N°26)
- EL AFFROUN dans le bassin des CÔTIERS ALGEROIS (bassin N°29)
- AIN EL ASSEL dans le bassin des CÔTIERS CONSTANTINOIS (bassin N°58)
- CED FAGUES dans le bassin du HODNA (bassin N°69)

et dont les caractéristiques ont été regroupées dans le tableau 23 suivant :
(la numérotation des bassins est propre à ce document de thèse)

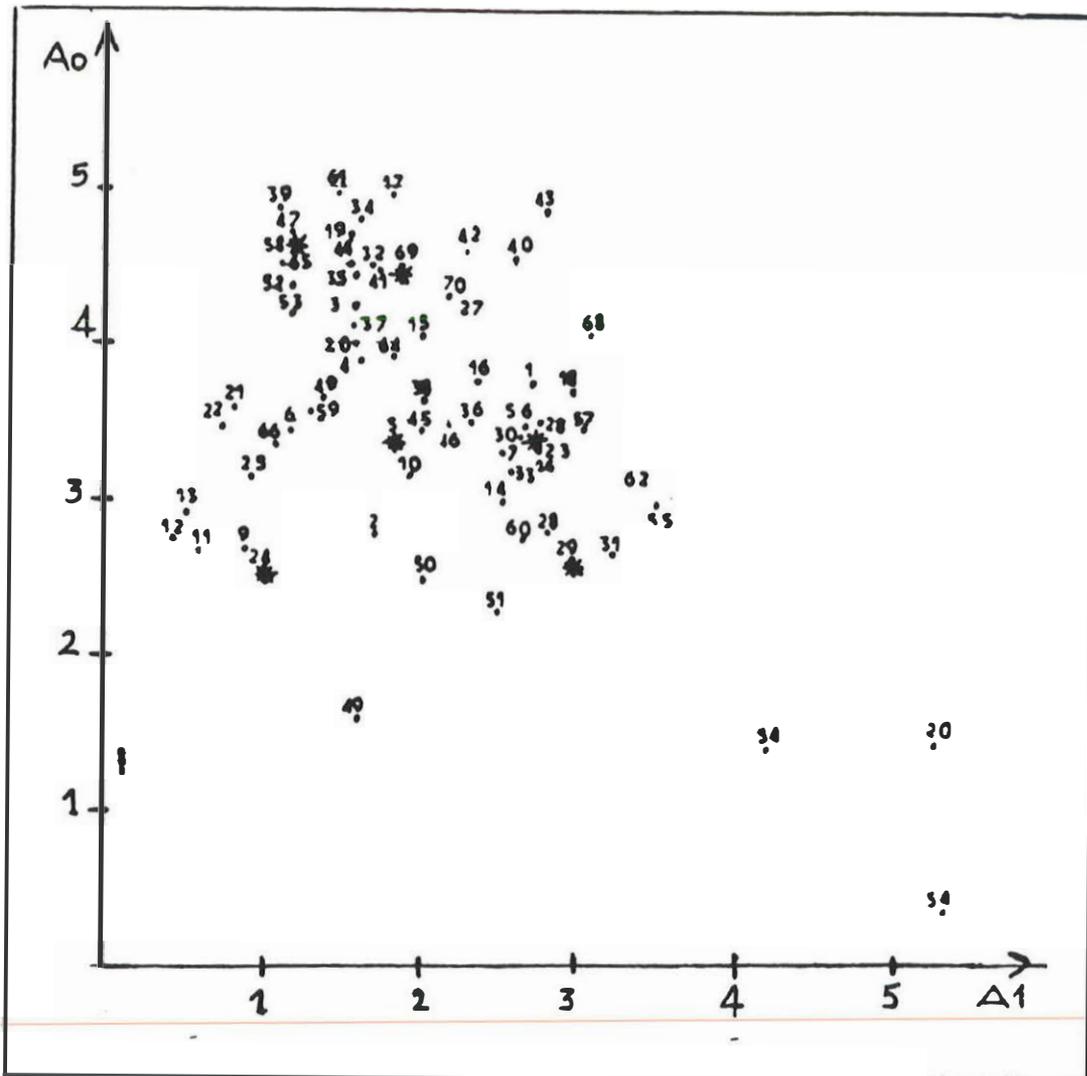


Figure 16 - Essai de régionalisation des paramètres du modèle linéaire



N° et Nom de la station hydrométrique	Surface du B.V(km ²)	Lame précipitée interannuelle(mm)	Lame écoulée interannuelle (mm)
5 BENSEKRANE	1230	577	50.1
24 TAKHEMARET	1550	281	6.3
26 SIDI AKACHA	295	631	108.6
29 EL AFFROUN	395	778	105.3
58 AIN EL ASSEL	680	893	308.3
69 CED FAGUES	334	251	23.7

Tableau 23 Caractéristiques des bassins versants de l'échantillon réduit

Pour les premiers essais de GRM1 sur les six bassins représentatifs une même méthodologie a été employée aussi bien au niveau des données qu'au niveau du calage :

4.4.1.1 - Les fichiers des données hydrométriques :

Dans un premier temps, la phase d'examen et de critique de ces données nous a conduit à créer des fichiers opérationnels par station ; c'est ce dont nous avons traité dans la deuxième partie de cette recherche.

Chaque bassin est désigné par un code hydrologique. Tous les débits mensuels d'une même année sont sur une même ligne. Chaque ligne contient donc le numéro de la station, l'année considérée et les valeurs des 12 mois.

L'organisation du fichier est illustré par la figure 24.

----- DEBUT -----												
2020771	214	302	1354	1920	7018	8263	4371	1254	2171	345	81	38
2020772	309	368	85	553	4500	6370	2670	615	112	179	12	6
2020773	149	989	33	2350	515	3470	9180	6330	776	177	37	11
2020774	20	1130	217	88	137	154	1750	595	179	10	1	0
2020775	3	6	1870	1820	461	13600	577	710	1210	112	40	19
2020776	46	730	858	951	1600	254	103	83	422	20	7	13
2020777	0	1	869	256	914	172	424	973	107	1	0	0
2020778	0	2670	421	884	216	9950	8150	970	154	54	11	11
2020779	362	243	237	1950	5730	589	3770	166	162	23	9	8
2020780	3	10	51	8280	2000	3170	636	837	553	79	27	4
2020781	13	17	26	131	220	1930	105	149	170	4	3	5
2020783	0	0	388	205	389	646	252	38	208	18	2	0
2020784	0	223	53	427	755	118	1710	242	235	5	0	0
----- FIN -----												

Figure 24 : Extrait du fichier débit

Un tel format de fichier, très simplifié, présente l'avantage d'être lisible par la quasi totalité des logiciels. Ces fichiers sont en particulier importables dans n'importe quel tableur, ce qui facilite la production de graphiques. On peut également les lire sans difficulté à l'aide d'un éditeur de texte classique ou dans le cadre d'un programme FORTRAN.

4.4.1.2 - Les fichiers des données pluviométriques :

La création des fichiers des pluies moyennes sur un bassin s'obtient à partir d'un ou plusieurs fichiers de pluies complétés au préalable. Le programme PMM.FOR permet d'effectuer cette opération . Le lancement de ce programme nécessite d'indiquer seulement et successivement le nom du fichier créé par le logiciel, le nombre et le code des postes pluviométriques à considérer. Comme pour les fichiers débits, une année est également représentée par une ligne. On trouvera en annexe 15, la description informatique de ce programme.

4.4.1.3 - Les fichiers des données d'évaporation

Chaque station est constituée d'une seule ligne qui comprend la valeur mensuelle interannuelle des 12 mois.

4.4.2 - Options choisies pour le contrôle du modèle.

Après le choix des cas d'application, les premiers essais de GRM1 s'effectueront avec les éléments que nous avons proposés précédemment (4.2, 4.3).

En particulier, nous utiliserons la modification apportée au niveau de la modélisation de la fonction de production et qui correspond à une réduction conjointe pluie-évaporation. Par contre, l'expression des fonctions de rendement de pluie et d'évaporation, et la fonction de transfert c'est-à-dire la loi de vidange ont gardé les formes originales proposées par le concepteur de GR3j. L'optimisation se fera sur la base de la fonction critère quadratique choisie.

Ce premier travail de contrôle du modèle de base a pour objectif d'une part d'apprécier globalement les performances du modèle proposé sur des bassins de type méditerranéen et d'autre part de redéfinir certaines orientations pour la suite de la modélisation. En effet, il est préférable de déceler d'éventuels défauts de fonctionnement sur un petit échantillon de bassins versants avant de passer à un contrôle sur l'ensemble des données disponibles.

Une fois cette étape passée et si les résultats de la simulation sont jugés assez satisfaisants sur cet échantillon de bassins, nous étendrons le calage, avec la nouvelle version, à l'ensemble des bassins.

Bien que l'échantillon de départ soit représentatif, il sera probablement nécessaire d'apporter d'autres modifications qui apparaîtront souhaitables lors de l'application systématique du modèle à l'ensemble des bassins de la région d'étude.

Dans ce qui suit, nous allons d'abord essayer d'effectuer cette première simulation.

4.4.3 - Tests du modèle sur un échantillon réduit :

4.4.3.1 - Présentation des sorties du programme de calage.

Pour chaque bassin, le programme effectue alors la simulation et écrit une page de résultats sur l'écran, dont un exemple est donné en figure 18

```

Résultats pour id:\mess\Q26CS = 295( km2), Pam = 631(mm), Qam = 108.6(mm)
paramètres de GR3M : X1= 5.71 X2= 1.56 X3= 1.55
variables--- module --- Qannuel --- Qmensuel
erreurs: .8 % 2.8 %Pa 16.4 %Qa 32.0 %
  
```

Figure 18 : Résultats de la simulation de GRM1 affiché sur l'écran

La première ligne correspond à l'identification du bassin où :

Q26 C : nom du bassin versant traité

S : Surface du bassin versant en (km²)

Pam : Pluie annuelle moyenne sur le bassin (mm)

Qam : Apport annuel moyen (mm)

La deuxième ligne correspond à la restitution des paramètres du modèle où :

X1 : premier paramètre du modèle, et correspond à la capacité maximale de S

X2 : deuxième paramètre du modèle, et matérialise la capacité du réservoir eau-gravitaire R

X3 : dans cette version du modèle, c'est le troisième paramètre, relatif à la fonction de rendement et plus précisément la fraction de l'évaporation disponible pour une confrontation immédiate avec la pluie.

En fait l'optimisation porte sur des transformées des 3 paramètres ainsi :

$$X1 = \text{Ln } A$$

$$X2 = \text{Ln } B$$

$$X3 : \text{Ln } \frac{C}{1 - C}$$

La quatrième ligne est relative aux critères d'appréciation de la simulation : à de gauche figure l'erreur sur le bilan, il s'agit d'une valeur globale pour l'ensemble de la période considérée. Dans le cas présent, l'erreur entre l'écoulement total calculé et l'écoulement total observé est égal à 0.8% de cet écoulement total. Puis, on trouve l'erreur quadratique, qui désigne l'écart type de l'erreur des débits annuels converti en pourcentage de la pluie ou des débits. Et le tableau affiche enfin l'erreur quadratique mensuelle.

Des compléments disponibles en deux parties sont successivement présentées dans les paragraphes A & B :

A) première partie : simulation du modèle sur toutes les données disponibles sur la pluie : un extrait de cette partie apparaît sur la figure 19.

72	148	588	208	987	1708	1149	848	130	0	800	0	7	3958
72	1800	1000	930	540	540	680	830	1080	1710	1720	2300	2220	15350
72	87	33	7	50	395	528	848	54	10	16	1	1	1358
72	2	2	2	23	373	603	856	19	7	6	2	1	1098
73	543	604	123	1853	158	1308	1767	1488	22	84	0	0	7996
73	1800	1000	930	540	540	680	830	1080	1710	1720	2300	2220	15350
73	13	90	3	213	43	283	823	554	70	16	3	1	2128
73	1	3	2	223	29	319	684	518	21	7	4	2	1848
74	104	1293	239	12	834	373	1531	686	491	56	0	4	3067
74	1800	1000	930	540	540	680	830	1080	1710	1720	2300	2220	15350
74	2	103	19	8	12	13	159	32	16	1	0	0	285
74	2	31	13	3	3	6	172	90	23	8	4	8	361
75	61	81	2104	780	618	2220	270	646	999	340	2	110	8023
75	1800	1000	930	540	540	680	830	1080	1710	1720	2300	2220	15350
75	0	1	164	185	41	1115	38	68	110	10	4	8	1724
75	2	1	198	201	164	992	64	108	93	13	6	3	1849
76	311	1147	834	733	925	91	317	298	1108	76	46	21	3961
76	1800	1000	930	540	540	680	830	1080	1710	1720	2300	2220	15350
76	4	66	73	86	141	21	9	7	38	8	1	1	451
76	2	21	58	109	214	18	19	11	39	10	5	3	509

Figure 19 : Simulation issue de GRM1 sur les données existantes

Cette partie est complémentaire des résultats précédents. Elle permet non pas de porter un jugement global du modèle sur le bassin concerné, mais plutôt d'examiner le comportement du modèle mois par mois et année par année.

L'année correspond à l'année hydrologique qui court du premier septembre au 31 août. La dernière colonne est l'écoulement annuel.

B) Deuxième partie : statistiques mensuelles sur les débits et les erreurs du modèle.

En général, si les débits observés ne s'annulent pas, ces statistiques portent sur les logarithmes des variables. Sinon, elles concernent les valeurs non transformées comme cela apparaît sur la figure 20 ; on donne successivement :

- les écarts types des débits observés ;
- les écarts types des débits calculés ;
- les moyennes des erreurs ;
- les écarts types des erreurs du modèle ;
- les autocorrélations des erreurs du modèle.

écart-type des débits naturels (0.01 mm)											
109	657	491	1901	1965	3503	2650	1393	521	84	20	9
écart-type des débits calculés (0.01mm)											
4	304	716	1452	2457	2861	2224	1474	225	32	11	5
moyenne des erreurs (0.01 mm)											
60	318	90	186	-469	240	-126	-343	184	-5	-20	-13
écarts types des erreurs (0.01 mm)											
107	381	242	608	1212	1118	883	589	398	81	17	8
autocorrélations des erreurs (* 100)											
83	3	-35	8	31	-77	-53	0	-9	79	93	63

Figure 20 : Les erreurs du modèle GRM1 mois par mois

Cette partie permet de juger les performances du modèle selon les mois considérés, et en particulier de juger de sa qualité à l'étiage.

4.4.3.2 - Les paramètres identifiés :

Pour chaque bassin, il y a trois paramètres à optimiser. Les paramètres identifiés et les critères d'adéquations du modèle sont reproduits sur le tableau 25.

N°des BV	CRITERES			PARAMETRES		
	Fm	Fb%	R	LnA	LnB	LnC
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
5	42.0	14.9	0.855	7.10	3.40	15.63
24	53.4	0.9	0.423	4.92	7.63	0.91
26	32.0	0.8	0.935	5.71	1.56	1.55
29	29.4	2.3	0.946	6.11	1.61	0.76
58	39.0	-2.9	0.897	6.05	2.54	12.28
69	60.6	11.2	0.733	4.60	3.98	15.12

Tableau 25 : Calage de référence (GRMI) de l'échantillon réduit

Ce tableau comporte 7 colonnes qui correspondent dans l'ordre aux grandeurs suivantes :

- (1) : numéro d'identification du bassin versant modélisé ;
- (2) : Fm est l'erreur quadratique mensuelle moyenne ;
elle constitue le critère le plus important pour juger de la plus ou moins bonne qualité du calage.
- (3) : Fb% exprime en pourcentage l'erreur sur le bilan de l'ensemble de la simulation ;
- (4) : coefficients de corrélation valeurs observées-
valeurs simulées ;
- (5) : A, premier paramètre du modèle ;
- (6) : B, deuxième paramètre du modèle ;

(7) : C, dans la version actuelle, correspond à la valeur optimale de la fraction d'évaporation disponible pour une éventuelle neutralisation pluie-évaporation, troisième paramètre du modèle.

L'analyse de ces différents résultats appelle quelques commentaires :

- tout d'abord la fonction critère F_m : On considère qu'une simulation est satisfaisante lorsque F_m devient inférieur à 50. On constate que deux bassins versants, (les n°24 et 69) présentent des critères supérieurs à ce seuil. Les 2/3 des bassins sont modélisés de façon satisfaisante ;

- l'erreur sur le bilan annuel n'est pas importante si l'on considère comme correctes les valeurs inférieures à 20%. Le bilan est variable entre -3 et 15%. Si on excepte le bassin n°58, l'erreur sur le bilan est positive sur 5 bassins versants. Autrement dit, il y a une tendance assez générale à sous-estimer les apports ;

- le coefficient de corrélation (colonne (4) du tableau 25) est supérieur à 0.85 pour 67% des bassins. Pour ces derniers, le modèle répond bien en phase avec la réalité observée. Par contre, pour deux bassins versants, les n°24 et 69, le résultat est moins satisfaisant ; en particulier le bassin n°24 où le coefficient de corrélation est inférieur à 0.5. Cela a été aussi mis en évidence par le critère mensuel.

Pour l'analyse des paramètres du modèle, examinons les colonnes (5), (6) et (7) du tableau 25:

- le paramètre A : les capacités du réservoir-sol sont assez faibles, avec une moyenne de 437 mm ; 5 valeurs sur 6 sont comprises entre 100 et 450 mm. Une valeur forte : 1200 mm pour le bassin n°5. Les valeurs prises par A semblent donc être réalistes ;

- le paramètre B : les capacités du réservoir eau-gravitaire sont très variables autour d'une moyenne de 361 mm. Mais 5 valeurs sur 6 sont comprises entre 5 et 54 mm. Si on excepte un bassin, le n°24, présentant une valeur de B forte (2000 mm), la moyenne devient égale à 63 mm. Ces faibles valeurs de B traduisent le faible stockage d'" eau gravitaire" ;

- pour ce qui est du paramètre C, là encore, les valeurs obtenues varient dans une large gamme. On a constaté sur la moitié des bassins versants modélisés, que la valeur de C est nulle. Il semble donc que la neutralisation pluie-évaporation n'est pas une mesure suffisante et devrait être complétée dans le cas où C est égal à zéro, (bassins n°5, 58 et 69) pour éviter une réduction à 2 paramètres effectifs.

4.4.3.3 - Qualité de l'ajustement :

Cette analyse globale peut être complétée par un examen plus détaillé des chroniques mensuelles et des statistiques inter-annuelles, où les débits simulés des 6 bassins versants modélisés sont comparés aux débits mesurés sur les figures 21 à 27. Ces figures appellent quelques remarques :

- le modèle rend relativement bien compte des modules. La figure 21 montre que l'allure moyenne est bonne ;

- au niveau mensuel, les figures 22 à 27 laissent apparaître que le modèle a tendance à sous-estimer les apports pour la période des hautes eaux, par contre la période estivale est généralement sur-estimée ;

- sur les six bassins versants modélisés, deux sont moins bien simulés, au moins pendant une partie du temps. Il s'agit des bassins n°24 et 69, et plus particulièrement le bassin n°24 qui présente des débits calculés assez réguliers pendant toute l'année.

On a également analysé la qualité du calage au moyen des figures 28 et 35 qui suivent. Les variables analysées sont :

- les écarts-types des débits mensuels observés et calculés (figures 28 à 33). A l'exception du bassin n°24, l'écart-type, donc la variabilité des débits, est très bien reproduit, ce qui est très important si le modèle est utilisé en extension de données pour analyser la variabilité d'un remplissage de réservoir ou d'une production de micro-centrale par exemple ;

- le débit moyen hivernal (de janvier à mars). Il est bien simulé pour tous les bassins modélisés (figure 34) ;

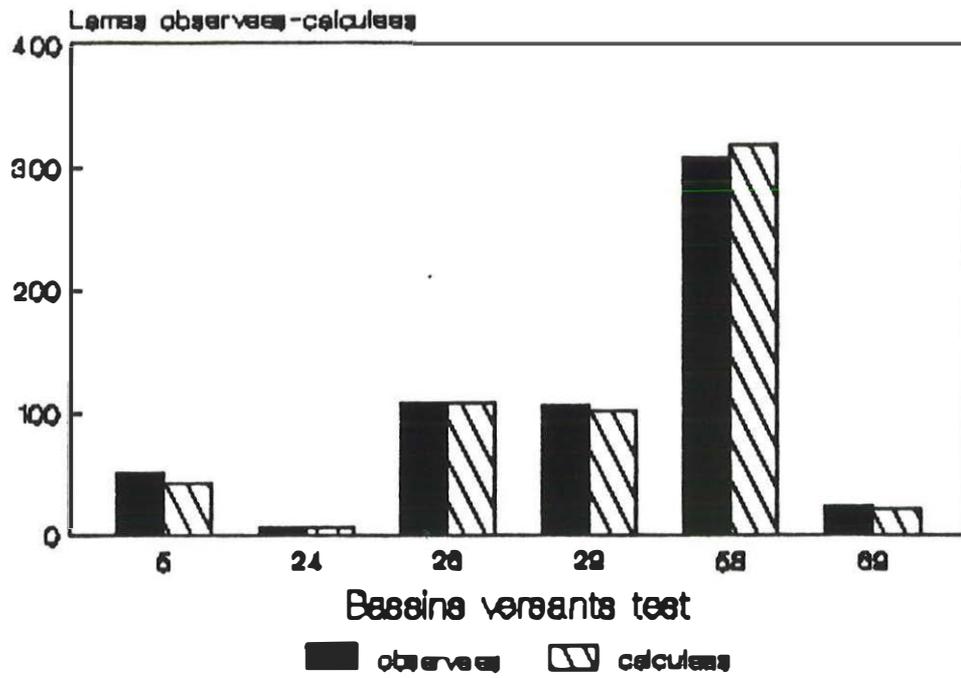


Figure 21 - **Module observe-calculé sur les 6 bv**

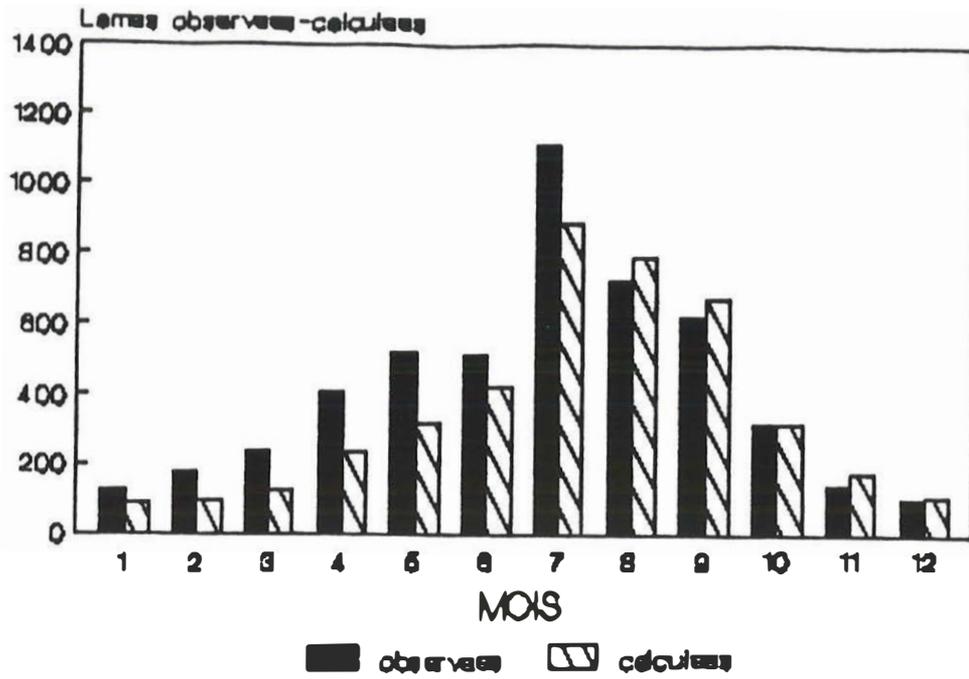


Figure 22 - Lames mensuelles moyennes obs-cal
bv (5)

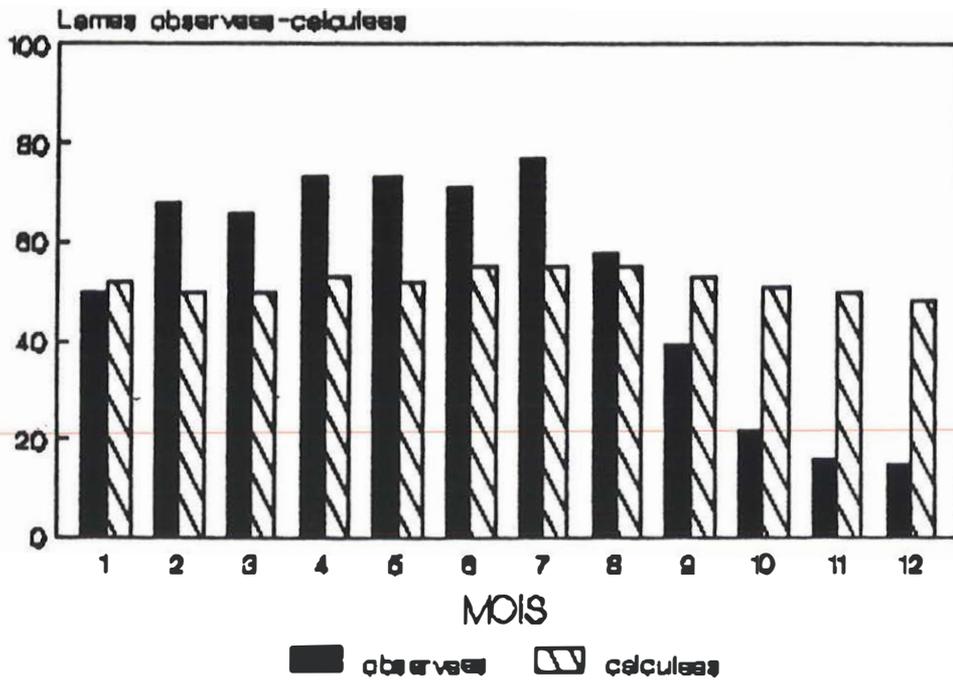


Figure 23 - Lames mensuelles moyennes obs-cal
bv (24)

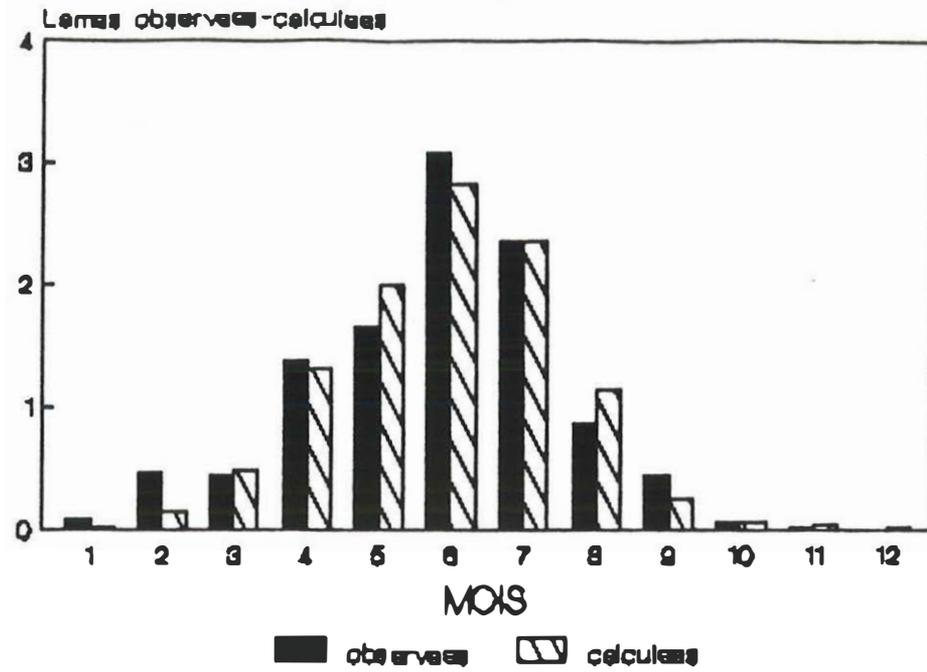


Figure 24 - Lames mensuelles moyennes obs-cal
bv (26)

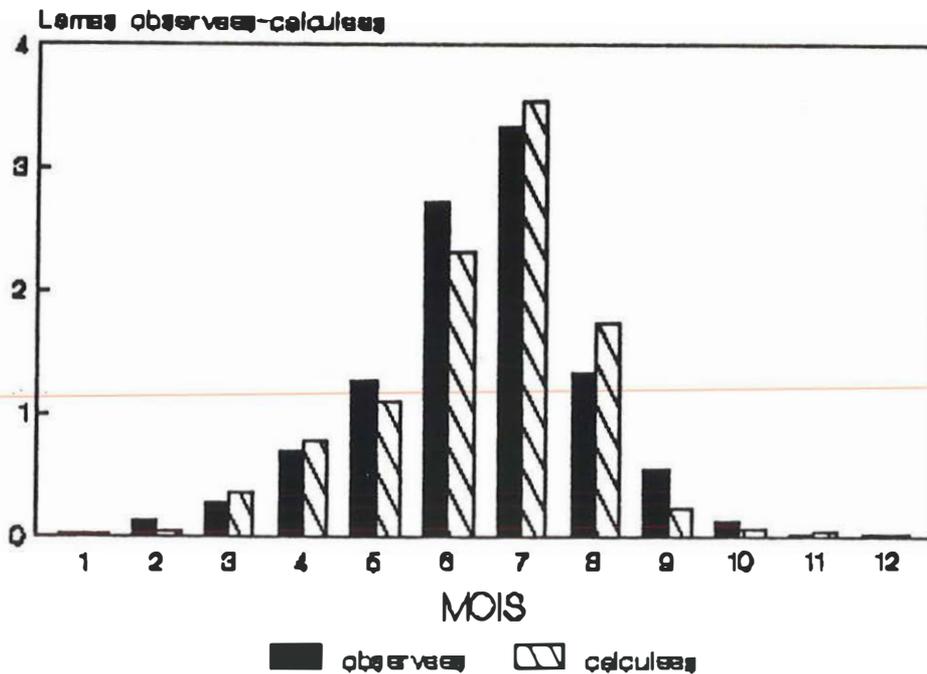


Figure 25 - Lames mensuelles moyennes obs-cal
bv (29)

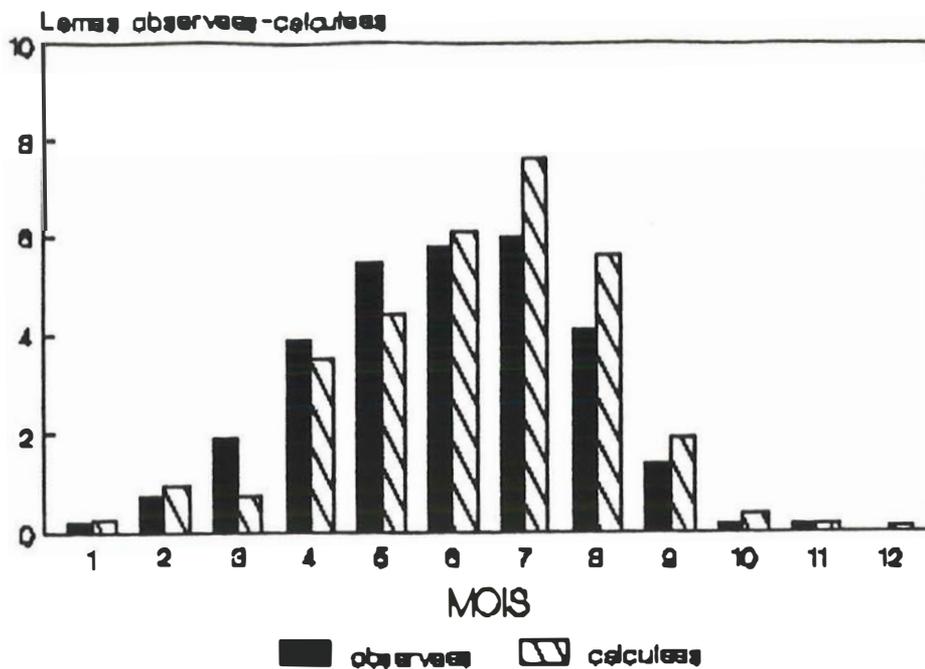


Figure 26 - Lames mensuelles moyennes obs-cal
bv (58)

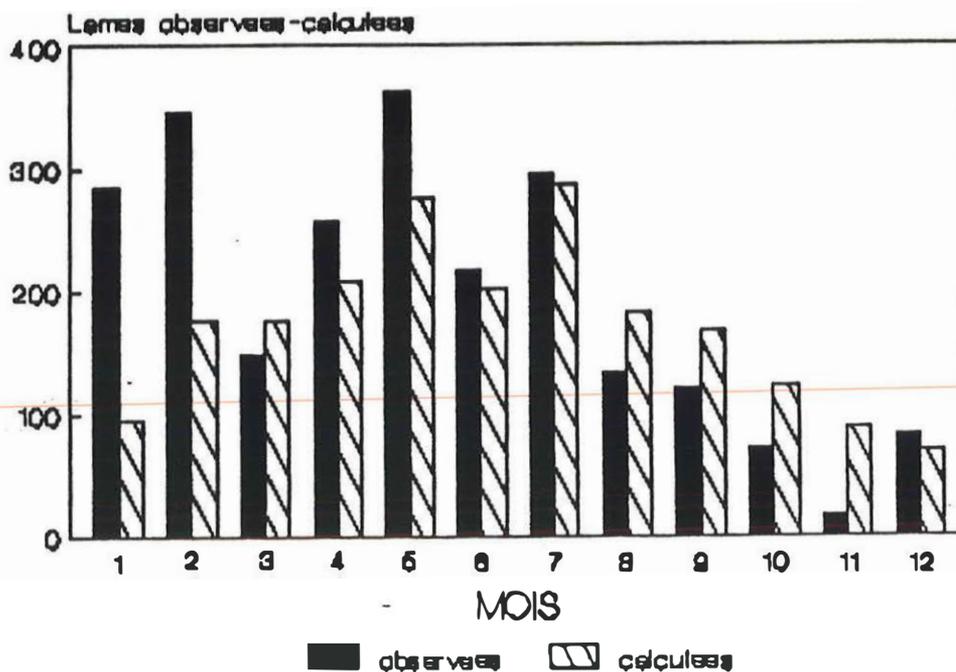


Figure 27 - Lames mensuelles moyennes obs-cal
bv (69)

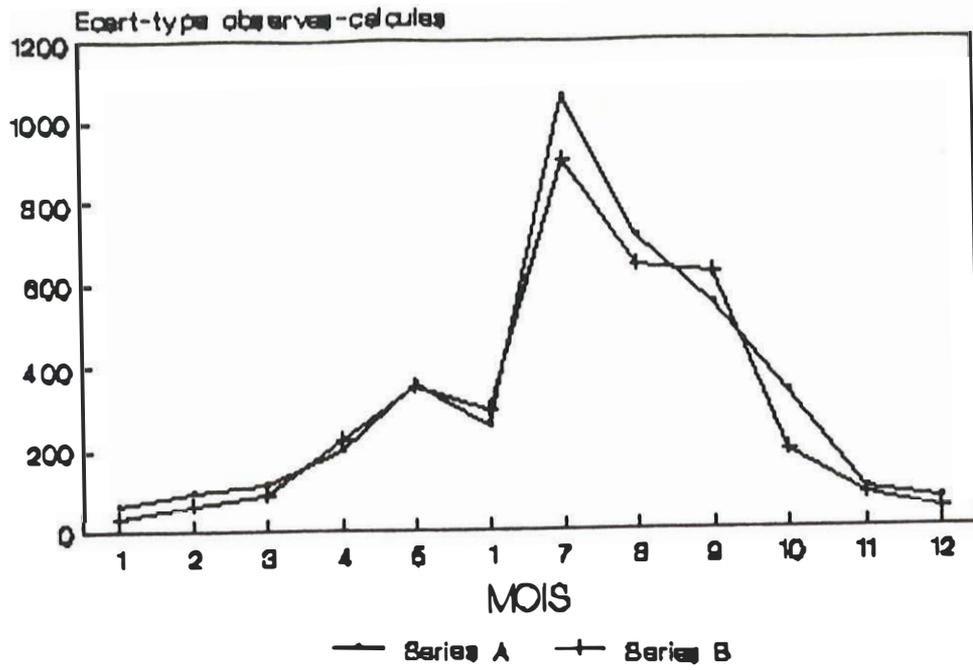


Figure 28 - Ecart-type des débits observés-calculés
bv (5)

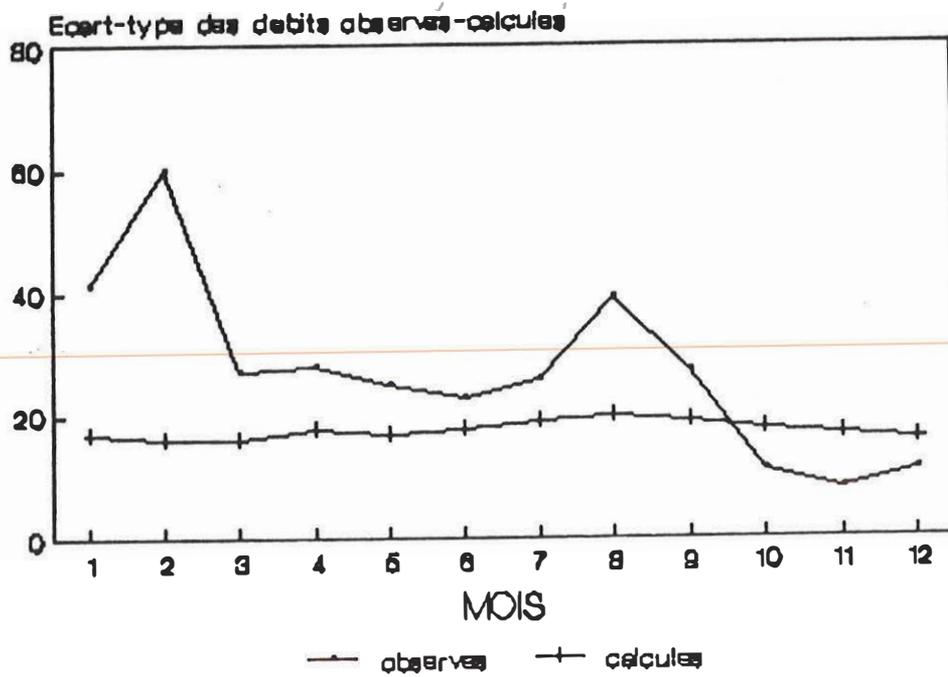


Figure 29 - Ecart-type des débits observés-calculés
bv (24)

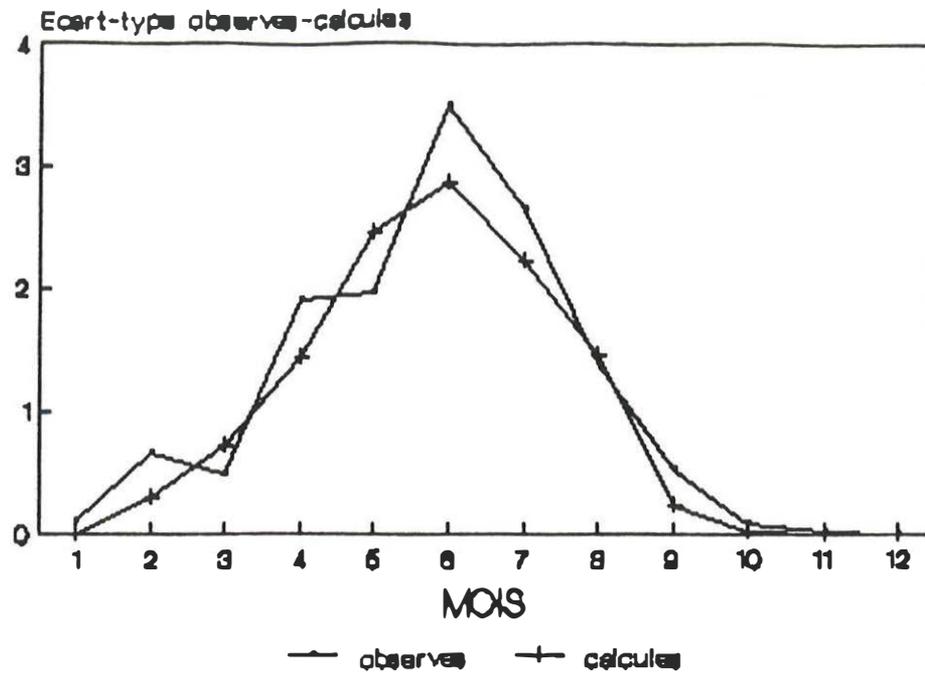


Figure 30 - **Ecart-type des débits observés-calculés
bv (26)**

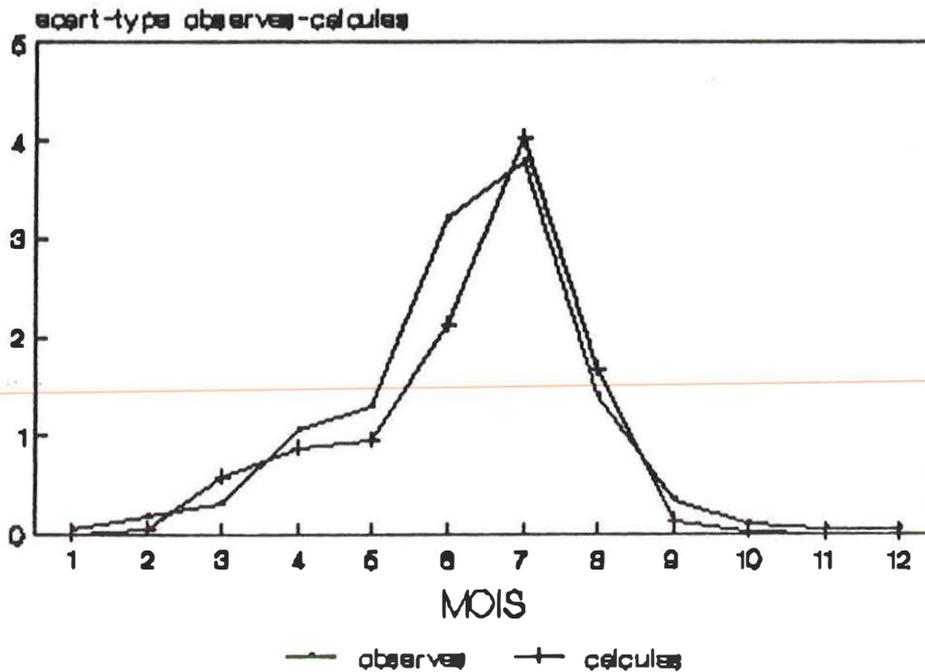


Figure 31 - **Ecart-type des débits observés-calculés
bv (29)**

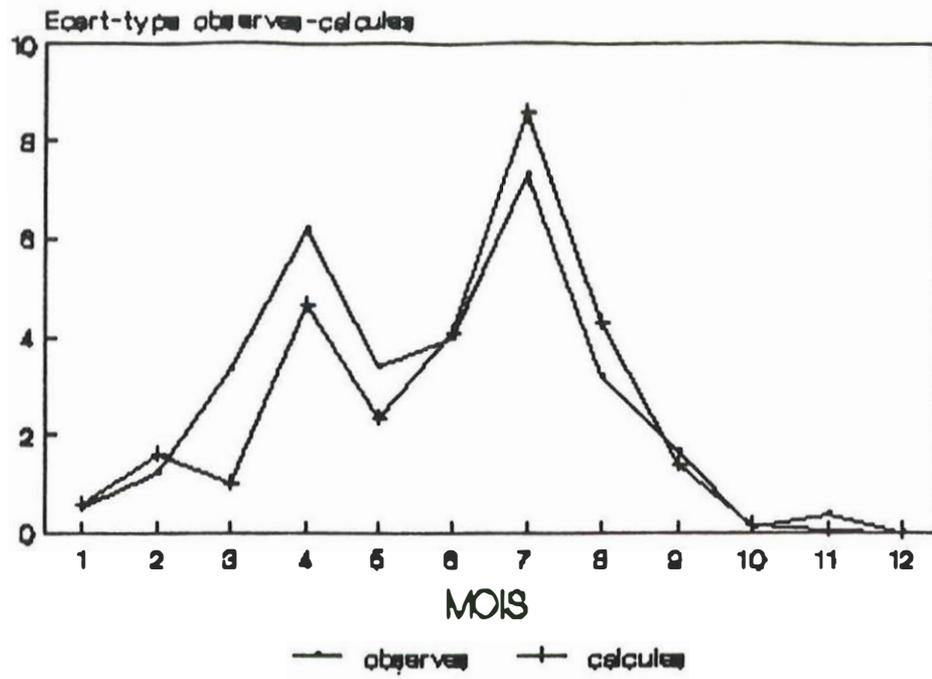


Figure 32 - **Ecart-type des débits obs-cal
bv (58)**

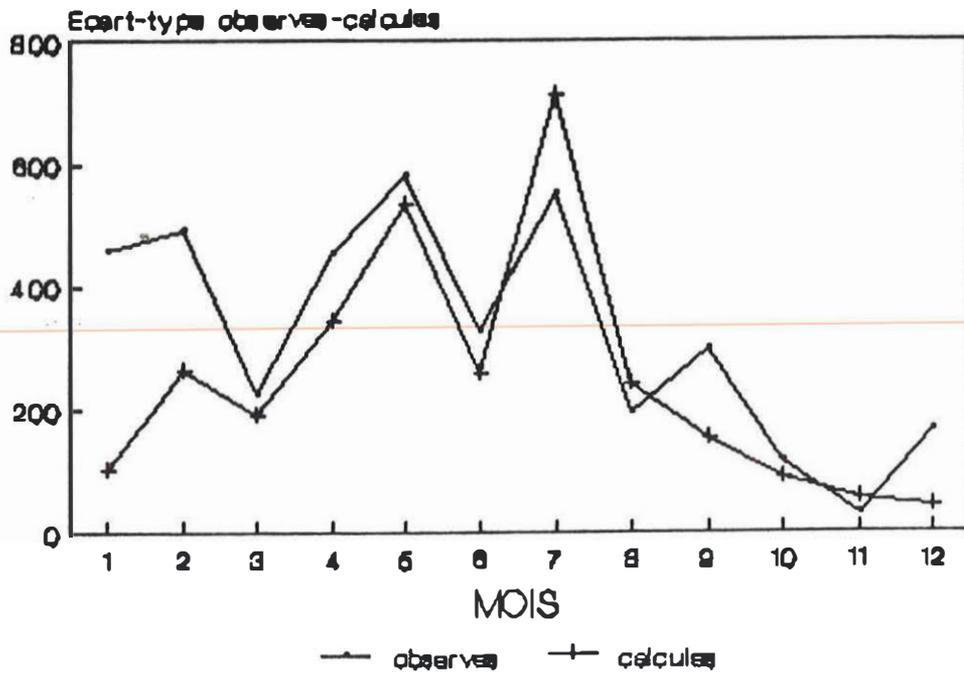


Figure 33 - **Ecart-type des débits obs-cal
bv (69)**

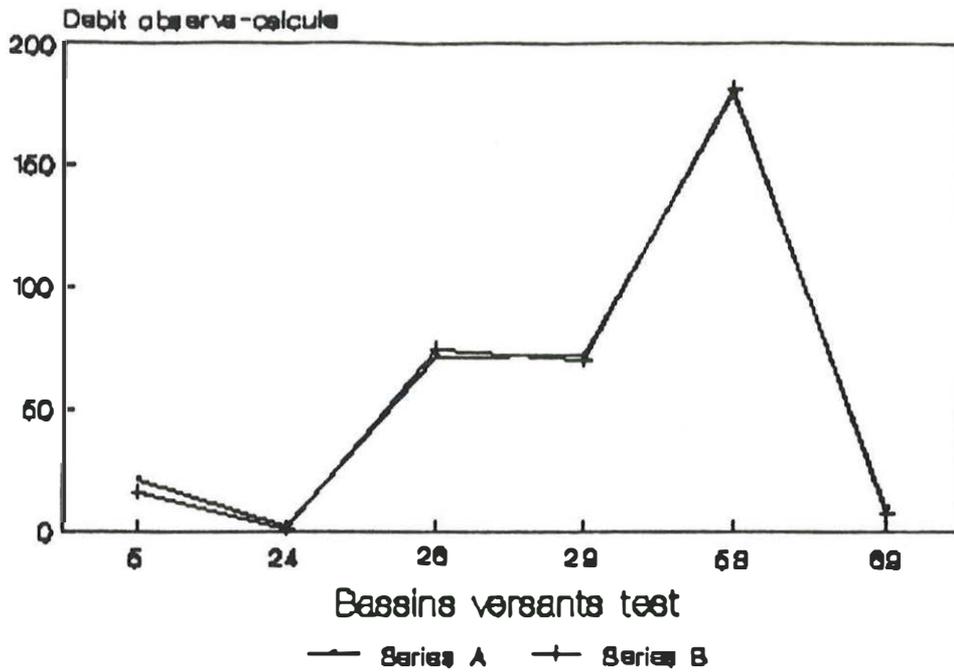


Figure 34 - **Debit hivernal observe-calcule sur les 6 bv**

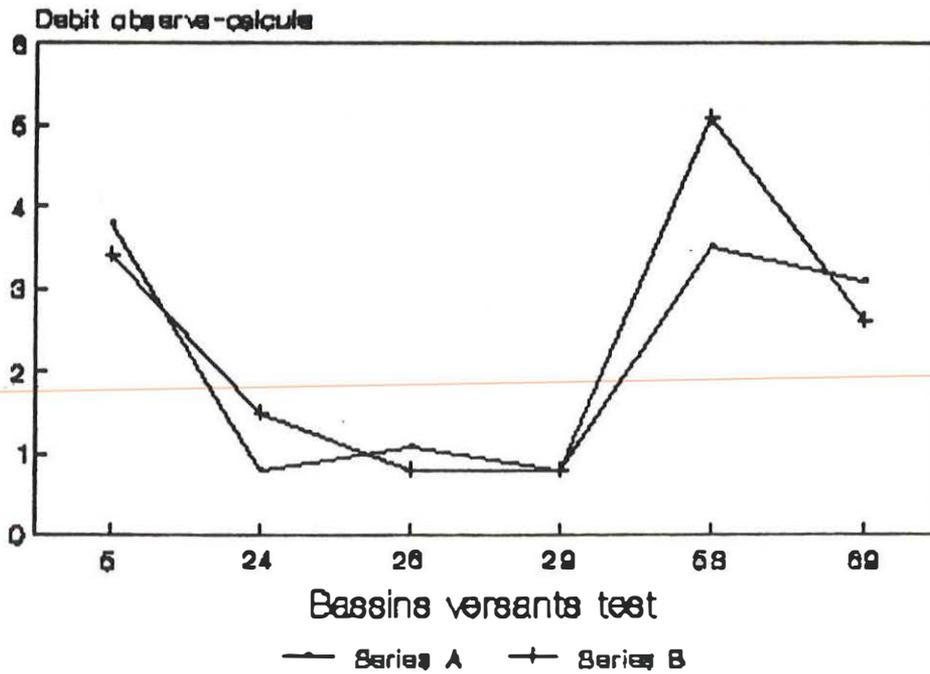


Figure 35 - **Debit estival observe-calcule sur les 6 bv**

- le débit moyen estival (de juin à septembre). La figure 35 montre qu'il est un peu moins bien reconstitué que le débit hivernal.

4.4.3.4 - Conclusion sur la variante de base de GRM1 :

En conclusion, il apparaît que le modèle rend relativement bien compte des apports mensuels. Seul un bassin sur 6 n'est pas bien simulé, encore que cela puisse provenir des données.

Une certaine tendance existe à diminuer les apports hivernaux et à sur-estimer les apports estivaux. Pourtant le modèle présente les spécifications qui devraient lui permettre de pallier ce défaut puisque la neutralisation permet de supprimer toute introduction de pluie lorsque cette dernière est faible, et que, en choisissant un paramètre B faible, on diminue les reports d'un mois sur l'autre ; on ne pourra lever ces interrogations qu'en analysant les résultats liés à d'autres spécifications, introduites de façon systématique.

4.4.4 - Comparaison du modèle linéaire et du modèle conceptuel GRM1 :

Après avoir construit et testé le modèle conceptuel de base sur un échantillon réduit de bassins versants, nous nous proposons ci-après de comparer les résultats obtenus par les deux approches de modélisation pluie-débit utilisées : à savoir le modèle linéaire élaboré dans la troisième partie de ce mémoire et le modèle conceptuel GRM1.

Cette comparaison a pour dessein de désigner le type de modélisation à adopter dans la reconstitution des débits et à orienter les travaux ultérieurs. La comparaison des performances des deux modèles est faite à l'aide du résultat numérique donné par la fonction critère F_p exprimant l'erreur quadratique moyenne du modèle, pour la prédiction des apports annuels, erreur standard exprimée en pourcentage de la pluie.

Rappelons que le modèle linéaire est au pas de temps annuel. Son objectif est l'estimation d'un débit annuel à partir de la pluie annuelle et de sa répartition entre les mois.

Après plusieurs essais, on a abouti au modèle très simple à deux paramètres qui suit :

$$\ln Q_a = A_0 + A_1 (\ln P + 0.25 \ln P_{mx}) + e$$

dans lequel on a :

Q_a : écoulement annuel (mm),

P : pluie annuelle (mm),

P_{mx} : pluie mensuelle maximale de l'année (mm),

\ln : logarithme népérien,

e : erreur du modèle d'écart-type .

Les résultats des deux modèles sur l'échantillon réduit de bassins versants sont reportés sur le tableau 26 ci-après :

N° d'identification des BV	Fonction critère en %(Fp)		Différence (2) - (3)
	modèle linéaire	modèle conceptuel	
(1)	(2)	(3)	(4)
5	3.54	3.1	0.44
24	0.61	0.5	0.11
26	5.99	2.8	3.19
29	3.83	2.5	1.33
58	14.1	4.8	9.3
69	6.85	4.4	2.45

Tableau 26 : Comparaison du modèle linéaire et du modèle conceptuel GRM1

La comparaison des colonnes (2) et (3) du tableau 26 montre que le modèle conceptuel est plus performant que le modèle linéaire sur la totalité des bassins testés. Ce résultat est tout à fait net puisque le critère erreur quadratique annuelle moyenne est passé de 5.8 à 3.0 soit une diminution de près de la moitié.

Ce résultat est très important puisqu'il permet d'orienter la recherche en direction de la modélisation conceptuelle. Notre effort portera donc sur l'amélioration et la généralisation d'un modèle conceptuel du type de la version de base qui vient d'être examinée.

4.5 - ESSAI D'AMELIORATION DE LA VERSION DE BASE GRM1 :

4.5.1 - Tests de différentes options de neutralisation pluie-évaporation :

La version de base laisse apparaître que la neutralisation pluie-évaporation proposée n'est pas efficace pour l'ensemble des bassins étudiés. Pour approfondir la question, nous nous proposons d'étudier trois versions différentes de neutralisation pluie-évaporation potentielle.

4.5.1.1 - Neutralisation complète :

Il peut sembler rationnel de tester d'abord la démarche utilisée dans le modèle de référence GR3j et qui consiste en une neutralisation totale pluie-évaporation (c'est-à-dire que l'évapotranspiration agit en totalité sur la pluie correspondante). La pluie nette P' est égale à la pluie brute P diminuée de la totalité de l'évapotranspiration potentielle E_p . Une partie de la pluie ou la totalité de la pluie peut être évaporée selon le schéma suivant :

Soit P la pluie brute et E_p l'évapo-transpiration potentielle:

Si $E_p > P$ on a $E'_p = E - P$ et $P' = 0$

Si $E_p < P$ on a $E'_p = 0$ et $P' = P - E_p$

où E'_p et P' représentent les valeurs respectives d'évapo-transpiration et de pluie qui vont être traitées dans le reste du modèle.

Le modèle ne dépend que de deux paramètres A et B .

Le calage correspondant sur les six bassins versants, montre que la neutralisation complète est inadéquate au pas de temps mensuel. Le tableau 27 affiche une dégradation systématique pour tous les bassins versants modélisés. Le critère mensuel moyen passe de 42.7 pour le calage de base à 56.4 pour une

neutralisation totale. On note une dégradation de plus de 15% pour les bassins n°5, 29 et 69. Le bilan global est aussi très largement affecté : par exemple pour le bassin n°69, situé dans le CHOTT HODNA, il passe de 11% à 77% d'écart en % de l'apport annuel.

N°des BV	Version de base		Neutralisa- tion com- plète		Neutralisa- tion impo- sée		Sans neutralisa- tion	
	bilan	critère mensuel	bilan	critère mensuel	bilan	critère mensuel	bilan	critère mensuel
5	14.9	42.0	26.6	59.3	23.1	49.3	14.9	42.0
24	0.9	53.1	1.3	55.1	6.7	56.5	1.8	54.2
26	0.8	32.0	-2.5	38.9	4.7	34.4	-9.1	33.3
29	2.3	29.4	3.3	46.3	9.8	30.0	-19.3	34.1
58	-2.9	39.0	-17.1	42.1	11.8	40.3	-2.9	39.0
69	11.2	60.6	77.3	97.0	-3.9	65.6	12.3	60.6
critère mensuel moyen		42.68		56.43		46.02		43.87

Tableau 27 : Comparaison des différentes versions de neutralisation pluie-évaporation

4.5.1.2 - Neutralisation imposée :

Après l'échec du test précédent, nous nous proposons de tester une neutralisation intermédiaire entre la neutralisation complète et celle proposée dans le calage de base, il s'agit d'une neutralisation définie comme suit :

$$P' = P^2 / (P + E_p)$$

et

$$E'p = E_p^2 / (P' + E_p)$$

on vérifie que l'on a bien :

$$E_p - E'_p = P - P'$$

Le tableau 27 montre que les simulations sont moins satisfaisantes que celles du modèle de base. Le critère mensuel moyen s'est dégradé de 3.3%. Cependant on remarque que la détérioration du critère est moins importante que celle obtenue par une neutralisation complète.

4.5.1.3 - Sans neutralisation :

La dernière possibilité est d'abandonner toute neutralisation pluie-évaporation.

Les résultats de cet essai, regroupés dans le tableau 27 montrent qu'il est le plus proche du modèle de base, bien que le critère mensuel moyen se soit dégradé de 1.2%. Il faut noter que sur la moitié des bassins le modèle de base ne se distingue pas de cette version puisque C y est égal à zéro.

4.5.1.4 - Conclusion :

A l'issue des essais réalisés précédemment, il apparaît que la neutralisation d'une fraction à optimiser de la pluie par l'évaporation n'apporte pas un très grand progrès par rapport au modèle simplifié ne comportant pas de neutralisation. Néanmoins, nous conservons la version utilisée dans le modèle de base et essayons de tester d'autres spécifications en vue de confirmer le bien fondé de chacune des parties du modèle.

4.5.2 - La loi de vidange du réservoir de routage :

4.5.2.1 - Hypothèses de base :

Il est important de vérifier si la loi de fonctionnement du réservoir de routage, qui est celle adoptée dans le modèle journalier, est bien adaptée au pas de temps mensuel.

Un réservoir linéaire ne ferait-il pas aussi bien l'affaire ?

Nous nous plaçons dans le cas d'une vidange du réservoir, sans entrée. Le débit de sortie peut être représenté en fonctionnement en continu par une fonction puissance du taux de remplissage. Cette loi continue peut suggérer une loi applicable aux données moyennées sur un pas de temps tel que le pas de temps mensuel.

En valeurs instantanées, désignons par q et r le débit sortant et le niveau du réservoir. Avec une loi puissance, nous avons:

$$q = k r^\alpha$$

$$\text{ou } q = - \frac{dr}{dt} \quad (t \text{ est le temps})$$

$$\text{d'où } - \frac{dr}{r^\alpha} = k dt$$

En indiquant par 1 l'état du réservoir au début du pas de temps t et par 2 l'état à la fin du pas de temps, on obtient par intégration, à la condition $\alpha \neq 1$:

$$\frac{1}{(\alpha - 1) R_2^{\alpha-1}} - \frac{1}{(\alpha - 1) R_1^{\alpha-1}} = k \Delta t$$

en reformulant le paramètre k sous la forme B , telle que :

$$(\alpha - 1) k \Delta t = B^{1-\alpha}$$

on obtient la loi très simple :

$$\frac{1}{R_2^{\alpha-1}} = \frac{1}{R_1^{\alpha-1}} + \frac{1}{B^{\alpha-1}}$$

et le débit (moyen sur le pas Δt) étant Q on a :

$$Q = R_1 - R_2$$

Le réservoir linéaire correspond au cas $\alpha = 1$. Dans ce cas l'intégration conduit à :

$$R_2 = \frac{R_1}{\beta}$$

lorsque l'on pose $e^{k \Delta t} = \beta$

Il ne s'agit pas de définir α avec précision, mais de choisir entre quelques options simples comme :

- $\alpha = 1$, réservoir linéaire
- $\alpha = \frac{3}{2}$,
- $\alpha = \frac{5}{3}$,
- $\alpha = 2$, modèle GR3 J

Pour employer ces différentes lois il faut pouvoir les utiliser dans le sens $Q \rightarrow R$ aussi bien que $R \rightarrow Q$, car on a besoin d'initialiser le niveau du réservoir en début de simulation pour le rendre cohérent avec le débit initial.

4.5.2.2 - Initialisation du réservoir de routage :

Cette initialisation ne pose pas de problème dans les cas $\alpha = 1$ et $\alpha = 2$ où la relation $Q = f(R)$ est explicite. (avec R étant R_1 ou R_2). Raisonnons dans le cas où α est différent de ces 2 valeurs, reprenant les expressions précédentes :

$$\frac{1}{R_2 \alpha - 1} = \frac{1}{R_1 \alpha - 1} + \frac{1}{B \alpha - 1}$$

$$Q = R_1 - R_2$$

soit :

$$\frac{1}{R_2 \alpha - 1} = \frac{1}{(Q + R_2) \alpha - 1} + \frac{1}{B \alpha - 1}$$

Cherchons $R_2 = f(Q)$ et raisonnons sur des variables adimensionnelles en divisant par B :

$$y = \frac{Q}{B}$$

$$x = \frac{R_2}{B}$$

il vient :

$$\frac{1}{x \alpha - 1} = \frac{1}{(x + y) \alpha - 1} + 1$$

ce qui s'écrit aussi :

$$y = \left(1 + (x + y)^{1 - \alpha} \right)^{\frac{1}{1 - \alpha}}$$

ce qui permet d'envisager une résolution itérative sous la forme :

$y_0 = 1$ et

$$y_n = \left(1 + (x + y_{n-1})^{1-\alpha} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

Avec y cherché = limite de y_n quand $n \rightarrow \infty$

Graphiquement, cela conduit au cheminement de la figure :

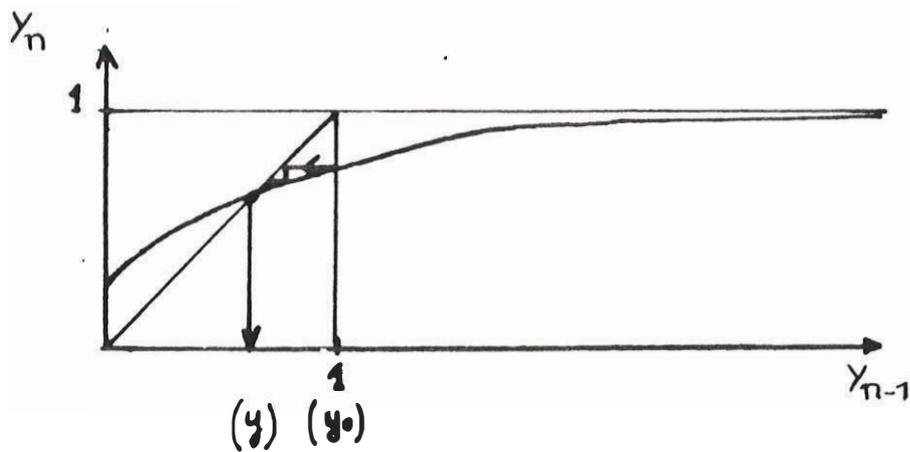


Figure 36 : Recherche du niveau initial du réservoir de routage

La convergence est garantie si la dérivée de la fonction $y_n = f(y_{n-1})$ est en valeur absolue inférieure à 1.

$$f'(y_{n-1}) = (x + y)^{-\alpha} \left(1 + (x + y)^{1-\alpha} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}$$

Soit

$$f'(Y_{n-1}) = \left(1 + (x + y)^{\alpha-1}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}$$

On voit que $f' \rightarrow 1$ si x et $y \rightarrow 0$ et dans ce cas la convergence risque d'être très lente. Il faut donc partir d'une autre valeur que de $y_0 = 1$.

L'équation :

$$y = \left(1 + (x + y)^{1-\alpha}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

peut s'écrire :

$$y = (x + y) \left(1 + (x + y)^{\alpha-1}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

et si $(x+y)$ est petit devant 1 :

$$y \approx (x + y) \left(1 + \frac{1}{1-\alpha} (x + y)^{\alpha-1}\right)$$

soit :

$$0 = x + \frac{(x + y)^\alpha}{1 - \alpha}$$

c'est-à-dire :

$$y = \left((\alpha - 1)x\right)^{\frac{1}{\alpha}} - x$$

Si l'on veut une solution par excès on peut partir de :

$$y_0 = \min \left\{ 1, \frac{1}{\left((\alpha - 1) x \right)^\alpha} \right\}$$

Dans ces conditions, la convergence vers une solution approchée est assez rapide:

4.5.2.3 - Résultats des différents essais :

Nous avons présenté dans le tableau 28, la valeur du critère mensuel pour chacune des lois de vidange linéaire et quadratique.

N° d'ordre des B.V.	Critère mensuel pour une loi de vidange	
	Linéaire	Quadratique
5	52.9	42
24	86.8	53.1
26	38.6	32.0
29	35.1	29.4
58	48.8	39.0
69	67.5	60.6
Moyenne du critère mensuel	55.0	42.7

Tableau 28 : Comparaison des lois de vidange linéaire et quadratique

Le critère mensuel moyen passe de 55.0 en utilisant une loi de vidange linéaire à 42.7 pour une loi quadratique. Les simulations issues de cette dernière sont systématiquement plus satisfaisantes. C'est pourquoi, nous décidons, dans la suite de la recherche, de retenir la loi quadratique.

4.5.3 - Rôle des erreurs dans les modèles pluies-débits :

Il est bien évident que comme toute modélisation d'un système naturel, l'étude de la relation pluie-débit afférente à un bassin naturel, se heurte à trois grands types d'erreurs.

a) les erreurs sur les données dues soit aux erreurs de mesures, soit à l'estimation de ces données à partir de grandeurs mesurées.

Les Anglo-saxons disent "garbage in, garbage out", que l'on peut traduire par : "mauvaises entrées, mauvaises sorties", autre variante de l'auberge espagnole. En fait, il s'agit d'un problème à double face qu'il convient d'analyser prudemment. Le postulat qu'il convient de faire est que les données sont inévitablement entachées de nombreuses erreurs tout en étant indispensables pour les activités relevant de l'ingénierie et tout spécialement l'hydrologie. L'écueil à éviter est la tentation de reporter sur la mauvaise qualité des données, la responsabilité de l'échec d'une modélisation a priori respectable ;

b) erreurs sur les paramètres du modèle retenu. Elles correspondent au risque de se tromper sur les valeurs des paramètres, même si la structure du modèle est simple et peut être confrontée facilement à la réalité ;

c) erreurs d'inadéquation du modèle même, due à son incapacité à représenter valablement les débits observés.

Les trois types d'erreurs se répercutent sur la sortie du modèle, dans notre cas le débit simulé, et ceci sans que l'on soit capable d'évaluer leur poids relatif. Il est important cependant de tester le comportement du modèle, en particulier de son calage, face à l'imprécision des données d'entrées (cette imprécision est un fait et il faut "faire avec") d'une part, et d'autre part, d'étudier la significativité des paramètres qui a pour intérêt de souligner la redondance éventuelle pour chacun des bassins étudiés.

4.5.3.1 - Sensibilité aux erreurs sur les entrées :

On peut approcher le problème de différentes façons :

a) tester une modification stochastique en introduisant un processus d'erreur modélisé ;

b) tester une correction d'échelle : correction systématique due à un mauvais positionnement des instruments de mesure ;

c) utiliser d'autres données réelles mais jugées moins représentatives que celles concernant réellement le bassin versant.

La solution c) a été examinée lors de l'établissement du modèle linéaire.

L'estimation des pluies moyennes sur le bassin versant nous a permis de déterminer les pluviomètres qui semblent être les plus représentatifs et ainsi d'avoir un ordre de grandeur de l'incertitude sur les données de pluies.

La solution b) a été examinée pour le modèle conceptuel de base GRM1. Une modification de 20% de la pluie ou de l'évaporation prise en compte a été étudiée. La détérioration des performances du modèle peut être assez importante comme l'indique le tableau 29 :

N° du BV	Dégradation du critère %	
	Modification de la pluie	Modification de l'évaporation
5	0.1	0.6
24	0.3	0.4
26	3.2	2.0
29	1.6	0.6
58	3.8	2.2
69	0.9	36.4

Tableau 29 : Dégradation des performances du modèle suite à la modification de 20% des variables d'entrées.

Face aux diverses difficultés rencontrées dans le comportement du modèle GRM1 on s'efforcera donc de rechercher des dispositions qui permettent une meilleure simulation pour les bassins défectueux sans pour autant nuire aux bons résultats obtenus sur les autres.

Parmi les dispositions que l'on peut prendre, une critique des données d'entrée est probablement celle qui vient la première à l'esprit après avoir constaté les modifications dues aux changements des données.

4.5.3.2 - Correction des entrées ? :

Etant donné l'importance des données d'entrée et la nécessité de recourir parfois à un capteur assez éloigné du bassin versant, on peut être inquiet du calage du modèle avec des données assez systématiquement biaisées.

Précédemment, il est apparu que le modèle de base tendait vers une sous-estimation des débits en hiver. Pour le calcul de l'évapo-transpiration potentielle, nous avons utilisé des données du BAC COLORADO, en des stations parfois assez éloignées du bassin versant considéré, ayant tendance à donner des mesures sur-estimées.

Nous allons donc essayer d'optimiser une correction globale de la pluie ou de l'évapo-transpiration potentielle, correction destinée à prendre en compte la non-représentativité des entrées telles qu'elles ont pu être estimées, vis-à-vis des conditions météorologiques qui agissent réellement sur le bassin versant considéré.

Pour offrir une certaine souplesse dans l'utilisation du modèle, les corrections sont introduites en option. Ceci permet de, choisir, en fonction de la qualité des données, la variable nécessitant une modification. Les corrections globales de pluies obtenues sur l'échantillon réduit, sont, soit nulles, soit négatives, la moyenne est de -4% ce qui peut sembler surprenant a priori, car le modèle de base tendait plutôt à faire apparaître une sous-estimation des débits. La correction la plus importante est de -18% (bassin n°58, de superficie 680 km²), pour les autres bassins versants, elle est inférieure à 10%. Il est intéressant de remarquer, que la comparaison des corrections sur les deux entrées, laisse apparaître que ce sont plutôt les données d'évaporation qui nécessitent une correction, comme on peut le voir sur le tableau: 30

N°des BV	correction globale de la pluie	correction globale de l'ETP	gain sur cri tère mensuel
(1)	(2)	(3)	(4)
5	0.00	- 0.16	0.9
24	0.00	0.01	0.0
26	-0.01	0.07	0.3
29	0.00	0.09	0.2
58	-0.18	0.03	4.2
69	-0.07	-0.10	0.2

Tableau 30 : Correction des entrées du modèle GRM1

Il est évident que la correction des deux entrées à la fois est très efficace.

Mais le calage de cinq paramètres, puisqu'il y a trois paramètres du modèle, plus deux relatifs à la correction de la pluie et de l'évaporation, serait très probablement très difficile à réaliser, car il est possible que pour certaines données on bute sur des optimums secondaires. C'est pourquoi nous avons effectué l'opération par étapes. On cale d'abord les paramètres du modèle : A, B et C, puis à partir de ce jeu de paramètres on optimise l'ensemble des 5 paramètres comprenant, outre A, B et C, les corrections globales choisies.

Un tel schéma qui ne remet pas en cause l'architecture du modèle de base a par contre le désavantage de conduire à un nombre important de paramètres pour une très légère amélioration du critère. Seul le bassin n°58 a conduit à une amélioration significative de la valeur du critère de l'ordre de 4%, pour les cinq autres bassins versants le gain par rapport au critère quadratique mensuel est inférieur à 1% comme on peut le constater dans le tableau 30 , colonne (4).

Pour ces quelques bassins, il nous a paru plus instructif de nous en tenir très rigoureusement aux données disponibles. Cependant nous nous réservons la possibilité de procéder à une éventuelle correction, si nécessaire lors de l'application du modèle sur l'ensemble de la région géographique à étudier.

Nous allons donc essayer de rechercher d'autres dispositions tout en conservant le même nombre de paramètres que le modèle de base c'est-à-dire trois. Mais auparavant nous définirons une légère modification de la fonction critère, intervenue à ce stade de la recherche.

4.5.4 - Redéfinition de la fonction critère :

Le critère d'appréciation du modèle consiste à juger de la proximité de deux séries chronologiques, celle des débits mensuels calculés et celle des débits mensuels observés. Jusqu'à présent nous avons utilisé le critère des moindres carrés qu'on exprime en valeur relative en divisant par la moyenne quadratique des débits observés :

$$F_m = \sqrt{\frac{\sum [Q_m - \hat{Q}_m]^2}{\sum Q_m^2}} * 100$$

Pour être plus cohérent avec les critères classiques en régression nous adopterons pour dénominateur la variance des débits observés :

$$F_Q = \sqrt{\frac{\sum [Q_m - \hat{Q}_m]^2}{\sum \left(Q_m - \frac{1}{N} \sum Q_m \right)^2}} * 100$$

Les valeurs obtenues sont plus élevées que celles de la formule initiale. Le tableau 31 donne les valeurs obtenues pour les deux formulations du critère.

N° des BV	Critère initial	Critère retenu
5	42.0	53.7
24	53.4	90.8
26	32.0	35.6
29	29.4	32.4
58	39.0	45.4
69	60.6	68.8

Tableau 31 : Comparaison des 2 formules du critère mensuel

4.5.5 - Introduction d'un écoulement pseudo-direct :

Après avoir suspecté les données de pluie et d'évaporation, opération qui nous a permis de mieux comprendre le comportement du modèle vis-à-vis de la qualité des données disponibles, nous arrivons à une "modification" de l'architecture du modèle de base. En effet dans la version actuelle, le ruissellement de surface n'a pas été pris en compte, pas plus qu'une percolation vers une nappe profonde. Nous avons supposé que la totalité de la pluie destinée à l'écoulement est routée par le réservoir eau-gravitaire. Le débit du cours d'eau correspond alors totalement au débit sortant du réservoir eau-gravitaire.

Cette version est sûrement mieux adaptée à des régions où les précipitations sont beaucoup plus régulières et où l'écoulement des bassins versants est à caractère pérenne. Dans notre région d'étude, le climat est très capricieux, les bassins versants sont généralement caractérisés par des écoulements intermittents. Le débit est souvent nul en dehors des périodes pluvieuses et pas seulement pendant l'été, l'écoulement n'a lieu que s'il y a une forte pluie ou une pluie de longue durée. Il y a rarement un débit de base.

Parmi les six bassins versants, nous avons observé deux bassins pérennes n°5 et 69, et deux bassins dont les écoulements sont parfois nuls en été (24 et 26) et deux autres (29 et 58) sont caractérisés par des écoulements généralement nuls en juillet, août et septembre. L'idée serait donc d'accepter le modèle GRM1 tel qu'il a été élaboré jusqu'à présent mais en considérant que la pluie nette ne transite pas en totalité par le réservoir de routage et qu'une fraction de celle-ci court-circuite le réservoir eau gravitaire. Cela n'est pas trop surprenant, car dans la réalité il y a toujours un certain pourcentage de la pluie qui se transforme directement en écoulement. Nous pouvons donc penser à un schéma où le débit du cours d'eau sera alors la somme du débit lâché par le réservoir eau-gravitaire et de la fraction de pluie qui ne transite pas par R.

4.5.5.1 - Modèle GRM1 de base avec introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit :

On teste l'hypothèse qu'un certain pourcentage de la pluie est directement transformé en écoulement.

Mais auparavant il faut déterminer à quel moment s'effectuera la dérivation de cette fraction de pluie. Selon la structure du modèle, il y a deux possibilités de prélèvement (voir figure 37).

- 1) avant rendement par le réservoir sol,
- 2) après rendement par le réservoir sol.

Il est également possible que cette fraction de pluie provienne de la pluie brute, c'est-à-dire avant la procédure de neutralisation pluie-évaporation. Mais nous étudierons cette possibilité au cas où l'essai n°1 se révélerait supérieur.

a) Dérivation avant rendement par le réservoir-sol :

Pour ce premier cas, la dérivation a lieu après la neutralisation de la pluie par l'évaporation : cette fraction de la pluie est considérée comme une partie introduite directement dans le cours d'eau. Un essai a montré que les résultats sont sensiblement moins bons et qu'en conséquence, ce schéma ne répond pas à notre problème. (résultats en annexe 7)

b) Dérivation après rendement par le réservoir-sol :

La deuxième possibilité correspond à un schéma plus réaliste où la partie de la pluie participant directement au débit est une fraction de la pluie nette définie par le réservoir sol. Dans ces conditions, il paraît nécessaire, du moins en premier lieu, d'optimiser la valeur de cette fraction et donc d'introduire un quatrième paramètre.

La fraction de débit qui n'est pas routée par le réservoir eau-gravitaire sera égale à :

$$Q_{PM} = D * PR$$

où D est le 4ème paramètre, il est compris entre 0 et 1.

Alors le complément : $(1 - D) * PR$ entre dans le réservoir eau-gravitaire qui relâche le débit Q_{RM}

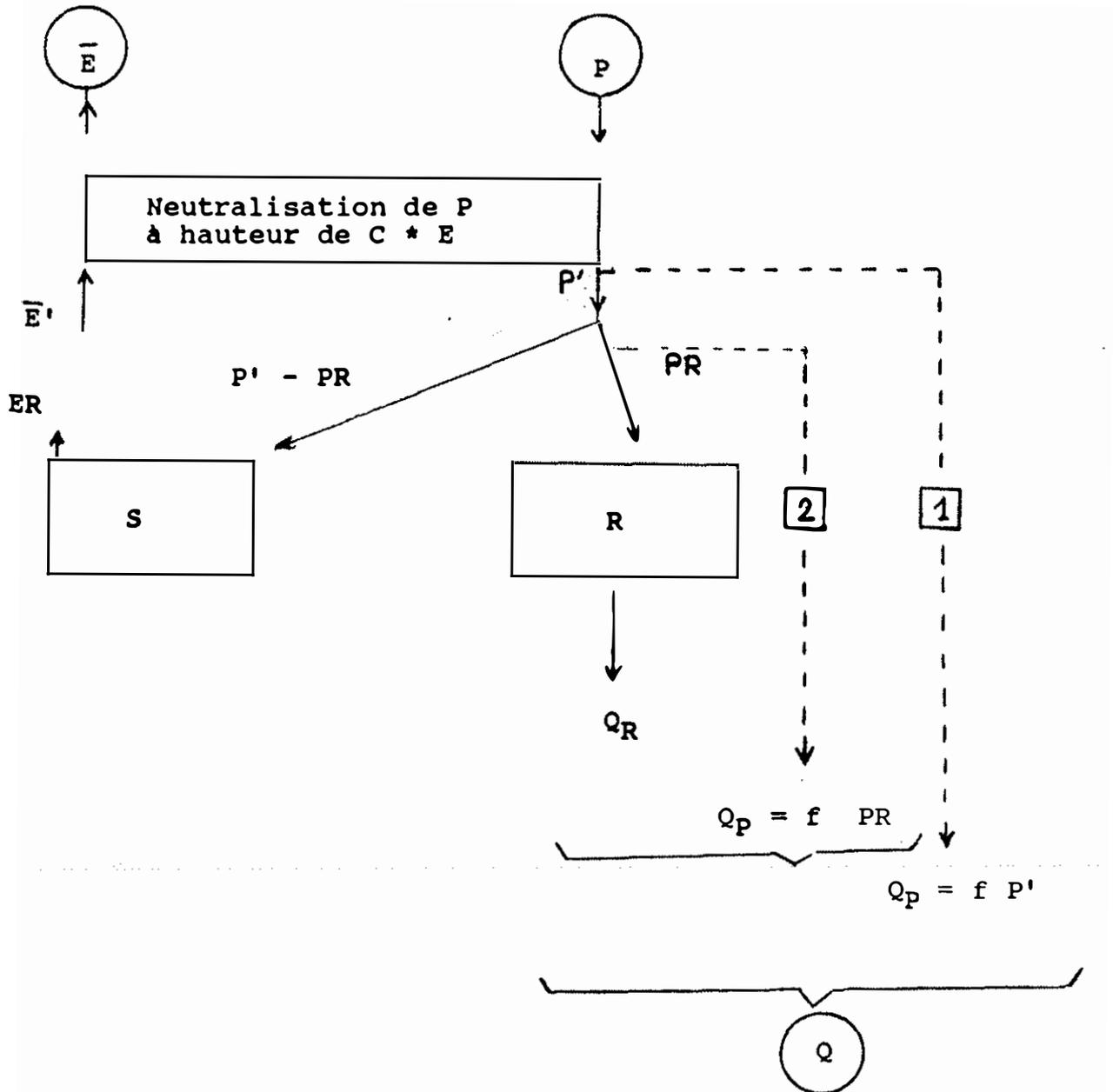


Figure 37 : Les 2 possibilités de dérivation d'une fraction de la pluie

On a donc le débit total égal à :

$$Q_M = Q_{RM} + Q_{PM}$$

Les résultats de la simulation, résumés dans le tableau 32 sont tout-à-fait encourageants. Le modèle conduit à une amélioration significative du critère en comparaison avec le modèle de base, on aboutit à un gain moyen de 1.5%. Ce résultat est intéressant. Nous remarquons que D varie assez largement : pour les bassins versants n°26 et 58, plus de la moitié de l'écoulement n'est pas routé par le 2ème réservoir.

Pour le bassin n°29, D a une valeur nulle ce qui veut dire qu'il n'y a pas d'écoulement de surface et que la totalité de la pluie nette transite par le réservoir eau-gravitaire.

N°des BV	LnA	LnB	LnC	D%	gain
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
5	6.71	9.08	17.0	50	2.4
24	5.75	6.26	2.12	18	1.3
26	5.52	5.20	1.19	69	0.9
29	6.08	1.80	1.07	0	1.6
58	5.76	9.81	2.21	79	2.3
69	4.59	4.52	17.04	22	0.6

Tableau 32 : Modèle mensuel avec introduction d'une fraction de la pluie participant directement à l'écoulement

Au vu de ces résultats, nous pouvons conclure que l'introduction d'une fraction de pluie participant directement au débit et dérivée après rendement du réservoir sol est d'un intérêt certain.

Bien que cette variante conduise aux meilleurs résultats vis-à-vis des valeurs prises par la fonction critère, la détermination du pourcentage optimum a nécessité de rajouter un 4ème paramètre. Pour satisfaire notre désir d'une grande économie de paramètres, nous devons limiter toute introduction d'un nouveau paramètre à caler, c'est pourquoi nous nous proposons d'accepter le principe

qu'une fraction de pluie participe directement à l'écoulement mais en faisant l'économie d'un paramètre à caler.

4.5.5.2 - Peut-on fixer le pourcentage de la fraction de pluie participant directement à l'écoulement ?

Pour respecter la contrainte de ne pas dépasser trois paramètres, la solution est d'économiser un paramètre non pas en supprimant sa fonction mais en lui attribuant une valeur fixe.

Pour cela, il faut pouvoir juger de l'importance relative des différents paramètres du modèle et pouvoir séparer ceux qui valent d'être optimisés, donc nécessitant un calage, de ceux qui peuvent être approchés par une valeur fixe pour tous les bassins.

Pour ces derniers, il peut s'agir soit de paramètres peu sensibles (eu égard au contexte hydrologique) ou ayant un rôle secondaire dans la fonction. Cela semble être le cas du 4ème paramètre relatif à la fraction de la pluie nette qui s'écoulera directement dans le cours d'eau.

Ayant choisi le paramètre à fixer, le problème à résoudre est de déterminer un pourcentage qui soit valable pour l'ensemble des bassins versants. C'est-à-dire une valeur qui permette d'une part d'améliorer les simulations pour les bassins où on observe un écoulement de surface, et d'autre part, de ne pas dégrader les résultats pour ceux où ce type d'écoulement n'est pas à introduire. On est alors amené à explorer une gamme de valeurs très étendue puisqu'on a vu précédemment (tableau 32, colonne (5)) que le pourcentage de cette fraction était largement variable d'un bassin à l'autre. Pour faciliter la comparaison avec des taux différents, nous nous basons en particulier sur la valeur moyenne d'un critère déjà utilisé qui est le rapport au module observé de l'écart-type de l'erreur annuelle du modèle. Ce critère global permet de mesurer la valeur du critère non pas pour un seul bassin versant, mais pour un ensemble de bassins ce qui permet de porter un jugement sur le comportement du modèle vis-à-vis de situations différentes.

Il s'agit alors de déterminer la valeur du pourcentage pour laquelle on obtient le critère global le plus faible.

Pour cela nous avons effectué 9 tests avec des pourcentages variant de 5 à 30%. La valeur du critère moyen relative à chaque pourcentage est représentée dans le tableau 33 ci-après. L'ensemble des résultats sont regroupés en annexe 8.

Erreur quadratique annuelle	% de la pluie participant directement à l'écoulement								
	5%	10%	15%	20%	25%	27%	30%	40%	50%
	28.3	28.2	27.8	27.7	27.7	27.8	28.6	29.1	29.8

Tableau 33 : Détermination du pourcentage fixe de pluie participant directement à l'écoulement

Il apparaît que les simulations correspondant au taux de 25% soient le meilleur compromis pour cet échantillon. En effet la valeur du critère moyen est la plus faible parmi l'ensemble des valeurs obtenues comme on peut le visualiser sur le graphique 38.

En conclusion on peut dire qu'il est évident que l'optimisation de cette fraction conduit à de meilleurs résultats mais les essais précédents laissent apparaître qu'il est possible de fixer cette fraction sans perdre trop d'efficacité.

Avec un taux fixe de 25%, le critère de calage est amélioré de 0 à 2.4% par rapport au modèle de base et la dégradation du critère par rapport au modèle à 4 paramètres varie de 0 à 1.2 %.

Au vu de ces résultats, nous nous proposons donc de fixer le taux d'écoulement qui passe directement dans le cours d'eau puisque cette version présente le double avantage de tenir compte de cette forme d'écoulement sans consommer de paramètre. Comme nous n'avons testé que 6 bassins nous arrondirons la fraction d'écoulement pseudo-direct et retiendrons le taux 0.2. La version correspondante est nommée GRM2.

Cette dernière version du modèle admet que 20% de la pluie nette ne sont pas routés par le réservoir eau-gravitaire et produisent une fraction de débit égal à :

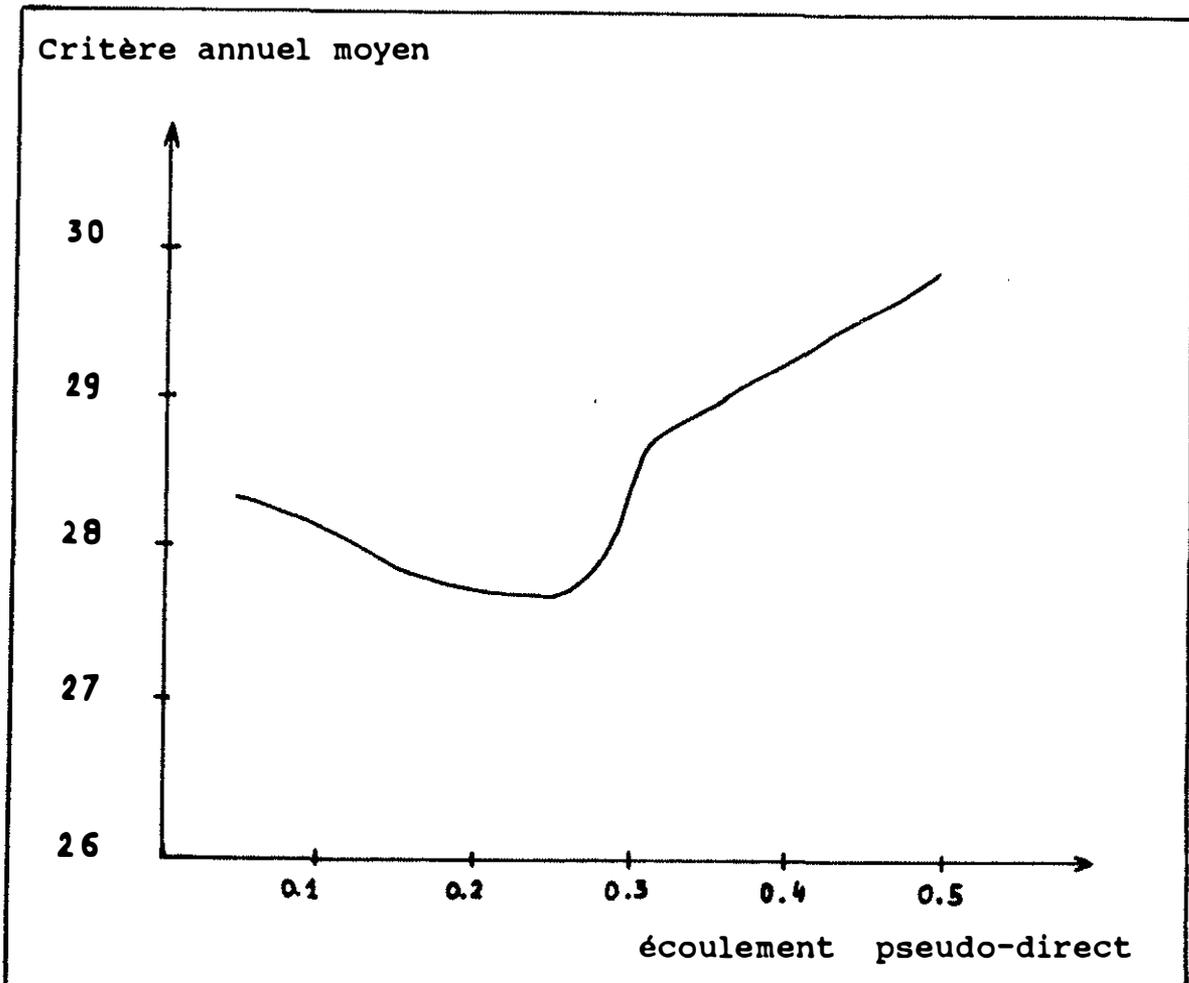


Figure 39 - Evolution du critère en fonction du taux d'écoulement pseudo-direct

$$Q_p = 0.20 * PR$$

où PR est la pluie nette

Dans ce cas, le reste de la pluie nette, c'est-à-dire $0.80 * PR$ entre le réservoir eau-gravitaire qui relâche un débit Q_R .

Le débit total sera alors égal à :

$$Q = Q_P + Q_R = 0.20 * PR + Q_R$$

Avant d'opter définitivement pour cette version, nous pouvons imaginer qu'au lieu de caler la neutralisation pluie-évaporation avec un taux fixe d'écoulement pseudo-direct nous pouvons effectuer l'essai inverse, c'est-à-dire caler la fraction d'écoulement pseudo-direct avec un taux fixe de neutralisation pluie-débit.

Il est apparu à l'issue de trois essais fixant des pourcentages de neutralisation pluie-évaporation à 5%, 10% et 20%, que les ajustements correspondants sont nettement moins satisfaisants que ceux où on imposait l'écoulement pseudo-direct et on optimisait la neutralisation pluie-évaporation. Nous abandonnons donc cette dernière idée.

Cette recherche n'a été effectuée que sur un échantillon réduit de bassins versants. Il serait probablement nécessaire de généraliser ce traitement afin de pouvoir déterminer le meilleur pourcentage à attribuer à l'ensemble des bassins de notre région d'étude.

4.6 - GENERALISATION DU MODELE AVEC INTRODUCTION D'UN TAUX FIXE DE PLUIE PARTICIPANT DIRECTEMENT A L'ECOULEMENT :

Précédemment, nous avons exposé quelques modifications du modèle GRM1 de base en vue d'améliorer son comportement face à diverses difficultés. Ces modifications nous ont permis également de mieux comprendre le comportement du modèle.

Jusqu'à présent nos essais ont porté seulement sur un échantillon réduit de bassins versants au nombre de 6. Les modèles proposés sont comparés au modèle de base et la sélection ou le rejet de telle ou telle version s'est effectuée sur l'analyse des résultats de cet échantillon réduit. C'est ainsi que nous avons élaboré une nouvelle version appelée GRM2 et dont la principale différence avec le modèle GRM1 de base est qu'une fraction de la pluie nette participe directement au débit sortant. Le taux de cette fraction est normalement optimisé mais il a été possible de lui attribuer une valeur fixe valable pour les bassins versants testés.

Dans cette partie, nous nous proposons de tester la nouvelle structure du modèle sur l'ensemble de la région géographique à étudier. En effet en utilisant les données de 62 bassins nouveaux, d'autres problèmes sont apparus. Des modifications doivent être apportées au modèle pour l'adapter aux nouvelles situations hydrologiques introduites par des bassins versants dispersés dans tout le territoire d'Algérie septentrionale.

Mais avant d'examiner les différentes difficultés, il est nécessaire de tester le nouveau schéma avec la composante d'écoulement pseudo-direct sur l'ensemble de la région d'étude.

4.6.1 - Détermination du taux d'écoulement pseudo-direct sur les 68 B.V. :

Pour déterminer le taux d'écoulement pseudo-direct pour l'ensemble des bassins versants, nous avons adopté la même procédure que celle utilisée pour l'échantillon réduit. C'est-à-dire que nous avons étudié l'influence de différents taux d'écoulement pseudo-direct sur le critère moyen et le meilleur pourcentage correspondra alors au test présentant le plus faible critère moyen.

A cet effet, une dizaine d'essais ont été effectués sur les 68 bassins versants soit 680 tests avec des pourcentages d'écoulement pseudo-direct variant de 10% à 60%.

Il apparaît que la fraction de pluie nette destinée à s'écouler directement n'est pas identique à celle trouvée pour l'échantillon réduit et fait apparaître une augmentation de 15%. Autrement dit, on impose que 35% de la pluie nette

participe directement à l'écoulement et seulement 65% seront routés par le réservoir eau-gravitaire.

Le débit total sera alors égal à :

$$Q_T = 0.35 * PR + Q_R$$

4.6.2 - Analyse des paramètres et de leur efficacité

Les simulations sont effectuées pour l'ensemble des bassins versants en considérant pour chacun la totalité de la période disponible de données concomitantes de débit et de pluie à l'exception du bassin n°58. Pour ce bassin, le calage n'a porté que sur une partie de la période disponible car il est apparu l'existence de deux périodes différentes (mélange de données?) Seul le service gestionnaire pourra émettre une explication.

Après avoir déterminé une structure générale du modèle mensuel, l'étape suivante consiste à analyser le comportement de cette version sur chacun des bassins versants. Des tentatives d'amélioration seront alors effectuées là où le modèle posera un problème.

Jusqu'à présent, dans la sélection de nos essais, nous nous sommes basés essentiellement sur la valeur prise par les critères mensuel et annuel. Il s'agit maintenant d'analyser les valeurs prises par les 3 paramètres. Pour cela, il est intéressant de consulter le tableau 34 qui regroupe pour chacun des bassins versants, la valeur des 3 paramètres dans les 3 dernières colonnes ainsi que la valeur du critère mensuel, en colonne (2), du critère annuel en pourcentage de la pluie et du débit observé respectivement en colonne (3) et (4), et le critère de bilan en colonne (5).

4.6.2.1 - Paramètre A :

Ci-après nous allons analyser le comportement du réservoir-sol caractérisé par sa capacité maximale A, dont les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau 34 en colonne (7). Il semble que les capacités sont assez faibles, elles sont comprises entre 55 mm et 854 mm. Cependant, cinq exceptions présentent des capacités très supérieures à celles de la majorité de l'échantillon et variant de

N ^o B.V	F _m %	F _p %	F _q %	F _b %	Erreur max.	LnA	LnB	LnC
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	27.3	1.4	13.5	-4.7	5.4	5.59	6.71	1.16
2	62.3	1.6	34.7	3.9	4.3	6.77	5.36	2.36
3	48.0	4.3	24.9	4.3	5.4	5.85	4.96	14.43
4	33.7	2.8	18.3	2.3	4.2	6.15	4.62	3.63
5	52.8	2.8	32.0	-1.0	7.2	6.50	6.75	2.23
6	36.7	0.7	5.5	-1.3	4.3	6.24	8.07	2.06
7	41.8	2.6	24.7	0.9	7.2	6.21	5.14	1.80
8	99.6	0.5	49.6	14.2	6.4	9.10	5.81	1.32
9	92.9	0.5	15.8	8.0	5.0	9.75	5.39	13.21
10	61.9	1.4	29.6	1.3	4.0	6.33	3.46	12.97
11	74.8	0.6	19.2	13.5	5.6	7.26	6.28	17.34
12	62.4	1.1	29.5	2.7	4.8	6.04	4.19	2.26
13	62.1	1.0	23.1	-3.4	4.1	5.87	4.53	3.07
14	35.7	4.9	35.4	11.7	3.2	6.37	3.45	0.81
15	52.0	4.5	29.3	1.6	8.5	5.15	6.64	0.90
16	47.8	2.9	27.5	11.0	4.9	5.55	3.27	0.92
17	65.3	12.2	25.7	3.6	5.7	4.18	5.89	15.20
18	40.2	1.0	9.4	-4.8	6.6	5.55	4.18	1.57
19	56.4	5.2	22.1	-7.6	5.3	4.99	7.00	15.72
20	43.9	3.2	21.1	-1.0	4.1	5.97	4.02	12.21
21	62.9	2.5	32.0	-7.4	4.2	4.92	6.05	0.90
22	72.2	2.2	31.1	5.6	3.9	6.16	7.52	12.93
23	50.3	1.8	35.2	1.3	6.7	5.09	6.33	0.58
24	94.8	0.6	26.7	14.3	4.3	6.01	6.22	2.46
Q25	69.5	0.9	20.4	-5.5	4.8	5.12	7.71	2.04
26	35.4	2.8	16.3	-4.3	6.2	5.57	3.60	1.30
27	53.5	9.2	28.8	7.4	7.2	5.27	5.36	12.78
28	41.9	4.1	39.3	4.5	4.3	6.16	3.60	0.81
29	34.1	2.5	18.3	-1.5	4.6	6.05	2.38	0.99
30	38.3	7.1	33.3	1.1	7.8	5.36	4.24	0.90
31	29.3	2.8	15.7	-3.5	5.9	5.67	4.19	0.48
32	37.8	14.5	38.4	3.3	6.3	5.71	5.06	2.47
33	33.4	4.4	26.5	-4.9	6.9	5.85	5.21	1.44
34	38.9	8.4	21.3	15.1	4.3	4.80	5.42	15.88
35	35.2	6.7	18.5	-1.3	3.9	5.37	5.68	12.41
36	44.6	5.5	18.3	6.7	6.1	5.61	3.00	-0.70
37	30.1	5.1	16.5	-1.6	4.1	5.96	4.16	1.61
38	26.3	3.5	19.3	-5.7	3.7	5.37	4.35	0.47

N°BV	F _m %	F _p %	F _a %	F _b %	Erreur maxim.	ln A	ln B	ln C
39	50.0	7.3	23.2	-0.4	4.3	5.02	5.42	8.40
40	87.3	4.1	46.2	8.2	6.5	5.52	5.66	13.06
41	58.5	5.6	23.5	6.4	6.6	4.46	4.73	13.16
42	66.1	3.7	28.0	9.5	6.0	5.35	4.09	15.44
43	51.8	4.0	21.8	-4.5	4.0	3.95	5.42	2.41
44	53.6	8.7	37.0	-0.3	6.5	5.28	6.58	17.60
45	80.4	5.0	66.2	-6.8	9.2	5.71	5.64	7.04
46	52.8	2.7	39.5	1.2	4.0	5.43	5.20	3.80
47	87.8	10.6	41.6	7.3	7.0	4.20	5.54	18.88
48	85.8	0.7	48.3	-0.6	4.5	8.37	5.06	1.25
49	58.1	3.7	26.5	-1.6	3.7	5.89	10.59	17.20
50	96.0	1.8	43.6	5.0	3.5	8.65	7.12	1.44
51	47.7	0.3	28.4	5.5	5.0	6.83	4.69	-0.79
52	40.2	4.8	22.6	1.4	4.3	5.95	-0.56	1.37
53	31.1	1.4	6.1	5.7	2.3	5.41	4.23	0.54
54	50.5	2.6	25.8	12.5	5.8	6.34	1.90	-0.69
55	34.7	3.9	23.8	4.3	4.8	5.05	4.04	-0.92
56	45.6	4.3	28.9	-2.1	7.2	5.61	1.02	1.27
57	34.1	3.2	19.2	-3.2	4.9	5.37	1.07	0.71
58	45.4	6.7	19.4	-14.1	4.9	5.64	5.23	1.47
59	39.9	1.9	31.2	-6.7	3.2	5.03	7.97	2.97
60	57.3	4.9	47.5	-28.2	7.3	3.98	7.81	12.37
61	49.6	6.0	17.6	10.0	6.5	5.48	3.83	11.05
62	43.9	5.0	31.6	0.1	5.6	5.64	3.06	-1.27
64	66.3	4.5	31.9	5.9	5.9	5.61	4.56	17.40
65	48.3	3.8	21.5	14.6	3.4	4.76	5.65	17.40
66	106.5	1.0	18.7	11.8	6.2	5.74	7.74	13.60
68	64.0	1.6	30.9	-5.3	4.8	5.00	4.21	12.88
69	68.5	4.4	46.9	11.9	5.7	4.61	4.83	16.17
70	43.2	2.7	18.6	-5.1	5.9	-0.30	6.06	0.27

Tableau 34 - Résultats des simulations de GRM2 sur les 68 BV

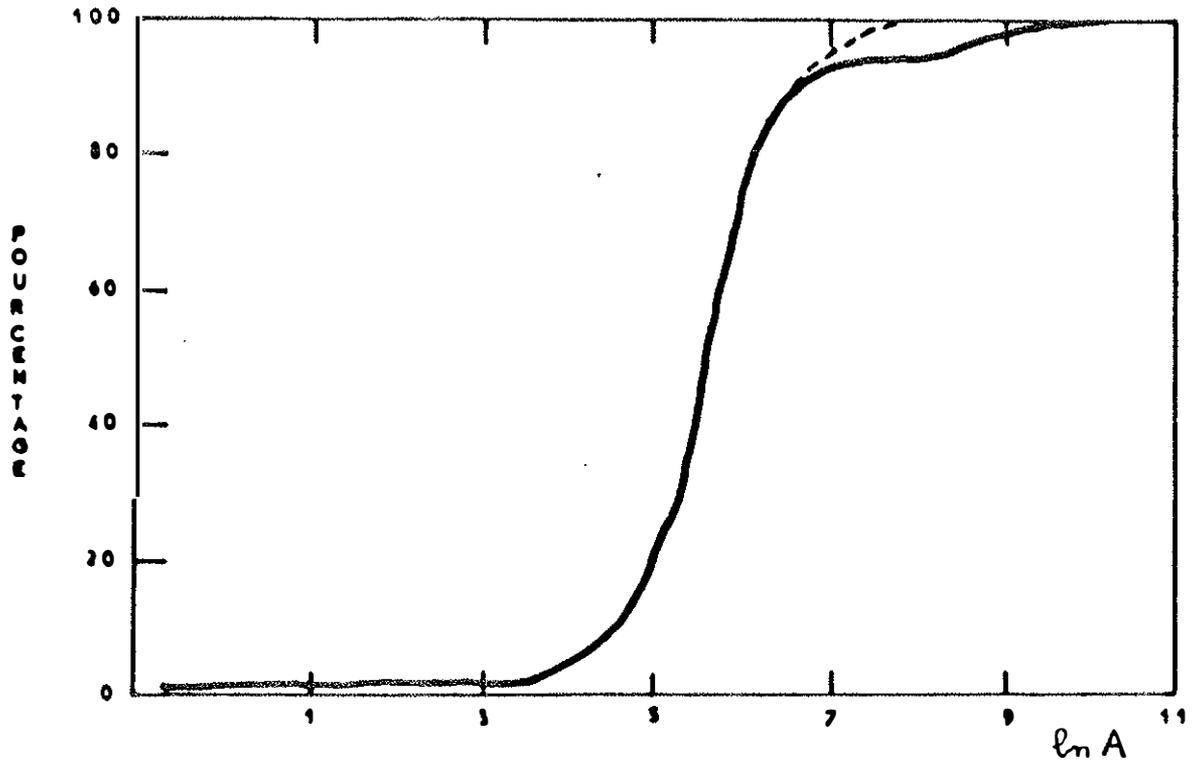


Figure 39 : Fonction de répartition du paramètre $\ln A$ - modèle GRM2

4273 à 17154 mm (soit un intervalle de 20 à 80 fois la plus forte valeur précédente). Il s'agit des bassins versants n°8, 9, 11, 48 et 50.

Afin de mieux visualiser le comportement de ces bassins particuliers, nous avons présenté la distribution de $\ln A$ (figure 39)

Il apparaît que c'est une distribution à peu près log-normale jusqu'à $\exp(7) = 1097$ mm.

On peut penser a priori qu'une sur-estimation de la pluie ou une sous-estimation de l'évaporation pourrait être à l'origine des grandes capacités du réservoir sol. En effet l'examen des tests relatifs à une correction globale de la pluie et de l'évaporation (cf tableau 35) laisse apparaître d'une part que les corrections de la pluie sont négatives, et que d'autre part les corrections d'évaporation sont importantes.

N° des B.V.	$\ln A$	correction globale de la pluie	correction globale de l' ETP
8	9.10	- 0.33	0.59
9	9.75	- 0.21	0.61
11	8.58	- 0.15	0.03
48	8.37	- 0.30	0.00
50	8.65	- 0.22	0.00

Tableau 35 : Correction des entrées du modèle pour les bassins versants ayant A "hors limites"

Nous allons tenter, pour les bassins versants ayant des capacités "hors limites", une correction de l'initialisation du réservoir sol de la façon suivante :

Si $A < \exp(6)$ alors $S = Z_{\text{moy}}(\text{md}) * A$

où $Z_{\text{moy}}(\text{md})$ est une fraction dépendant du mois "md" du début de la simulation.

Sinon on effectue une correction et S sera alors égal à :

$$S = Z \text{ moy (md)} * A / \exp (\ln A - 6)$$

Le chiffre 6 a été déduit de la courbe de distribution de A.

Contrairement aux résultats attendus, cette procédure devant normalement permettre de rattraper les valeurs douteuses et ainsi améliorer le critère mensuel pour ces bassins, le critère s'est considérablement dégradé, de 2.8% à 28.8%, excepté sur le bassin n°48. (cf tableau 36)

Ces mauvais résultats ne sont probablement pas dus à une mauvaise initialisation du réservoir-sol puisque la période de mise en route est égale à un an. A titre de vérification nous avons optimisé la valeur initiale du niveau du réservoir-sol. Notre étonnement est encore plus grand puisque les simulations montrent que (cf tableau 36) les corrections sont positives c'est-à-dire qu'il faut encore augmenter les valeurs de A.

N° des BV	Modèle de base		Diminution de So		Optimisation de So (0)		
	Ln A	critère mensuel	Ln A	critère mensuel	Ln A	0	crit. mens.
8	9.10	99.6	8.36	107.1	8.71	0.40	99.0
9	9.75	92.9	7.62	121.7	8.64	0.50	90.4
11	7.26	74.8	7.20	81.9	8.18	0.48	58.3
48	8.37	85.5	8.51	83.5	8.83	-0.87	83.1
50	8.65	96.0	8.05	98.8	8.36	0.15	87.7

Tableau 36 : Influence de l'initialisation sur la capacité du réservoir-sol

Après avoir suspecté la procédure d'initialisation du réservoir-sol, nous allons examiner les données d'entrées du modèle ainsi que celles simulées. Il apparaît que parmi les 5 bassins, les n°11 et 50 ont un comportement hydrologique très

particulier (problème d'influence anthropique, ...) à écoulements très réguliers ou constants, ne semblent pas être dépendants ni de la pluie ni de l'évaporation. Les 3 autres bassins versants, les n°8, 9 et 48 présentent des données peu fiables : il n'y a pas de concordance entre la pluie et le débit observé, en effet on peut observer un écoulement alors que la pluie correspondante du mois considéré est nulle et que l'évaporation est importante ; ou encore, le débit hivernal est inférieur à celui de l'été.

Pour ces raisons, nous avons préféré ne pas considérer ces bassins particuliers et nous en tenir à 63 bassins uniquement.

4.6.2.2 - Paramètre B :

Après avoir étudié le paramètre A, nous allons ci-après analyser le comportement du réservoir eau-gravitaire caractérisé par sa capacité maximale B.

Sur l'ensemble des bassins versants modélisés, le réservoir eau-gravitaire peut être caractérisé par un stockage faible et le paramètre B atteint rarement 1 m.

Cependant quelques bassins versants sont un peu particuliers, ils se démarquent des autres par des capacités trop importantes, non habituelles dans la région. Ceci n'est pas gênant puisque le paramètre B n'influence pas le volume total simulé, il intervient plutôt dans la loi de vidange. Une forte valeur de B entraîne des valeurs faibles pour R et des débits plus réguliers.

Afin de mieux analyser l'ensemble des résultats obtenus, nous avons représenté la distribution des valeurs de $\ln B$: la figure 40 permet de faire la remarque suivante :

- la courbe de distribution des valeurs de B présente une anomalie : on note un fléchissement de la distribution au-delà du point exp (7), ce qui correspond à des capacités supérieures à 1m. Au delà de cette limite, B évolue trop rapidement.

Une solution intéressante serait alors de limiter $\ln B$ à 7 et de récupérer le paramètre, pour ces bassins versants, et de lui attribuer une autre signification. Parmi les dispositions que nous pouvons prendre, une correction des données est

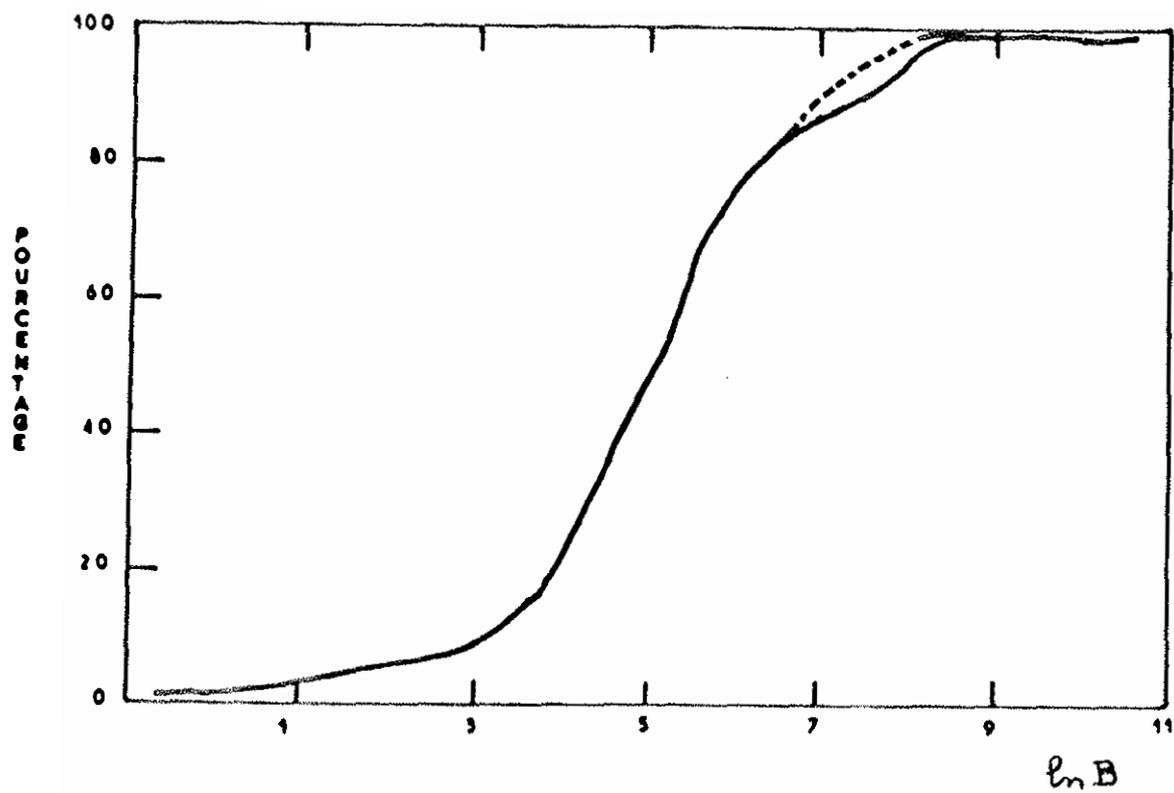


Figure 40 : Fonction de répartition du paramètre $\ln B$ - modèle GRM2

la première que nous envisageons puisque nous avons vu précédemment (cf 4.5.3.2) que cette procédure améliore les simulations.

Il reste alors à déterminer quelle correction il faut effectuer: sur la pluie ou sur l'évaporation ? En fait, nous avons effectué une correction globale des deux entrées et il est apparu que la pluie moyenne sur ces bassins versants est sur-estimée puisque les corrections globales obtenues de la pluie sont généralement négatives (3 bassins sur 5).

Nous nous proposons donc de procéder à une correction globale de la pluie, en la diminuant, pour les bassins versants dont le paramètre B est supérieur à $\exp(7)$.

Il s'agit des bassins versants n°6, 22, 25, 66 et 50. Les résultats de cette version sont présentés dans le tableau 37 en comparaison avec le modèle de base c'est-à-dire sans aucune correction ; nous trouverons également en colonne (6) et (7) de ce tableau les corrections globales respectivement à la pluie et à l'évaporation.

N° BV	Modèle de base		Calage avec correction de la pluie		Correction des entrées	
	Ln 8	Critère mensuel	Ln B	Critère mensuel	Pluie	ETP
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
6	8.07	36.7	7.00	38.4	0.0	0.0
22	7.52	72.2	7.02	72.5	0.0	0.0
25	10.56	66.6	7.30	64.4	-0.36	0.13
66	7.71	106.5	7.47	93.7	-0.57	0.02
50	7.12	96.0	7.22	88.0	-0.22	0.00

Tableau 37 : Essai de limitation de B par une correction des entrées

On constate que l'ajustement est plus performant pour une correction globale de la pluie : le critère s'est amélioré en moyenne de 4.2% avec une diminution des valeurs de B. Cependant ce résultat n'est pas général, on note deux exceptions. Les bassins n°6 et n°22 pour lesquels le critère mensuel s'est dégradé légèrement.

Ce résultat est très intéressant puisque nous venons de voir comment on peut améliorer les simulations pour certains bassins versants en conservant le même nombre de paramètres que le modèle de base. Une correction de la pluie, peut être alors réalisée sans consommation de paramètre. Cette correction est identifiée à (en appelant $x(2)$ le paramètre optimisé) :

$$\begin{aligned} \text{Si } x(2) < 7 & \quad \text{alors } B = \exp(x(2)) \\ \text{Si } x(2) > 7 & \quad \text{alors } B = \exp(7) \\ & \quad \text{et } P' = P * \exp(7 - x(2)) \end{aligned}$$

4.6.2.3 - Paramètre C :

Le troisième paramètre dénommé C est une composante essentielle de la fonction de production. Il correspond à la fraction de neutralisation pluie-évaporation, opération permettant de régler la quantité de pluie qui sera efficace c'est-à-dire disponible pour l'écoulement après rendement par le réservoir-sol.

Cependant, bien que cet emploi du paramètre C soit le meilleur jusqu'à présent (cf 4.5.1) l'analyse des valeurs prises par cette composante (cf tableau 34 colonne (9)) laisse apparaître que cette approche n'est pas générale pour l'ensemble des bassins versants étudiés. Comme pour les paramètres A et B, nous avons établi la courbe de distribution des valeurs de $\ln C$ (figure 41) sur laquelle il est important de noter que la neutralisation pluie-évaporation proposée est efficace sur 60% des bassins versants modélisés, pour le reste, C réel a tendance à avoisiner l'unité, en laissant ainsi un paramètre "libre". A partir de cette remarque il est intéressant de chercher à mieux exploiter ce paramètre en complétant son rôle. Autrement dit nous proposons deux significations adjacentes pour le paramètre C :

- une signification principale qui est de déterminer la neutralisation pluie-évaporation déjà proposée ;
- et une signification complémentaire lorsque la neutralisation atteint la valeur maximale qui a pour but d'utiliser le paramètre C devenu libre. Cette procédure devrait améliorer les résultats déjà obtenus sans pour autant alourdir le modèle puisque nous conservons le même nombre de paramètres que le modèle de base, c'est-à-dire trois.

Il s'agit alors de rechercher le rôle complémentaire pour C qui permettra une meilleure simulation pour l'ensemble des bassins versants. Pour cela nous nous proposons d'essayer plusieurs solutions que nous présentons successivement :

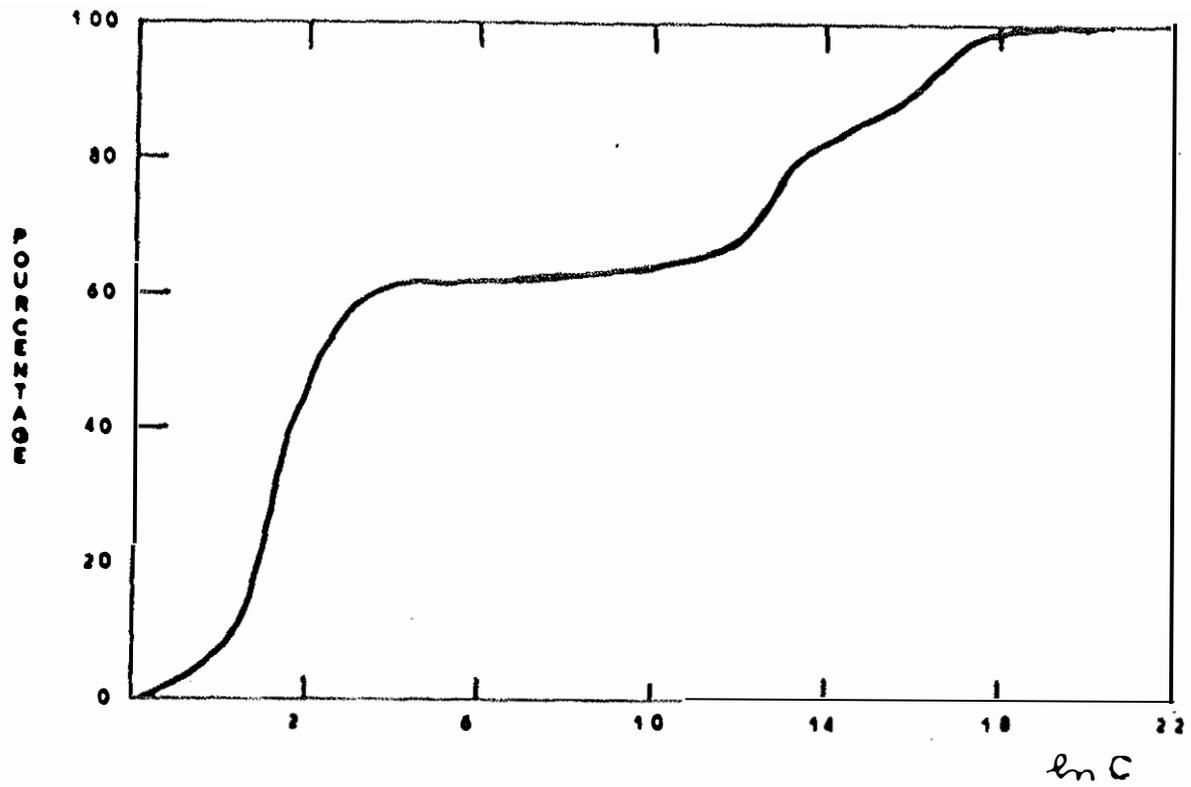


Figure 41 : Fonction de répartition du paramètre $\ln C$ - modèle GRM2

a) Essai de couplage de la neutralisation pluie-évaporation et de l'écoulement pseudo-direct :

L'une des conclusions importantes de l'amélioration du modèle de base était la prise en compte de l'écoulement pseudo-direct. Mais afin de respecter la contrainte de ne pas dépasser trois paramètres, cette composante n'est pas optimisée, mais fixée pour l'ensemble des bassins versants.

Bien que cette version soit pour l'instant la plus performante, cette démarche d'introduction d'un écoulement pseudo-direct constant est assez brutale. L'idée serait alors d'accepter le modèle GRM2 tel qu'il été conçu jusqu'à présent mais en donnant plus d'importance au paramètre C : c'est-à-dire qu'au lieu d'avoir un écoulement pseudo-direct fixe, il serait intéressant de détecter une éventuelle relation entre la neutralisation pluie-évaporation et l'écoulement pseudo-direct. Si cette opération réussit, elle permettra d'ajuster pour chacun des bassins versants l'écoulement pseudo-direct.

Pour ce faire nous avons représenté sur un graphique les valeurs optimales de la neutralisation pluie-évaporation et de l'écoulement pseudo-direct obtenues sur la totalité des bassins versants (figure 42). L'examen de cette figure ne laisse apparaître aucune relation entre les paramètres correspondants et vouloir ramener une variante à l'autre serait encore probablement plus brutal que de fixer l'écoulement pseudo-direct. C'est pourquoi nous avons abandonné cette idée.

b) Rôle complémentaire pour C : optimiser l'écoulement pseudo-direct :

Dans cette approche nous conservons l'idée principale développée ci-dessus, à savoir arriver à une meilleure simulation par une utilisation plus radicale de C et une estimation plus précise de l'écoulement pseudo-direct.

L'utilisation plus radicale de C consiste à attribuer à C, quand il est "libre", une deuxième signification qui est à chercher.

Lorsque X (3) transformée de C atteint une valeur élevée (disons 4) on limite C à la transformée de 4 et on peut utiliser X (3) pour définir l'écoulement pseudo-direct. Cette version dépendant d'un même nombre de paramètres optimisés que

le modèle GRM2, diffère par son architecture qui est représentée par la figure 43.

Le critère moyen annuel correspondant à cette version est comparable à celui du modèle GRM2 retenu, les valeurs sont respectivement 28.1 et 27.9. Cependant si on examine les simulations bassin versant par bassin versant, on peut faire les remarques suivantes (une comparaison du critère mensuel pour chacun des bassins versants par rapport aux modèles GRM2 est représentée en annexe 9) :

- la modification apportée est assez valable pour les bassins versants où la neutralisation pluie-évaporation est trop faible et où l'écoulement pseudo-direct optimal est assez différent de la fraction fixée dans le modèle GRM2. Nous pouvons citer l'exemple des bassins n° 21,43,48,50,51,59,70, où l'amélioration du critère mensuel est supérieure à 5% et peut atteindre 8%

- en revanche, pour un grand nombre de bassins versants, la dégradation du critère mensuel est importante. Les bassins versants n°1,9,11,59 laissent apparaître une détérioration du critère supérieure à 5% voire 10%.

Cette version est probablement intéressante pour un type particulier de bassin versant. Son caractère partiel ne satisfait pas notre objectif d'arriver à un modèle général qui soit à peu près satisfaisant sur un large ensemble de bassins versants situés dans des conditions contrastées.

C'est pourquoi nous abandonnons cette version et maintenons le taux d'écoulement pseudo-direct à 35%.

c) Rôle complémentaire pour C : correction des entrées ?

Après avoir examiné les possibilités d'assemblage de fonctions déjà existantes (neutralisation pluie-évaporation et écoulement pseudo-direct), nous allons ci-après étudier une approche qui consistera à améliorer la fonction de production et ceci par une meilleure adéquation des entrées du modèle.

En effet, dans les paragraphes précédents, nous avons remarqué qu'une correction globale des données améliore les simulations. Cette variante pourrait être envisagée maintenant puisqu'elle a le double avantage d'apporter une amélioration sans avoir recours à d'autres paramètres. Autrement dit, le rôle

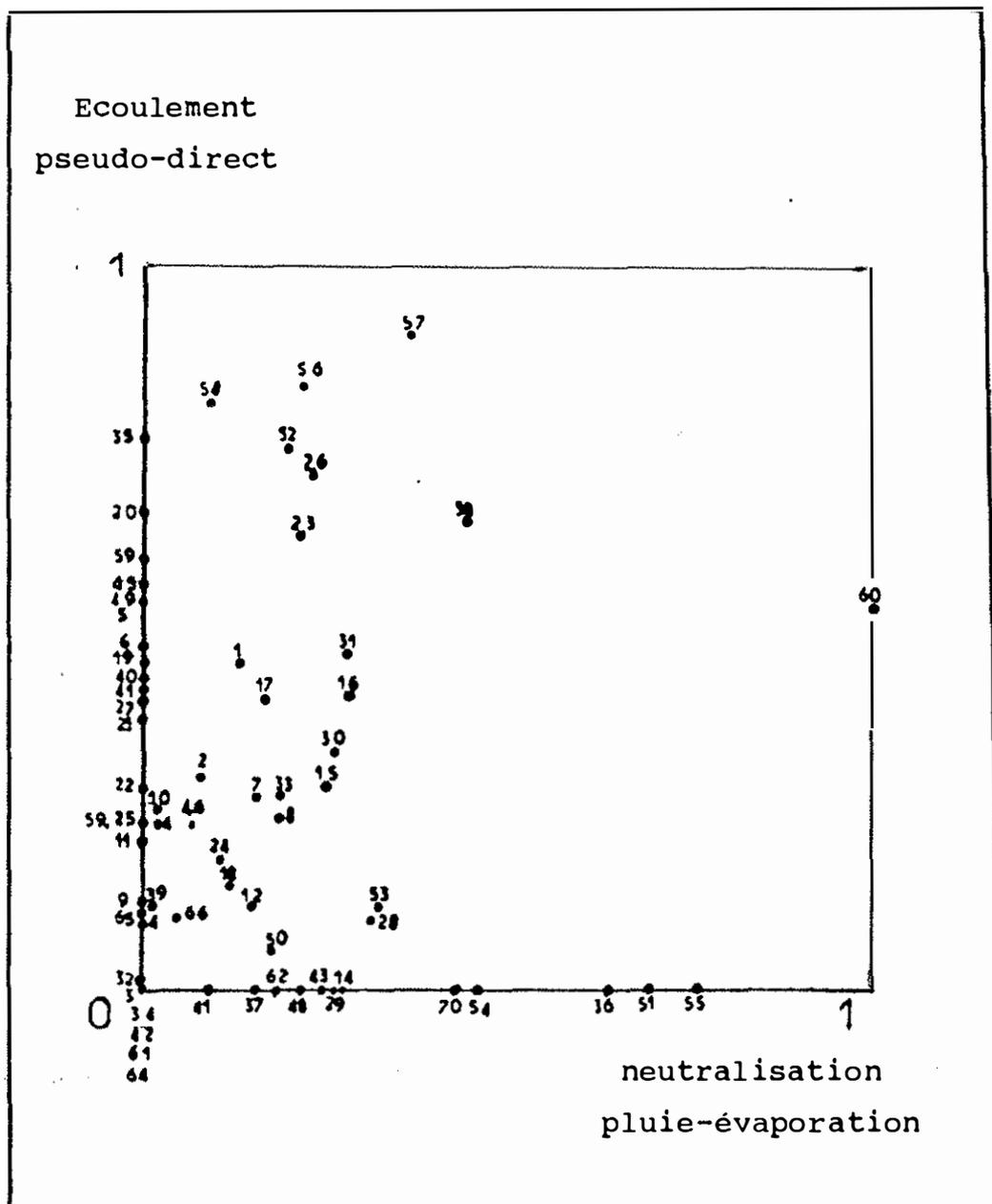


Figure 42 - Ecoulement pseudo-direct en fonction de la neutralisation pluie-évaporation - modèle GRM2

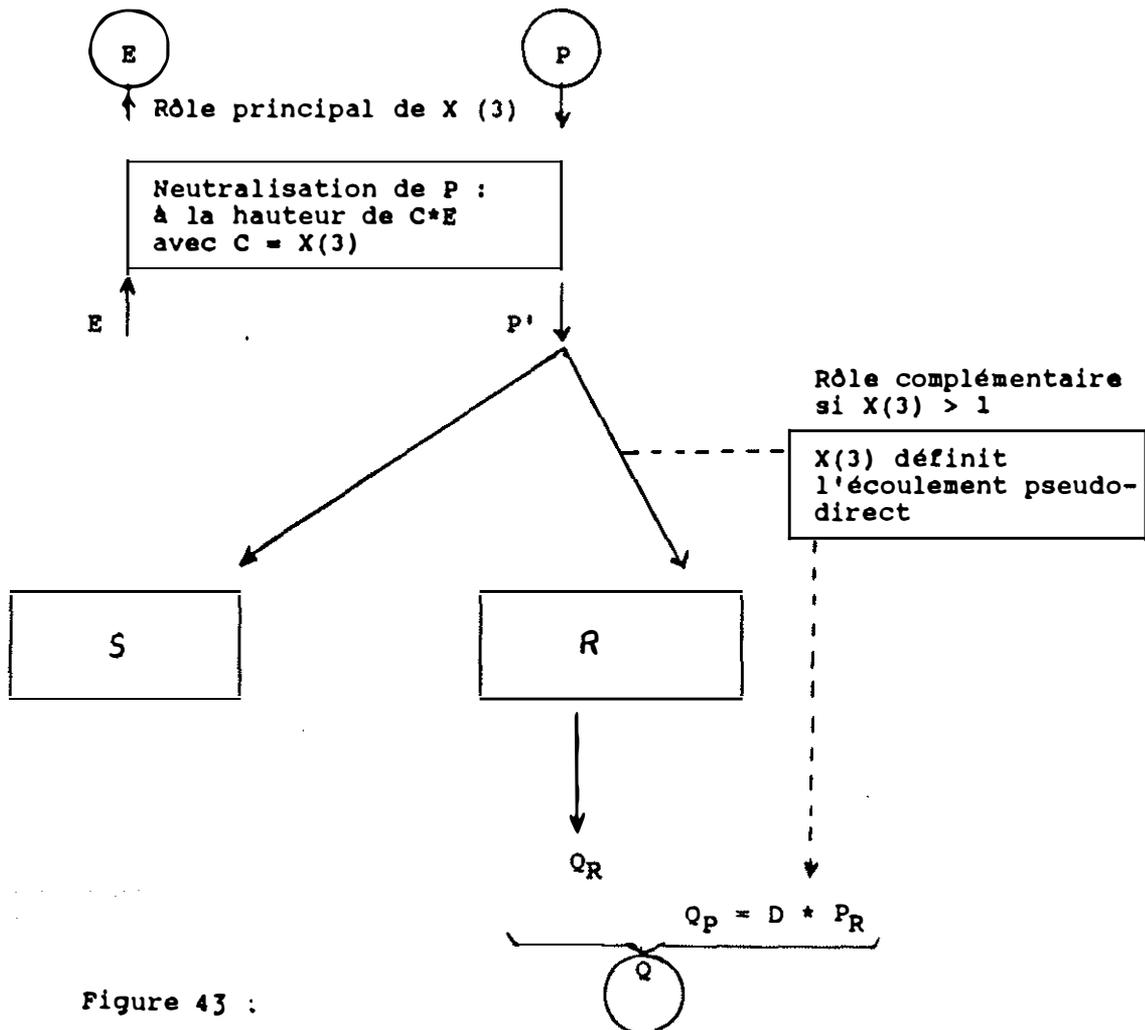


Figure 43 :

Paramètre C a un rôle complémentaire possible si la neutralisation pluie-évaporation arrive au maximum.
Le troisième paramètre sert à définir l'écoulement pseudo-direct

complémentaire du paramètre C correspondra à une correction globale de la pluie ou de l'évaporation.

Pour cela nous avons effectué deux essais : l'un où la prolongation du rôle de C correspond à une correction de la pluie, l'autre à une correction de l'évaporation. Dans près de 30% des bassins versants modélisés, nous avons observé une amélioration significative du critère mensuel qu'il s'agisse d'une correction de la pluie ou de l'évaporation. Cependant nous avons été surpris par les fortes valeurs des corrections relatives à l'évaporation : pour un grand nombre de bassins il faut diminuer l'évaporation de moitié.

Dans la phase actuelle de l'étude, il nous semble beaucoup plus prudent de procéder à une correction globale de la pluie pour tous les bassins versants où le paramètre C est "libre".

4.6.3 - Conclusion :

Les études précédentes montrent bien la difficulté d'élaborer un modèle simple et général qui doit être, d'une part, performant sur un ensemble de régions contrastées par leurs conditions climatiques et géologiques et, d'autre part, dépendant d'un nombre limité de paramètres.

A l'issue de ces essais, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- l'initialisation du réservoir-sol semble être correcte. Néanmoins selon les valeurs prises par A, nous pouvons changer les valeurs initiales de ce réservoir en les limitant ;
- paramètre B : un réajustement global de la pluie a permis généralement de rattraper les mauvais ajustements de B ;
- il est assez brutal d'essayer de chercher une relation entre l'écoulement pseudo-direct et la neutralisation pluie-évaporation, et l'imposition d'un pourcentage fixe d'écoulement pseudo-direct correspond à la solution la plus satisfaisante.
- la neutralisation pluie-évaporation proposée est bien efficace pour 60% des bassins versants modélisés. Pour les autres, le troisième paramètre est "libre". Il semble donc qu'il y ait matière à réfléchir sur cette particularité du paramètre C.

Une solution possible était alors d'attribuer au paramètre C une fonction complémentaire et ceci pour les bassins versants où la neutralisation pluie-évaporation a atteint son maximum. Parmi les essais réalisés une correction des entrées du modèle à été retenue où selon la valeur prise par le paramètre C on effectue une correction soit de la pluie, soit de l'évaporation.

Cette démarche semble donc être acceptable puisqu'elle présente le double intérêt de prendre en compte les corrections des entrées du modèle sans consommer de paramètres.

La version actuelle dénommée GRM3 que nous nous proposons de retenir est composée donc de trois paramètres à optimiser : A, B et C et d'un paramètre fixe. La principale différence avec le modèle GRM2 est relative au paramètre C. Ce dernier ne correspond plus uniquement à la neutralisation pluie-évaporation mais aussi, lorsque cette neutralisation atteint son maximum, à une correction globale de la pluie ou de l'évaporation

4.7 - COMPARAISON DU MODELE GRM3 AVEC D'AUTRES MODELES

4.7.1 - Nouvelle initialisation du réservoir S

L'analyse des différents tests réalisés jusqu'à présent nous permet de modifier l'initialisation du réservoir-sol proposé en (4.3.2).

So est estimé selon les valeurs du tableau 38 ci-après.

MOIS	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
So/A	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05

Tableau 38 - Nouvelle initialisation du réservoir-sol

L'application du modèle GRM3 avec cette nouvelle initialisation a conduit à une amélioration du critère annuel moyen de 0.5%. C'est pourquoi nous nous proposons de la retenir dans la suite de notre recherche.

4.7.2 - Comparaison du modèle GRM3 avec d'autres modèles :

L'application de la version actuelle du modèle mensuel GRM3 à l'ensemble de la région géographique à étudier a fait apparaître certaines défaillances que nous pourrions mieux apprécier si on les compare aux performances d'autres modèles utilisés en Algérie ou ailleurs dans le monde.

4.7.2.1 - Procédure adoptée dans la comparaison des modèles :

La première base de comparaison est fournie par le modèle linéaire établi précédemment. Nous utiliserons ensuite 4 modèles conceptuels dont le modèle SMAP très utilisé en Algérie pour simuler la transformation pluie-débit et le modèle non linéaire de SHAAKE et CHUNZHEN que nous nommons MNL, le modèle T~~A~~d'ALLEY et le modèle ABCD de THOMAS .

Une description du principe de ces modèles et de leur schéma de fonctionnement à été faite dans le chapitre 4.1.2.

A ces 4 modèles conceptuels, nous rajoutons un modèle largement utilisé en France : le modèle GARDENIA du BRGM [THIERY, 1985].

Le modèle GARDENIA est un modèle global pluie-débit qui permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir d'une lame d'eau sur le bassin, d'une lame d'évapotranspiration potentielle et d'un nombre maximal de 8 paramètres.

Pour tester le modèle GARDENIA sur notre région d'étude, nous avons utilisé une version simplifiée dont l'architecture repose sur 3 réservoirs et 4 paramètres :

- un réservoir S, caractérisé par sa capacité maximale,

- A : premier paramètre du modèle,
- un deuxième réservoir qui comprend deux sorties.

La première représente l'écoulement rapide du bassin et dépend d'un paramètre D. Cette sortie est proportionnelle au carré de la hauteur dans le réservoir, la deuxième correspond à l'alimentation du réservoir profond. Cette sortie est proportionnelle à la hauteur dans le réservoir (coefficient 1/B). Le paramètre D représente la hauteur dans le réservoir pour laquelle les deux sorties sont égales.

- G est le troisième réservoir dépendant d'un seul paramètre: C (mois), il se vidange linéairement (coefficient 1/C) à l'exutoire du bassin versant.

Cependant avec ce modèle qui applique simultanément P et E au premier réservoir on obtient de mauvais résultats en particulier pour les bassins où E est presque toujours supérieur à P. Cela nous a conduit à décaler l'évaporation E en deux temps, un premier temps avant le test de débordement et un deuxième temps après le calcul du débordement éventuel.

E peut se décomposer en :

$$E1 = (P * E)/(P + E)$$

et

$$E2 = E^2 / (P + E)$$

On applique simultanément E1 et P et on calcule le débordement éventuel puis on applique l'évaporation résiduelle E2 au réservoir S.

Cette version donne des résultats tout à fait satisfaisants qui sont présentés dans le tableau 39. Le schéma correspondant à cette technique apparaît en figure 44.

Nous avons retenu le critère déjà utilisé dans la comparaison des différentes versions du modèle mensuel, à savoir l'erreur quadratique moyenne sur l'ensemble des bassins versants modélisés, appelé encore critère annuel moyen. Nous pouvons également compléter l'analyse par le critère mensuel moyen qui représente la moyenne sur l'ensemble des bassins des erreurs quadratiques moyennes (exprimées en pourcentage de l'écoulement) sur les valeurs mensuelles calculées par le modèle.

Pour que l'on puisse comparer les résultats des différents modèles, il est nécessaire d'utiliser une même méthode d'optimisation recourant à une même fonction critère. Nous avons donc incorporé dans le programme principal le

le module de chacun des modèles retenus. Les programmes des cinq modèles : SMAP, GARDENIA, MNL, T et ABCD ainsi établis sont présentés respectivement en annexe 10 à 14.

4.7.2.2 - Comparaison des résultats :

Les résultats complets des simulations issues de l'application des cinq modèles : SMAP, GARDENIA, MNL, T et ABCD aux 63 bassins versants retenus sont présentés respectivement en annexe 15 à 19.

Dans le tableau 39 , nous présentons pour chacun des cinq modèles précédents ainsi que pour le modèle linéaire et le modèle conceptuel GRM3, le nombre de paramètres optimisés en colonne (2), et la valeur des critères moyens annuels et mensuel, respectivement en colonne (3) et (4) (excepté pour le modèle linéaire qui fonctionne seulement au pas de temps annuel).

modèles	nombre de paramètres optimisés	critère annuel moyen %	critère mensuel moyen %
(1)	(2)	(3)	(4)
modèle linéaire	2	41.4	
modèle conceptuel GRM3	3	27.0	50.0
GARDENIA	4	35.9	56.3
SMAP	3	39.6	63.3
MNL	5	36.6	61.3
T α	3	37.0	59.9
ABCD	4	27.3	50.5

Tableau 39 : Comparaison des performances de différents modèles

L'examen du tableau 39 permet de faire les remarques suivantes:

a) comparaison du modèle conceptuel GRM3 et du modèle linéaire:

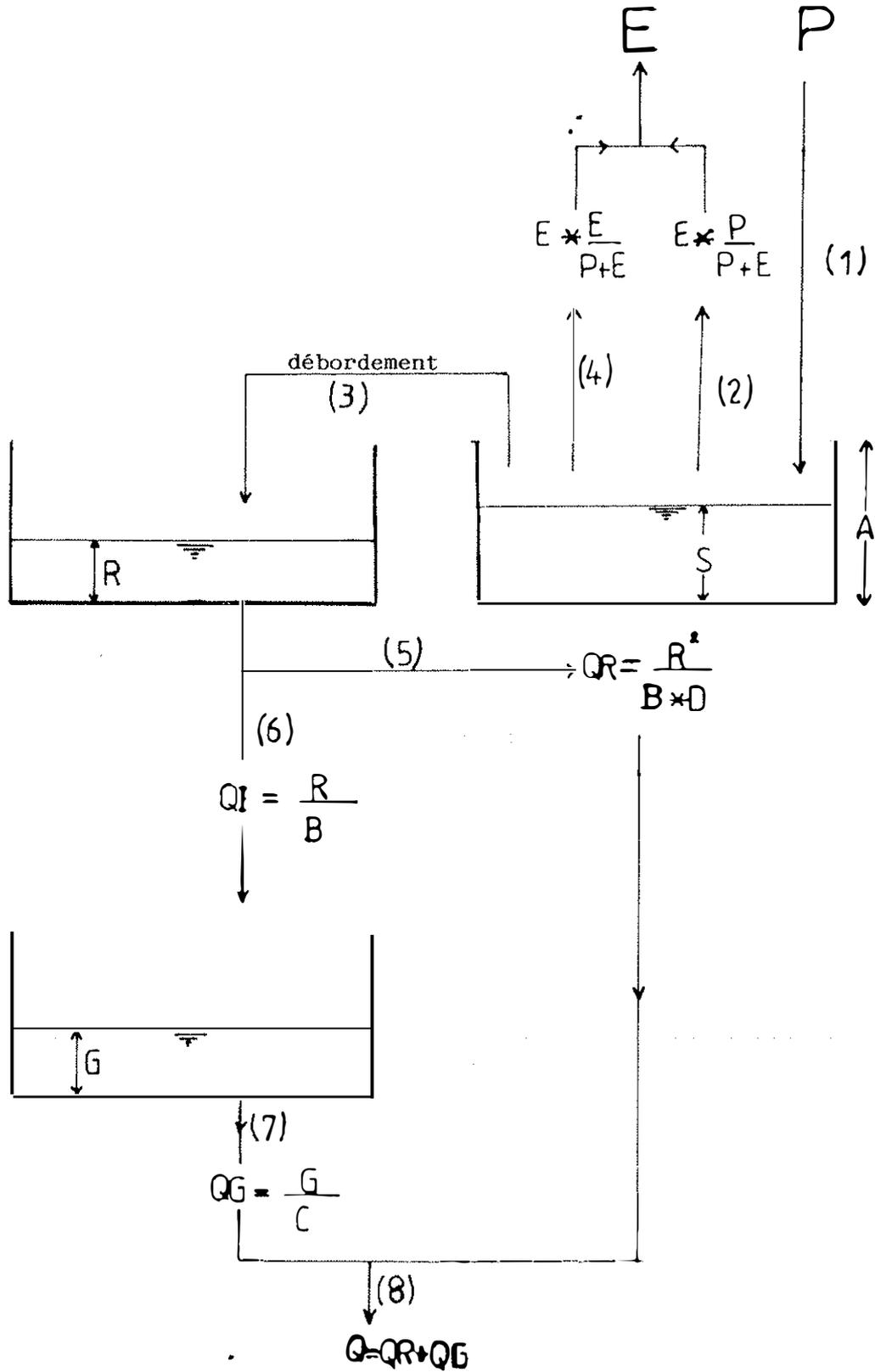


Figure 44 : Variante du Modèle GARDENIA
 (les nombres entre parenthèses indiquent l'ordre des opérations)

La comparaison du critère annuel moyen montre que le modèle conceptuel est nettement plus performant que le modèle linéaire puisque le critère est passé de 41.4% à 27.0%.

b) comparaison du modèle conceptuel GRM3 et de SMAP :

La version de SMAP ici utilisée est quelque peu modifiée par rapport à l'original. Elle comporte 3 paramètres optimisés et 8 paramètres fixés a priori, conformément à la pratique actuelle, et ne diffère que par le fait que l'optimisation est manuelle. Les simulations issues du modèle SMAP sont moins satisfaisantes que celles fournies par le modèle linéaire dans plus de la moitié des bassins versants modélisés (33 sur 63).

c) comparaison du modèle GRM3 et de MNL, T_α et ABCD :

Le modèle MNL est peu adapté, puisqu'avec le nombre de paramètre le plus élevé parmi les modèles testés, il présente des résultats très moyens également fournis par le modèle T_α qui n'a que 3 paramètres.

Un modèle qui se distingue des autres, est le modèle ABCD à 4 paramètres. Les critères annuel et mensuel sont pratiquement identiques à ceux du modèle GRM3.

4.7.2.3 - Conclusion :

En résumé, on peut dire que :

- le modèle linéaire est moins bon que les modèles conceptuels;
- le modèle conceptuel GRM3 est le mieux placé comparativement aux autres modèles conceptuels ;
- le modèle ABCD est la meilleure alternative au modèle GRM3 et nous le choisirons comme référence pour les comparaisons ultérieures.

4.8 - TESTS COMPLEMENTAIRES SUR LE MODELE GRM3 :

Même dans le cas d'un modèle très simple, il n'est pas possible de tester toutes les spécifications figurant dans le modèle. Nous sommes partis de GR3J en essayant de réutiliser le plus efficacement possible le paramètre affecté à

l'hydrogramme unitaire devenu inutile. Il nous a semblé nécessaire de revenir sur certains choix de GR3J qui pourraient ne plus être optimaux au pas de temps mensuel.

On va donc tester un certain nombre de spécifications en les faisant varier, introduisant ainsi un quatrième paramètre à chaque test.

Cette recherche permettra soit de confirmer le choix adopté dans GRM3 soit d'entrevoir les variantes qui seront les plus prometteuses.

Cependant, tous ces essais seront repris, à quelques détails près, lors de la mise au point finale du modèle. Comme cette recherche est un peu laborieuse nous avons choisi de mettre le présent chapitre en annexe et nous ne gardons que les conclusions avant de passer à l'étape de mise au point définitive. Ces conclusions sont au nombre de 2 :

1) Les fonctions principales du modèle impliquant les paramètres A et B sont correctes et peu susceptibles d'amélioration.

2) Les données disponibles sont telles que l'on a beaucoup de mal à dégager une amélioration au delà de 3 paramètres. Le gain marginal nous paraît trop faible pour justifier une complication d'un modèle bien que très simple.

Nous allons donc approfondir de façon assez systématique les analyses rassemblées en annexe 20 en nous limitant impérativement à trois paramètres.

4.9 RECHERCHE DE LA MEILLEURE ARCHITECTURE A 3 PARAMETRES

Les différentes versions proposées jusqu'à présent et leurs applications sur l'ensemble des bassins versants de l'étude témoignent de la difficulté à représenter le comportement d'un ensemble de bassins versants dont les conditions hydroclimatologiques sont diverses et variées, surtout lorsqu'on s'impose une architecture très simple, ne dépendant que d'un nombre limité de paramètres comme celle que nous avons adoptée jusqu'à présent.

Néanmoins, les résultats déjà obtenus nous paraissent concluants pour trois raisons importantes :

- comparativement à d'autres modèles qui existent dans la littérature, le modèle GRM3, malgré quelques difficultés s'est révélé le plus adéquat pour reproduire les débits mensuels ;
- Il reste encore à effectuer une recherche orientée plutôt vers l'architecture du modèle que vers la multiplication des paramètres ;
- Une attention spéciale au traitement de l'évaporation potentielle semble la meilleure utilisation d'un troisième paramètre.

Compte-tenu de l'expérience acquise, nous nous proposons dans ce paragraphe, de rechercher l'architecture la plus efficace à trois paramètres en testant différents rôles que l'on peut attribuer à ce paramètre.

Les autres spécifications impliquant les paramètres A et B étant maintenues identiques à celles définies dans le modèle GRM2.

Les essais que nous présentons sont souvent similaires à ceux du chapitre précédent, cependant il est nécessaire de les refaire puisque le nombre global de paramètres est réduit à 3 et que l'on supprime la neutralisation préalable ($P' = P^2/(P + E)$ et $E' = E^2/(P + E)$).

Nous allons étudier successivement six possibilités :

1) écoulement pseudo-direct,

- 2) neutralisation pluie-évaporation,
- 3) modification du rendement de la pluie,
- 4) modification du rendement de l'évaporation,
- 5) adaptation de l'évaporation potentielle,
- 6) réduction d'une entrée du modèle,

Ces diverses variantes apparaissent sur le schéma d'ensemble de la figure 45

4.9.1 - Taux d'écoulement pseudo-direct variable

La première spécification, que nous nous proposons d'examiner est relative à la partie transfert du modèle et le troisième paramètre correspond à l'optimisation de la fraction de la pluie destinée à s'écouler directement dans le cours d'eau.

Il est probable que ce schéma ne permette pas d'avoir les meilleures simulations mais il est effectué dans le but de voir, si avec les nouvelles options, c'est-à-dire sans neutralisation préalable, le taux d'écoulement pseudo-direct est comparable à celui proposé dans le modèle GRM3. L'essai correspondant conduit à une valeur du critère annuel moyen de 33.6%, soit une dégradation du critère par rapport au modèle GRM3 de 6.7%.

Pour mieux visualiser le comportement du modèle sur les 63 bassins versants modélisés selon cette variante, nous avons représenté en figure 46 le taux d'écoulement pseudo-direct en fonction de la capacité du réservoir eau-gravitaire.

Cette figure permet de faire les observations suivantes :

- on retrouve la même caractéristique d'une grande variabilité du pourcentage d'écoulement pseudo-direct entre 0% et 85% ;
- il est apparu, une nette distinction entre les bassins versants présentant un écoulement pseudo-direct compris entre 1% et 85% et ceux où cette fraction est nulle. Pour un tiers des bassins versants modélisés, la totalité de la pluie nette transite par le réservoir eau-gravitaire. Les capacités B relatives à ces bassins versants sont parmi les plus faibles et ne dépassent pas 150 mm.
- il semble a priori, peu efficace de consacrer le troisième paramètre à adapter le taux d'écoulement pseudo-direct à chaque bassin. Nous préférons conserver un taux fixe dont le niveau dépendra de la composition finale du modèle. Dans ces

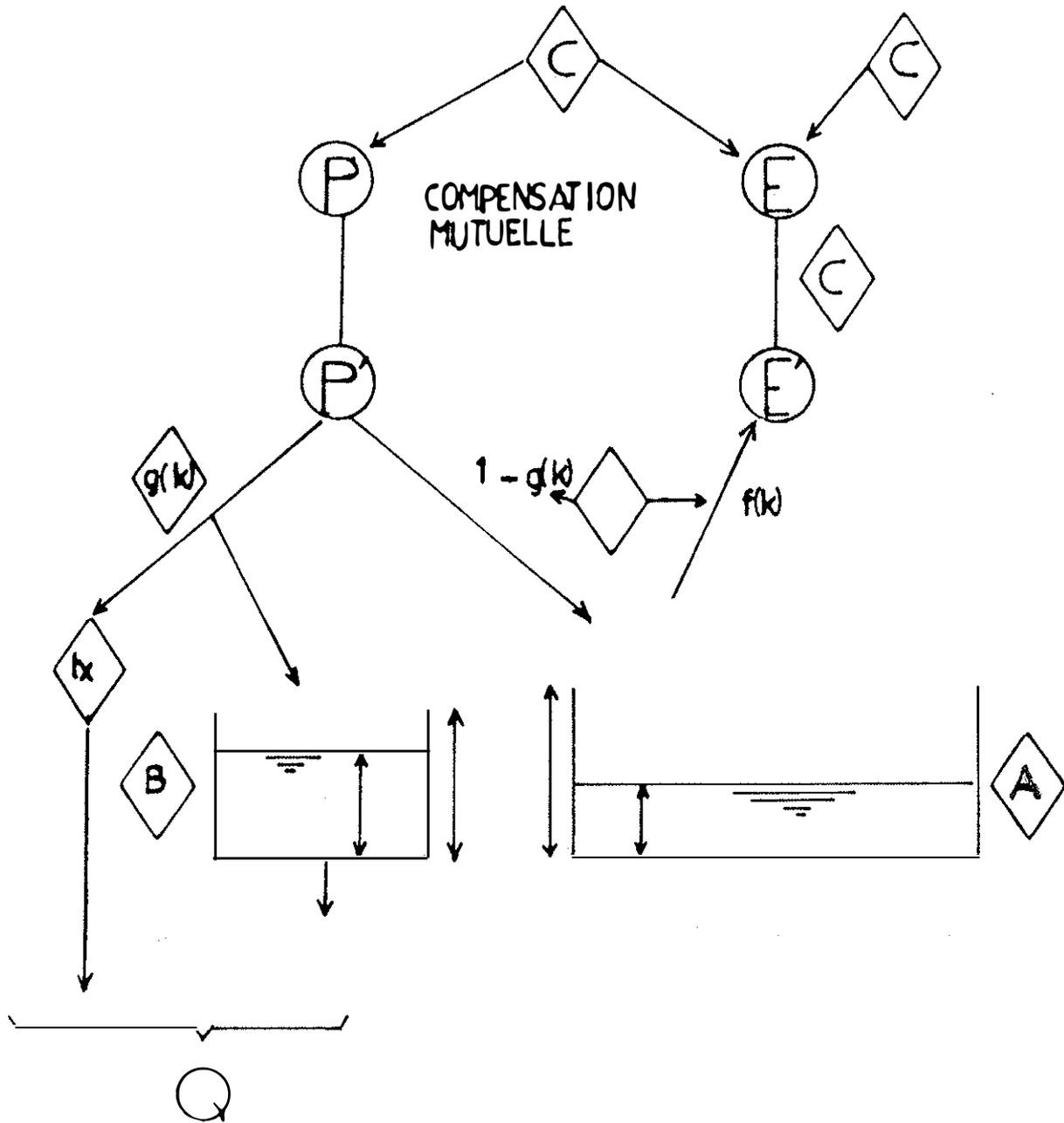


Figure 45 - Schéma d'ensemble des différents rôles que peut prendre le troisième paramètre

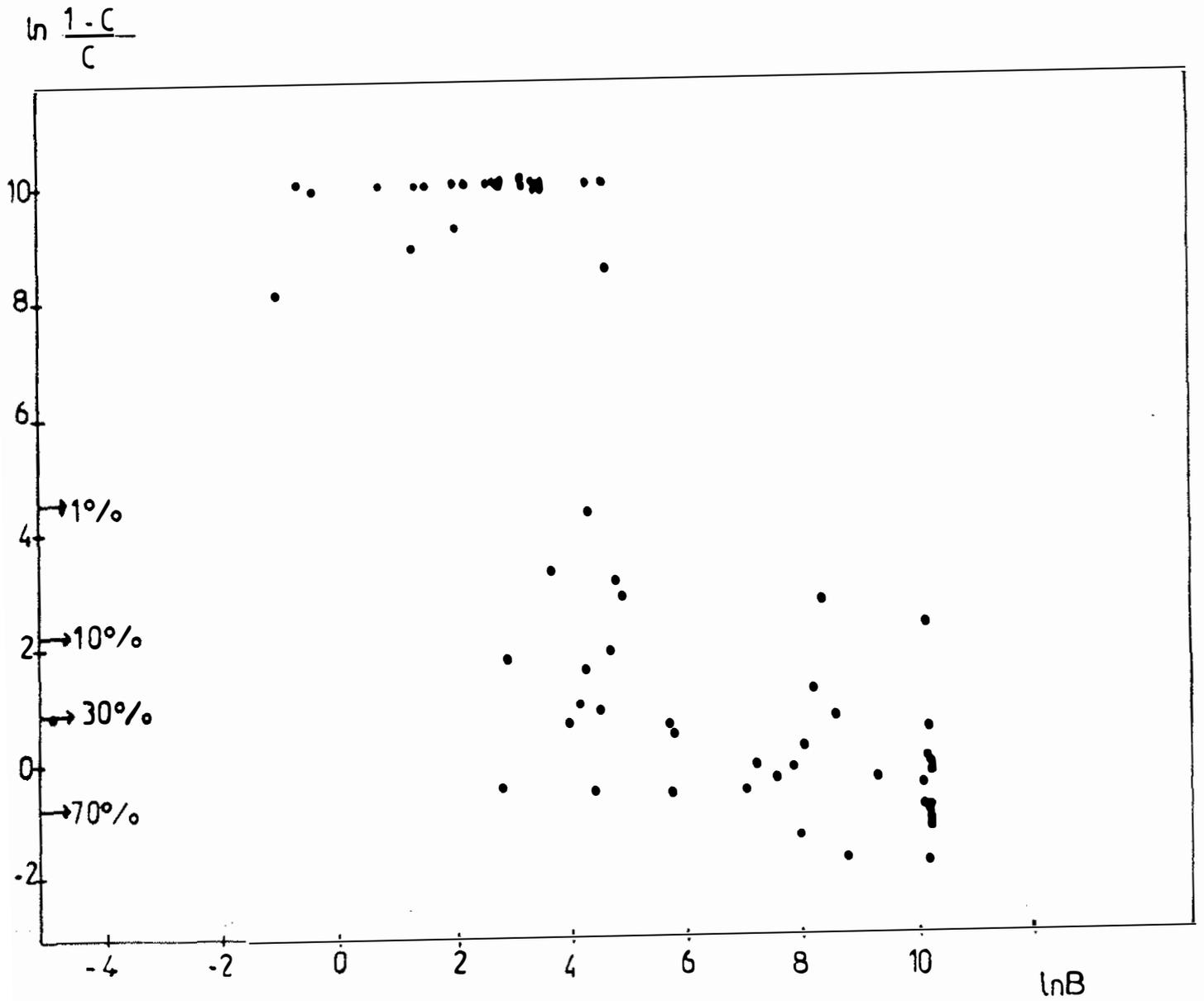


Figure 46 - Variante de c : écoulement pseudo-direct

conditions nous testerons les variantes qui suivent avec 3 taux différents 0, 30 et 50%.

4.9.2 - Neutralisation pluie-évaporation

Afin de respecter les conclusions déduites au paragraphe 4.5.1, nous proposons un schéma similaire à la version de base où le paramètre C est une neutralisation conjointe pluie-évaporation mais avec une différence fondamentale qui consiste à supprimer la neutralisation préalable.

Afin de ne pas préjuger du taux d'écoulement pseudo-direct à considérer pour l'ensemble des bassins versants, nous avons testé trois pourcentages fixes : 0%, 30% et 50%. Il est apparu, comme on peut le voir sur le tableau 40, le taux d'écoulement pseudo-direct conduisant au critère annuel moyen minimal est de 50% au lieu de 35% pour le modèle GRM3.

	Neutralisation pluie-évaporation			GRM3
	sans écoulement pseudo-direct (0%)	avec 30%	avec 50%	
critère annuel moyen	29.4	29.0	28.9	27.0

Tableau 40 : Variante de C : une neutralisation pluie-évaporation.

Ceci n'est pas surprenant, puisqu'en modifiant la forme de la neutralisation, les résultats obtenus ont également changé. Disons simplement que la neutralisation pluie-évaporation identifiée avec cette option varie de 0% à 99% et comparativement à la version GRM3, elle est significative pour un plus grand nombre de bassins versants modélisés (seulement 15 bassins versants affichent une valeur nulle pour C, au lieu de 40 bassins versants).

Par contre, les capacités du réservoir eau-gravitaire sont beaucoup plus variables que celles identifiées dans le modèle de base. Elle varient entre 10 mm à plus de 22 m avec une nette majorité ne dépassant pas 1 m.

4.9.3 - modification du rendement de la pluie

Précédemment, lors des vérifications des options adoptées dans le modèle de base, il est apparu que l'exposant de l'expression du coefficient d'écoulement est très variable d'un bassin à l'autre. A partir de cette remarque nous pouvons imaginer une nouvelle version plus générale où l'exposant n est optimisé pour chacun des bassins versants modélisés. Nous aboutissons à un éventail de courbes (figure 47) :

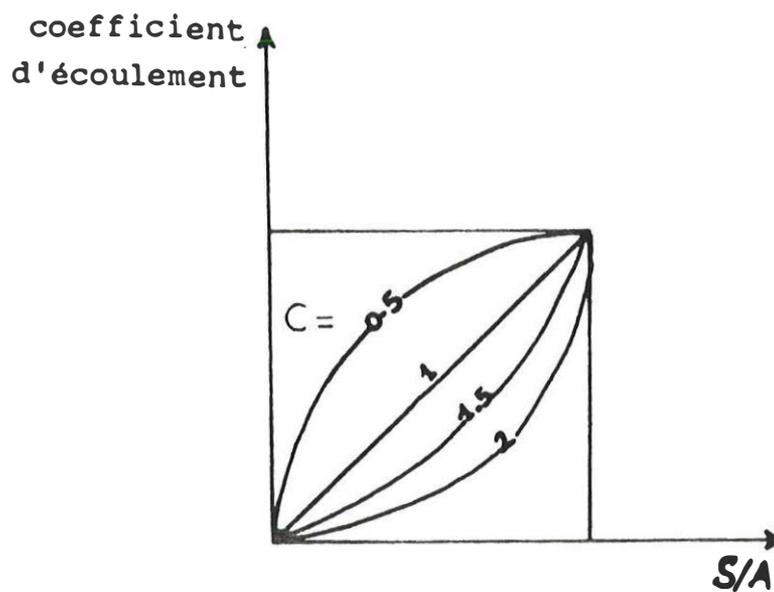


Figure 47 : différentes formes du coefficient d'écoulement
variante de C : modification du rendement de
la pluie

Le paramètre C aura donc pour fonction l'optimisation de l'exposant de la relation du coefficient d'écoulement.

Trois essais ont été réalisés avec des taux d'écoulement pseudo-direct de 0%, 30%, et 50%. Le tableau 41 montre que le critère annuel moyen minimal correspond au taux de 50%.

	rendement des pluies de forme variable			GRM3
	sans écoulement pseudo-direct	avec 30%	avec 50%	
critère annuel moyen	27.9	28.0	27.6	27.0

Tableau 41 : Variante de C : modification du rendement de la pluie

Ce résultat est très intéressant, puisqu'en comparant avec la version précédente dans laquelle le paramètre C correspondait à une neutralisation pluie-évaporation, il apparaît une amélioration sensible du critère : 27.6. au lieu de 28.9.

Les valeurs prises par C sont comprises ente 1 et 5 ; cependant pour un grand nombre de bassins versants, C est proche de 2.

4.9.4 - Modification du rendement de l'évaporation potentielle.

Dans ce paragraphe, nous allons essayer d'utiliser le 3ème paramètre pour adapter la formule du rendement de l'évaporation.

Jusqu'à présent, la fonction de réduction de l'évaporation potentielle en évaporation réelle est exprimée par l'expression suivante :

$$h = \frac{S}{A} * \left(2 - \frac{S}{A} \right)$$

Cette expression peut se mettre également sous la forme suivante :

$$h = 1 - \left[\frac{S}{A} \right]^c \quad \text{avec } C = 2 \text{ pour le modèle de base}$$

Nous allons essayer de caler l'exposant C pour chacun des bassins versants.

Rappelons que le rendement de la pluie est toujours égal à :

$$k = \left[\begin{array}{c} S \\ - \\ A \end{array} \right]^2$$

Nous présentons dans le tableau 42, les valeurs du critère annuel moyen pour chacun des trois taux d'écoulement pseudo-direct.

	Variation de la formule du rendement de l'évaporation			GRM3
	Sans écoulement pseudo-direct	avec 30%	avec 50 %	
critère annuel moyen	28.5	27.9	27.5	27.0

Tableau 42 : Variante de C : variation de la formule du rendement de l'évaporation potentielle

Du point de vue du critère global, les simulations obtenues avec variation de la fonction de rendement de l'évaporation potentielle, avec une fraction d'écoulement pseudo-direct de 50% sont comparables à celles obtenues avec modification du rendement de la pluie mais cependant en faveur de l'optimisation du rendement de l'évaporation potentielle.

L'analyse du calage relatif à la modification du rendement de l'évaporation potentielle sur l'ensemble des bassins versants de l'étude nous laisse faire les remarques suivantes en comparaison avec l'optimisation de la fonction du rendement de la pluie :

- les valeurs prises par C sont beaucoup plus variables que celles obtenues pour le rendement de la pluie : elles sont comprises entre 1 et 7 avec une moyenne de 3 si on excepte 4 bassins versants (n° 32, 51, 53 et 55) pour lesquels le paramètre C affiche des valeurs anormalement élevées,

- pour une dizaine de bassins versants modélisés, la capacité du réservoir-eau-gravitaire est inférieure à 1 mm; autrement dit pour ces bassins versants, il n'y a pas de report de l'écoulement sur le mois suivant ; la totalité de l'écoulement est pseudo-direct, il s'agit des bassins suivants: n°16, 18, 19, 20, 23, 26, 29, 30, 52, 56, 57. Ceci n'est pas inquiétant puisque le critère mensuel relatif à ces bassins est compris entre 38.6 et 53.9, ce qui les classe parmi les bassins versants dont la simulation est considérée comme satisfaisante,

- B a tendance à prendre des valeurs plus réalistes. On observe uniquement deux bassins versants présentant des valeurs de B supérieures à 22 m (les bassins n°21 et 40) au lieu de quatre pour la modification du rendement de la pluie (les bassins n°21, 23, 25 et 40). Pour le reste, les capacités ne dépassent pas 1m.

4.9.5 - Adaptation de l'évaporation potentielle :

Après les essais d'amélioration du modèle avec modification du rendement de la pluie ou de l'évaporation potentielle, la présente approche consiste à modifier les entrées du modèle. Compte-tenu de ce que nous avons constaté précédemment (annexe 20), à savoir que le rôle de l'information relative à l'évaporation potentielle est déterminante, nous allons intégrer dans la fonction de production, un module d'adaptation de l'évaporation potentielle chargé, par exemple, de compenser une mauvaise représentativité des données ou encore de prendre en compte l'hétérogénéité du bassin versant.

Pour cela, dans un premier temps, nous essayons d'étudier l'effet d'un traitement préalable de l'évaporation potentielle de deux façons différentes :

- a) une correction multiplicative globale,
- b) une correction additive globale

La qualité de l'ajustement de ce calage avec les deux traitements proposés est présentée dans le tableau 43 en considérant, comme pour les tests précédents, trois taux d'écoulement pseudo-direct.

	Traitement multiplicatif			traitement additif			GRM3
	% d'écoulement pseudo-direct			% d'écoulement pseudo-direct			
	0%	30%	50%	0%	30%	50%	
critère annuel moyen	28.3	26.9	27.2		27.6		27.0

Tableau 43 : Variante de C : Adaptation de l'évaporation potentielle

ce tableau nous permet de faire les remarques suivantes :

- contrairement aux essais précédents, relatifs au paramètre C, le taux d'écoulement pseudo-direct conduisant au critère minimal est de 30% au lieu de 50% pour les autres variantes.

- la comparaison du critère annuel moyen avec un taux d'écoulement pseudo-direct de 30% laisse apparaitre la supériorité du traitement multiplicatif où le gain est de 0,7% sur les 63 bassins versants modélisés

- par comparaison avec les premières variantes effectuées, il apparait une amélioration remarquable du critère annuel moyen.

Il est intéressant de comparer la version actuelle au modèle GRM3 où le paramètre C correspond à une neutralisation préalable pluie-évaporation en analysant la qualité de la simulation avec le critère mensuel, l'erreur sur le bilan et les valeurs prises par le paramètre C.

Comme pour le critère annuel moyen, l'amélioration de la simulation s'est traduite également par une nette amélioration du critère mensuel moyen qui passe de 52.1 à 49.8, soit un gain de 2,3% sur les 63 bassins versants modélisés. D'autre part, il est tout à fait réconfortant de constater que cette amélioration est généralement plus significative pour les bassins versants mal simulés présentant un critère mensuel supérieur à 75%. Sur le tableau 44, on observe qu'avec une adaptation de l'évaporation potentielle, le critère mensuel moyen sur les six

bassins versants, s'améliore de 5,5% et que l'erreur du bilan est plus faible (maximum 13% au lieu de 46%).

Evidemment on peut s'attendre aussi à ce que le paramètre B change avec le changement de structure du modèle. Par comparaison avec la neutralisation pluie-évaporation, seuls deux bassins versants (n°25 et 69) ont des capacités supérieures à 22 m et trois (n°19, 20, 26), ont des valeurs de B inférieures à 1 mm. Le critère mensuel est moins bon pour les bassins versants à capacité supérieure à 22 m que pour ceux où les capacités sont faibles (Ces capacités extrêmes révèlent que le modèle n'est pas adapté à ces bassins mais nous conservons ces bassins par souci d'exhaustivité).

N° B.V.	C neutralisation pluie-évaporation			C adaptation de l'ETP		
	critère mensuel %	erreur sur bilan %	valeur de Ln C	critère mensuel %	erreur sur bilan %	valeur de Ln C
24	91.2	26.0	0	81.1	3.3	2
25	76.5	7.5	0.19	67.9	- 8.3	1.6
40	87.5	7.7	0	88.1	3.7	1.2
45	81.0	11.6	0.2	81.8	- 2.2	1.3
47	85.9	46.6	0	78.6	8.1	0.58
66	113.7	34.8	0	105.5	13.4	1.4
moyenne	89.3	22.4	0.06	83.8	3.0	1.3

Tableau 44 : comparaison pour les B.V. mal simulés de l'adaptation de l'ETP à la neutralisation pluie-évaporation (modèle GRM3)

Avec le modèle GRM3, si l'on observe en particulier les valeurs obtenues pour les bassins versants mal simulés (cf tableau 44), on s'aperçoit que pour 4 bassins sur 6 les valeurs de Ln C sont nulles. Dans le cas de l'adaptation de l'évaporation potentielle, C semble avoir un rôle plus général puisqu'il est compris entre 0.58 et 2. Ces résultats témoignent du gain significatif obtenu, quant à la qualité des simulations, lorsqu'on intègre un module d'adaptation des données

d'évaporation potentielle à la fonction de production du modèle conceptuel pluie-débit appliqué à un climat semi-aride.

Mais malgré ces bons résultats, les valeurs du paramètre C identifiées semblent être trop fortes dans certains bassins versants où l'évaporation potentielle est diminuée ou augmentée d'un facteur de 2.

Pour essayer de pallier cette difficulté, nous allons voir si ces corrections globales d'évaporation ne peuvent pas être réduites en essayant conjointement une adaptation de la pluie. C'est ce que nous nous proposons d'étudier ci-après. Auparavant, pour montrer la supériorité d'une modification relative à l'évaporation potentielle par rapport aux précédentes variantes, nous regroupons dans le tableau 45 la valeur du critère annuel moyen sur les 63 bassins versants pour les cinq versions testées jusqu'à présent (avec 50% d'écoulement pseudo-direct, s'il n'est pas optimisé).

spécifications du paramètre C	Critère (%)
neutralisation pluie évaporation	28.9
rendement de la pluie	27.6
rendement de l'ETP	27.5
adaptation de l'ETP	27.2
écoulement pseudo-direct variable	33.6

Tableau 45 : critère annuel moyen pour 5 spécifications différentes du paramètre C.

4.9.6 - Correction des deux entrées du modèle

Nous nous proposons dans ce paragraphe, d'essayer d'affiner la variante précédente en procédant à une adaptation non seulement de l'évaporation potentielle mais aussi de la pluie. Deux approches sont alors possibles :

- correction simultanée des deux entrées du modèle dans des sens opposés ;
- diminution d'une entrée choisie de façon automatique :

l'évaporation potentielle ou la pluie.

4.9.6.1 - corrections opposées des deux entrées :

Les tests effectués précédemment ont démontré la nécessité d'une adaptation de l'évaporation potentielle, mais il est intéressant de voir si une correction conjointe de la pluie ne pourrait pas diminuer certaines valeurs fortes du facteur correctif de l'évaporation potentielle.

Pour ce faire nous avons effectué deux essais :

- a) un traitement multiplicatif des deux entrées
- b) un traitement multiplicatif des deux entrées mais en donnant plus de poids au facteur correctif de l'évaporation potentielle.

La solution a) conduit à un critère annuel moyen nettement moins bon que le calage réalisé avec une adaptation uniquement de l'évaporation potentielle, on passe de 26.9 à 28.1.

Par contre cet essai, n'est pas sans intérêt si on examine les valeurs prises par le paramètre C. La comparaison avec la version où C est une adaptation de l'évaporation potentielle seule laisse apparaître une certaine relation entre les corrections de la pluie et de l'évaporation potentielle.

On se trouve alors conduit au cas b) où nous considérons que la correction sur la pluie et celle sur l'évaporation potentielle ne doivent pas être identiques puisque les données d'évaporation potentielle sont plus incertaines. La relation proposée est alors :

$$E_C = 3 * P_c$$

où E_C = correction de l'évaporation potentielle

P_c = correction de la pluie

Bien que le critère annuel moyen se soit légèrement amélioré en comparaison avec la solution a) (27.5 au lieu de 28.1), le calage est moins bon qu'avec une adaptation de l'évaporation potentielle uniquement. Ceci peut être traduit par une sorte d'hétérogénéité spatiale, qu'elle soit artificielle ou réelle.

4.9.6.2 - Diminution de l'une des entrées : pluie ou évaporation potentielle.

Nous proposons une modification de l'une des deux entrées du modèle : soit une diminution de la pluie, soit une diminution de l'évaporation potentielle.

On réalise cela de la façon suivante :

$$\text{Si } C > 1 \implies E' = E - (C - 1)$$

$$\text{Si } 0 < C < 1 \implies P' = P - \left(\frac{1}{C} - 1 \right)$$

Dans le premier cas, on a une perte qui peut correspondre à une infiltration profonde.

Dans le second cas, une partie de l'évaporation potentielle reste sans effet.

Comme les essais précédents, ce calage a été effectué en considérant les trois pourcentages d'écoulement pseudo-direct. Il est apparu que les meilleures simulations vis à vis du critère annuel moyen correspondent au taux de 50% comme on peut le constater sur le tableau 46

	Réduction d'une entrée du modèle		
	Sans écoulement pseudo-direct	avec (30%)	avec (50%)
critère annuel moyen	27.9	26.9	26.5

Tableau 46 : corection d'une entrée du modèle

A peu de chose près, la modification d'une entrée unique, c'est-à-dire l'évaporation potentielle, ou la réduction de l'une des deux entrées : pluie ou évaporation potentielle, donnent lieu à des simulations comparables du point de vue du critère mensuel moyen et du critère annuel moyen. La similitude est très grande, mais les performances du modèle avec réduction de l'une des deux entrées, vis à vis de certains problèmes particuliers déjà observés, sont améliorées. C'est le cas des bassins versants mal simulés. Malgré une fonction critère qui reste supérieure à 75%, nous constatons une amélioration dans les

simulations : le critère mensuel moyen relatif à ces bassins versants est amélioré de 1.9%. De même, l'erreur sur le bilan est de moitié pour les bassins n°24 et 47. Il est important de constater que les valeurs du paramètre C identifiées avec réduction de l'une des deux entrées du modèle sont plus groupées que celles identifiées avec modification seulement de l'évaporation potentielle. C'est le but recherché dans cette version.

Enfin les capacités du réservoir eau-gravitaire sont relativement faibles : plus de la moitié des bassins versants modélisés ont des valeurs de B inférieures à 1m. Parmi ces bassins versants, un nombre non négligeable (7 bassins versants) ont des valeurs de B inférieures au mm, il s'agit des bassins n°16, 18, 23, 26, 35, 44 et 52 qui ont tous un critère mensuel meilleur que 55%.

Mais on note deux exceptions très nettes ; les bassins n°21 et 59 dont la valeur de B semble être anormalement forte et dépasse 22m ; cependant ces bassins versants présentent des critères mensuels respectifs de 69.4% et 30.7%.

4.9.7 - Conclusion :

En conclusion, l'utilisation du paramètre C qui consiste à introduire soit une diminution de l'évaporation potentielle soit une diminution de la pluie est "conceptuellement" plus réaliste. Cette version du modèle est nommée GR3M.

4.10 - VALIDATION DU MODELE GR3M ET DE SES PARAMETRES :

Les données disponibles étaient trop réduites pour réaliser une véritable validation sur un échantillon différent de celui du calage. La très grande parcimonie du modèle rend d'ailleurs cette opération moins impérieuse. On peut cependant avoir une idée de la consistance du modèle en effectuant une étude de sensibilité des paramètres d'un type bayésien (MEIN et BROWN, 1978).

En fait, nous avons réalisé l'approche simplifiée qui suit :

soient : $\{Q_i/i = 1, n\}$ les débits observés et soient $\{R_i/i = 1, n\}$ les débits calculés par le modèle pour le jeu de paramètres optimal $\{a, b, c\}$ où les lettres minuscules représentent les logarithmes des paramètres réels A, B et C. Considérons une modification de ξ (nous prendrons $\xi = 0.05$) d'un des paramètres a ou b ou c. Soient $\{R_{ai}/i = 1, n\}$ les

débites calculés avec le jeu $\{a + \xi, b, c\}$, $\{R_{bi}/i = 1, n\}$ les débits calculés avec le jeu $\{a, b + \xi, c\}$ et enfin : $\{R_{ci}/i=1, n\}$ les débits calculés avec le jeu $\{a, b, c + \xi\}$. Nous allons utiliser le modèle linéaire général pour relier l'erreur du modèle mensuel avec les variations de débits ainsi obtenues:

$$Q - R = \alpha \frac{R_a - R}{\xi} + \beta \frac{R_b - R}{\xi} + \gamma \frac{R_c - R}{\xi} + u$$

modèle où α, β, γ sont les variations optimales respectivement pour a, b, c et u est l'erreur de ce modèle linéaire.

L'intérêt de cette procédure n'est pas d'obtenir les corrections α, β et γ mais la matrice des variances-covariances de ces coefficients qui est approximativement celle des coefficients a, b et c .

Cette démarche donne des renseignements très précieux sur les précisions des paramètres ainsi que sur les "liaisons" entre eux.

Ces résultats ont été établis pour l'ensemble des 63 bassins étudiés et révèlent une assez bonne consistance pour les trois paramètres transformés a, b et c . Cela explique aussi la facilité avec laquelle la recherche dans l'espace $\{a, b, c\}$, aboutit sur le jeu optimal de paramètres.

L'ensemble de ces résultats figure en annexe 21.

4.11 - MODELE RETENU POUR L'ESTIMATION DES APPORTS DES COURS

D'EAU DE L'ALGERIE SEPTENTRIONALE

Nous étant fixé initialement l'objectif de simuler les apports annuels, nous avons constaté la nette supériorité des modèles conceptuels sur les modèles linéaires.

Comme point de départ pour l'architecture du modèle mensuel, disons simplement que nous sommes partis d'un modèle à 2 paramètres proche du modèle qui a servi de point de départ au modèle GR3j (EDIJATNO, 1990).

Par une recherche systématique et une application à un ensemble de 63 bassins versants, nous avons construit un modèle mensuel rustique, le modèle GR3M, dépendant de trois paramètres :

- 1) paramètre A : caractérisant la capacité maximale du réservoir-sol ;
- 2) paramètre B : caractérisant la capacité maximale du réservoir eau-gravitaire
- 3) paramètre C : adaptation de l'une des entrées du modèle.

L'architecture du modèle GR3M retenu est présentée en figure 48.

La progression du critère moyen entre le modèle linéaire, le modèle de référence à 2 paramètres et le modèle GR3M peut être suivie par la comparaison des distributions des erreurs obtenues par les 3 modèles sur les 63 bassins versants (figure 49).

Le modèle GR3M présente un critère annuel moyen égal à 26.5, et variant de 3.9 à 68.5%. Un seul bassin versant a une valeur supérieure à 50% (bassin n°45).

Quand au critère mensuel moyen il est égal à 49.9 et varie de 27.3 à 98.8%. Plus de la moitié des bassins versants ont une valeur du critère mensuel inférieure à 50%. Cependant 5 bassins (les n°24, 40, 45, 47 et 66) donne un résultat décevant puisque le critère mensuel est supérieur à 75%. Il est conseillé de procéder à une critique plus approfondie de ces données, le service gestionnaire pourra éventuellement faire ce contrôle.

4.12 - ESSAI D'EXPLICATION DES PARAMETRES DU MODELE GR3M

La transposition du modèle mensuel GR3M à des bassins versants non jaugés est conditionnée à l'explication des paramètres A, B et C.

Pour ce faire, il y a trois possibilités :

- vis-à-vis de chaque paramètre, essayer de déterminer une valeur régionale ;
- rechercher des liaisons entre les paramètres eux-mêmes ;

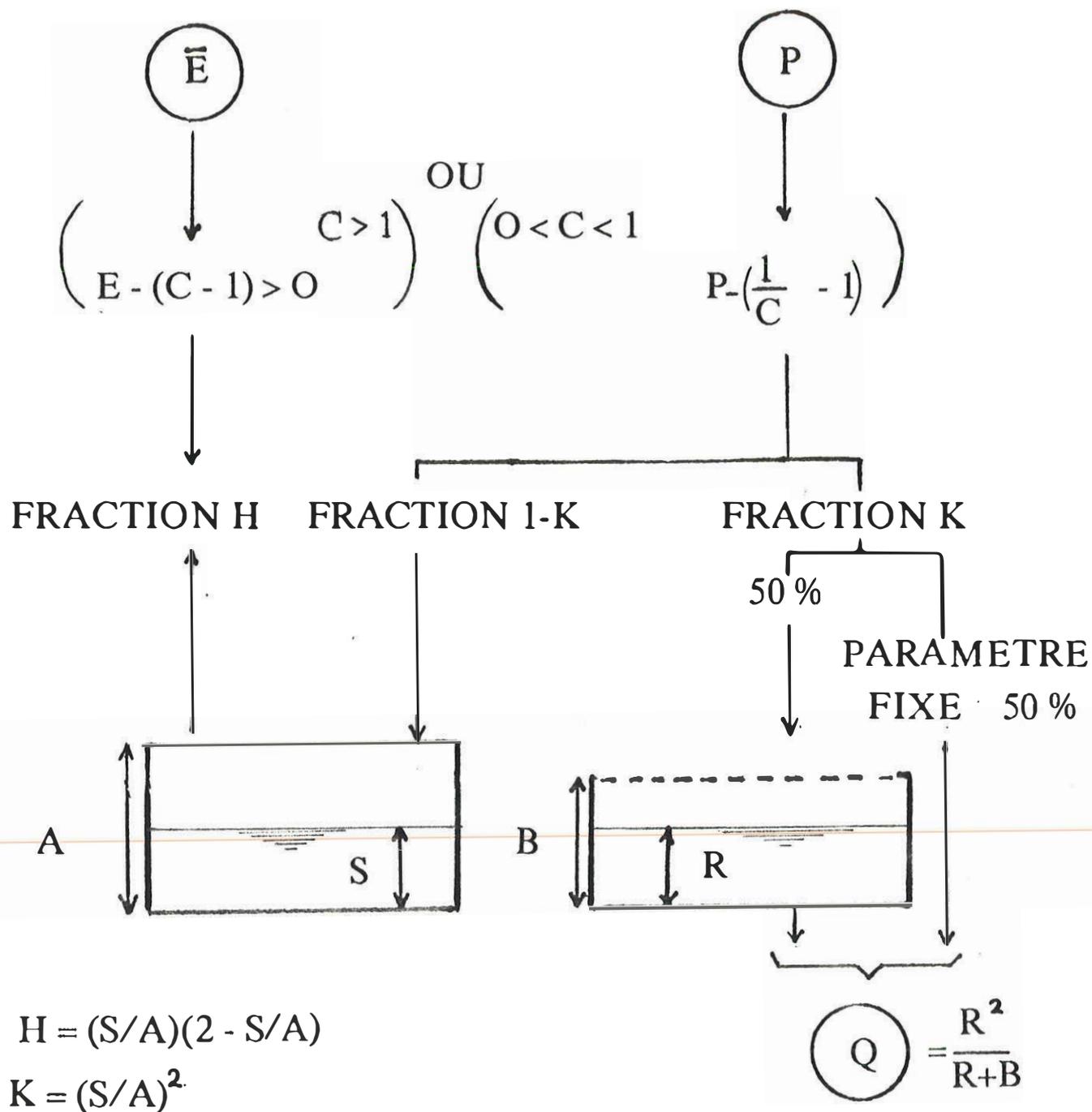


Figure 48 : Architecture du modèle mensuel retenu : GR3M

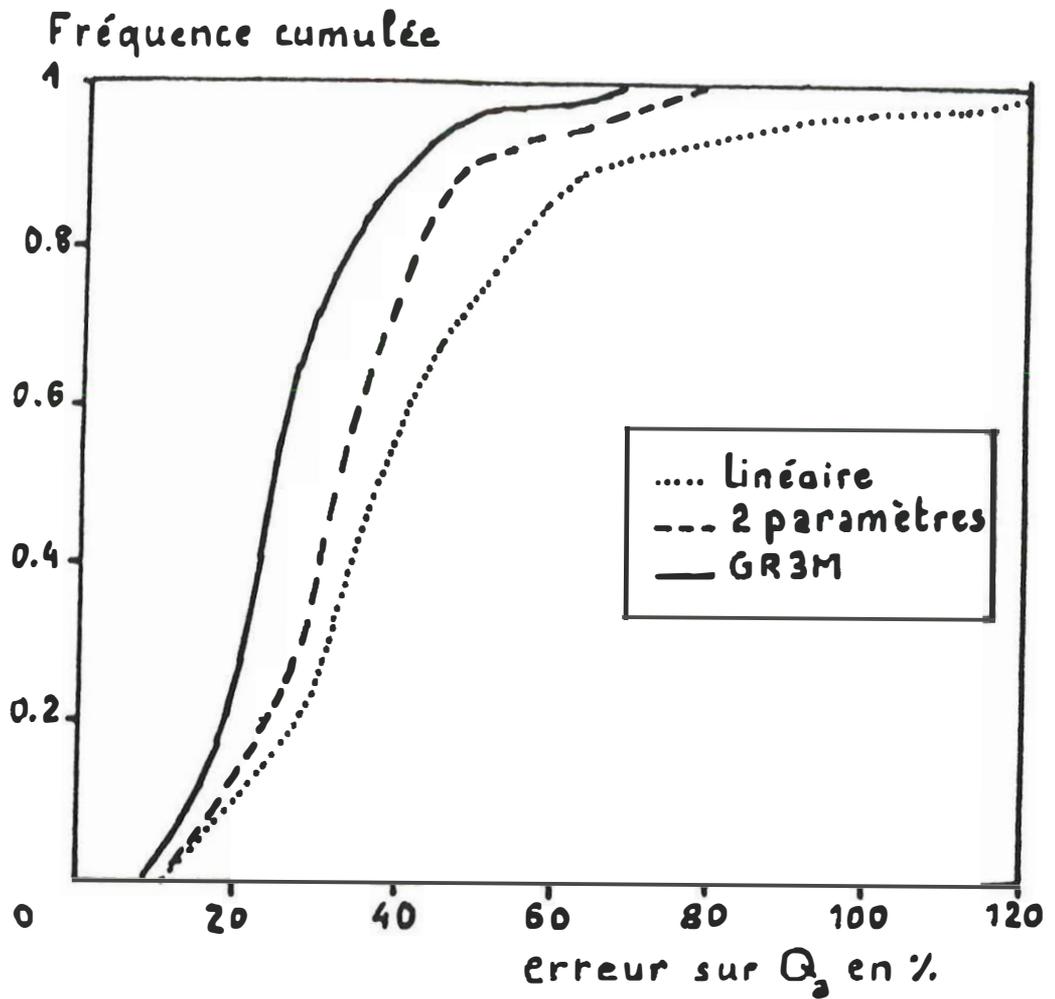


Figure 49 - Comparaison des distributions des erreurs pour 3 modèles

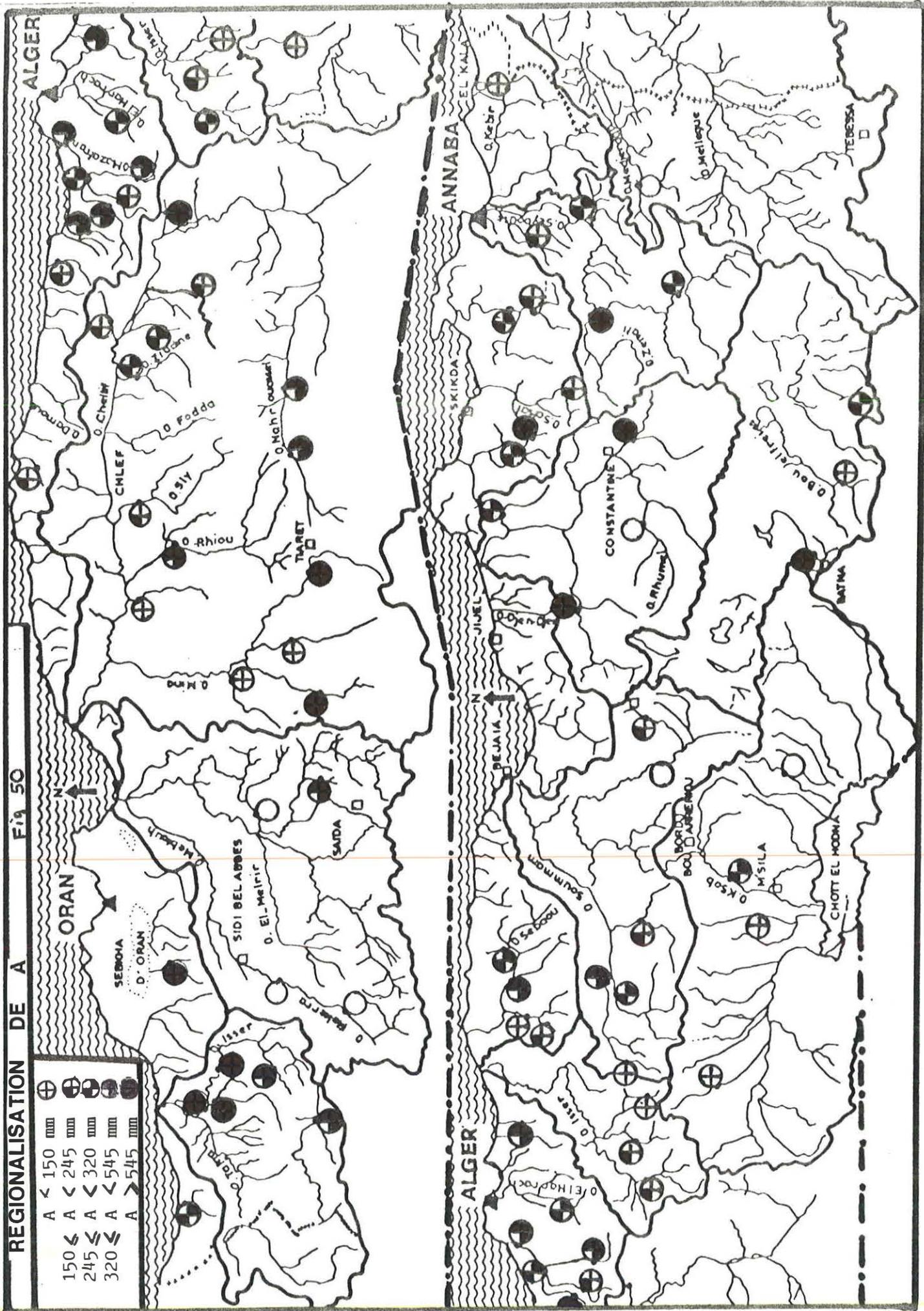
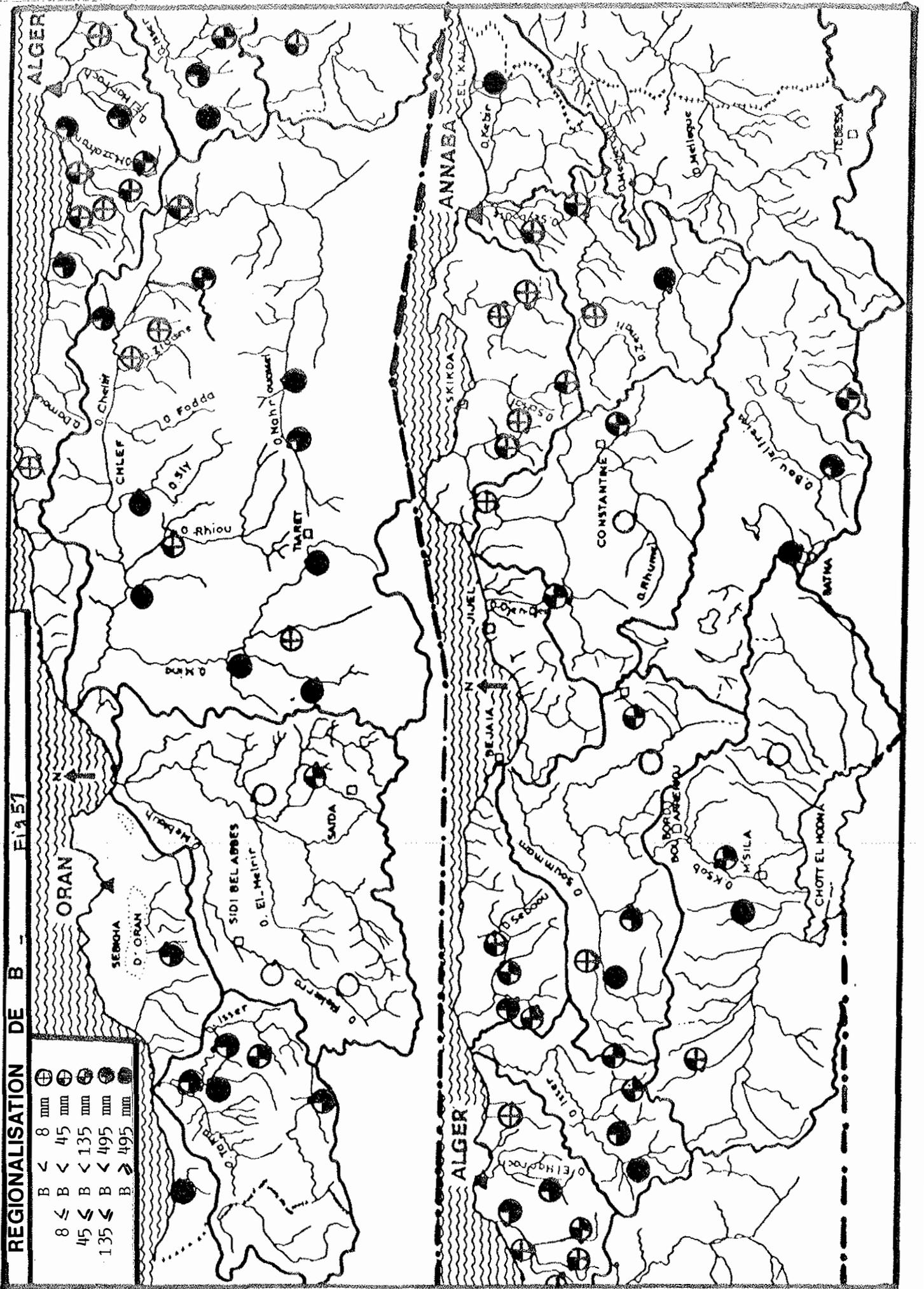


Fig 50

REGIONALISATION DE A



REGIONALISATION DE B - F1457

- B < 8 mm
- 8 ≤ B < 45 mm
- 45 ≤ B < 135 mm
- 135 ≤ B < 495 mm
- B ≥ 495 mm

- rechercher des relations entre les paramètres du modèle et certaines caractéristiques des bassins versants.

Dans cette recherche, nous allons essayer de procéder à une régionalisation de chacun des 3 paramètres du modèle GR3M et de les expliquer par la géologie.

4.12.1- Essai de régionalisation des paramètres du modèle GR3M

La régionalisation des paramètres est basée sur le constat d'une éventuelle constance d'un paramètre dans une région donnée. Le but est de repérer si une valeur moyenne est acceptable dans une région pour chacun des paramètres. Pour faire apparaître de façon simple et plus concrète les valeurs des paramètres, nous les avons fait figurer chacun sur une carte après les avoir regroupés par classes.

a) Paramètre A :

Les valeurs du paramètre A, variant de 104 à 4866 mm ont été réparties en 5 classes :

- 1) $A < 150$ mm
- 2) $150 < A < 245$ mm
- 3) $245 < A < 320$ mm
- 4) $320 < A < 545$ mm
- 5) $A > 545$ mm

Nous avons représenté sur la figure 50, le paramètre A ainsi classé. Force est de constater qu'aucune grande région hydrologique ne rassemble des paramètres d'une même classe.

b) Paramètre B :

Le paramètre B varie de 0.2 à 7044 mm si on excepte 7 valeurs extrêmes.

Comme pour le paramètre A, les valeurs du paramètre B ont été regroupées en 5 classes :

- 1) $B < 8$ mm
- 2) $8 < B < 45$ mm
- 3) $45 < B < 135$ mm
- 4) $135 < B < 495$ mm

5) $B > 495 \text{ mm}$

La figure 51, montre, comme pour le paramètre A, qu'il est impossible de définir des régions homogènes.

c) Paramètre C :

Variant de 0.02 à 0.98, le paramètre C a été réparti dans les cinq classes suivantes:

- 1) $C < 0.07$
- 2) $0.07 < C < 0.83$
- 3) $0.83 < C < 0.93$
- 4) $0.93 < C < 0.96$
- 5) $C > 0.96$

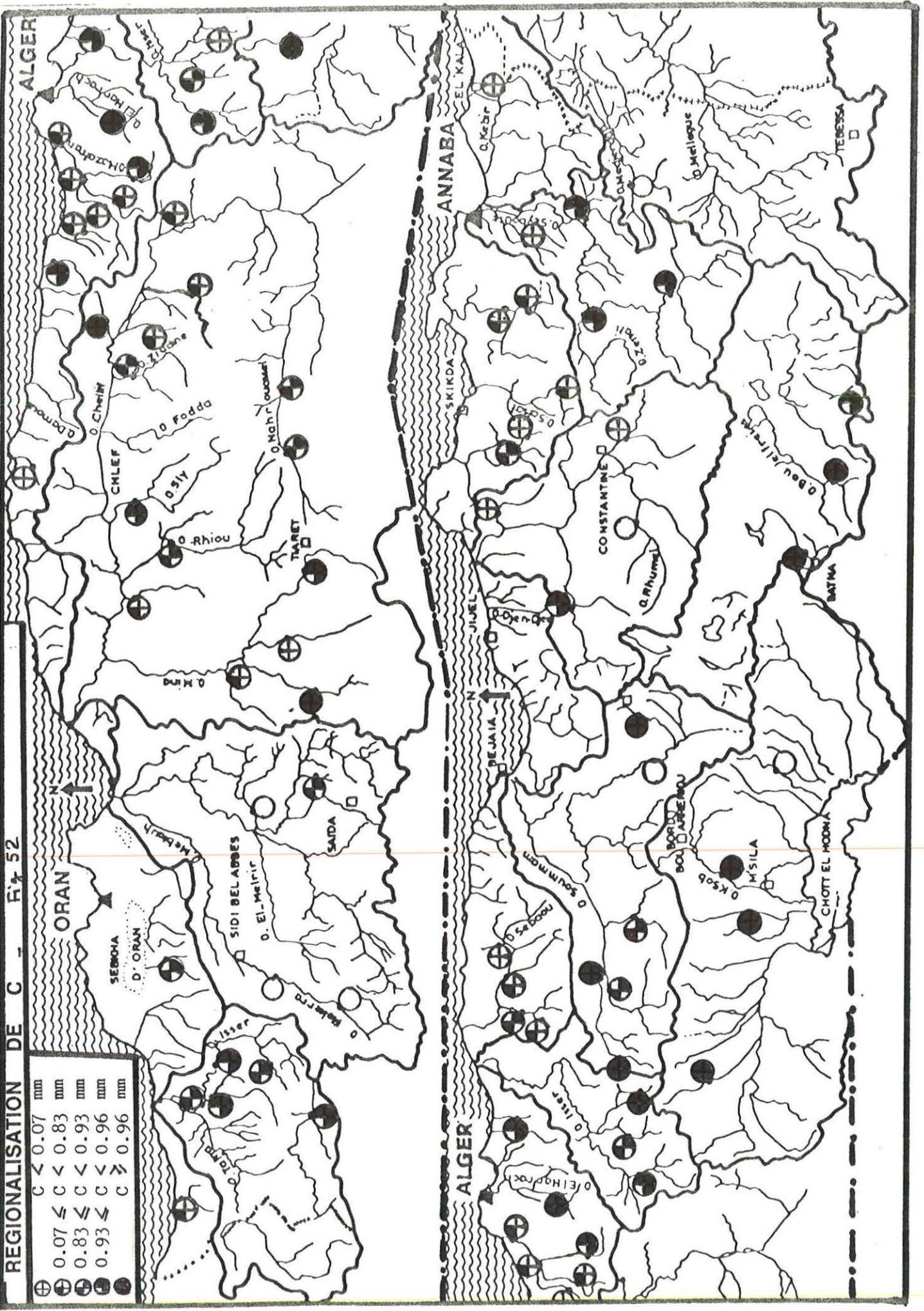
Comme pour les deux premiers paramètres, on ne voit aucune possibilité de régionalisation pour le paramètre C. La présentation de la figure 51 montre une très grande variabilité spatiale de C.

L'analyse des 3 cartes précédentes (figures 50 à 52) montre que la régionalisation des paramètres ne semble pas possible.

Il est possible que des régions homogènes existent, mais d'une taille plus petite, dont l'identification aurait nécessité le recours à un nombre beaucoup plus important de bassins versants.

REGIONALISATION DE C - F 52

⊕	$C < 0.07$	mm
⊕	$0.07 \leq C < 0.83$	mm
⊕	$0.83 \leq C < 0.93$	mm
⊕	$0.93 \leq C < 0.96$	mm
⊕	$C \geq 0.96$	mm



4.12.2 - Relation entre les paramètres de la géologie :

Puisque la régionalisation paraît difficile, on a essayé de voir si en superposant une carte géologique de la région aux cartes précédentes on pouvait identifier différentes formations géologiques correspondant aux différentes classes de paramètres.

Par exemple, pour le paramètre A, on pourrait penser que la capacité du réservoir-sol varie avec la nature du sol et donc que chaque classe d'un paramètre corresponde à une formation géologique. Or quand on superpose par exemple la carte relative au paramètre A et la carte géologique on n'arrive pas à expliquer la dispersion.

4.12.3 - Conclusion :

Ce que l'on vient de présenter est un essai de transposition du modèle GR3M à des bassins versants non jaugés. On pourrait faire la même chose avec la morphoclimatologie mais cela constitue une recherche à part entière, qui sort du cadre de cette recherche.

Ce qu'il faut retenir de cette tentative, c'est que même avec un modèle aussi simple que GR3M, il restera probablement difficile d'expliquer les paramètres d'un modèle conceptuel.

CONCLUSION GENERALE

Le but initialement fixé à ma recherche pouvait apparaître comme "gagné d'avance" vu le caractère élémentaire du sujet traité. En effet, l'estimation d'un écoulement annuel moyen devrait constituer le B-A-BA de toute étude hydrologique. Cependant, même pour un objectif aussi simple, les embûches ont été nombreuses et quatre années de recherche n'ont pas été de trop pour obtenir les résultats qui ont été présentés ici.

Parmi les embûches, on trouve en premier lieu, les difficiles problèmes relatifs au rassemblement des données, à leur critique et au comblement des lacunes qu'elles laissent inévitablement apparaître. Ces difficultés familières aux hydrologues sont néanmoins accrues dans les régions aux caractéristiques climatiques très contrastées et très irrégulières. Une autre série d'embûches est liée au caractère très globalisant d'une échelle de temps annuelle. Même si l'inégalité de répartition est commune à toutes les variables considérées il est difficile d'en trouver un descripteur global efficace. Enfin, la dernière série d'embûches, relative à la partie centrale de la thèse, concerne la modélisation pluie-débit et la difficulté que l'on ressent à échapper aux modèles linéaires dont l'usage est si répandu et la construction si pratique. Cependant les résultats obtenus par ces méthodes étant assez pauvres, nous avons été contraints à une analyse un peu plus conceptuelle et à la prise en compte systématique de données au pas de temps mensuel. Dans cette démarche, les résultats obtenus par un modèle linéaire élémentaire ont servi de point de référence pour juger des progrès accomplis. La difficulté inhérente à la modélisation conceptuelle est la non pertinence des a-prioris physiques qui ne peuvent que suggérer des constructions vraisemblables mais non certaines.

Cela conduit le chercheur à un examen attentif des non-concordances entre les variables modélisées et les variables observées et à des retouches interminables portées au modèle proposé. C'est ce travail laborieux qui est le garant d'une certaine consistance de l'outil patiemment élaboré et que l'on a tenu à restituer malgré ses lourdeurs et ses répétitions.

Fort heureusement, tout ce travail n'a porté que sur un modèle très simple dont le nombre de paramètres a été volontairement limité à 3, sans quoi, la mise au point aurait été beaucoup plus longue pour une même pertinence.

Mais cette contrainte de temps n'est pas l'explication fondamentale du nombre limité des paramètres. Deux autres raisons plus impérieuses nous ont conduit à une restriction aussi sévère. D'abord l'expérience que les données généralement disponibles n'autorisent pas une sophistication bien supérieure. Ensuite le fait que les paramètres descriptifs de la transformation pluie-débit doivent pouvoir être reliés statistiquement à des caractéristiques locales ou régionales pour permettre les prédictions demandées dans les régions dépourvues de données.

Cette dernière étape n'a pas été entreprise du fait de la faiblesse des moyens disponibles comparativement à ce qui aurait été nécessaire pour réussir une telle entreprise. On peut seulement conjecturer que la robustesse et la simplicité du modèle proposé seront de nature à améliorer grandement les conditions dans lesquelles cette recherche complémentaire pourra se développer. Mais d'ores et déjà, l'outil élaboré pourra rendre des services appréciables dans l'extension des données ou leur simulation pour élaborer et analyser des scénarios d'aménagement de la ressource en eau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADJEL A. et ISMAIL R., (1985)
Etude de l'apport moyen des petits bassins versants de l'Algérie Septentrionale. I.S.T. de l'U.S.T.U.B. d'Alger.
- ALLEY W.M., (1985)
Water balance models in one month ahead streamflow forecasting. Water Resources Research, 21 (4) : 596-606.
- BOIS, (1976)
"Hydrologie de l'Ingénieur". Session de perfectionnement de l'Ingénieur, Septembre 1976, INP de Grenoble
- CEMAGREF, (1989)
Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. CEMAGREF, Section hydrologie-hydraulique fluviale et souterraine d'ANTONY.
- CHAUMONT M., (1963)
Carte des précipitations annuelles moyennes au 1/500 ème ramenée à la période de 50 ans du 01.09.191 au 31.08.1963.
- CLARK R.T., (1973)
Mathematical models in hydrology FAO consultant. Institute of hydrology, Wallingford, United Kingdom. 275p.
- CORMARY et al (1970)
Modèles déterministes des relations pluie-débit sur la Sioule. Note 30/69, LNH, EDF, Faculté de Sciences de MONTPELLIER, 35pp.
- COUTAGNE A., (1949)
Contribution à l'étude de l'écoulement en Algérie. Annuaire Hydrologique 1947-48 S.C.E.G.G.T.
- DE FLOTTE DE ROIQUEYAIR, (1926)
Carte pluviométrique des pluies en Algérie
- DEMMAK, (1982)
"Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Septentrionale".
Thèse de Docteur Ingénieur présentée à l'Université P. et M. Curie, 318 pp.
- DERI J., (1977)
Etude générale de la ressource en eau en Algérie. Note manuscrite + annexes A.N.R.H.

- DIB K.R. et CANEDO P. (1985)
 Modèle pluie-débit, une nouvelle version.
 VI Symposium Brésilien d'Hydrologie et des Ressources
 hydriques.
 Symposium International des Ressources Hydriques dans les
 régions métropolitaines.
- DUBREUIL P., (1974)
 Initialisation à l'analyse hydrologique.
- EDIJATNO, MICHEL C., (1989)
 Un modèle pluie-débit journalier à 3 paramètres.
 La Houille Blanche, 2 : 113-121.
- EDIJATNO, (1990)
 Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas
 de temps journalier.
 Rapport de thèse, Université de STRASBOURG
- FOURMIER F., (1960)
 Climat et érosion. P.U.F.
- GUILBOT A., (1971)
 Processus d'optimisation en 4 étapes appliqué à la
 recherche des paramètres des modèles déterministes, note
 L.H.M. 16/71, Université de MONTPELLIER, 25p.
- GUILLOT P., (1971)
 Quelques remarques sur l'utilisation des modèles
 mathématiques pour la prévision en hydrologie et
 météorologie.
- I.N.R.H., (1972)
 Annuaire Hydrologique de l'Algérie - 1971-1972
- JACQUET J., (1971)
 Aspects généraux de la représentation mathématique des
 phénomènes en hydrologie de surface (exposé introductif).
 La Houille Blanche, 2 : 105-110.
- LARSON CL. et al, (1982)
 Some particular watershed models in Hydrologic modeling of
 small watersheds of American Society of Agricultural
 Engineers 410-428 p.
- LINSLEY RK., (1982)
 Rainfall-runoff Models : An Overview
 In Rainfall-Runoff Relationships
 of Water Resources Publications.
- MAILHOL JC., (1980)
 Notice d'utilisation du programme d'optimisation.
 Note interne CTGREF, ANTONY, 17-10-80, 11pp.

- MASSON JM., (1977)
 Définition d'une méthodologie d'analyse régionale des débits moyens objectif et plan d'étude.
 Rapport de mission du 5 au 20.11.1977.
 Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
 MONTPELLIER. 51p.
- Mc CABE G.J. Jr., AYERS M.A., (1989)
 Hydrologic effects of climate change in the Delaware River Basin.
 Water Resources Bulletin, 25 (6) : 1231-1242.
- MEDINGER G., (1948)
 Tableau général de l'hydrologie algérienne dans Hydrologie Algérienne, recueil des observations de 1924 à 1946 S.C.E.G.G.T.
- MEIN R.G., BROWN B.M., (1978) v.
 Sensitivity of optimised parameters. In Watersheds Models Water Resources Research, 14 (2) : 299-303.
- MICHEL C., (1983)
 Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ?
 La Houille Blanche, N°1, pp.39-44.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE FRANCAIS, (1977)
 Techniques des barrages en aménagement rural.
- PADOUN (1974)
 Le module interannuel et le bilan hydrologique des oueds de l'Algérie septentrionale. Résumé de thèse de troisième cycle.
 Traduction du Russe : A.N.R.H., Alger, 26p.
- PROMON (1987)
 Etude hydrologique pour le site de KRAMIS.
- RAUDKIVI A.J., (1979)
 Hydrology and advanced introduction to hydrological process and modelling.
 Pergamon Press, London, 479 pp.
- ROCHE, (1963)
 Hydrologie de surface.
 Gauthier Villars. 390 p.
- ROCHE M., (1971)
 Les divers types de modèles déterministes.
 La Houille Blanche, 2 : 111-129.
- ROCHE et COLOMBANI
 Modèles conceptuels utilisés dans les méthodes hydrologiques.
 Technical reports to the commission of hydrology n°21
 World Meteorologic Organisation.

- ROSENBROCK H.H., (1960)
An Automatic Method for finding the greatest or least value of a function.
The Computer Journal. Vol 3, 175-184.
- SAMER RIFAAT, (1980)
Comparaison de plusieurs techniques de reconstitution de débits mensuels.
E.P.F.L. Lausanne rapport de stage.
- SELTZER P., (1938)
Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/1000 000ème d'après les moyennes brutes de 25 années agricoles du 01.09.1913 au 31.08.1938.
- SERVAT, DEZETTER et LAPETITE, (1989)
Modélisation pluie-débit. Etude et sélection des critères de calage des modèles pluie-débit, programme ERREAU, note 2. ORSTOM-IIRSDA.
- SHAAKE J.C. Jr., CHUZHEN L., (1989)
Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources. IAHS, 181 : 343-352.
- THIERY D., (1985)
Analyse et modélisation des bassins versants de la Moselle française.
Modélisation de 40 bassins versants et analyse de sensibilité du calage.
Service géologique national.
Bureau de Recherches Géologiques et Minières - Orléans.
- THOMAS H.A., (1981)
Improved methods for national water assessments.
Report to U.S. Water Resources Council. Contr. W R15249270, U.S. Water Ressour. Counc. Washington, (1989).
- THORNTHWAITE C. et MATHER J., (1955)
The water balance, publications in climatology, 8, c.w. thornthwaite associates, Laboratory of Climatology, Centerton, NJ.
- VAN DE GRIEND A.A., (1979)
Modelling catchment response and runoff analysis.
Institute of Earth Sciences.
Free University Amsterdam, the Netherlands.
- WOOLHISER et al, (1982)
Hydrologic modeling of small watersheds.
Of American Society of Agricultural Engineers. 3-15pp.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 - Localisation des stations hydrométriques sélectionnées
- Figure 2 - Période d'observation des 70 stations hydrométriques sélectionnées
- Figure 3 - Le modèle SMAP
- Figure 4 - Organigramme du modèle CREC
- Figure 5 - Modèle CREC - version à 10 paramètres
- Figure 6 - Modèle de BOUGHTON
- Figure 7 - Modèle $\tau\alpha$ d'ALLEY
- Figure 8 - Architecture du modèle linéaire [JOHN C. SHAAKE et CHUNZHEN, 1989]
- Figure 9 - Architecture du modèle non linéaire [JOHN C. SHAAKE et CHUNZHEN, 1989]
- Figure 10 - Module observé et calculé par le modèle non linéaire [JOHN C. SHAAKE et CHUNZHEN, 1989]
- Figure 11 - Relation entre Y_i et W_i du modèle ABCD de THOMAS
- Figure 12 - Architecture du modèle ABCD de THOMAS
- Figure 13 - Rendement de la pluie et de l'évaporation MICHEL - EDIJATNO, Houille Blanche
- Figure 14 - Schéma d'ensemble du modèle de référence GR3j
- Figure 15 - Architecture du modèle GRM1 - modèle de base
- Figure 16 - Essai de régionalisation des paramètres du modèle linéaire
- Figure 17 - Répartition géographique des échantillons réduits
- Figure 18 - Résultats de la simulation de GRM1 affiché sur l'écran
- Figure 19 - Simulation issue de GRM1 sur les données existantes
- Figure 20 - Les erreurs du modèle GRM1 mois par mois
- Figure 21 - Module observé et calculé sur les 6 B.V.

- Figure 22 - BV n°5: lame mensuelle moyenne observée et calculée
- Figure 23 - BV n°24 : lame mensuelle moyenne observée et calculée
- Figure 24 - BV n°26 : lame mensuelle moyenne observée et calculée
- Figure 25 - BV n°29 : lame mensuelle moyenne observée et calculée
- Figure 26 - BV n°58 : lame mensuelle moyenne observée et calculée
- Figure 27 - BV n°69 : lame mensuelle moyenne observée et calculée
- Figure 28 - BV n°5 : écart-type des débits observés et calculés
- Figure 29 - BV n°24 : écart-type des débits observés et calculés
- Figure 30 - BV n°26 : écart-type des débits observés et calculés
- Figure 31 - BV n°29 : écart-type des débits observés et calculés
- Figure 32 - BV n°58 : écart-type des débits observés et calculés
- Figure 33 - BV n°69 : écart-type des débits observés et calculés
- Figure 34 - Débit hivernal observé et calculé sur les 6 BV
- Figure 35 - Débit estival observé et calculé sur les 6 BV
- Figure 36 - Recherches du niveau initial du réservoir de routage
- Figure 37 - Les deux possibilités de dérivation d'une fraction de la pluie
- Figure 38 - Evolution du critère en fonction du taux d'écoulement pseudo-direct
- Figure 39 - Fonction de répartition du paramètre A
- modèle GRM2
- Figure 40 - Fonction de répartition du paramètre B
- modèle GRM2
- Figure 41 - Fonction de répartition du paramètre C
- modèle GRM2

- Figure 42 - Écoulement pseudo-direct en fonction de la neutralisation pluie-évaporation modèle GR2M
- Figure 43 - Paramètre C a un rôle complémentaire possible si la neutralisation pluie-évaporation arrive au maximum. Le troisième paramètre sert à définir l'écoulement pseudo-direct
- Figure 44 - Variante du modèle GARDENIA
- Figure 45 - Schéma d'ensemble des différents rôles que peut prendre le troisième paramètre
- Figure 46 - Variante de C : écoulement pseudo-direct
- Figure 47 - Différentes formes du coefficient d'écoulement variante de C : modification du rendement de la pluie
- Figure 48 - Architecture du modèle mensuel retenu : GR3M
- Figure 49 - Comparaison des distributions des erreurs pour 3 modèles
- Figure 50 - Régionalisation de A
- Figure 51 - Régionalisation de B
- Figure 52 - Régionalisation de C
- Figure 53 - Carte géologique très schématique

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Liste des 70 stations hydrométriques
- Tableau 2 : Répartition des bassins par région
- Tableau 3 : Répartition des stations en fonction des superficies des bassins versants
- Tableau 4 : Exemple de détection d'anomalies
- Tableau 5 : Représentativité des postes pluviométriques
- Tableau 6 : Amélioration des corrélations par augmentation des séries débimétriques
- Tableau 7 : Critique de la station ARIB (17)
- Tableau 8 : Critique de la station de DJIDIOUIA (21) et de SIDI ALI BEN AMAR (22)
- Tableau 9 : Postes pluviométriques les plus représentatifs
- Tableau 10 : Amélioration des résultats par comblement des lacunes des débits pour les BV considérés comme fiables
- Tableau 11 : Amélioration par détermination des postes pluviométriques représentatifs
- Tableau 12 : Comparaison de diverses formules anciennes en regard des valeurs observées
- Tableau 13 : Bassins versants où le modèle (1) est inadéquat
- Tableau 14 : Synthèse des principaux résultats de 5 modèles linéaires
- Tableau 15 : Comparaison de 2 nouveaux modèles climatiques
- Tableau 16 : Comparaison des résultats des modèles (1), (5) et (8)
- Tableau 17 : Différentes modalités d'introduction de la pluie mensuelle maximale
- Tableau 18 : Comparaison de différentes variables pluviométriques synthétiques
- Tableau 19 : Détermination de la pondération optimale de P_{mx}
- Tableau 20 : Exemple de simulation du modèle SMAP

- Tableau 21 : Application du modèle de BOUGHTON avec 13, 10, 7 et 3 paramètres [MEIN et BROWN]
- Tableau 22 : Initialisation du réservoir-sol du modèle GRM1
- Tableau 23 : Caractéristiques des bassins versants de l'échantillon réduit
- Tableau 24 : Extrait du fichier débit
- Tableau 25 : Calage de référence (GRM1) de l'échantillon réduit
- Tableau 26 : Comparaison du modèle linéaire et du modèle conceptuel GRM1
- Tableau 27 : Comparaison des différentes versions de neutralisation pluie-évaporation
- Tableau 28 : Comparaison des lois de vidange linéaire et quadratique
- Tableau 29 : Dégradation des performances du modèle suite à la modification de 20% des variables d'entrées
- Tableau 30 : Correction des entrées du modèle GRM1
- Tableau 31 : Comparaison des 2 formules du critère mensuel
- Tableau 32 : Modèle mensuel avec introduction d'une fraction de la pluie participant directement à l'écoulement
- Tableau 33 : Détermination du pourcentage fixe de pluie participant directement à l'écoulement
- Tableau 34 : Résultats des simulations de GRM2 sur les 68 BV
- Tableau 35 : Correction des entrées du modèle pour les bassins versants ayant A "hors limites"
- Tableau 36 : Influence de l'initialisation sur la capacité du réservoir-sol
- Tableau 37 : Essai de limitation de B par une correction des entrées
- Tableau 38 : Nouvelle initialisation du réservoir-sol
- Tableau 39 : Comparaison des performances de différents modèles
- Tableau 40 : Variante de C : une neutralisation pluie-évaporation
- Tableau 41 : Variante de C : modification du rendement de la pluie

- Tableau 42 : Variante de C : variation de la formule du rendement de l'évaporation potentielle
- Tableau 43 : Variante de C : adaptation de l'évaporation potentielle
- Tableau 44 : Comparaison pour les BV mal simulés de l'adaptation de l'ETP à la neutralisation pluie-évaporation (modèle GRM3)
- Tableau 45 : Critère annuel moyen pour 5 spécifications différentes du paramètre C
- Tableau 46 : Correction d'une entrée du modèle

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Résultats des 5 premiers essais de modélisation linéaire : modèle (1) à (5)
- Annexe 2 : Résultats des modèles (6) et (7)
- Annexe 3 : Résultats des modèles (9), (10) et (11)
- Annexe 4 : Résultats de l'irrégularité annuelle moyenne des débits du bassin versant du Chélif
- Annexe 5 : Apport interannuel observé et calculé par SMAP
- Annexe 6 : Programme du modèle mensuel GR3M : GR3M.FOR
- Annexe 7 : Dérivation de la fraction de pluie destinée à s'écouler directement dans le cours d'eau avant rendement par le réservoir-sol
- Annexe 8 : Détermination de la fraction d'écoulement pseudo-direct pour les 6 bassins tests
- Annexe 9 : Comparaison du critère mensuel de GRM2 où C a 2 rôles : - rôle principal : neutralisation pluie-évaporation
- rôle secondaire : l'écoulement pseudo-direct
- Annexe 10 : Programme du modèle SMAP
- Annexe 11 : Programme du modèle GARDENIA
- Annexe 12 : Programme du modèle MNL
- Annexe 13 : Programme du modèle $T\alpha$
- Annexe 14 : Programme du modèle ABCD
- Annexe 15 : Résultats des simulations issues du modèle SMAP
- Annexe 16 : Résultats des simulations issues du modèle GARDENIA
- Annexe 17 : Résultats des simulations issues du modèle MNL
- Annexe 18 : Résultats des simulations issues du modèle $T\alpha$

- Annexe 19 : Résultats des simulations issues du modèle ABCD
- Annexe 20 : Tests complémentaires sur le modèle GRM3
- Annexe 21 : Résultats des simulations issues de GR3M

Résultats des 5 premiers essais de modélisation linéaire :
modèle (1) à (5)

N° des BV	Modèle (1)			Modèle (2)			Modèle (3)		
	R	E.S	T.S	R	E.S	T.S	R	E.S.	T.S
3	0.868	5.75	5.6	0.936	5.51	2.9 0.5	0.915	5.40	1.9 0.8
4	0.760	4.87	3.7	0.902	4.84	1.8 0.8	0.892	4.81	2.3 1.2
5	0.835	3.18	5.5	0.920	3.09	3.4 -0.7	0.916	3.10	3.1 0.5
6	0.932	4.76	7.3	0.983	3.18	3.3 1.6	0.974	3.57	3.2 1.6
7	0.843	3.58	4.7	0.919	4.19	2.9 0.0	0.936	3.94	3.4 0.4
9	0.852	0.530	5.4	0.920	0.588	4.7 -0.4	0.928	0.505	4.7 0.5
10	0.805	2.27	3.6	0.911	2.05	3.6 -0.9	0.904	2.31	3.0 -0.5
11	0.655	0.428	2.1	0.840	0.552	2.2 0.8	0.920	0.464	2.2 1.8
12	0.253	1.86	0.7	0.870	1.02	0.0 2.9	0.640	1.30	1.1 -0.8
13	0.351	1.62	1.1	0.690	1.46	1.9 0.9	0.638	1.52	0.6 0.5
14	0.876	7.24	5.1	0.973	6.37	4.9 2.4	0.990	5.98	10.0 2.4
15	0.727	8.66	3.7	0.919	6.58	4.5 -2.3	0.860	8.06	3.1 0.7
16	0.778	5.53	3.5	0.869	4.97	2.8 -0.1	0.869	4.96	2.5 -0.1
18	0.827	5.87	4.7	0.896	4.08	3.0 0.8	0.916	3.94	4.2 -0.4
19	0.888	10.5	6.1	0.966	7.75	6.2 0.2	0.942	9.02	5.7 -0.2
20	0.714	8.95	2.7	0.924	6.98	4.2	0.929	6.23	5.1

						0.4			-0.5
21	0.72	2.2	2.4	0.955	1.56	3.6 -2.3	0.997	0.526	4.6 -8.5
22	0.44	3.40	1.4	0.881	1.13	1.7 0.4	0.862	1.38	2.0 -0.3
23	0.905	3.04	7.1	0.963	2.26	7.0 -1.0	0.952	2.41	6.4 -0.8
24	0.814	0.617	4.0	0.944	0.302	2.2 0.3	0.951	0.321	4.9 -1.1
25	0.789	1.19	3.6	0.837	1.05	2.2 -0.4	0.888	1.03	2.7 -0.1
26	0.930	5.28	8.4	0.966	5.48	7.7 1.3	0.956	5.60	6.6 1.5
27	0.869	11.5	6.4	0.953	9.41	7.2 0.8	0.943	9.84	6.6 1.4
28	0.889	5.28	6.2	0.944	4.36	5.2 0.8	0.950	4.17	5.3 1.2
29	0.923	5.29	7.6	0.940	5.15	4.8 -0.4	0.972	4.03	6.7 0.4
30	0.877	11.1	5.8	0.948	10.3	5.0 0.3	0.949	10.2	5.4 0.5
31	0.934	6.67	7.9	0.966	5.22	5.8 0.5	0.977	5.06	7.3 0.7
32	0.689	2.01	3.0	0.849	27.3	3.0 -0.2	0.880	25.35	2.7 1.3
33	0.924	7.14	6.4	0.979	6.50	7.5 -0.5	0.976	7.10	4.6 1.8
36	0.858	28.3	5.0	0.957	26.1	4.6 2.1	0.923	26.82	4.0 -0.5
37	0.906	10.5	4.8	0.929	9.17	2.6 0.3	0.925	10.1	1.7 -0.1
38	0.889	9.58	4.3	0.972	11.5	3.0 0.4	0.937	4.31	2.4 -0.8
39	0.877	9.09	4.1	0.937	10.1	3.6 0.1	0.946	12.30	2.8 0.2
40	0.751	4.79	2.5	0.960	3.10	5.9 -0.4	0.942	3.53	4.3 -0.2
41	0.618	11.1	2.5	0.940	10.27	1.8 1.1	0.986	8.27	6.7 4.3

42	0.881	3.50	5.3	0.973	3.26	6.4 -0.3	0.956	4.02	5.5 0.5
43	0.808	8.62	9.9	0.970	7.81	4.7 3.8	0.988	6.09	8.8 5.2
44	0.904	13.7	7.3	0.955	12.18	6.7 0.1	0.961	11.67	7.4 -0.5
45	0.803	10.3	3.8	0.911	9.64	3.2 -0.2	0.933	9.20	3.9 -1.2
47	0.760	12.4	3.5	0.782	14.5	1.9 -0.4	0.801	13.7	2.2 0.2
48	0.649	1.19	1.9	0.865	0.826	2.1 1.1	0.810	1.04	1.4 -0.4

R : Coefficient de corrélation

E.S : Erreur standard en pourcentage de la pluie

T.S : Rapports de Student pour chacun des coefficients de régression des variables explicatives

modèle (1) : $Q = A_0 + A_1 P$

modèle (2) : $Q = A_0 + A_1 P + A_2 P(-1)$

modèle (3) : $Q = A_0 + A_1 P + A_2 Q(-1)$

N° des BV	Modèle (4)			Modèle (5)		
	R	E.S.	T.S.	R	E.S.	T.S.
3	0.914	6.21	0.9 0.2 0.5	0.946	3.74	0.7 2.8
4	0.913	4.98	1.8 0.1 0.8	0.987	1.98	1.3 .2.6
5	0.928	3.11	3.2 - 1.1 0.9	0.969	1.73	1.8 5.1
6	0.984	3.70	1.8 - 0.4 0.7	0.987	2.44	- 1.2 3.1
7	0.936	4.06	2.9 - 0.9 1.2	0.978	2.13	2.8 4.5
9	0.941	0.51	4.1 - 1.2 1.4	0.950	0.37	1.5 1.8
10	0.929	2.26	3.3 - 1.1 0.8	0.900	2.15	2.2 0.4
11	0.920	0.53	1.7 - 0.1 1.4	0.959	0.30	- 0.6 3.7
12	0.815	1.17	0.1 1.6 - 0.1	0.884	0.97	- 0.4 3.1
13	0.697	1.60	0.8 0.7 0.2	0.879	0.99	1.6 2.9
14	0.992	2.85	7.0 1.2 0.1	0.948	5.72	2.0 1.2
15	0.924	7.05	4.0 - 1.8 0.6	0.920	5.21	1.3 1.9
16	0.869	5.44	2.3	0.950	3.15	2.1

			0.0 - 0.1			2.8
18	0.941	3.42	3.6 2.1 - 2.0	0.953	3.02	1.8 2.4
19	0.978	5.66	6.5 1.6 - 1.8	0.990	3.46	1.0 6.4
20	0.959	5.66	3.6 2.1 - 2.2	0.984	3.11	0.2 5.3
21	0.997	0.711	2.0 - 0.3 - 2.4	0.934	1.73	0.8 2.0
22	0.881	1.51	1.0 0.6 - 0.5	0.948	0.75	1.7 1.2
23	0.970	2.26	6.1 1.0 - 1.3	0.929	0.87	2.0 1.7
24	0.948	0.32	1.1 0.2 0.5	0.944	0.45	2.9 2.1
25	0.848	1.12	2.0 0.2 - 0.5	0.889	1.03	1.8 0.2
26	0.960	5.90	5.7 - 0.4 0.9	0.989	3.11	6.9 3.9
27	0.954	9.77	6.5 0.0 0.4	0.967	7.32	0.9 2.4
28	0.950	4.41	5.0 - 0.4 0.9	0.979	3.32	0.5 3.9
29	0.958	4.98	4.5 0.0 0.0	0.986	2.94	1.5 2.8
30	0.949	10.8	4.8 - 0.3 0.4	0.953	9.40	2.1 1.7
31	0.966	5.69	5.3 - 0.1 0.2	0.988	3.54	1.5 3.8

32	0.9.15	23.1	2.5 - 1.5 2.0	0.952	15.9	0.0 4.2
33	0.981	3.06	5.7 - 0.2 0.0	0.995	2.51	1.0 6.5
36	0.995	6.70	4.2 1.2 - 1.4	0.986	15.0	0.6 2.1
37	0.939	9.91	1.4 0.4 - 0.4	0.963	8.44	1.0 1.1
38	observation insuf.			0.994	3.30	2.5 6.3
39	0.947	17.3	1.7 0.1 - 0.1	0.940	9.81	1.5 0.5
40	0.955	2.62	3.9 - 0.6 0.5	0.985	1.41	0.9 3.3
41	observation insuf.			0.924	7.27	0.5 1.1
42	0.981	3.0	7.0 - 1.3 1.4	0.984	2.47	0.6 3.3
43	0.992	2.81	9.7 1.4 2.4	0.951	5.57	1.0 3.3
44	0.967	8.85	7.2 0.8 - 0.9	0.984	5.88	2.8 4.1
45	0.958	7.37	3.9 1.1 - 1.5	0.969	4.38	- 0.2 3.8
47	0.832	13.5	1.8 - 1.1 1.0	0.964	6.81	- 0.1 3.5
48	0.913	0.93	1.9 1.3 - 1.1	0.925	0.71	0.5 1.9

Modèle (4) : $Q = A_0 + A_1P + A_2P(-1) + A_3Q(-1)$

Modèle (5) : $Q = A_0 + A_1P + A_2Q_v$

Résultats des modèles (6) et (7)

N° des BV	Modèle (6)			Modèle (7)		
	R	E.S.	T.S.	R	E.S.	T.S.
3	0.927	5.53	5.0	0.932	5.09	4.3 0.2
4	0.90	4.57	3.9	0.878	5.05	2.2 0.6
5	0.871	3.59	3.9	0.923	2.98	3.6 1.1
6	0.980	3.13	8.4	0.980	3.20	2.9 2.2
7	0.890	4.46	3.7	0.936	3.57	3.2 1.4
9	0.721	0.898	1.9	0.927	0.549	4.1 -0.7
10	0.786	2.68	2.1	0.898	2.17	2.8 0.2
11	0.812	0.534	2.1	0.831	0.564	2.0 -0.7
12	0.745	1.21	1.9	0.507	1.51	0.7 0.1
13	0.688	1.36	1.4	0.618	1.44	1.0 0.4
14	0.965	4.55	6.8	0.936	6.29	4.8 -0.2
15	0.540	11.0	1.0	0.906	6.47	2.7 2.2
16	0.789	5.49	2.1	0.890	4.48	3.4 -0.6
18	0.851	4.40	3.0	0.970	2.39	5.7 3.9
19	0.901	9.79	3.9	0.951	8.44	3.6 1.2
20	0.832	9.02	2.7	0.956	6.45	2.8 2.3

21	0.643	3.91	0.9	0.975	1.10	-0.9 3.9
22	0.873	2.70	3.1	0.893	1.08	1.3 0.9
23	0.790	4.49	2.4	0.953	3.36	6.2 0.6
24	0.934	0.298	4.4	0.910	0.559	2.3 0.7
25	0.729	1.15	1.7	0.930	0.839	3.4 1.9
26	0.830	10.8	3.0	0.969	5.29	7.2 1.3
27	0.833	15.5	3.4	0.933	10.6	6.0 -0.1
28	0.875	5.85	3.6	0.956	4.86	6.5 -1.5
29	0.823	6.61	3.3	0.963	4.53	6.8 0.8
30	0.898	13.1	4.1	0.936	10.7	5.3 -0.4
31	0.894	8.12	3.5	0.969	5.73	7.1 0.8
32	0.674	33.1	1.5	0.869	24.7	2.1 1.4
33	0.767	6.55	1.8	0.961	7.12	5.6 0.1
36	0.927	23.8	4.8	0.933	27.1	4.4 -0.8
37	0.456	8.43	0.4	0.965	8.26	2.1 1.2
38	0.862	13.2	2.2	0.985	8.30	1.9 3.6
39	0.704	16.3	1.3	0.945	9.47	3.1 -0.7
40	0.853	3.76	2.6	0.974	1.83	7.1 2.0
41	0.862	8.32	1.6	0.956	8.52	2.6 3.1

42	0.868	6.02	2.8	0.977	2.76	7.9 3.3
43	0.962	6.11	7.0	0.932	8.59	3.8 1.7
44	0.859	14.3	3.6	0.957	8.65	6.5 -1.3
45	0.849	8.78	2.8	0.90	7.49	3.0 -0.5
47	0.525	15.2	0.8	0.909	11.4	2.2 1.6
48	0.725	0.965	2.0	0.896	0.741	2.7 -1.6

modèle (6) : $Q = A_0 + A_1 [P + P(-1)]$

modèle (7) : $Q = A_0 + A_1 P + A_2 \frac{Pm^2}{P}$

N° des BV	Modèle (9)			Modèle (10)			Modèle (11)		
	R	E.S	T.S	R	E.S	T.S	R	E.S.	T.S
3	0.870	5.06	5.6 0.4	0.869	5.08	2.6 0.3	0.876	6.28	4.0
4	0.768	5.09	3.0 0.5	0.770	5.07	1.7 0.6	0.928	5.51	3.0
5	0.848	3.02	5.4 1.0	0.849	3.01	2.3 1.0	0.776	3.45	4.4
6	0.956	3.35	6.3 1.9	0.958	3.28	1.5 2.1	0.971	3.55	8.0
7	0.876	3.58	4.8 1.4	0.875	3.60	2.1 1.4	0.894	4.19	4.0
9	0.854	0.56	5.1 - 0.3	0.857	0.55	3.1 - 0.6	0.834	0.738	3.2
10	0.806	2.17	3.3 0.2	0.806	2.17	2.0 0.2	0.801	2.61	2.2
11	0.679	0.57	1.6 - 0.6	0.705	0.55	2.2 - 0.8	0.179	0.71	- 0.1
12	0.270	1.50	0.7 0.2	0.257	1.50	0.5 0.1	0.445	1.43	0.6
13	0.374	1.45	1.0 0.3	0.397	1.43	0.3 0.5	0.618	1.35	1.2
14	0.877	6.29	4.5 - 0.2	0.877	6.29	4.5 - 0.2	0.557	11.6	0.9
15	0.829	6.32	4.5 2.4	0.826	6.35	1.1 2.3	0.897	6.42	4.7
16	0.786	4.52	3.3 - 0.5	0.789	4.50	2.8 - 0.6	0.676	6.10	1.5
18	0.930	2.56	6.7 3.5	0.946	2.26	3.4 4.3	0.933	3.26	5.6
19	0.907	7.35	6.4 1.3	0.916	7.41	1.9 1.3	0.930	8.31	5.5
20	0.898	5.41	5.7	0.914	5.0	1.0	0.951	4.98	6.7

			1.8			2.3			
21	0.810	2.57	1.7 2.8	0.749	2.79	- 1.2 2.4	0.825	2.86	2.5
22	0.563	2.57	1.6 1.1	0.578	2.54	0.0 1.2	0.760	2.38	2.0
23	0.914	2.28	7.0 1.0	0.908	2.36	4.1 0.6	0.855	3.67	3.6
24	0.824	0.57	3.8 0.6	0.827	0.56	0.8 0.7	0.90	0.55	3.9
25	0.867	0.84	4.5 1.9	0.852	0.88	1.2 1.6	0.903	0.90	4.0
26	0.945	5.07	9.1 1.6	0.940	5.25	4.5 1.3	0.893	8.72	4.5
27	0.870	10.6	6.1 0.2	0.870	10.6	5.2 - 0.1	0.678	18.4	1.9
28	0.909	4.95	6.6 - 1.4	0.908	5.0	5.5 - 1.3	0.698	9.85	1.8
29	0.929	4.51	7.5 0.9	0.928	4.52	5.2 0.8	0.819	8.56	2.9
30	0.877	10.8	5.4 0.1	0.879	10.7	4.3 - 0.4	0.823	17.9	2.1
31	0.939	5.71	7.8 0.8	0.939	5.75	5.3 0.8	0.823	11.6	2.8
32	0.738	25.4	3.0 1.2	0.754	24.7	1.1 1.4	0.846	25.0	3.2
33	0.925	7.09	5.8 0.2	0.925	7.09	4.1 0.2	0.819	12.8	2.4
36	0.867	26.19	4.9 - 0.7	0.870	23.3	3.6 - 0.8	0.778	35.4	2.3
37	0.922	8.77	3.3 0.9	0.931	8.28	1.2 1.2	0.951	8.64	4.8
38	0.960	6.19	5.2 2.9	0.961	6.04	0.6 3.0	0.978	5.64	7.5
39	0.883	9.88	3.7 - 0.4	0.892	9.49	2.2 - 0.7	0.864	12.5	2.5
40	0.948	1.74	7.2 2.0	0.948	1.75	5.3 2.0	0.810	4.01	2.3
41	0.882	10.3	3.2 2.3	0.924	8.39	1.0 3.2	0.950	8.41	4.7

42	0.951	2.87	8.1 3.1	0.953	2.81	5.3 3.2	0.858	5.89	3.1
43	0.873	8.44	4.7 1.8	0.877	8.33	2.7 1.9	0.851	11.2	3.0
44	0.908	9.03	6.8 - 0.7	0.911	8.87	4.9 - 1.0	0.821	15.2	3.2
45	0.805	7.58	3.5 - 0.3	0.810	7.49	2.3 - 0.5	0.798	9.23	2.3
47	0.811	10.7	3.9 1.4	0.817	10.6	0.8 1.5	0.894	10.4	4.0
48	0.794	0.76	2.6 - 1.5	0.853	0.73	2.6 - 1.7	0.545	1.06	0.7

Modèle (9) : $Q = A0 + A1P + A2Pmx/P$

Modèle (10) : $Q = A0 + A1P + A2Pmx$

Modèle (11) : $Q = A0 + A1Pmx$

N° des BV	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
IQ	4	4	4	5	5	3	4	4	4	4	2	4	2	3

Résultats de l'irrégularité annuelle moyenne des débits du bassin
versant du Cheliff

Apport interannuel observé et calculé par SMAP

N°	B.V	F m %	apport interan.	
			simulé (mm)	observé (mm)
1		31.9	23.6	47.8
2		113.7	5.6	20.7
3		67.9	49.8	85.2
4		47.0	66.3	97.7
5		68.3	29.6	50.1
6		52.4	49.0	87.0
7		58.7	41.5	61.8
8		97.5	3.9	4.0
9		89.9	13.4	13.4
10		88.1	8.1	19.9
11		78.1	15.6	15.7
12		95.9	7.9	15.0
13		108.2	8.6	16.9
14		39.6	86.5	102.3
15		56.6	70.0	83.8
16		49.6	38.7	50.9
17		80.1	243.0	313.0
18		48.9	51.4	58.3
19		59.1	88.4	115.2
20		53.0	68.3	81.5
21		86.2	24.0	25.0
22		110.2	15.9	28.6
23		52.8	18.2	21.0
24		145.1	2.4	6.3

25	105.7	7.1	13.4
26	43.8	103.1	108.6
27	65.8	169.3	221.6
28	48.8	63.4	71.9
29	38.2	103.0	105.3
30	45.9	140.0	151.8
31	36.4	132.5	138.3
32	45.2	282.3	336.2
33	43.6	113.3	120.3
34	43.0	191.0	277
35	38.2	323.2	356.5
36	41.5	295.5	326.7
37	34.5	328.1	335.1
38	33.7	139.1	130.8
39	65.0	252.7	223.2
40	100.0	18.2	29.1
41	61.5	58.7	102.9
42	95.8	52.3	49.4
43	64.2	57.9	74.5
44	63.5	122.2	148.6
45	83.9	19.4	30.6
46	86.2	21.9	31.1
47	96.5	75.6	118.9
48	92.8	8.2	9.2
49	77.9	69.8	98.8
50	123.3	10.6	23.8
51	49.7	3.2	6.0
52	49.7	151.5	175.4
53	46.6	143.8	172.4

54	61.4	74.1	70.8
55	34.0	100.4	118.3
56	49.9	98.4	94.9
57	35.7	121.1	112.5
58	55.3	278.0	308.0
59	42.3	7.1	17.2
60	66.8	43.2	61.0
61	56.8	142.2	219.2
62	39.5	105.5	67.6
64	79.9	50.2	73.9
65	55.5	32.5	67.0
66	95.8	12.7	22.6
68	76.5	18.8	17.3
69	73.1	12.9	23.7
70	51.0	28.9	53.0


```

C*****
c Nom du prog:GR3M.FOR :modèle mensuel *Loi de vidange
quadratique
C X1=parametre du réservoir SOL
C X2=parametre du réservoir EAU-GRAVITAIRE
c X3=parametre de correction d'une des 2 entrées du modèle
C*****
      DIMENSION Q(100,12),P(100,12),E(12),C(100,12)
      DIMENSION X(6)
      DIMENSION RM(12),RS(12),RR(12)
      DIMENSION QSIG(12),CSIG(12),qom(12),qcm(12)
      dimensionqy(300),qx(9,300),er(300),core(9)
      +,zr(9,9),sco(9)
      dimension qo(300),qc(300),qcc(300),xd(6)
      CHARACTER QUOI*80
      character *12 NOMP,NOMQ,NOME,NOMQU,nmp,nmq,nme
      character gr3n*10
      logical qui
100 FORMAT(F6.0,3A12)
400 FORMAT(' paramètres de GR3M : X1=',F6.2:'
      X2=',F6.2:' X3=',F
      &6.2:' X4=',F6.2:' X5=',F6.2)
290 FORMAT(' variables--- module ---          Qannuel
---+Qmensuel --
      &- Err.mens.max')
300 FORMAT(' erreurs:   ',F6.1,' % ',F6.1,' %Pa',F6.1,' %Qa
      +',F
      &6.1,' % ',F6.1,' *s')
500 FORMAT(' Débits observés:   Qm hivernal :',F5.1,'
      +Qm estival :',
      &F5.1,' Qm annuel :',F5.1)
200 FORMAT(' Débits calculés:   "   "   ',F5.1,'   "
      +"   '
      &F5.1,'   "   "   ',F5.1)
800 format(//,' Compléments disponibles dans le fichier
      +',a10,//)
1100 format(//,' Résultats pour :',a12,'S =',i5,'( km2),
      +Pam =',I5,'(mm
      &), Qam =',F6.1,'(mm)')
1200 format(' écarts-types des transformées des paramètres:',
      &/,' X1:',f6.2:' X2:',f6.2:' X3:',f6.2:' X4:',f6.2:'
      +X5:',f6.2:
      &' X6:',f6.2)
1300 format(' Matrice des correlations des parametres:')
1400 format(f9.5:f9.5:f9.5:f9.5:f9.5:f9.5:f9.5)
1500 format(' R**2=',f6.4,' err.std=',f8.4)
1600 format(/,' Sensibilité des paramètres (sur ',i4,' débits
      +mensuels:
      &)/,' dx0:',f8.4:' dx1:',f8.4:' dx2:',f8.4:'
      +dx3:',f8.4:' dx4
      &:',f8.4:' dx5:',f8.4:' dx6:',f8.4)
      WRITE(*,'(A\)' )' nom du fichier résultat ?'
      READ(*,'(A\)' )gr3n
      inquire(file=gr3n,exist=qui)
      if(qui)then
      open(108,file=gr3n,status='old')
      close(108,status='delete')
      endif

```

```

OPEN(108,FILE=gr3n,STATUS='new')
OPEN(100,FILE='BVTEST.DAT',STATUS='OLD')
lop=1
n1=12
C NOMBRE DE PARAMETRES (<=6)
N=3
igraf=0
WRITE(*,'(A\)' )' voulez-vous traiter tous les BV
( oui:1 non:0)? '
READ(*,*)ITOT
if(itot.eq.1)then
WRITE(*,'(A\)' )' voulez-vous les graphes Qo-Qc
+( oui:1 non:0)? '
READ(*,*)Igraf
endif
IF(ITOT.EQ.0)THEN
WRITE(*,'(A\)' )' nom du fichier DEBITS (B:XYZT) ? '
READ(*,'(A)') NOMQU
ENDIF
irep=0
if(irep.eq.0)itp=1
if(irep.eq.1)then
WRITE(*,'(A\)' )' optimisation en une étape(1)
+ou plusieurs étape      (2)?'
read(*,*)itp
WRITE(*,'(A\)' )' voulez-vous corriger les évapos. ?
+oui(1) non(0)'
READ(*,*)irev
if(irev.eq.1)then
N=5
else
N=4
endif
endif
BV=0.
GLOBAL=0.
DO 3 ITER=1,100
READ(100,100,END=4)SURF,NMQ,NMP,NME
IF(ITOT.EQ.0.AND.NMQ.NE.NOMQU)GOTO 3
nomp='d:\mess\'//nmp(3:7)
nomq='d:\mess\'//nmq(3:7)
nome='d:\mess\'//nme(3:7)
C INITIATION
WRITE(*,'(///,' ' FICHER DE DEBITS : ' ',A12,///)' )NOMQ
BV=BV+1.
X(1)=6.
X(2)=4.5
X(3)=0.
X(4)=0.
X(5)=0.
x(6)=0.
do 1 i=1,100
do 1 j=1,12
q(i,j)=-999.
p(i,j)=-999.
c(i,j)=-999.
1 continue
do 2 i=1,12

```

```

    e(i)=-999.
2  continue
    CALL LECp(P, LD, LF, nomp)
    CALL LECq(Q, LD, LF, SURF, nomq)
    CALL LECE(E, nome)
    IF(LOP.EQ.1) THEN
    IF(ITP.EQ.1) THEN
    CALL FOND(Q, P, E, ld, lf, n1, N, X, ITOT)
    else
    NN=3
    CALL FOND(Q, P, E, ld, lf, n1, NN, X, ITOT)
    IF(N.GT.3) THEN
    NN=4
    CALL FOND(Q, P, E, ld, lf, n1, NN, X, ITOT)
    ENDIF
    IF(N.GT.4) THEN
    NN=5
    CALL FOND(Q, P, E, ld, lf, n1, NN, X, ITOT)
    ENDIF
    ELSE
    DO 17 I=1, N
    WRITE(*, '( " X" , I1, " ? " \) ') I
    READ(*, *) X(I)
17 CONTINUE
    ENDIF
    CALL MARCHE(Q, P, E, ld, lf, C, n1, X, Q1, Q2, q3, q4, Q5, sp, sd)
    write(*, 1100) nomQ, int(0.5+surf), INT(SP+0.5), SD
    write(108, 1100) nomQ, int(0.5+surf), INT(SP+0.5), SD
    WRITE(108, 400) (X(I), I=1, N)
    WRITE(*, 400) (X(I), I=1, N)
    WRITE(108, 290)
    WRITE(*, 290)
    WRITE(108, 300) q1, q4, q5, q2, Q3
    WRITE(*, 300) q1, q4, q5, q2, Q3
    GLOBAL=GLOBAL+Q5
    CALL QMM(q, c, ld, lf, QH, QE, QA, CH, CE, CA)
    WRITE(108, 500) QH, QE, QA
    WRITE(108, 200) CH, CE, CA
    WRITE(*, 500) QH, QE, QA
    WRITE(*, 200) CH, CE, CA
    call fonc(q, p, e, ld, lf, n1, x, eq, kq, qo, qcc)
    if(itot.ne.1.or.igraf.eq.1)
    call cor2(kq, qo, qcc, igraf, itot)
    do 5 k=1, kq
    qy(k)=qo(k)-qcc(k)
5  continue
    do 9 k=1, kq
    qx(1, k)=1.
9  continue
    np1=n+1
    do 6 i=1, n
    ip1=i+1
    do 7 il=1, n
    xd(il)=x(ip1)
7  continue
    xd(i)=x(i)+0.05
    call fonc(q, p, e, ld, lf, n1, xd, eq, kq, qo, qc)

```

```

do 8 k=1,kq
qx(ip1,k)=(qc(k)-qcc(k))/0.05
8 continue
6 continue
call mlg(kq,np1,qx,qy,r2,s2,core,sco,er,zr)
IF(R2.EQ.-999.)GOTO 3
write(*,1600)kq,(core(i),i=1,np1)
write(*,1500)r2,s2
write(108,1200)(sco(i),i=2,np1)
write(108,1300)
write(*,1200)(sco(i),i=2,np1)
write(*,1300)
do 11 i=2,np1
write(108,1400)(zr(i,j),j=2,np1)
write(*,1400)(zr(i,j),j=2,np1)
11 continue
CALL RESIDU(Q,C,LD,LF,QSIG,CSIG,RS,RR,QOM,QCM)
QUOI=' lames observées mensuelles moyennes (0.01 mm) '
call regime(qom,quoi)
QUOI=' lames calculées mensuelles moyennes (0.01 mm) '
call regime(qcm,quoi)
QUOI=' erreurs mensuelles moyennes (%) '
CALL REGIME(RM,quoi)
QUOI=' écart-type des erreurs mensuelles (%) '
CALL REGIME(RS,QUOI)
IF(ITOT.EQ.0)THEN
QUOI=' écart-type des Q observés (0.01 mm) '
CALL REGIME(QSIG,QUOI)
QUOI=' écart-type des Q simulés (0.01 mm) '
CALL REGIME(CSIG,QUOI)
QUOI=' corrélation(*100) de l''erreur avec celle du mois
+avant'
CALL SORTIE(P,E,Q,C,LD,LF)
ENDIF
3 CONTINUE
4 IF(GLOBAL.LE.0.)THEN
WRITE(*,*)' Le BV demandé ne figure pas dans la liste'
STOP
ENDIF
GLOBAL=GLOBAL/BV
IF(ITOT.EQ.1)THEN
WRITE(*,'(////'' erreur moyenne sur tous les
BV =',F8.3)')GLOBAL
WRITE(108,'(////'' erreur moyenne sur tous
BV =',F8.3)')GLOBAL
ENDIF
close(108)
write(*,800)gr3n
STOP
END

```

```

SUBROUTINE GR3(X,j,MD,P,E,q,S)
DIMENSION X(*),XV(6),ZMOY(12)
DATA ZMOY/.10,.20,.25,.30,.40,.50,.50,
+.40,.30,.20,.10,.05/
IF(j.gt.0)GOTO 1
DO 9 I=1,6

```

```

XV(I)=EXP(X(I))
9 CONTINUE
  if(xv(3).gt.1.) then
    CE=xv(3)-1.
    CP=0.
  else
    CE=0.
    CP=1./xv(3)-1.
  endif
c TX=écoulement pseudo-direct
  TX=0.5
  S=Zmoy(md)*XV(1)
  Q=0.5
  QR=Q
  R=(SQRT(QR*QR+4.*QR*XV(2))-QR)/2.
  m=5
  fm=float(m)
  RETURN
1 continue
  E1=E-CE
  if(E1.lt.0.) E1=0.
  P1=P-CP
  if(P1.lt.0.) P1=0.
    dp=P1/fm
    de=E1/fm
  PR=0.
  do 2 i=1,m
    if(s.le.0.) then
      g=0.
      h=0.
    else
      if(s.ge.xv(1)) then
        g=1.
        h=1.
      else
        Sa=S/xv(1)
        g=Sa*(2.-Sa)
        h=Sa*Sa
      endif
    endif
    S=S-g*de+(1.-h)*dp
    if(s.lt.0.) s=0.
    if(s.gt.xv(1)) THEN
      PR=PR+S-XV(1)
      S=XV(1)
    ENDIF
    Pr=Pr+h*dp
2 continue
  r=R-QR+pR
  if(R.LT.0.00001) R=0.00001
  QR=R*R/(R+XV(2))
  Q=(1.-TX)*QR+TX*PR
  END

```

```

SUBROUTINE LECp(X,LD,LF,pluie)
DIMENSION ID(12),X(100,12)
character pluie*12

```

```

100 FORMAT(2X,I2,2X,12I6)
OPEN(2,FILE=PLUIE,STATUS='OLD')
ld=100
lan=0
DO 10 Ip=1,100
lanp=lan
READ(2,100,END=9) LAN, (ID(L),L=1,12)
i=lan
if(lan.le.lanp)then
write(*,*)' ATTENTION retour en arriere dans les données'
goto 9
endif
if(ip.gt.1.and.lan.gt.lanp+1)then
do 1 ka=lanp+1,lan-1
k=ka
do 2 km=1,12
x(k,km)=-999.
2 continue
1 continue
endif
lf=lan
do 6 l=1,12
if(id(l).ge.0.and.ld.eq.100)ld=lan
if(id(l).ge.0.)then
x(i,l)=float(id(l))*11
else
x(i,l)=-999.
endif
6 continue
10 CONTINUE
9 close(2)
if(ld.ge.lf)then
write(*,*)' PAS ASSEZ DE DONNEES'
stop
endif
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE LECq(X,LD,LF,SURF,DEBIT)
DIMENSION ID(12),X(100,12),DOM(12)
character debit*12
data dom/30.,31.,30.,31.,30.,28.,31.,30.,31.,30.,31.,31./
100 FORMAT(6X,I2,12I6)
OPEN(1,FILE=DEBIT,STATUS='OLD')
n=0
DO 10 Ip=1,100
READ(1,100,END=9) LAN, (ID(L),L=1,12)
if(lan.lt.ld) goto 10
if(lan.gt.lf) goto 9
i=lan
do 11 k=1,12
if(id(k).ge.0)then
X(i,k)=FLOAT(ID(k))*0.0864*DOM(k)/SURF
else
x(i,k)=-999.
endif
11 continue

```

```

10 CONTINUE
  9 close(1)
    RETURN
    END

    SUBROUTINE LECE(XE,EVAPO)
      DIMENSION XE(*)
      DIMENSION ID(12)
      character evapo*12
      OPEN(3,FILE=EVAPO,STATUS='OLD')
900 FORMAT(12I6)
      READ(3,900)(ID(I),I=1,12)
      DO 7 I=1,12
        7 XE(I)=FLOAT(ID(i))*0.08
      close(3)
      RETURN
      END

      SUBROUTINE FOND(Q,P,E,lD,lF,N1,N,X,ITOT)
        DIMENSION X(*),P(100,12),Q(100,12),E(*)
        DIMENSION Z(6),Y(6),qo(300),qc(300)
100 FORMAT(/' suivi de l''optimisation :
      +',/,'          valeurs des parametres
      +somme des carrés des écarts')
200 FORMAT(5F10.2,10x,f10.2)
      WRITE(*,100)
      CALL FONC(Q,P,E,lD,lF,N1,X,G,kq,qo,qc)
      DO 5 L=1,5
        Z(L)=X(L)
    5 CONTINUE
      DX=0.32
      IA=0
      IAM=0
    2 DO 1 ITER=1,1000
      IF(DX.LT.0.01)RETURN
      DO 6 I=1,N
        DO 8 K=1,5
          Y(K)=X(K)
    8 CONTINUE
        DO 7 J=1,2
          FJ=2.*(FLOAT(J)-1.5)
          Y(I)=X(I)+FJ*DX
          IF(Y(I).GT.10.)Y(I)=10.
          IF(Y(I).LT.-10.)Y(I)=-10.
          CALL FONC(Q,P,E,lD,lF,N1,Y,F,kq,qo,qc)
          IF(F.LT.G) THEN
            DO 9 L=1,5
    9 Z(L)=Y(L)
            G=F
            IA=I
          ENDIF
    7 CONTINUE
    6 CONTINUE
      IF (IA.NE.0) THEN

```

```

DO 10 L=1,5
10 X(L)=Z(L)
   IAM=IAM+1
   IF (IAM.GT.2*N) THEN
     DX=DX*2.
     IAM=0
   ENDIF
   WRITE (*,200) (Z(L),L=1,N),G
   IF (ITOT.NE.1) WRITE(108,200) (Z(L),L=1,N),G
   ELSE
     DX=DX/2.
     IAM=0
   ENDIF
   IA=0
1 CONTINUE
END

```

```

SUBROUTINE FONC(Q,P,E,ld,lf,N1,X,EQ,kq,qo,qc)
DIMENSION Q(100,12),P(100,12),E(*),X(*)
dimension qo(*),qc(*)
kq=0
EQ=0.
ii=-1
DO 1 I=ld,lf
do 2 j=1,12
if(p(i,j).lt.0.)then
ii=-1
goto 2
endif
ii=ii+1
PP=P(I,j)
EE=E(j)
CALL GR3(X,ii,j,PP,EE,CC,SS)
IF(ii.LT.N1.OR.Q(I,j).LT.0.) GOTO 2
EQ=EQ+(Q(I,j)-CC)**2
if(kq.eq.300)goto 2
kq=kq+1
qo(kq)=q(i,j)
qc(kq)=cc
2 continue
1 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE MARCHE(Q,P,E,ld,lf,C,N1,X,Q1,Q2
+,q3,q4,q5,sp,sd)
DIMENSION Q(100,12),P(100,12),E(*),C(100,12),X(*)
DIMENSION QA(100),CA(100),PA(100)
FQ=0.
GM=0.
GQ=0.
EM=0.
EQ=0.
CN=0.
MOIS=MD
ii=-1
j=0

```

```

na=0
DO 1 I=1d,1f
  l=0
  SQ=0.
  SC=0.
  SP=0.
  do 2 j=1,12
    if(Q(I,j).LT.0.)l=1
    if(P(I,j).LT.0.)THEN
      C(I,j)=-999.
      l=1
      ii=-1
      GOTO 2
    ENDIF
    ii=ii+1
    PP=P(I,j)
    EE=E(j)
    CALL GR3(X,ii,j,PP,EE,CC,S)
    if(ii.lt.n1)then
      c(i,j)=-999
      l=1
    else
      C(I,j)=CC
      SQ=SQ+Q(I,j)
      SP=SP+P(I,j)
      SC=SC+C(I,j)
    endif
    IF(ii.LT.N1.OR.Q(I,j).LT.0.) GOTO 2
    if(c(i,j).lt.0.)goto 2
    EC=ABS(Q(I,J)-C(I,J))
    EM=EM+Q(I,j)-C(I,j)
    GM=GM+Q(I,j)
    EQ=EQ+EC*EC
    IF(FQ.LT.EC)FQ=EC
    GQ=GQ+Q(I,j)*Q(I,j)
    CN=CN+1.
  2 continue
  if(l.eq.0) then
    na=na+1
    pa(na)=sp
    qa(na)=sq
    ca(na)=sc
  endif
1 CONTINUE
  Q1=EM/GM*100.
  GQ=GQ-GM*GM/CN
  Q2=SQRT(EQ/GQ)*100.
  Q3=FQ/SQRT(EQ/CN)
  SP=0.
  SQ=0.
  SD=0.
  DO 20 k=1,na
    SQ=SQ+(CA(k)-QA(k))**2
    SP=SP+PA(k)
    SD=SD+QA(k)
  20 CONTINUE
  SP=SP/FLOAT(na)
  SD=SD/FLOAT(na)

```

```

Q4=SQRT(SQ/FLOAT(na))/SP*100.
q5=q4*sp/sd
RETURN
END

```

```

subroutine QMM(q,c,ld,lf,QH,QE,QA,CH,CE,CA)
dimension q(100,12),c(100,12),BQ(12),QM(12),CM(12)
DO 3 J=1,12
  BQ(J)=0.
  QM(J)=0.
  CM(J)=0.
3 CONTINUE
  do 1 i=ld,lf
    do 2 j=1,12
      IF(Q(I,J).GE.0..AND.C(I,J).GE.0.) THEN
        BQ(J)=BQ(J)+1.
        QM(J)=QM(J)+Q(I,J)
        CM(J)=CM(J)+C(I,J)
      ENDIF
    2 continue
  1 continue
  DO 4 J=1,12
    IF(BQ(J).GT.0.) QM(J)=QM(J)/BQ(J)
    IF(BQ(J).GT.0.) CM(J)=CM(J)/BQ(J)
  4 CONTINUE
  IF(BQ(5)*BQ(6)*BQ(7).LE.0.) THEN
    QH=-9.9
    CH=-9.9
  ELSE
    QH=QM(5)+QM(6)+QM(7)
    CH=CM(5)+CM(6)+CM(7)
  ENDIF
  IF(BQ(1)*BQ(11)*BQ(12).LE.0.) THEN
    QE=-9.9
    CE=-9.9
  ELSE
    QE=QM(1)+QM(11)+QM(12)
    CE=CM(1)+CM(11)+CM(12)
  ENDIF
  LQ=0
  QA=0.
  CA=0.
  DO 5 J=1,12
    IF(BQ(J).LE.0.) LQ=1
    QA=QA+QM(J)
    CA=CA+CM(J)
  5 CONTINUE
  IF(LQ.EQ.1) QA=-9.9
  IF(LQ.EQ.1) CA=-9.9
end

SUBROUTINE SORTIE(p,e,Q,C,ld,lf)
DIMENSION p(100,12),e(*),Q(100,12),C(100,12)
dimension ip(12),ie(12),IQ(12),IC(12)
100 FORMAT(/,'pluies,ETP,débits observés,débits calculés

```

```

      +( 0.1 mm)',/,
      +' une ligne pour chaque type de données',//)
200 FORMAT(i2,13I6)
300 FORMAT(i2,13i6,/)
      WRITE(108,100)
      ise=0
      do 8 i=1,12
      ie(i)=int(10.*e(i)+0.5)
      ise=ise+ie(i)
8    continue
      do 1 il=ld,lf
      do 3 i=1,12
      ip(i)=-999
      iq(i)=-999
      ic(i)=-999
3    continue
      lp=0
      lq=0
      lc=0
      isp=0
      isq=0
      isc=0
      do 2 j=1,12
      if(p(il,j).ge.0.) then
      ip(j)=int(10.*p(il,j)+0.5)
      isp=isp+ip(j)
      else
      lp=1
      endif
      if(q(il,j).ge.0.) then
      iq(j)=int(10.*q(il,j)+0.5)
      isq=isq+iq(j)
      else
      lq=1
      endif
      if(c(il,j).ge.0.) then
      ic(j)=int(10.*c(il,j)+0.5)
      isc=isc+ic(j)
      else
      lc=1
      endif
2    continue
      if(lp.eq.1) isp=-999
      if(lq.eq.1) isq=-999
      if(lc.eq.1) isc=-999
      WRITE(108,200) il, (Ip(j),j=1,12), isp
      WRITE(108,200) il, (Ie(j),j=1,12), ise
      WRITE(108,200) il, (IQ(j),j=1,12), isq
      WRITE(108,300) il, (IC(j),j=1,12), isc
1    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

      subroutine residu(q,c,ld,lf,qs,cs,rm,rs,rr,qm,cm)
      dimensionq(100,12),c(100,12),rm(*),rs(*),
      +rr(*),qs(*),cs(*)

```

```

dimension qm(*),cm(*),n(12),nq(12),nc(12),nr(12)
do 3 j=1,12
  rm(j)=0.
  rs(j)=0.
  rr(j)=0.
  qm(j)=0.
  cm(j)=0.
  qs(j)=0.
  cs(j)=0.
  nq(j)=0
  nc(j)=0
  n(j)=0
  nr(j)=0
3 continue
  la=1
  do 1 i=ld,lf
    do 2 j=1,12
      ja=j-1
      ia=i
      if(ja.eq.0)then
        ja=12
        ia=i-1
      endif
      l=0
      lc=0
      lq=0
      if(q(i,j).lt.0.)then
        lq=1
        l=1
      else
        nq(j)=nq(j)+1
      endif
      if(c(i,j).lt.0.)then
        lc=1
        l=1
      else
        nc(j)=nc(j)+1
      endif
      if(l.eq.0)n(j)=n(j)+1
      if(l.eq.0.and.la.eq.0)nr(j)=nr(j)+1
      if(lq.eq.0) qm(j)=qm(j)+q(i,j)
      if(lc.eq.0) cm(j)=cm(j)+c(i,j)
      if(lq.eq.0) qs(j)=qs(j)+q(i,j)*q(i,j)
      if(lc.eq.0) cs(j)=cs(j)+c(i,j)*c(i,j)
      if(l.eq.0) rm(j)=rm(j)+q(i,j)-c(i,j)
      if(l.eq.0) rs(j)=rs(j)+(q(i,j)-c(i,j))**2
      if(l.eq.0.and.la.eq.0)rr(j)=rr(j)
      ++(q(i,j)-c(i,j))*(q(ia,ja)-c(ia,ja))
      la=1
    2 continue
  1 continue
  do 4 j=1,12
    en=float(n(j))
    enq=float(nq(j))
    enc=float(nc(j))
    enr=float(nr(j))
    rm(j)=rm(j)/en
    qm(j)=qm(j)/enq

```

```

cm(j)=cm(j)/enc
Z=qs(j)/enq-qm(j)*qm(j)
if(Z.LE.0.)then
qs(j)=0.
else
qs(j)=sqrt(Z)
endif
Z=cs(j)/enc-cm(j)*cm(j)
if(Z.LE.0.)then
cs(j)=0.
else
cs(j)=sqrt(Z)
endif
Z=rs(j)/en-rm(j)*rm(j)
if(Z.LE.0.)then
rs(j)=0.
else
rs(j)=sqrt(Z)
endif
if(j.ge.2)rr(j)=(rr(j)/enr-rm(j)*rm(j-1))/rs(j)/rs(j-1)
if(qm(j).gt.0.)then
rm(j)=rm(j)/qm(j)
rs(j)=rs(j)/qm(j)
else
rm(j)=-0.99
rs(j)=-0.99
endif
4 continue
rr(1)=(rr(1)/float(nr(1))-rm(1)*rm(12))/rs(1)/rs(12)
end

subroutine regime(x,quoi)
character quoi*80
dimension x(*)
100 format(12i6)
200 format(a80)
write(108,200)quoi
write(108,100)(int(100.*x(i)+0.5),i=1,12)
end

SUBROUTINE MLG(N,K,X,Y,R2,S2,B,SB,E,Z)
DIMENSION X(9,*),Y(*),E(*),B(*),Z(9,9),SB(*)
DIMENSION B1(9)
EN=FLOAT(N)
DO 1 I=1,K
DO 2 J=1,K
Z(I,J)=0.
DO 3 M=1,N
Z(I,J)=Z(I,J)+X(I,M)*X(J,M)
3 CONTINUE
2 CONTINUE
1 CONTINUE
DO 4 M=1,K
D=Z(M,M)
Z(M,M)=1.
IF(D.EQ.0.)THEN
R2=-999.

```

```

RETURN
ENDIF
DO 5 L=1,K
Z(M,L)=Z(M,L)/D
5 CONTINUE
DO 6 I=1,K
IF(I.EQ.M) GOTO 6
D=Z(I,M)
Z(I,M)=0.
DO 7 J=1,K
Z(I,J)=Z(I,J)-D*Z(M,J)
7 CONTINUE
6 CONTINUE
4 CONTINUE
DO 8 J=1,K
B1(J)=0.
DO 9 I=1,N
B1(J)=B1(J)+X(J,I)*Y(I)
9 CONTINUE
8 CONTINUE
DO 11 I=1,K
B(I)=0.
DO 12 J=1,K
B(I)=B(I)+Z(I,J)*B1(J)
12 CONTINUE
11 CONTINUE
Y1=0.
Y2=0.
DO 14 I=1,N
Y1=Y1+Y(I)
Y2=Y2+Y(I)*Y(I)
14 CONTINUE
S2=0.
DO 15 I=1,N
E(I)=Y(I)
DO 16 J=1,K
E(I)=E(I)-X(J,I)*B(J)
16 CONTINUE
S2=S2+E(I)*E(I)
15 CONTINUE
R2=1.-S2/(Y2-Y1*Y1/EN)
S2=SQRT(S2/FLOAT(N-K))
DO 13 I=1,K
SB(I)=SQRT(Z(I,I))
13 CONTINUE
DO 18 I=1,K
DO 18 J=1,K
Z(I,J)=Z(I,J)/SB(I)/SB(J)
18 CONTINUE
DO 17 I=1,K
SB(I)=S2*SB(I)
17 CONTINUE
END

subroutine cor2(n,x,y,igraf,itot)
dimension x(*),y(*)
parameter (ie=66,je=22)
character *1 e(ie,je),b,g,r,nb(9),rep

```

```

dimension l(ie,je)
data b,g,r/' ','(',')'/
data nb/'1','2','3','4','5','6','7','8','9'/
if(itot.eq.0)then
write(*,'(' dessin de la correlation (oui:1 non:0) ?
..+''\)')
read(*,'(a1)')rep
else
rep='1'
endif
if(rep.ne.'1')return
do 11 j=1,je
e(1,j)=g
e(ie,j)=r
l(1,j)=0
l(ie,j)=0
do 10 i=2,ie-1
e(i,j)=b
l(i,j)=0
10 continue
11 continue
tn=x(1)
tx=tn
rx=0
ry=0
sx=0
sy=0
sxy=0
do 12 k=1,n
rx=rx+x(k)
ry=ry+y(k)
sx=sx+x(k)*x(k)
sy=sy+y(k)*y(k)
sxy=sxy+x(k)*y(k)
if(tn.gt.x(k))tn=x(k)
if(tn.gt.y(k))tn=y(k)
if(tx.lt.x(k))tx=x(k)
if(tx.lt.y(k))tx=y(k)
12 continue
sxy=sxy/float(n)
sx=sx/float(n)
sy=sy/float(n)
rx=rx/float(n)
ry=ry/float(n)
ro=(sxy-rx*ry)/sqrt((sx-rx*rx)*(sy-ry*ry))
if(tx.eq.tn)tx=tn+1
d=(je-1)/(tx-tn)
do 15 k=1,n
i=3*int(d*(x(k)-tn)+0.5)+1
j=1+d*(y(k)-tn)
l(i,j)=l(i,j)+1
if(l(i,j).gt.9)l(i,j)=9
15 continue
do 17 i=2,ie-1
do 16 j=1,je
if(l(i,j).GT.0)e(i,j)=nb(l(i,j))
16 continue
17 continue

```

```
do 18 j=je,2,-1
write(*,'(14x,80a1)')(e(i,j),i=1,ie)
if(igraf.eq.1.or.itot.eq.0)
write(108,'(14x,80a1)')(e(i,j),i=1,ie)
18 continue
write(*,'(1x,'' R= ',f6.3,3x,80a1)')ro,(e(i,1),i=1,ie)
write(*,'(1x)')
if(itot.eq.0)then
write(*,'('' éffacer (oui:1 non:0) ? ... ''\)'')
read(*,'(a1)')rep
endif
if(igraf.eq.1.or.itot.eq.0)then
write(108,'(1x,'' R= ',f6.3,3x,80a1)')ro,(e(i,1),i=1,ie)
write(108,'(1x)')
endif
end
```

→

Annexe 7

 Modèle mensuel avec introduction d'une fraction de la pluie
 avant rendement par le réservoir-sol

N° des B.V	LnA	LnB	LnC	D %	gain ou perte de Fm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
5	4.28	4.91	1.14	42	- 3.9
24	9.65	7.63	0.64	0.0	- 0.3
26	2.04	4.88	- 0.7	65	- 10.7
29	4.04	4.96	- 0.65	68	- 20.6
58	3.83	4.93	- 1.04	78	- 2.1
69	7.94	3.73	2.38	46	1.5

Colonnes (2) et (3) : correspondent respectivement à la
 capacité maximale du réservoir S et R ,
 Colonne (4) : neutralisation optimale pluie-évaporation ,
 colonne (5) : fraction optimale de la pluie introduite
 directement dans le cours d'eau et dérivée avant
 rendement du réservoir-sol
 colonne (6) : amélioration ou dégradation du critère mensuel Fm
 par rapport à la seconde possibilité où la
 dérivation est effectuée après rendement du
 réservoir-sol .

Détermination de la fraction d'écoulement pseudo-direct
pour les 6 bassins versants tests :

N° des BV	Erreur quadratique annuelle pour des % de la pluie participant directement à l'écoulement								
	5%	10%	15%	20%	25%	27%	30%	40%	50%
5	31.4	31.1	30.8	30.5	30.2	33.6	30.2	28.0	25.7
24	26.0	25.8	23.8	23.9	24.2	24.4	25.3	25.5	30.4
26	16.4	16.3	16.2	16.1	16.1	16.0	16.1	16.4	17.2
29	36.3	35.6	35.6	35.5	35.5	35.6	35.6	35.6	35.6
58	13.8	13.8	13.9	13.9	14.1	10.8	18.4	22.5	22.1
69	46.1	46.6	46.5	46.4	46.3	46.3	46.3	46.7	47.9
MOYENNE Fq	28.3	28.2	27.8	27.7	27.7	27.8	28.6	29.1	29.8

Comparaison du critère mensuel de GRM2 où C est la neutralisation pluie-évaporation et GRM2 où C a 2 rôles : - rôle principal : neutralisation pluie-évaporation
- rôle complémentaire : l'écoulement pseudo-direct

N° de	Critère mensuel	
	C:à 1 seule fonction	C : 2 fonctions
1	27.3	37.6
2	62.3	64.6
3	48.0	46.8
4	33.7	33.5
5	52.8	51.8
6	36.7	36.0
7	41.8	42.7
8	99.6	101.0
9	92.9	85.3
10	61.9	62.5
11	74.8	88.4
12	62.4	61.1
13	62.1	62.7
14	35.7	35.7
15	52.0	54.2
16	47.8	48.1
17	65.3	66.4
18	40.2	42.3
19	56.4	56.2
20	43.9	42.9
21	62.9	57.1

22	72.2	76.6
23	50.3	50.3
24	94.8	95.6
25	69.5	65.1
26	35.4	37.0
27	53.3	53.5
28	41.9	42.5
29	34.1	34.0
30	38.3	40.0
31	29.3	29.1
32	37.8	37.6
33	33.4	33.8
34	38.9	35.0
35	35.2	33.0
36	44.6	44.6
37	30.1	29.9
38	26.3	26.3
39	50.0	49.7
40	87.3	87.2
41	58.5	55.5
42	66.1	65.0
43	51.8	43.5
44	53.6	53.6
45	80.4	79.9
46	52.8	52.6
47	87.8	86.0
48	85.5	79.2
49	58.1	56.8
50	96.0	83.7

51	47.7	40.0
52	40.2	40.2
53	31.1	31.1
54	50.5	50.3
55	34.7	33.9
56	45.6	46.0
57	34.1	34.1
58	45.4	42.0
59	39.9	32.9
60	57.3	63.2
61	49.6	49.4
62	43.9	43.8
64	66.3	64.8
65	48.3	46.0
66	106.5	99.3
68	64.0	62.6
69	68.5	68.2
70	43.2	37.4
critère mensuel moyen	53.98	53.21


```

*****
C*Nom du prog:SMAP.FOR
C*****
      SUBROUTINE SMAP(surf,X,j,PP,EV,q)
      DIMENSION X(*),XV(6)
C      xv(1)=STR
C      x(2)=E2
C      xv(3)=SUBIN
      IF(j.gt.0)GOTO 1
      asi=0.2
      akk=0.8
      api=24.
      acinf=0.55
      acrec=0.02
      aqmin=2630.*0.08/surf
      DO 9 I=1,5
      XV(I)=EXP(X(I))
9 CONTINUE
      RSOL=asi*XV(1)
      SS=xv(3)/(1.-akk)
1 P=PP*XV(4)-api
      if(p.lt.0.)p=0.
      EE=EV*XV(5)
      tu=(rsol+p*acinf)/xv(1)
      if(tu.le.0.001)tu=0.001
      es=p*tu**x(2)
      er=ee*tu
      rec=rsol*acrec*tu**4
      rsol=rsol+p-es-er-rec
      ss=ss+rec
      eb=ss*(1.-akk)
      ss=ss-eb
      q=es+eb
      if(q.lt.aqmin)q=0.
      END

```



```

C*****
C MODELE GARDENIA THIERY B.R.G.M.
C*****
      SUBROUTINE GARDENIA(X,j,N,P,E,q,S)
      DIMENSION X(*),XV(6)
      IF(j.gt.0)GOTO 1
      DO 9 I=1,5
      XV(I)=EXP(X(I))
9 CONTINUE
      XV(3)=1.+XV(3)
      XV(2)=1.+XV(2)
      S=0.
      R=0.
      G=0.
      RETURN
1 CONTINUE
      S=S+P-E*P/(P+E)
      if(S.gt.XV(1))then
      Pr=S-xv(1)
      S=xv(1)
      else
      pr=0.
      endif
      s=s-E*E/(P+E)
      if(S.lt.0.)S=0.
      R=R+pr
      if(N.eq.4)then
      Qr=R*R/xv(2)/xv(4)
      r=r-Qr
      if(r.lt.0.)then
      qr=qr+r
      r=0.
      endif
      else
      Qr=0.
      endif
      qg=R/xv(2)
      R=R-qg
      G=G+qg
      QS=G/xv(3)
      G=G-qs
      Q=Qr+Qs
      END

```



```

C*****
c Nom du prog:MNL.FOR :modèle mensuel *
C Modele à 5 parametres:
C*****
  SUBROUTINE MNL(X,j,MD,P,E,Q,D)
    DIMENSION X(*),XV(6),ZMOY(12)
    DATA ZMOY/.19,.38,.50,.67,.80,.85,.84,
+.74,.62,.44,.28,.16/
    IF(j.gt.0)GOTO 1
    DO 9 I=1,6
      XV(I)=EXP(X(I))
  9 CONTINUE
    do 2 i=1,4
      XV(i)=1./(1.+XV(i))
  2 continue
    D=(1.-zmoy(md))*XV(1)
    q=p*zmoy(md)*zmoy(md)
    R=0.5*(Q+SQRT(Q*Q+4.*Q*XV(2)))
    S=xv(1)*xv(5)
    RETURN
  1 CONTINUE
    Et=E*(xv(5)-D)/xv(5)
    Pr=P-xv(2)*Et-xv(3)*D
    if(Pr.lt.0.)then
      qs=0.
    else
      qs=Pr*Pr/(Pr+D)
    endif
    if(D.lt.S)then
      qg=xv(4)*(S-D)
    else
      qg=0.
    endif
    Q=qs+qg
    D=D-P+Et+Q
    if(D.lt.0.)then
      Q=Q-D
      d=0.
    endif
    if(D.gt.xv(5))d=xv(5)
  END

```



```

C*****
C Modele à 3 parametres: modèle 'T-ALPHA' de W.M.ALLEY
C*****
  DIMENSION Q(100,12),P(100,12),E(12),C(100,12)
  DIMENSION X(6)
  DIMENSION RM(12),RS(12),RR(12)
  SUBROUTINE ALPHA(X,j,MD,P,E,Q,S)
  DIMENSION X(*),XV(6),ZMOY(12)
  DATAZMOY/.19,.38,.50,.67,.80,.85,.84,
+.74,.62,.44,.28,.16/
  IF(j.gt.0)GOTO 1
  DO 9 I=1,6
  XV(I)=EXP(X(I))
9 CONTINUE
  xv(1)=1./(1.+xv(1))
  xv(2)=1./(1.+xv(2))
  S=Zmoy(md)*XV(3)
  q=p*z moy(md)*z moy(md)
  T=Q/(1./xv(1)-1.)
  RETURN
1 continue
  R=XV(2)*P
  PP=P-R
  W=0.
  if(PP.lt.E)then
    cs=(e-pp)/xv(3)
    if(cs.gt.12.)cs=12.
    S=S/exp(cs)
  else
    s=S+pp-e
    if(S.GT.xv(3))then
      w=s-xv(3)
      s=xv(3)
    endif
  endif
  T=xv(1)*(T+W)
  Q=(1./xv(1)-1.)*T+R
  END

```



```

C*****
c Nom du prog:GABCD.FOR
C Modele à 4 parametres: modèle de ALLEY
C*****
      SUBROUTINE ABCD(X,j,MD,P,E,Q)
      DIMENSION X(*),XV(6),ZMOY(12)
      DATAZMOY/.10,.20,.25,.30,.40,.50,.50,.40,
+.30,.20,.10,.05/
      IF(j.gt.0)GOTO 1
      DO 9 I=1,6
      XV(I)=EXP(X(I))
9 CONTINUE
      XV(1)=1./(1.+XV(1))
      XV(3)=1./(1.+XV(3))
      S=Zmoy(md)*xv(2)
      q=p*z moy(md)*Zmoy(md)
      H=Q/xv(4)
      RETURN
1 CONTINUE
      W=S+P
      WB=W/xv(2)
      WB1=WB+1.
      Y=2.*xv(2)*WB/(WB1+sqrt(WB1*WB1-4.*xv(1)*WB))
      E2=E/xv(2)
      if(E2.gt.12.)E2=12.
      S=Y/exp(E2)
      G=xv(3)*(w-Y)
      R=W-Y-G
      H=(G+H)/(1.+xv(4))
      Q=xv(4)*H+R
END

```


Résultats des simulations issues de SMAP sur les 68 BV

N° des BV	Fm %	Fp %	Fq %	Fb %
1	31.9	5.3	49.3	4.2
2	113.7	3.7	80.8	19.2
3	67.9	8.1	47.5	19.5
4	47.0	5.9	38.0	14.3
5	68.3	4.5	51.9	26.2
6	52.4	6.0	44.8	28.6
7	58.7	4.7	44.9	25.9
10	88.1	3.2	66.4	-0.6
12	95.9	2.2	58.8	18.0
13	108.2	2.5	58.1	29.0
14	39.6	4.8	34.3	7.7
15	56.6	5.7	37.0	2.6
16	49.6	3.2	30.6	-2.9
17	80.1	18.7	39.4	21.2
18	48.9	1.8	16.6	5.3
19	59.1	6.8	28.5	12.1
20	53.0	4.8	32.0	10.3
21	86.2	3.7	47.7	15.4
22	110.2	4.3	61.2	26.8
23	52.8	1.5	29.7	-3.3
24	145.1	1.5	66.4	28.4
25	105.7	2.4	52.6	17.3
26	43.8	3.2	18.9	-0.6
27	65.8	12.5	39.0	16.9
28	48.8	3.8	36.0	-0.2

29	38.2	2.5	18.3	-0.3
30	45.9	8.0	37.6	2.2
31	36.4	2.4	13.6	-0.7
32	45.2	9.9	26.2	12.1
33	43.6	3.4	21.0	14.7
34	43.0	12.6	32.2	24.1
35	38.2	6.4	17.8	4.7
36	41.5	6.1	20.6	5.5
37	34.5	4.8	15.4	11.3
38	33.7	3.4	18.5	-5.7
39	65.0	9.9	31.4	15.2
40	100.0	4.7	53.8	18.4
41	61.5	11.0	46.0	19.6
42	95.8	6.0	45.7	23.7
43	64.2	6.5	35.9	10.4
44	63.5	8.9	37.7	13.1
45	83.9	5.3	69.8	9.1
46	86.2	4.2	62.2	19.0
47	96.5	11.8	46.7	23.1
49	77.9	5.9	42.6	21.5
51	49.7	0.5	41.7	17.9
52	49.8	4.0	22.6	0.6
53	46.6	3.8	16.9	14.8
54	61.4	3.1	34.9	-7.6
55	34.0	4.2	25.2	6.2
56	46.9	3.9	26.6	-9.7
57	35.7	2.9	17.3	-8.7
58	55.3	6.6	19.0	8.2
59	42.3	3.8	61.7	29.0

60	66.8	7.9	76.4	10.0
61	56.8	10.7	31.3	27.9
62	39.5	3.9	25.1	-8.0
64	79.9	6.7	47.5	19.5
65	55.5	7.3	40.8	19.7
66	95.8	2.6	46.7	1.5
68	76.5	2.4	46.2	10.2
69	73.1	6.3	66.2	17.2
70	51.0	6.2	43.0	16.8

Résultats des simulations issues du modèle GARDENIA

N°des BV	Fm %	Fp %	Fq %	Fb %
1	31.2	2.1	19.5	2.5
2	64.8	1.4	29.6	-4.6
3	55.6	5.1	29.9	-0.3
4	57.0	7.5	48.3	-16.0
5	51.0	2.4	27.3	-2.3
6	38.4	2.9	21.6	4.4
7	53.1	3.1	29.9	3.7
10	91.4	3.0	61.6	-1.6
12	81.3	1.5	40.2	-9.1
13	60.8	1.0	24.1	-3.2
14	45.5	6.0	43.2	2.4
15	58.4	6.8	44.2	8.8
16	57.8	3.9	37.0	3.7
17	61.7	12.2	25.7	-6.2
18	58.2	5.7	51.5	-11.2
19	56.5	7.9	33.5	-12.9
20	60.8	6.9	45.8	-10.5
21	64.5	1.5	23.4	6.3
22	68.8	1.2	18.8	1.3
23	50.4	2.1	41.7	15.1
24	95.5	0.7	29.0	3.3
25	81.0	1.1	24.4	-7.7
26	41.9	5.1	29.7	3.2
27	57.0	9.5	29.8	-11.0
28	54.6	4.6	46.5	-2.5

29	56.0	8.4	62.0	-20.2
30	39.9	7.8	36.8	-2.9
31	41.0	6.5	36.5	-6.4
32	52.2	18.3	48.4	11.3
33	39.2	7.0	42.3	8.9
34	35.1	5.9	15.1	-7.2
35	38.6	9.2	25.5	-10.7
36	48.6	5.7	19.1	7.1
37	37.9	8.0	25.9	-5.9
38	30.7	4.8	26.3	-11.8
39	49.9	7.8	24.8	-4.5
40	97.4	5.6	63.7	2.7
41	56.4	5.9	24.9	-5.0
42	73.2	4.6	34.8	3.9
43	46.9	4.8	26.4	-7.6
44	50.6	10.7	45.5	-9.8
45	82.9	6.6	87.3	8.8
46	62.7	3.7	55.1	7.0
47	81.4	11.6	45.7	-4.7
49	52.7	3.6	25.8	-3.9
51	39.2	0.3	22.1	0.9
52	57.2	11.1	51.2	-26.6
53	38.1	3.1	13.55	13.2
54	55.9	2.0	22.6	-12.7
55	33.8	0.5	30.0	-2.3
56	46.4	4.1	27.7	-6.0
57	37.5	3.2	19.2	-8.3
58	51.3	12.9	37.5	-32.2
59	38.5	1.7	27.5	6.4

60	63.2	7.1	67.8	-5.4
61	54.1	6.5	19.1	54.1
62	45.7	6.1	39.1	11.0
64	76.6	8.1	57.7	-13.6
65	51.5	4.7	26.6	-2.4
66	100.9	2.0	36.2	3.3
68	72.8	3.0	56.8	5.6
69	74.5	5.2	55.2	-1.5
70	37.1	3.4	23.8	-13.9

Résultats des simulations issues du modèle non-linéaire
de M. L. KAVVAS : modèle MNL

N° des BV	Fm %	Fp %	Fq %	Fb %
1	36.5	3.3	31.4	8.2
2	121.0	3.8	82.1	16.2
3	60.3	4.7	27.6	0.1
4	44.1	3.0	19.0	-1.1
5	66.6	2.9	33.2	-0.6
6	62.9	6.1	46.1	29.3
7	78.7	5.9	56.4	27.4
10	108.6	3.9	82.3	23.3
12	88.9	1.7	46.4	34.1
13	91.3	1.8	42.2	32.1
14	56.9	7.3	52.2	23.5
15	62.7	6.4	41.7	12.5
16	60.9	4.8	45.6	18.7
17	64.8	11.8	24.9	6.0
18	50.2	2.5	22.5	10.1
19	52.5	3.7	15.8	-1.1
20	45.7	3.2	21.1	-0.9
21	75.1	2.4	37.4	29.8
22	80.2	0.9	13.6	3.0
23	50.1	2.0	40.1	11.6
24	121.6	1.1	46.9	40.8
25	73.3	0.9	20.1	8.8
26	45.0	2.8	16.1	2.9
27	56.4	8.2	25.8	1.3
28	55.0	5.7	54.2	10.6

29	47.2	4.1	30.2	12.7
30	37.8	7.0	32.8	8.0
31	33.7	2.1	11.7	0.3
32	39.4	14.3	37.9	-0.9
33	42.6	3.1	19.0	-2.3
34	28.1	7.4	18.9	4.1
35	35.1	5.6	15.5	-1.3
36	44.6	4.7	15.8	-2.5
37	34.4	5.2	17.0	-4.9
38	28.0	3.5	19.2	-3.0
39	54.1	7.6	24.0	1.1
40	89.8	4.6	52.5	31.3
41	47.9	6.8	28.5	6.8
42	85.3	5.0	38.3	24.9
43	63.6	6.7	36.5	15.3
44	57.4	7.7	32.5	-6.3
45	87.4	6.6	87.2	25.6
46	57.2	5.9	86.7	19.6
47	92.3	11.0	43.5	23.4
49	102.8	7.6	54.5	15.6
51	45.4	1.0	91.0	14.4
52	59.5	5.1	23.9	10.0
53	38.4	1.3	5.9	4.7
54	77.2	4.1	46.0	14.2
55	35.3	3.4	20.5	-1.9
56	47.8	3.9	26.1	3.6
57	37.5	2.4	14.6	0.8
58	51.2	6.9	20.0	-7.1
59	53.0	1.8	30.0	26.1

60	72.9	8.0	76.9	7.1
61	50.0	5.6	16.4	-1.6
62	40.0	4.7	30.1	5.7
64	72.8	3.5	25.2	-4.0
65	43.0	4.4	24.6	3.0
66	120.0	3.7	67.9	31.3
68	71.6	2.3	43.3	9.0
69	75.1	5.2	55.4	24.2
70	52.2	6.4	44.0	23.2

Résultats des simulations issues du modèle Tα d'ALLEY

N° des BV	Fm %	Fp %	Fq %	Fb %
1	42.8	4.2	39.0	-5.8
2	70.1	2.0	42.8	14.8
3	59.4	6.1	35.4	9.3
4	49.2	5.6	36.4	-0.4
5	68.4	3.8	43.4	3.0
6	43.7	3.7	27.6	10.2
7	55.2	3.5	33.8	0.0
10	86.8	2.2	46.4	9.5
12	83.9	1.1	28.4	-0.8
13	81.1	1.2	28.7	8.5
14	49.9	4.7	33.5	3.4
15	57.4	6.6	43.2	4.8
16	52.6	2.4	23.3	3.4
17	71.1	15.4	32.5	12.7
18	58.8	3.7	33.3	-5.7
19	57.5	6.2	25.9	-9.8
20	52.9	3.7	24.9	-5.0
21	58.5	1.3	19.8	-3.3
22	75.8	1.1	17.3	0.1
23	38.6	1.2	22.9	-1.6
24	74.0	0.5	20.7	1.7
25	62.4	0.8	18.6	3.6
26	38.6	4.1	23.5	-6.8
27	58.6	9.2	28.9	6.1
28	51.6	4.9	46.5	-0.1

29	51.3	6.1	45.4	-11.4
30	40.3	7.4	34.8	4.9
31	34.7	4.9	27.3	-5.1
32	39.4	15.6	41.2	16.6
33	37.3	5.4	32.7	3.7
34	48.8	13.7	35.0	26.1
35	38.0	9.2	25.4	-3.1
36	47.7	5.0	16.9	4.6
37	38.3	7.4	24.0	0.5
38	26.0	3.6	19.9	-3.3
39	54.2	7.7	24.5	5.7
40	78.7	3.6	41.6	-0.4
41	79.1	10.2	42.6	-9.8
42	80.9	4.6	34.9	3.9
43	74.2	8.3	45.3	-12.6
44	53.8	10.5	44.4	-1.6
45	87.1	7.1	94.2	-7.5
46	81.6	4.1	60.6	3.2
47	90.1	10.8	42.6	-0.2
49	67.0	6.4	46.4	-8.7
51	36.2	0.3	30.3	10.5
52	52.3	8.9	41.5	-20.6
53	34.7	1.4	6.0	5.2
54	78.5	7.2	80.6	-46.9
55	36.5	5.1	30.6	6.3
56	54.5	5.4	36.3	-1.6
57	43.2	4.5	27.2	-4.9
58	50.2	8.3	24.0	-12.7
59	72.3	2.4	39.6	-12.5

60	65.2	8.2	78.6	-18.9
61	54.3	4.5	13.2	5.2
62	53.9	6.5	41.2	-27.6
64	80.7	8.9	63.5	-2.7
65	74.2	8.0	44.8	0.9
66	101.6	1.9	34.0	22.0
68	81.7	2.5	48.0	-9.5
69	78.2	5.9	62.0	-11.6
70	75.7	10.2	70.7	-30.5

Résultats des simulations issues du modèle ABCD de THOMAS

N° des BV	Fm %	Fp %	Fq %	Fb %
1	39.6	2.2	21.1	-13.2
2	63.3	1.5	31.8	6.3
3	45.2	4.0	23.7	-0.1
4	33.9	2.6	16.9	-1.4
5	49.5	2.5	28.9	-0.4
6	42.4	3.7	27.5	8.2
7	42.5	2.8	26.4	2.2
10	58.8	1.5	30.4	2.0
12	65.2	1.1	29.2	-1.2
13	71.1	1.1	26.6	0.0
14	39.3	5.1	36.5	2.9
15	56.8	5.1	33.3	6.8
16	49.1	2.2	21.4	8.8
17	59.5	11.9	25.2	7.2
18	42.9	1.5	13.1	-0.5
19	48.4	4.2	17.5	-1.1
20	47.8	4.2	28.0	-0.4
21	58.9	1.6	24.3	-1.5
22	67.6	1.1	16.6	1.9
23	47.2	1.7	33.9	8.5
24	98.0	0.5	24.1	4.3
25	57.7	0.8	17.7	-1.3
26	38.6	3.6	20.8	-4.2
27	51.2	8.1	25.4	-3.7
28	39.0	3.8	36.3	-0.4

29	32.9	2.5	18.7	-1.7
30	38.4	6.5	30.3	2.1
31	31.9	2.8	15.8	2.7
32	37.5	14.3	37.8	-2.5
33	37.7	4.7	28.9	-9.5
34	27.3	7.9	20.1	12.0
35	30.9	6.2	17.1	1.6
36	45.1	4.8	16.0	-4.4
37	34.3	7.5	24.3	-18.0
38	27.2	4.8	26.6	-4.1
39	52.1	7.1	22.4	-9.1
40	79.4	3.7	41.9	4.5
41	50.3	7.1	29.6	15.3
42	62.1	3.3	25.1	1.1
43	40.2	4.6	25.2	-1.1
44	48.4	8.2	34.6	-12.2
45	84.9	5.3	70.7	-3.2
46	66.0	3.2	46.7	-0.5
47	76.8	10.9	42.9	0.6
49	74.1	3.6	26.3	-6.2
51	30.2	0.2	16.7	-1.6
52	37.9	3.1	14.7	-6.5
53	28.4	0.7	3.0	-0.3
54	85.2	4.8	53.1	-16.1
55	36.9	4.4	26.9	-4.9
56	40.8	4.1	27.4	4.9
57	32.4	3.8	22.8	-2.2
58	45.4	6.7	19.4	-5.5
59	30.0	1.1	17.7	4.7

60	58.3	6.8	65.2	1.1
61	49.2	5.8	17.0	-5.7
62	52.4	6.3	40.1	-12.6
64	59.9	2.9	20.4	1.5
65	42.2	3.9	22.0	5.6
66	99.3	1.1	20.9	3.0
68	66.3	1.6	30.1	-4.1
69	66.3	4.1	43.2	0.6
70	31.3	3.1	21.4	4.5

Tests complémentaires sur le modèle GRM2

Cette annexe retrace un certain nombre d'analyses réalisées pour conforter certaines spécifications du modèle GRM2 et pour tenter d'identifier dans quelles conditions on peut espérer obtenir des améliorations.

Nous verrons successivement :

- la fonction de rendement des pluies ;
- l'introduction d'un écoulement "pseudo-direct" ;
- la neutralisation pluie-évaporation

1 - Vérification de la fonction de rendement de la pluie :

Dans les modèles de prédétermination, on cherche en premier lieu à connaître la quantité d'eau disponible pour l'écoulement en considérant comme pertes l'infiltration et l'évaporation. Cette recherche de la fonction de production peut se faire par deux méthodes différentes : capacité d'absorption et coefficient d'écoulement k qui est le rapport entre la pluie nette (PR) et la pluie brute. C'est cette dernière approche que nous avons utilisé dans notre modèle.

De nombreuses techniques sont disponibles dans la littérature. Citons par exemple la fonction de production du modèle de ruissellement PREVIK (SOGREAH, 1966), on peut citer également les relations utilisées dans les modèles ABCD, $T\alpha$, SMAP, MNL... ou encore la fonction utilisée initialement dans le modèle GR2, et qui est inspirée de la méthode du soil conservation service des Etat-Unis.

En ce qui nous concerne, nous avons adopté la même formule que celle utilisée dans le modèle de référence GR3j et dont l'expression est :

$$k = \left[\frac{S}{A} \right]^n \quad \text{avec } n = 2$$

Dans ce qui suit on se propose de contrôler uniquement la validité de l'exposant de cette formule en l'optimisant pour chacun des bassins versants.

Le résultat de cette optimisation est comparé à celui obtenu avec l'ancienne expression.

Le calage montre que les valeurs de C et donc de l'exposant de la relation du coefficient d'écoulement, varient dans une large gamme de 0.20 à 6.75. Cependant on peut remarquer que plus de la moitié des bassins versants étudiés affichent des valeurs de C inférieures à 1.5 et que 40% des bassins présentent des

valeurs de C inférieures à 1 et seulement trois bassins ont des valeurs supérieures à 2 (les bassins versants n°51, 55 et 60) dont les valeurs respectives sont : 3.5, 2.9 et 6.75.

Au vu de ces résultats, il semble que le coefficient d'écoulement suive une loi linéaire.

En fait, le calage du modèle GRM2 avec une fonction de rendement de la pluie linéaire conduit à des résultats moins satisfaisants qu'avec une fonction de rendement quadratique, la détérioration du critère annuel moyen est de 1%. C'est pourquoi, nous nous proposons dans la suite de l'étude, de retenir l'expression quadratique.

Une remarque intéressante à souligner est que le schéma avec optimisation du rendement de la pluie conduit à un critère annuel moyen comparable à celui obtenu avec le modèle GRM2. Autrement dit une modification de la spécification du paramètre C, sans aucune correction des données, aboutit à un modèle aussi performant que le modèle GRM2 dans lequel le troisième paramètre a deux significations : une neutralisation pluie-évaporation ou une correction des données.

2 - Ecoulement pseudo-direct :

Dans le but de voir l'influence du changement de structure du modèle sur la fraction d'écoulement pseudo-direct et éventuellement de la modifier, nous avons réalisé un test dans lequel le quatrième paramètre correspond au calage de la fraction d'écoulement pseudo-direct.

Par comparaison avec la simulation correspondant à la neutralisation pluie-évaporation (cf figure 42), on retrouve la même diversité :

- pour la majorité des bassins versants modélisés, la fraction d'écoulement pseudo-direct est de 3% à 75%. On note une légère augmentation par rapport au modèle de base.

- pour les bassins restants, cette fraction est, soit nulle et donc ce type d'écoulement n'existe pas (près d'une vingtaine de bassins versants se trouvent dans cette catégorie) soit elle atteint son maximum et alors la totalité de l'écoulement est pseudo-direct.

Trois bassins (n°57, 62 et 56) affichent un taux supérieur à 98%. On peut, là aussi chercher à fixer le taux d'écoulement pseudo-direct sur l'ensemble des bassins étudiés. L'essai correspondant avec un taux d'écoulement pseudo-direct fixe de 35% (la même valeur que celle utilisée dans le modèle GRM2) ne conduit pas à une forte dégradation de l'ajustement : l'écart du critère annuel moyen entre les deux procédures est inférieur à 1%.

Ce résultat permet de conclure que la fraction d'écoulement pseudo-direct peut être fixée sans dégradation sensible de la performance globale du modèle.

3 - Intérêt d'une correction des données :

Dans ce qui suit, notre attention portera sur les problèmes posés par les entrées. On rappelle que le modèle de base tendait à une sous-estimation des apports. On peut penser qu'une correction globale de l'évaporation (en la diminuant) ou de la pluie (en l'augmentant) pourrait améliorer les résultats. Selon les essais, le quatrième paramètre correspond donc à l'optimisation de la correction de l'une des deux entrées.

Il est évident que l'introduction d'une correction des données conduit à des résultats plus satisfaisants eu égard aux critères numériques. Cependant, l'analyse des résultats conduit aux remarques suivantes :

- le modèle introduisant une correction globale d'évaporation s'est révélé plus satisfaisant que celui relatif à une correction globale de la pluie avec une amélioration du critère annuel moyen de 0.5%.

- pour la plupart des bassins versants les corrections de pluie identifiées sont positives, ce qui peut sembler normal puisque nous avons remarqué une sous-estimation des lames d'eau simulées. La correction la plus forte est d'un facteur de 2 pour le bassin versant n°43. Cependant, on observe que pour un nombre non négligeable de bassins versants, la correction est très faible et peut être même inférieure à 1 (bassins n°21, 23, 25, 38, 49, 52, 54, 58 et 60) pour atteindre la valeur minimale de 0.80 pour le bassin 60.

- les corrections globales d'évaporation sont généralement inférieures à 1 : 73% des bassins versants modélisés ont une correction moyenne de -30%. Cependant, nous avons été surpris, quelque peu, par le grand nombre de bassins versants pour lesquels il faut diminuer l'évaporation potentielle de plus de la moitié.

Nous présentons dans le tableau 1 en colonne (3) et (2), respectivement, la correction d'évaporation potentielle ainsi que la capacité maximale du réservoir-sol correspondante à ces bassins versants.

N° des B.V.	CORRECTION DE L'ETP (estimée par le bac C)		CORRECTION DE L'ETP avec réduction de 20%	
	A(mm)	C(mm)	A(mm)	C(mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3	372	0.49	376	0.60
17	116	0.40	788	0.27
19	6	0.45	614	0.53
20	608	0.46	614	0.55
27	428	0.38	416	0.49
34	534	0.28	539	0.35
41	89	0.45	88	0.56
43	72	0.34	73	0.43
47	82	0.41	22026	0.27
68	311	0.32	305	0.40
70	111	0.41	112	0.52
moyennes (sauf47)	265 (sauf47)	0.40	393 (sauf47)	0.45

Tableau 1 : "Correction" globale d'ETP

Ces résultats viennent consolider ceux obtenus précédemment (4.5.32) où il est apparu que la correction d'évaporation potentielle est plus significative que celle des pluies et présente également des valeurs fortes.

L'effet de l'évaporation potentielle sur le bassin considéré semble partiel. Les réserves superficielles étant faibles, seule une partie du bassin versant est soumise à l'évaporation potentielle. En effet, il est apparu que la capacité moyenne du réservoir-sol (c'est-à-dire le paramètre A) relative à ces bassins versants, est inférieure à la moyenne de l'ensemble des bassins versants : on a 265 mm au lieu de 548 mm (si on excepte le bassin n°47).

Une deuxième remarque est relative aux données d'évaporation potentielle. Celles-ci étant issues de mesures en bac Colorado sont surestimées.

D'après l'analyse des valeurs, il apparaît qu'une réduction de 20% est nécessaire.

L'essai correspondant, montre que la correction proposée est satisfaisante pour la grande majorité des bassins versants étudiés. En particulier, il apparaît dans le tableau 1, colonne (5), une amélioration de la correction de 5% (la diminution de l'évaporation potentielle sur les 11 bassins versants du tableau 1, est de 55% au lieu de 60%) accompagnée d'une augmentation de la réserve superficielle (moyenne 393 mm au lieu de 265 mm) si on excepte le bassin versant n°47 pour lequel la valeur de A a augmenté considérablement (22 m !).

Cependant pour 24% des bassins versants modélisés, les corrections identifiées sont positives, mais elles sont en général beaucoup moins importantes que les négatives.

En définitive, il apparaît que parmi les variantes pouvant avoir une influence réelle sur la simulation des débits mensuels, une "correction" d'évaporation potentielle est la plus satisfaisante.

4 - Conclusion sur GRM2 avec 4 paramètres :

Dans ce chapitre, nous avons essayé, généralement par le recours à un quatrième paramètre, d'une part de vérifier la consistance de certaines spécifications du modèle, comme par exemple le caractère quadratique de la fonction de rendement de la pluie, et d'autre part de sonder les directions dans lesquelles on pouvait rechercher une amélioration des performances du modèle en introduisant une souplesse supplémentaire.

A l'issue de ces essais quelque peu laborieux, on peut poser les deux conclusions suivantes :

1) les fonctions principales du modèle, impliquant les paramètres A et B sont correctes et peu susceptibles d'amélioration ;

2) les données disponibles sont telles que l'on a beaucoup de mal à dégager une amélioration au-delà de 3 paramètres.

Le gain marginal nous paraît trop faible pour justifier une complication d'un modèle bien que très simple.

