

Application d'une modélisation de la relation pluie brute - pluie efficace à la prévision des crues sur le Haut-Aveyron

Claude THIRRIOT (1) et Jean-Claude GOUZE (1)

RÉSUMÉ

Après une brève synthèse bibliographique, une modélisation de la relation pluie brute - pluie efficace est présentée, dans le cadre général des relations pluie-débit. Ce modèle fait appel à une expression de forme quadratique, et l'estimation de la pluie efficace est bien sûr fonction de l'état de saturation des sols, par l'intermédiaire d'un indice d'humidité. On associe cette fonction de production, pour laquelle une méthode simple de calage est exposée, à une fonction de transfert pluie efficace-débit déterminée par la méthode DPFT bien connue. Le calage est réalisé sur le haut-bassin de l'Aveyron, puis l'on procède à la validation sur des crues-tests. Les résultats semblent satisfaisants, au vu des critères d'adéquation préalablement définis.

MOTS-CLÉS: Relation pluie-débit — Pluie brute — Pluie efficace — Fonction de production — Fonction de transfert — Méthode DPFT — Indice d'humidité — Bassin versant — Haut-Aveyron — Crues-tests.

ABSTRACT

APPLICATION OF A MODEL RELATING TOTAL RAINFALL TO RAINFALL EXCESS TO FLOOD FORECASTING ON THE AVEYRON

First, a short literature review is given of the models relating total rainfall and rainfall excess. In particular, the family of models with tanks and other models using non-linear analytical expressions, are dealt with.

Secondly, our model connecting total rainfall and rainfall excess is presented in the framework of rainfall-runoff relations. This model is represented by a non-linear quadratic expression: $PE = P^2/(P + P_0)$. PE represents rainfall excess, P measured precipitation, the estimation of the rainfall excess depends on the soil moisture of the basin, corresponding to the parameter P_0 , concerning which we consider an antecedent-precipitation index with decreasing exponential coefficients.

A simple method is proposed for calibrating the model. This model is associated with a transfer function, calculated by the well-known DPFT method (taken from the unit hydrograph method with an iterative resolution, where rainfall excess and transfer function coefficients are calculated together). Calibration and validation are made in the Aveyron basin (S.W. France). The results obtained can be considered satisfactory according to the defined criteria of comparison between observed and calculated hydrographs. These criteria of comparison represent the standard deviation of the predicted values and also the error on the maximum flood.

KEY WORDS: Rainfall-runoff — Total rainfall — Rainfall excess — Production function — Transfer function — DPFT method — Moisture index — Catchment — Haut-Aveyron.

1. INTRODUCTION

Précisons tout d'abord que nous désignerons (bien qu'il n'existe pas forcément de consensus sur cette terminologie), par pluie efficace la part de la pluie tombée (ou pluie brute) donnant lieu à du ruissellement direct, et par fonction de production la fonction de passage de la pluie brute (P) à cette pluie efficace (PE). Bien entendu, nous n'avons pas la vaine prétention d'être les premiers à parler de ce passage à la pluie efficace. De nombreux chercheurs ont

(1) Institut de Mécanique des Fluides, 2, rue Camichel, 31071 Toulouse. Laboratoire associé au CNRS.

apporté leur contribution à l'examen de ce phénomène naturel depuis plus de 40 ans. Les chercheurs de l'ORSTOM en particulier ont mis en évidence les conséquences de circonstances fort différentes de celles que nous connaissons en France métropolitaine.

L'étude, plus générale, du passage de la pluie qui tombe en débit peut être abordée de différentes manières. Celle que nous avons choisie est une manière globale tenant compte de la variation temporelle de la pluie et de la variation concomitante du débit à l'exutoire du bassin (qui peut être assez grand, de l'ordre de 1 000 km²): on parle de convolution. Mais le phénomène est complexe: il englobe successivement la détention de surface et l'évapotranspiration, l'infiltration hypodermique, l'évaporation si la durée s'allonge (C. THIRRIOT, 1980), et ensuite l'écoulement.

Du point de vue mathématique, on peut schématiser le processus en scindant en deux le phénomène, en une étape de transformation de la pluie tombée en une pluie effective qui va s'écouler mais qui reste dans son estimation tout de même un concept fictif, et en une deuxième étape considérée purement de ruissellement. La première étape, dans le schéma conceptuel, est représentée par la fonction de production, la deuxième étape est qualifiée de fonction de transfert:

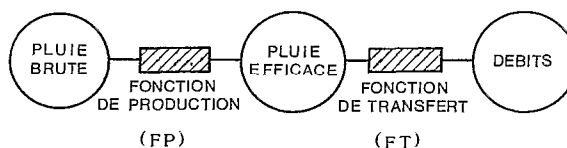


FIG. 1. — Schéma global de la relation pluie-débit.

Bien entendu, il est difficile de démêler ces deux étapes, et il y aura pas mal d'arbitraire dans leur conceptualisation. Par exemple, on admet généralement que la fonction de transfert est un opérateur linéaire, et on rejette toutes les causes de non-linéarité dans la première opération de la fonction de production. C'est la façon de voir que nous adopterons nous-mêmes dans ce qui suit, en marchant sur les traces de prédécesseurs prestigieux tels que GUILLOT et DUBAND.

2. LA FONCTION DE PRODUCTION

2.1. L'ASPECT BIBLIOGRAPHIQUE

Nous nous proposons, avant toute chose, et pour mieux situer notre approche, de donner un bref aperçu (évidemment non exhaustif) des familles de modèles pluie brute-pluie efficace que l'on peut rencontrer dans la littérature.

Dans le domaine de la modélisation déterministe de la relation pluie-débit, M. ROCHE (1971) distingue deux corps de doctrine: d'une part, celui des «modèles à réservoirs», et d'autre part celui des «modèles de ruissellement» (avec une équation générale du ruissellement), ces derniers dans la lignée de la théorie de l'hydrogramme unitaire (SHERMANN, 1932).

Quelle est alors la place de la fonction de réduction pluie brute-pluie efficace, qui nous intéresse, dans ces formulations? Dans le premier cas, la fonction de réduction de la pluie mesurée fait partie intégrante du modèle, par soustraction des pertes (évapotranspiration, infiltration...) en chaque réservoir. Dans le deuxième cas, il y a nécessité à effectuer au préalable la transformation lame brute-lame ruisselée.

Une famille importante est donc constituée des modèles à réservoirs, dont le plus ancien à notre connaissance est le modèle de Stanford (CRAWFORD et LINSLEY, 1966), qui a été suivi de beaucoup d'autres. Un certain nombre de modèles fonction de production s'inspire de ces schémas plus généraux. Ainsi, et à titre d'exemple, G. GIRARD, pour son modèle à discrétisation spatiale, utilise un schéma à un réservoir, avec déversoir supérieur pour simuler le ruissellement pur, et des orifices inférieurs pour simuler le ruissellement retardé, le ruissellement hypodermique, l'écoulement de nappes, le tout, après soustraction de l'évaporation (voir sur la figure 2 un schéma simplifié de ce type de représentation).

Un autre exemple nous est donné par le modèle utilisé au sein de l'équipe du professeur OBLED de Grenoble et proposé initialement par LORENT (1975). Les deux éléments en sont une vanne matérialisant la répartition entre stockage et ruissellement direct, et un réservoir (stockage) assorti d'un bouchon poreux (infiltration). La résolution s'articule autour des 3 équations suivantes:

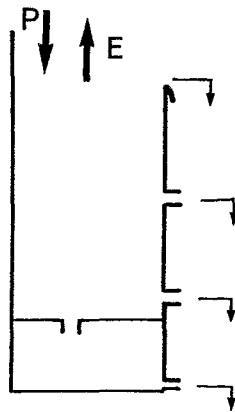


FIG. 2. — Schématisation de modèle à réservoir.

$$\begin{aligned} \text{équation de bilan:} & P_j = PE_j + W_j & (1) & \quad W_j \text{ est la partie stockée} \\ \text{déficit de stockage } (D_j) : & D_j = (1-\alpha) D_0 + \alpha (D_{j-1} - W_j) & (2) & \quad 0 < \alpha < 1 \\ \text{équation où intervient la pluie brute } P: & W_j = D_{j-1} (1 - \exp(-\beta P_j/D_{j-1})) & (3) & \quad 0 < \beta < 1. \end{aligned}$$

Au vu de ceci, nous pensons qu'il faut comprendre que W_j englobe également les pertes par évapotranspiration.

À côté de ces schémas à réservoirs, des expressions analytiques sont proposées par un certain nombre d'auteurs, donnant la pluie efficace en fonction de la pluie brute sous la forme générale:

$$\begin{aligned} PE &= \frac{(P - P_1)^m}{P^{m-1} + P_0^{m-1}} & \text{pour } P > P_1 \\ PE &= 0 & \text{pour } P < P_1 \end{aligned}$$

P_0 et P_1 sont des paramètres homogènes à des hauteurs de pluies qui vont dépendre de l'histoire hydrométéorologique, et tout particulièrement de l'humidité du sol superficiel qui est homologue au volume stocké utilisé par les représentations à réservoirs. Mais disons tout de suite que les modèles de ce type que l'on rencontre sont ceux pour lesquels $m = 2$. Citons en cela G. GIRARD (1975): «*Dans la plupart des études approfondies sur la forme de la relation entre lame ruisselée et pluie au niveau de l'événement averse-crue (...), on aboutit à l'idée d'une forme parabolique*».

Il en est ainsi de la méthode classique du SCS (Soil Conservation Service), et, par exemple en France, du modèle proposé par D. DUBAND (1982) avec une expression de la forme: $PE = P^2/(P + P_0)$. Le coefficient de «rétention» P_0 va dépendre d'une part de la température, d'autre part de l'état de saturation, caractérisé par l'indice d'humidité H , homogène à une hauteur d'eau, qui est, soit un indice des précipitations antérieures, soit un indice des débits antérieurs: $P_0 = P^* \cdot T/H \cdot T_0$, T : température, $P^* = \text{constante}$.

Ajoutons que les chercheurs de l'ORSTOM ont également beaucoup travaillé sur la question. Les études faites l'ont été dans un contexte hydrologique le plus souvent très différent du contexte français métropolitain. Si beaucoup d'études ORSTOM se placent à l'échelle de l'averse prise globalement, des travaux ont aussi été faits à l'échelle de pas de temps courts (citons seulement LAFFORGUE, 1976 et CHEVALLIER, 1985).

Au vu de tout ce qui précède, nous pouvons dire que, si les modèles à réservoirs permettent de bien schématiser l'intervention des différents mécanismes hydrodynamiques, ils peuvent comporter un aspect conceptuel autoritaire, comme par exemple l'équation (3) dans le modèle de Lorent. Ceci nous laisse penser qu'on peut aboutir à des résultats similaires par des formules de lissage sans prétention à représentation de la physique du phénomène. C'est la voie que nous avons choisie dans notre étude, en optant pour une forme analytique quadratique.

2.2. LE MODÈLE CHOISI

Le modèle fonction de production que nous avons choisi est, sous sa forme générale:

$$PE = \frac{P^m}{P^{m-1} + P_0^{m-1}} \quad (4)$$

Plus précisément, l'expression sera: $PE = P^2 / (P + P_0)$ (5), mais le coefficient P_0 va dépendre, comme on va le voir, de la pluie brute P . Nous avons choisi pour P_0 une formulation: $P_0 = \frac{P_0^{*2}}{FS(P,H)}$ (6) avec $P_0^* = \text{constante}$.

La fonction «état du sol» FS dépend de la pluie brute P du pas de temps courant, et d'un indice d'humidité H , indicateur global ayant pour objectif de caractériser l'état de saturation des sols du bassin. Il s'agit d'un indice des pluies antérieures (analogue à celui proposé par C. THIRRIOT, 1986) pour lequel, afin de tenir compte des effets conjugués de vidange assurés par l'évaporation et l'infiltration profonde, on va faire intervenir un coefficient de tarissement exponentiel. Nous englobons dans cet indice d'humidité, d'une part la contribution des jours précédents (par l'intermédiaire des pluies journalières antérieures à l'épisode générateur de crue: on considère donc ici un pas journalier), et d'autre part celle de

la somme S_a des pluies tombées depuis le début de l'épisode pluvieux ($S_a = \sum_{i=1}^{j-1} P_i$: on considère là le pas de temps court (< 24 h), i.e. le pas de prévision). L'indice H s'écrit: $\sum_{-\infty}^t P_j \cdot e^{- (t - t_j)/t^*}$ (7), la pondération par l'expo-

nentielle se prêtant sans difficulté à des intervalles de temps $(t-t_j)$ de valeurs différentes (pas journalier et pas < 24 h).

Restent la question du temps caractéristique t^* et celle de la longueur de la période antérieure. Des coups de sonde ont été faits en prenant des valeurs différentes, en particulier en prenant $t^* = 3$ jours et $t^* = 10$ jours. Il s'est avéré que les résultats étaient très peu différents en augmentant t^* et le nombre de jours antérieurs pris en compte, eu égard aux erreurs par ailleurs toujours présentes de mesure et de modélisation. Les valeurs retenues sont alors: $t^* = 3$ jours, et une période de 10 jours antérieurs.

En choisissant une expression linéaire pour la fonction «état du sol», nous écrivons:

$$FS = c.P + (1 - c).H \quad (8) \quad \text{avec: } 0 < c < 1$$

Le premier terme représente en quelque sorte la contribution du présent (P est la pluie tombée pendant le pas de temps courant), le second terme représente celle du passé (l'état du bassin).

Revenons ici sur l'expression générale (4). Compte tenu des relations (6) et (8), voyons ce que devient l'expression (5) suivant les valeurs de c .

Si $c \rightarrow 1$, FS se réduit à: $FS = P$; il vient alors: $PE = P^3/(P^2 + P_0^{*2})$, et l'on voit donc que nous avons en fait affaire à un exposant $m = 3$.

Si $c \rightarrow 0$, FS se réduit alors à: $FS = H$, et l'on a: $PE = P^2/(P + P_0^{*2})$, et l'exposant est alors égal à 2.

Enfin, si $0 < c < 1$, il vient:

$$PE = \frac{c P^3 + (1 - c) H.P^2}{c P^2 + (1 - c) H.P + P_0^{*2}}$$

et nous avons sous cette forme ainsi explicitée une expression qui est le rapport d'un polynôme de degré 3 et d'un polynôme de degré 2.

Ceci généralise donc d'une certaine façon le choix fait d'ordinaire d'une expression de degré 2. Il n'en demeure pas moins vrai que, dans l'élaboration de ce modèle, nous avons été guidés par le souci d'une certaine simplicité, et en particulier par la méfiance vis-à-vis d'un nombre trop grand de paramètres et de grandeurs physiques qui risquent d'entraîner une certaine instabilité.

3. LA MODÉLISATION DE LA RELATION PLUIE-DÉBIT PAR LA MÉTHODE DPFT

3.1. LE CALAGE DE LA FONCTION DE TRANSFERT ET L'IDENTIFICATION DES PLUIES EFFICACES

Le calage d'un modèle fonction de production, qui est un des points les plus délicats dans l'étude globale de la relation pluie-débit, nécessite la donnée de couples pluie brute-pluie efficace (P , PE).

Si l'on travaille à l'échelle des averses, prises globalement, les données de pluie efficace nous sont fournies à partir des hydrogrammes par le calcul des volumes ruisselés globaux. Il faut par contre user d'une autre méthode si l'on travaille à des pas de temps faibles, inférieurs à la durée de la pluie génératrice, de l'ordre de l'heure.

La méthode dite DPFT (Différences Premières de la Fonction de Transfert) a été mise au point par MM. P. GUILLOT et D. DUBAND, de la DTG-EDF (1980). Le schéma de la DPFT se situe dans le droit fil de l'approche type hydrogramme unitaire, approche déjà ancienne (SHERMANN, 1932). Le calage d'une relation pluie-débit par la méthode DPFT permet, à partir des hydrogrammes et des mesures de pluie brute, l'obtention conjointe de la fonction de transfert et des pluies efficaces pour chaque pas de temps, et donc en particulier d'un ensemble de couples (P, PE).

Le schéma traduisant la discrétisation de l'intégrale de convolution est:

$$(9) \quad q_{j,s} = \sum a_i \cdot P_{j-i+1,s} \quad \text{pour le pas de temps } j \text{ et l'événement pluie-crue } s$$

avec: $q_{j,s} = Q_{j,s} - Q_{j-1,s}$: différences premières sur les valeurs de débit,

$a_i = A_i - A_{i-1}$: différences premières de la fonction de transfert (DPFT),

A_i : coefficients de la fonction de transfert.

Nous avons également appliqué un certain nombre d'améliorations et de contraintes afin d'augmenter la qualité des résultats. En particulier, nous nous sommes inspirés des travaux menés à l'IMG de Grenoble sous la direction du Professeur OBLED (VERSIANI, 1983; NALBANTIS, 1987).

Ainsi, une fois déterminée la fonction de transfert (sur un échantillon de crues de calage), pourra-t-on, en l'associant à la fonction de production, juger de la validité du processus global pluie-débit (et ce, sur un échantillon de crues-tests). Soit en travaillant en reconstitution d'hydrogrammes, soit en travaillant en «prévision», c'est-à-dire avec prise en compte à chaque pas de temps de la valeur observée au pas de temps précédent.

3.2. LE CALAGE DU MODÈLE FONCTION DE PRODUCTION

Revenons à la formule générale (5): $PE = \frac{P^2}{P + P_0}$, assortie des expressions (6) et (8). Le lissage d'une telle formule non linéaire, c'est-à-dire l'obtention des paramètres P_0^* et c du modèle, va se faire de façon très simple: d'après l'expression (5), nous avons: $P_0 = \frac{P}{PE} \cdot (P - PE)$.

Pour chaque couple (P_j , PE_j) de notre jeu de données issu de l'algorithme de la DPFT, nous pouvons calculer:

$$P_{0j} = \frac{P_j}{PE_j} \cdot (P_j - PE_j).$$

(Notons au passage que ce coefficient P_{0j} est le produit de la «rétention» que l'on peut noter $R_j = P_j - PE_j$ et de l'inverse du coefficient de ruissellement P_j/PE_j).

D'après les relations (6) et (8), nous avons:

$$\frac{1}{P_{0j}} = \frac{c}{P_{0j}^{*2}} \cdot P_j + \frac{1-c}{P_{0j}^{*2}} \cdot H_j \quad (10)$$

Si l'on pose: $Z = 1/P_0$, $X = P$, $Y = H$, nous obtenons:

$$Z_j = \alpha X_j + \beta Y_j \quad (11) \quad \text{avec: } P_{0j}^{*2} = 1 / (\alpha + \beta) \\ \text{et } c = \alpha / (\alpha + \beta)$$

Cette forme linéaire nous permet de déterminer α et β (et donc P_0^* et c) par la méthode traditionnelle des moindres carrés, en utilisant directement les expressions analytiques.

Nous insistons sur le fait que le processus non linéaire choisi est calé de façon très simple et très rapide, en faisant appel à la méthode des moindres carrés appliquée à des variables anamorphosées.

Enfin, nous introduisons un terme de pondération $v_j = e^{-\gamma/R_j}$, afin de contrecarrer l'influence des pluies faibles (on minimise alors la quantité: $\sum v_j \cdot (Z_j - \alpha X_j - \beta Y_j)^2$). En effet, les pluies nulles ou égales à quelques dixièmes de millimètres sur le pas de temps unitaire sont plus fréquentes que les pluies importantes; or ce sont ces dernières qui jouent le rôle principal dans le phénomène de la crue, et pour lesquelles l'on désire en priorité connaître le processus de la réduction à la pluie efficace.

4. APPLICATION DU MODÈLE FONCTION DE PRODUCTION

4.1. LE BASSIN VERSANT

Le cadre géographique de notre étude a été le haut bassin de l'Aveyron, dans le sud-ouest de la France, à hauteur de la station de Villefranche-de-Rouergue. La superficie du bassin versant est de 1 000 km².

Pour ce qui est du cours de la rivière, l'écoulement se fait grosso modo dans le sens est-ouest (voir la figure 3 : le bassin versant).

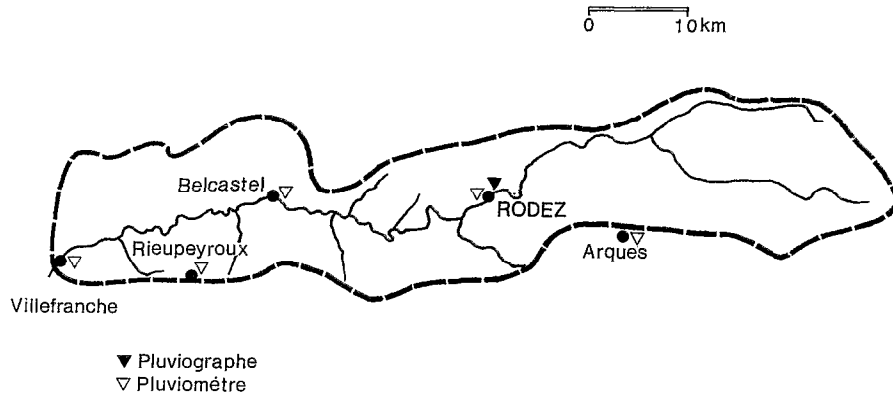


FIG. 3. — Le bassin versant du Haut-Aveyron.

L'Aveyron, qui est le plus grand affluent rive droite du Tarn, le Tarn se jetant lui-même dans la Garonne, prend naissance dans les Causses, dans la partie sud-ouest du Massif Central.

Les pluies représentatives que nous avons prises en compte pour la mise en œuvre de notre processus pluie-débit sont celles de la station de Rodez-Onet-Le-Château, en amont de Villefranche-de-Rouergue.

Le bassin comprend de vastes zones de terrain à faciès cristallins et cristallophylliens de tendance granito-gneissique dominante. Ces terrains sont très peu perméables et favorisent par là-même le ruissellement.

En ce qui concerne le relief, l'altitude du bassin s'élève assez progressivement d'ouest en est. Le point culminant se situe à la montagne de la Tousque (1 160 m). Le relief est quand même assez marqué, en particulier entre Rodez et Villefranche-de-Rouergue, où le cours d'eau entaille souvent profondément le lit, avec des rives à forte pente.

Parlons enfin du régime climatique général de la région. L'Aveyron est soumis à un régime océanique à influence continentale. La pluviométrie annuelle moyenne est de 980 mm à Rodez, et de 870 mm à Villefranche-de-Rouergue. On peut, approximativement, distinguer deux types d'événements pluvieux (hormis les précipitations orageuses, le plus souvent estivales): d'une part, des pluies de sud-est méditerranéennes, et d'autre part, de façon prépondérante, des précipitations d'ouest (océaniques).

Les hautes eaux se situent en hiver et au printemps (de décembre à avril), le débit mensuel maximal étant en février. Quant à l'étiage, il se situe au mois d'août (EGCE, 1967 *in* HABAIEB, 1987).

4.2. CALAGE ET TEST

Dans un premier temps, la méthode DPFT nous a donc permis de déterminer un jeu de pluies efficaces expérimentales, et d'opérer le calage de la fonction de transfert. L'échantillon de calage a porté sur 14 crues significatives de l'Aveyron à Villefranche-de-Rouergue. Le pas de temps que nous avons employé est de 4 h. Ce pas de temps a été choisi après observation des crues à Villefranche, et plus particulièrement en raison de la relative lenteur de la phase de montée des hydrogrammes: le temps de montée s'échelonne de 14 h à plusieurs jours pour les crues de l'échantillon. Cet intervalle de 4 h ne paraît donc pas trop grand, et il correspond d'ailleurs au délai de prévision souhaité pour l'Aveyron par le SHC (Service Hydrologique Centralisateur de Toulouse) et la DDE du Tarn-et-Garonne à Montauban.

La validation a consisté ensuite à appliquer le modèle fonction de production associé au modèle fonction de transfert, à des crues autres que celles de l'échantillon de calage, appelées crues-tests: on applique la fonction de production

calée, puis on réalise la convolution à l'aide de la fonction de transfert. Il est alors possible de comparer les débits obtenus aux débits réellement observés.

Les crues-tests sont au nombre de quatre. Trois d'entre elles ont une forme relativement simple (et fréquemment rencontrée) constituée d'un épisode à une bosse, la quatrième étant plus complexe, représentée par un hydrogramme à deux bosses (ceci apparaît plus loin sur les figures-résultats: 5 à 8).

TABLEAU I
Tableau des crues-tests

n °	date de la crue	Q _{max} (m ³ /s)	nbre de pics
1	16-22/01/1975	67	1
2	27/1-5/2/1975	80	1
3	15-23/12/1979	121	1
4	25/2-6/3/1983	119	2

Afin de quantifier l'adéquation entre valeurs observées et valeurs calculées par le modèle pluie-débit, le choix de critères doit être fait. Nous avons opté pour des grandeurs simples et bien connues.

Nous considérerons d'une part:

— le coefficient de corrélation R entre débits (ou niveaux) observés et débits (ou niveaux) modélisés.

D'autre part, deux critères déjà utilisés par C. THIRRIOT et H. HABAIEB (1987):

— critère S sur l'écart quadratique rapporté au maximum:

$$S = [(E^2/n)^{1/2}] / Q_{\max \text{ obs}} \quad \text{avec:} \quad E^2 = \sum (Q_{i \text{ cal}} - Q_{i \text{ obs}})^2$$

— critère sur le maximum:

$$S' = (Q_{\max \text{ cal}} - Q_{\max \text{ obs}}) / Q_{\max \text{ obs}}$$

Le calage du modèle fonction de production, réalisé bien sûr avec les pluies efficaces trouvées lors de l'application de la DPFT, donne les résultats suivants:

$$P_0^{*2} = 36 \text{ mm}^2 \quad c = 0,45 \quad \gamma = 8 \text{ mm}$$

La détermination du paramètre γ s'est faite par tâtonnements, la valeur retenue étant celle pour laquelle on obtient les meilleurs résultats sur les crues-tests au regard des critères S et S', après calage des paramètres P_0^* et c. Un certain nombre de valeurs de γ ont été testées. La figure 4 donne, pour trois crues-tests, les valeurs du critère S en fonction de valeurs de γ ($\gamma = 0, 2, 5, 8, 10, 15 \text{ mm}$). On constate donc le point optimum en $\gamma = 8 \text{ mm}$.

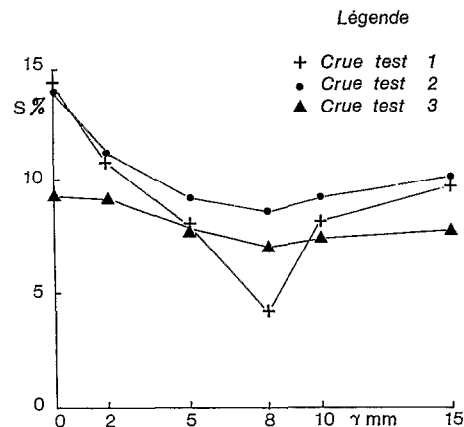


FIG. 4. — Graphe de sensibilité au paramètre γ .

4.3. RÉSULTATS

Nous présentons en trois temps les résultats de notre application et leur évaluation.

Tout d'abord, on trouvera les résultats sur les crues-tests, au sens des critères R, S et S', dans les tableaux II et III (les crues numérotées 1 à 4, S et S' exprimées en %): le tableau II donne les résultats en mode reconstitution, le tableau III en mode prévision. On peut ainsi constater (tableau III) que les valeurs trouvées traduisent une bonne adéquation (S, S' < 4%, R > 98%).

TABLEAU II

Valeurs des critères sur les crues-tests, en mode reconstitution

code crue	R	S %	S' %
CJ075	0,95	7,1	-9,5
CD179	0,99	4,2	1,4
CF083	0,91	8,6	2,7
CF075	0,95	6,6	-3,0

TABLEAU III

Valeurs des critères sur les crues-tests, en mode prévision

code crue	R	S %	S' %
CJ075	0,99	2,9	3,6
CD179	0,99	3,4	3,3
CF083	0,98	3,7	1,7
CF075	0,98	3,7	3,2

Ensuite, nous présentons (fig. 5 et 8) les graphes des hydrogrammes observés et calculés pour chacune des quatre crues-tests: l'on peut ainsi visualiser la qualité relativement bonne des valeurs calculées.

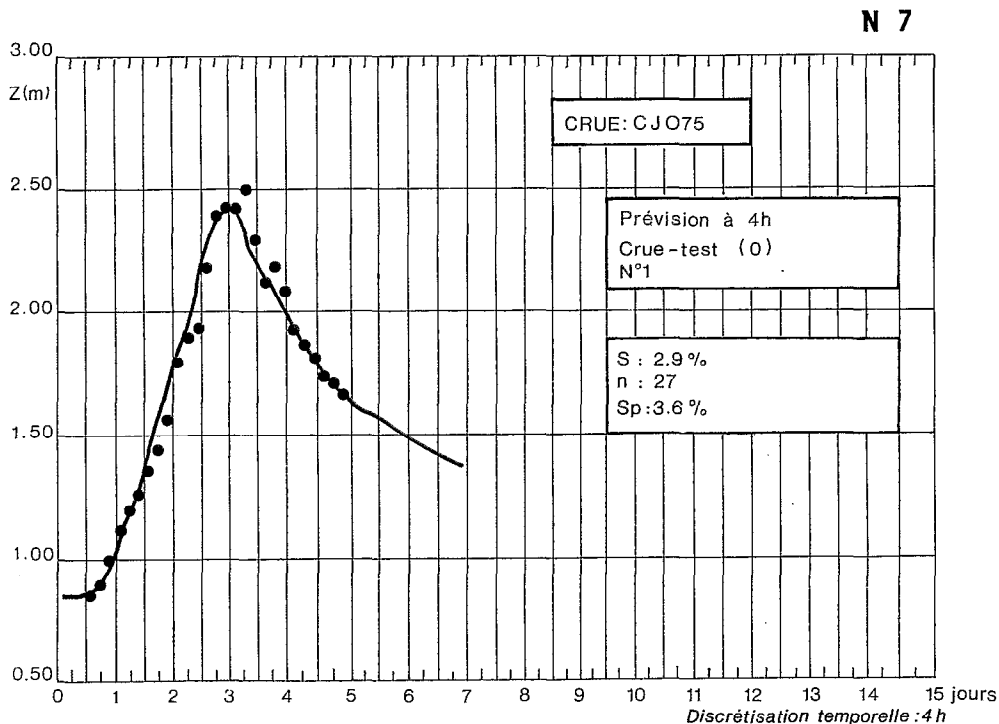


FIG. 5. — Hydrogrammes observé et calculé: crue-test n° 1.

N 7

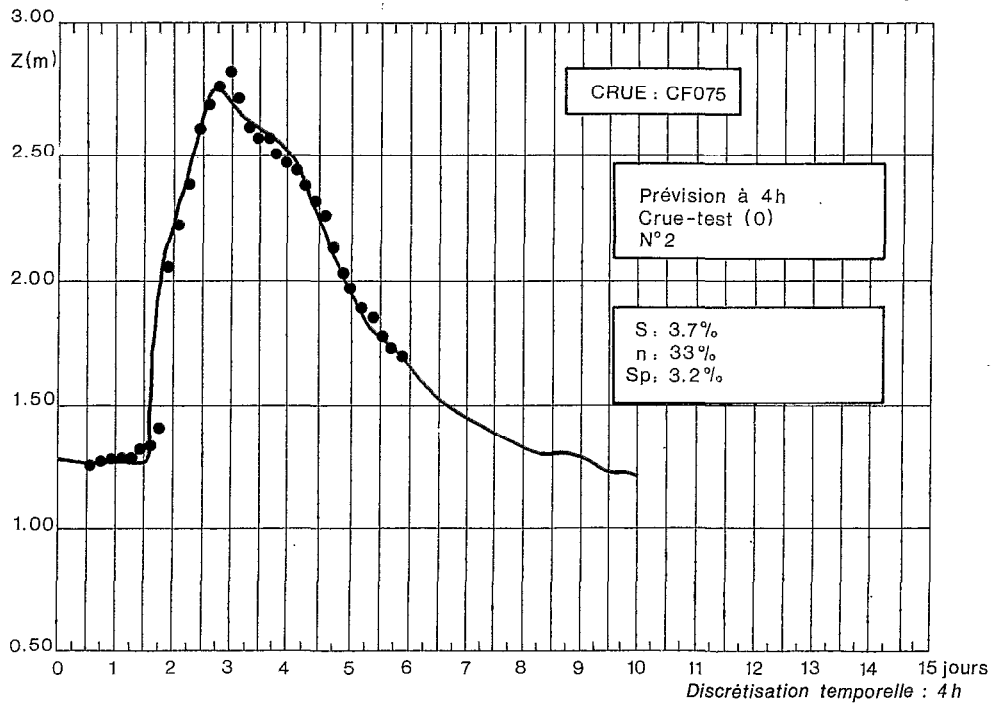


FIG. 6. — Hydrogrammes observé et calculé: crue-test n° 2.

N 7

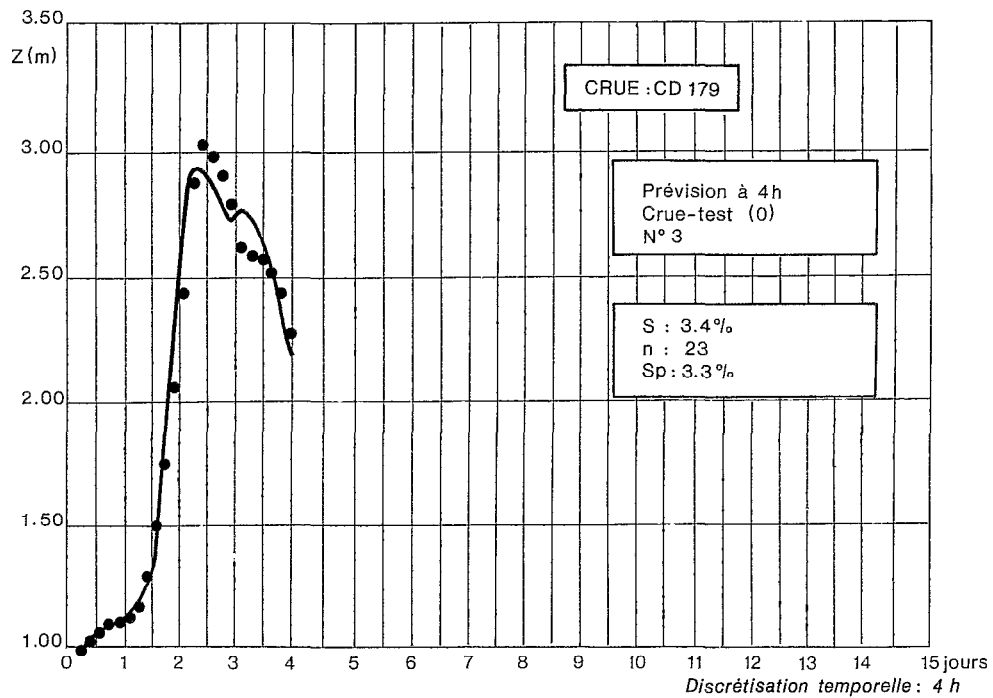


FIG. 7. — Hydrogrammes observé et calculé: crue-test n° 3.

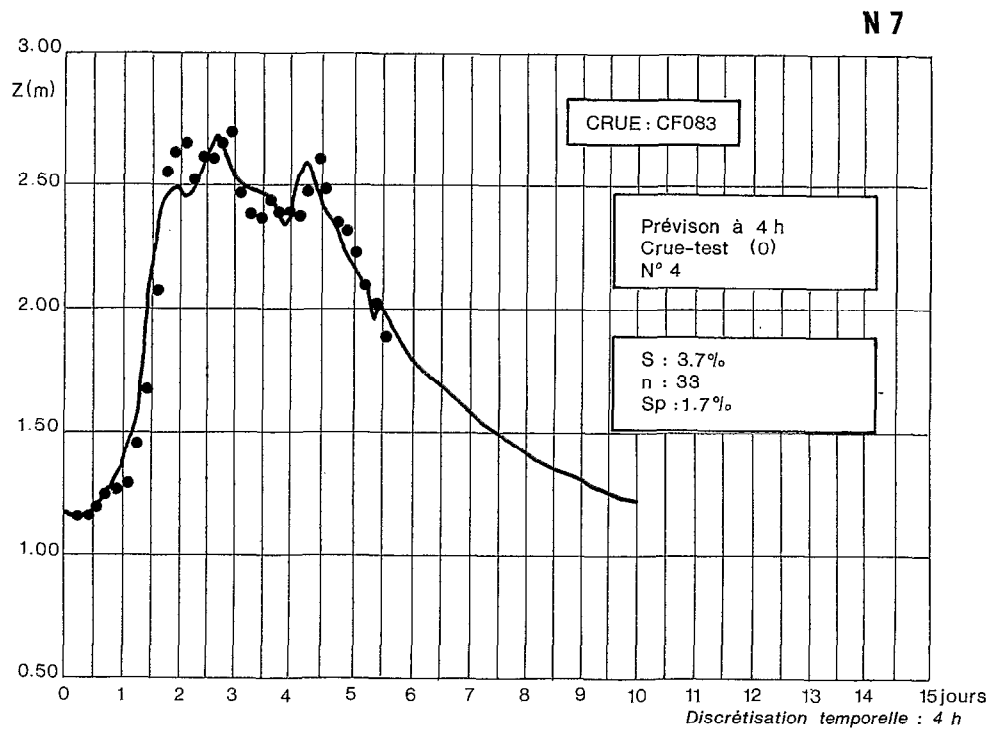


FIG. 8. — Hydrogrammes observé et calculé: crue-test n° 4.

Enfin, nous joignons (fig. 9 et 10) les fonctions de répartition expérimentales des critères S et S' pour l'ensemble des crues (crues de calage + crues-tests), où l'on voit que là aussi les critères restent inférieurs à 4%. A noter également que, sauf en deux cas, le maximum n'est pas minimisé (ceci allant dans le sens de la sécurité).

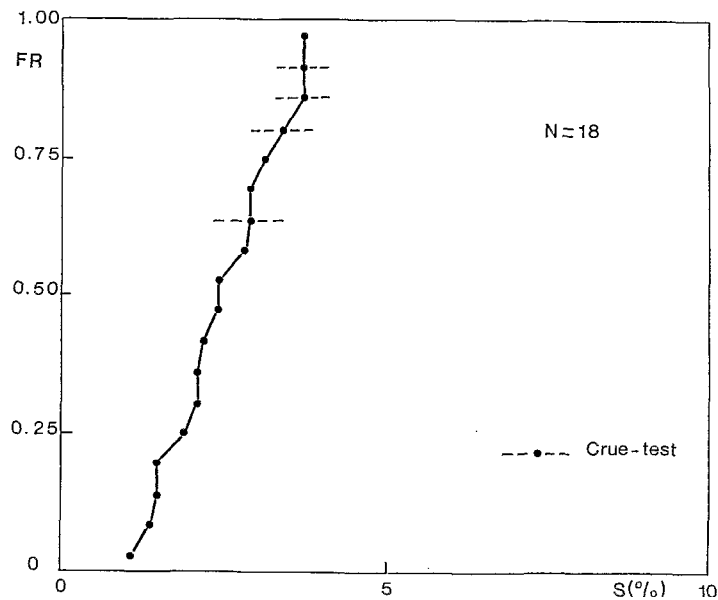
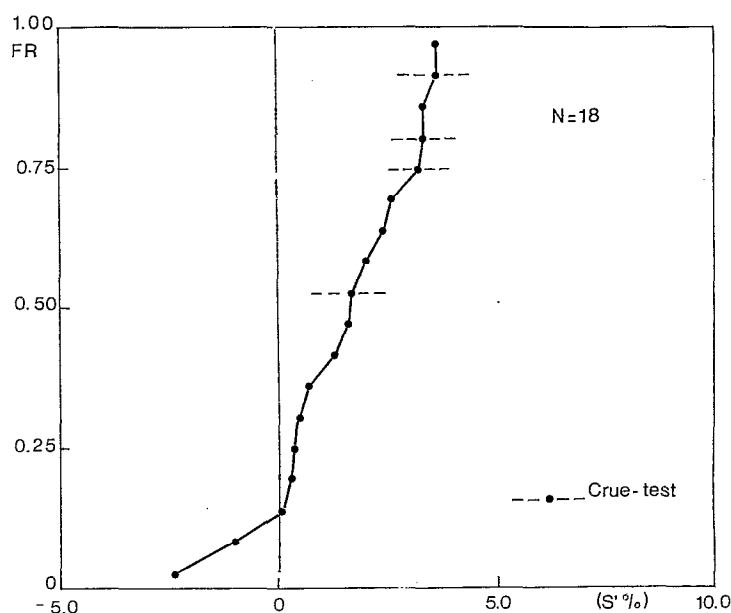


FIG. 9. — Fonction de répartition du critère S.

FIG. 10. — Fonction de répartition du critère S' .

5. CONCLUSION

Malgré toute la bonne volonté et malgré l'expérience, la représentation des crues reste une affaire difficile. Dans un récent séminaire sur l'hydrologie stochastique tenu à Peniscola en Espagne du 18 au 29 septembre 1989 grâce au mécénat de l'OTAN, un professeur américain a déclaré qu'aux Etats-unis il n'y avait pas eu d'amélioration sensible de la prévision des crues depuis cinquante ans.

La méthode DPFT présente à notre avis le grand avantage de faire une belle part dans l'algorithmique à la physique du phénomène, par l'intermédiaire de la fonction de production. Mais ce n'est pas encore la panacée. Dans l'étude présentée ici, nous montrons des résultats encourageants sur la prévision des crues-tests parce que les erreurs relatives sont assez limitées. L'application de l'algorithme de prévision aux crues qui ont servi au calage ne bouleverse pas les conclusions. Certes les fonctions de répartition des figures 9 et 10 montrent un avantage pour les crues de calage, mais l'une de celles-ci est plus défavorisée que les crues-tests, et suivant le critère S d'écart quadratique, les barycentres des deux catégories ne sont pas très éloignés.

A notre avis, la prévision des crues relève encore pour un bon bout de temps de la science inductive. Une plus grande clairvoyance et une meilleure efficacité nécessite la mise en commun coopérative des expériences menées par les laboratoires d'hydrologie informatique et les services de gestion opérationnelle; et c'était bien là l'objectif de notre contribution.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 10 octobre 1989

BIBLIOGRAPHIE

- ANDO (Y.), 1988. — A daily rainfall-runoff model for a mountainous basin. *Journal of hydroscience and hydraulic engineering*, vol. 5, n° 2: 53-64.
- CHANG (T.), DELLEUR (J.W.), KAVVAS (M.L.), 1987. — Application of discrete autoregressive moving average models for estimation of daily runoff. *Journal of hydrology*, n° 1/2, May 15: 119-135.
- CHEVALLIER (P.), 1983. — L'indice des précipitations antérieures. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XX, n° 3 et 4.

- CHEVALLIER (P.), 1985. — Analyse et modélisation du ruissellement en région sahélienne (mare d'Oursi, Burkina Faso). *La houille blanche*, n° 6/7.
- CLARKE (R.T.), 1973. — A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of hydrology*, 19: 1-20.
- CRAWFORD (N.H.), LINSLEY (R.K.), 1966. — Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model Mark IV. Dept. Civil Eng. Tech. Report 39, Stanford University California USA.
- DEMAREE (G.), 1982. — Comparison of techniques for the optimization of conceptual hydrological models. Mathematics and computers in simulation, XXIV: 122-130.
- DELLEUR (J.W.), OBLED (C.), 1985. — Flash flood forecasting in the Cevennes region in France; a case study. Vth world congress in water resources 9-15 juin, Bruxelles, Belgique.
- DUBAND (D.), 1982. — Hydrologie statistique approfondie. ENSH Grenoble, INP Grenoble.
- DUBREUIL (P.), 1966. — Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, n° 5.
- DUBREUIL (P.), 1974. — Initiation à l'analyse hydrologique. Masson, ORSTOM.
- DUJARDIN (J.M.), 1980. — Exemples concrets d'annonce des crues dans de petits bassins versants. *La houille blanche*, n° 4/5.
- GAUDU (R.), 1983. — Cours d'hydrologie, tome I. INP Toulouse, ENSEEIHT.
- GIRARD (G.), 1969. — Etude du ruissellement sur un bassin de 1 200 km² et recherche d'un modèle hydropluviométrique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. VI, n° 2.
- GIRARD (G.), 1970. — Essai pour un modèle hydropluviométrique conceptuel et son utilisation au Québec. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. VII, n° 2.
- GIRARD (G.), 1975. — Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame d'eau écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XII, n° 3.
- GIRARD (G.), 1980. — Application d'un modèle simplifié aux zones du Sahel. *La houille blanche*, n° 4/5.
- GIRARD (G.), MORIN (G.), CHARBONNEAU (R.), 1972. — Modèles précipitations-débits à discrétisation spatiale. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. IX, n° 4.
- GRARD (R.), GUILLOT (P.), 1980. — Relations pluie-débit sur la Saône à Lyon. *La houille blanche*, n° 4/5.
- GUILLOT (P.), DUBAND (D.), 1980. — Fonction de transfert pluie-débit sur les bassins versants de l'ordre de 1 000 km². *La houille blanche*, n° 4/5.
- HABAIEB (H.), 1987. — Contribution à l'étude critique des algorithmes de prévision des crues, exemples de l'Aveyron et de la Medjerdah. Thèse de doctorat, ENSEEIHT, INP Toulouse, *Multigr.*
- HAGER (W.H.), 1984. — A simplified hydrological rainfall-runoff model. *Journal of hydrology*, 74: 151-170.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976. — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n° 3.
- LAFFORGUE (A.), CASENAVE (A.), 1980. — Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transfert pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie. *La houille blanche*, n° 4/5.
- LIEBSCHER (H.J.), 1987. — Review of operational forecasting methods. International symposium on Water for the Future, Rome, 6-11 avril.
- LORENT (B.), 1975. — Tests of different river flow predictors. North-Holland Publishing Company.
- LOUMAGNE (L.), MICHEL (C.), NORMAND (M.), 1987. — Utilisation d'indicateurs de l'état hydrique du sol dans un modèle pluie-débit. *La houille blanche*, n° 5/6.
- NALBANTIS (I.), 1987. — Identification de modèles pluie-débit du type hydrogramme unitaire: développements de la méthode DPFT et validation sur données générées avec et sans erreur. Thèse de doctorat INP Grenoble, *Multigr.*
- NALBANTIS (I.), OBLED (C.), RODRIGUEZ (Y.), 1988. — Modélisation pluie-débit: Validation par simulation de la méthode DPFT. *La houille blanche*, n° 5/6.
- OBLED (C.), RODRIGUEZ (R.), 1988. — Résultats complémentaires sur la distribution spatiale des précipitations et son rôle dans la transformation pluie-débit. *La houille blanche*, n° 5/6.
- RIOU (C.), 1966. — Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration obtenues en laboratoire sur des sols initialement secs. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, n° 5.
- ROCHE (M.), 1963. — Hydrologie de surface. Gauthiers-Villars, ORSTOM.
- ROCHE (M.), 1965. — Point de vue matriciel sur un opérateur linéaire de transformation pluies-débits. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, n° 2.
- ROCHE (M.), 1971. — Les divers types de modèles déterministes. *La houille blanche*, n° 2.
- RODIER (J.), 1966. — Méthodes utilisées pour le calcul du coefficient de ruissellement sur les bassins représentatifs et expérimentaux. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, n° 4.
- SHERMAN (I.K.), 1932. — Stream flow from rainfall by the unit-graph method. *Engin. News Record* 108.
- SIRCOULON (J.), 1970. — Programme mixte de transformation hauteurs d'eau-débits. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. VII, n° 1.
- THIRRIOT (C.), 1980. — Le devenir prochain de la pluie: infiltration ou ruissellement. *La houille blanche*, n° 4/5.
- THIRRIOT (C.), 1986. — Prise en compte simplifiée de l'humidité du sol au moment d'une crue. Rapport interne IMFT, CT 670.
- THIRRIOT (C.), 1988. — Miscellanées sur la fonction de production. Rapport interne IMFT, CT 740.
- THIRRIOT (C.), HABAIEB (H.), 1987. — Fiabilité des modèles mathématiques de prévision des crues. *Hydrol. continent.*, vol. 2, n° 2: 151-157.
- THIRRIOT (C.), HABAIEB (H.), 1987. — Examen de quelques algorithmes de prévision de crue sur l'ensemble de la Medjerdah, fleuve du nord tunisien. *Annales des travaux publics de Belgique*, n° 5.

- VERSIANI (B.), 1983. — Modélisation de la relation pluie-débit pour la prévision des crues; application au Gardon d'Anduze. Thèse de docteur-ingénieur, INP Grenoble.
- VUILLAUME (G.), 1969. — Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. VI, n° 4.
- WEEKS (W.D.), BOUGHTON (W.C.), 1987. — Tests of ARMA model forms for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology*, n° 1/2, May 15: 29-47.