

Application du modèle à discrétisation spatiale à un bassin versant semi-désertique

G. Girard

Résumé. L'auteur rappelle la conception du modèle de transformation précipitations-débits utilisé qui est basé sur une division du bassin en carrés définis par leur tailles, leurs caractéristiques physiographiques et les sens de drainage.

Il présente les applications obtenues grâce à ce modèle calé sur deux années d'observations hydrométéorologiques, sur le bassin versant semi-désertique du Ghorfa .

(1) établissement des séries chronologiques de débits journaliers à partir des séries de précipitations journalières observées et générées,

(2) évaluation des débits de crue à partir des données sur les situations météorologiques exceptionnelles.

Cette dernière application est réalisé avec un modèle identique mais fonctionnant avec un pas de temps égal à une heure.

Ce modèle pour lequel la distinction entre la fonction de production et la fonction de transfert facilite son adaptation pour toutes zones climatiques présente l'avantage d'être transposable aux bassins versants d'une même région.

The application of a deterministic model to a semiarid basin

Abstract. The author recalls to mind the conception of the deterministic model (rainfall-runoff transformation) based upon a gridded map of the basin. Each square of this grid is defined by its physiographic features, its size and the drainage direction in it.

The paper shows the applications of this model on the Ghorfa basin located in a semiarid zone of the African Sahel (Mauritania). The model is fitted on two years of observation data. The applications are:

(1) production of time series of daily runoff discharges from observed or simulated daily rainfall data,

(2) estimation of flood discharges from data due to exceptional meteorological events (operating time interval of an hour).

In this model, the separation between the production function and the transfer function makes its utilization in different climatic zones and its transposition from one basin to another in the same hydrological region easier.

INTRODUCTION

Les premiers efforts en matière de modèle mathématique consistaient dans l'élaboration des modèles déterministes de synthèse des écoulements et ils comportaient deux stades.

(1) L'un de calage afin de reproduire la séquence des débits observée à l'aide des précipitations observées en N postes sur l'ensemble du bassin et de toutes autres considérations.

(2) L'autre de vérification sur une grande période d'observation hydropluviométrique complète des caractéristiques hydrologiques simulées par rapport à celles observées.

Actuellement l'extension envisagée des modèles est de fournir une série hydrologique à partir des informations pluviométriques longue durée

recueillies à une seule station de référence auxquelles s'ajoute une information hydropluviométrique intensive de courte durée. La seconde extension, plus lointaine, correspond à la transposabilité du modèle d'un bassin à un autre.

Au delà d'une certaine superficie du bassin versant, la pluie ponctuelle n'est plus représentative de la pluie moyenne journalière sur ce bassin et nous devons procéder soit à la simulation de pluies journalières considérées comme indépendantes selon la surface, soit à la simulation des pluies à des postes situés à des distances connues les uns des autres. Ceci est l'objet de la seconde partie du rapport.

Dans ces zones semi-arides l'effet des pertes en eau, par débordement dans les lits majeurs absorbants ou par l'alimentation de zones totalement endoreïques aussi bien superficielles que profondes des parties amont des bassins, intervient dès que la superficie augmente ou selon la nature et la géomorphologie des lieux. Rappelons les moyens de prendre en compte ces caractéristiques avec le modèle à discrétisation spatiale.

MODELE A DISCRETISATION SPATIALE, SES FONCTIONS ET SON APPLICATION A L'OUED GHORFA

Le principe de ce modèle exposé (Girard *et al.*, 1972) repose sur une subdivision du bassin versant en une multitude de parcelles élémentaires de même superficie dont les caractéristiques physiographiques serviront à étendre rationnellement les données météorologiques mesurées et à saisir à une échelle fine in-situ la lame d'eau disponible pour l'écoulement selon le type de couvert végétal, la nature et la caractéristique des sols et du sous-sol (Fig. 1).

Ces caractéristiques physiographiques interviendront sur la fonction de transfert inter-parcelles c'est-à-dire sur la transmission des apports (présence de lac, marais, zone absorbante etc.).

De par sa conception, le modèle présente l'avantage de pouvoir suivre aussi bien dans le temps que dans l'espace la formation et l'évolution des écoulements réels résultant des conditions météorologiques et du comportement hydrologique variable de l'amont à l'aval.

Depuis son élaboration, la fonction de production des écoulements sur chaque parcelle évolue afin de tenir compte, aussi simplement que possible, des phénomènes physiques complexes mais essentiels. Cependant des difficultés provenant du peu de renseignements quantifiés interviennent : effet d'échelle du phénomène et influence du pas de temps adopté sont constatées. La tendance actuelle s'oriente vers un ensemble de fonction de production, chacune d'elle étant adaptée à des régimes météorologiques très nettement différents.

Dans le cas particulier de l'étude du Ghorfa, l'expérience acquise par l'étude des bassins versants représentatifs facilite la schématisation de la fonction de production mais une difficulté demeure au niveau de la paramétrisation des facteurs influants et de leur mesure même. Nous disposons des données suivantes :

- (1) Une carte topographique au 1:200 000 donnant la forme du réseau hydrographique et l'importance en extension des zones d'inondation le long du cours d'eau principal.
- (2) Des photographies aériennes au 1:45 000 indiquant, par une vue du relief et des teintes différentes de la surface du sol, le pourcentage de

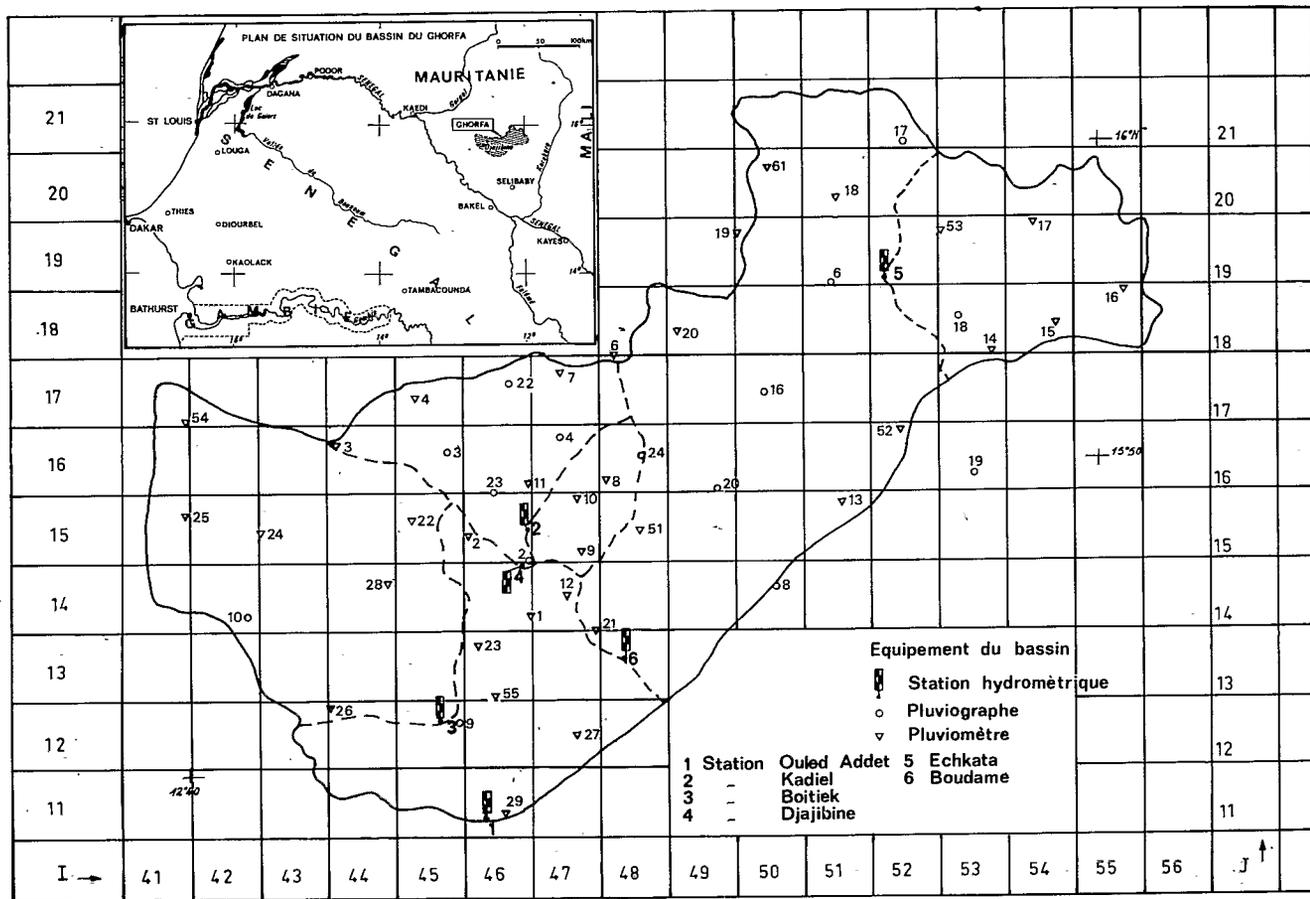


FIGURE 1. Bassin versant de l'Oued Ghorfa.

superficie des zones à fort ruissellement, à faible ruissellement et à ruissellement nul.

(3) Une esquisse géologique au 1:320 000 de la région.

(4) Un rapport hydrogéologique indiquant l'épaisseur des alluvions dans les zones de vallées propices à l'implantation de puits pour saison sèche.

(5) Un mémoire donnant une estimation possible de la qualité physique des éléments superficiels du sol établi à l'aide de tous les renseignements de nature géologique quant à sa décomposition.

Ces renseignements très précieux ne nous permettent pas d'estimer les pertes en eau le long du cours d'eau sur 10 km aux 1 500 000 de m³ mesurés pour une crue annuelle.

La prise en compte de ces phénomènes et le calage des paramètres relève d'un empirisme nécessaire à condition toutefois que celui-ci soit aussi proche que possible de la réalité.

Nous décrivons la fonction de production et la fonction de transfert utilisée, en remarquant qu'une autre fonction plus simple de conception pourrait être avantageusement utilisée.

Fonction de production

Elle est la traduction mathématique des schémas conceptuels tendant à représenter physiquement les processus hydrologiques complexes mis en jeu (infiltration, évaporation, écoulement en milieu non saturé) et leur interaction dans l'espace et le temps. Les déterminations de certains paramètres dans les algorithmes de calcul proviennent très souvent de l'expérience hydrologique acquise. Pour ce bassin les paramètres de la fonction d'infiltration, tant au pas de temps horaire que journalier, résultaient de l'exploitation des bassins représentatifs situés en zones semi-aride dont ceux de l'Oued Ghorfa. Selon les caractéristiques physiographiques des carreaux, les valeurs de ces paramètres par un empirisme justifié varient d'une façon systématique.

Il est implicitement tenu compte dans la détermination du ruissellement des zones absorbantes, mais seulement au niveau de la production élémentaire.

Fonction de transfert

Initialement cette fonction assurait l'amortissement très faible dans le réseau hydrographique et celui très important dans des lacs et marais. Elle fut modifiée pour tenir compte de la perte en eau le long du cours d'eau et de l'amortissement des zones d'inondation qui est lié à l'importance de ces zones et à la dégradation du réseau hydrographique plus qu'à celle de la surface du bassin versant amont. Laminage et pertes sont importantes à la crue mais très réduites quand l'ensemble de la plaine d'inondation est bien pourvu en eau. Schématiquement contiguë au réservoir contenant le volume d'eau transitoirement stockée dans le carreau partiel se situe un réservoir dit 'tampon' qui stocke momentanément, avec perte, une quantité d'eau liée, à l'extension de la surface inondable, cette perte n'étant due qu'à l'infiltration profonde et l'évaporation directe.

En l'absence de toutes mesures propres à étudier ce phénomène physique le schéma qui s'apparente aux réactions naturelles doit être quantifié; le stock d'eau maximal du réservoir tampon est estimé à partir de la superficie maximale d'inondation dans chaque carreau et du pourcentage de surface du

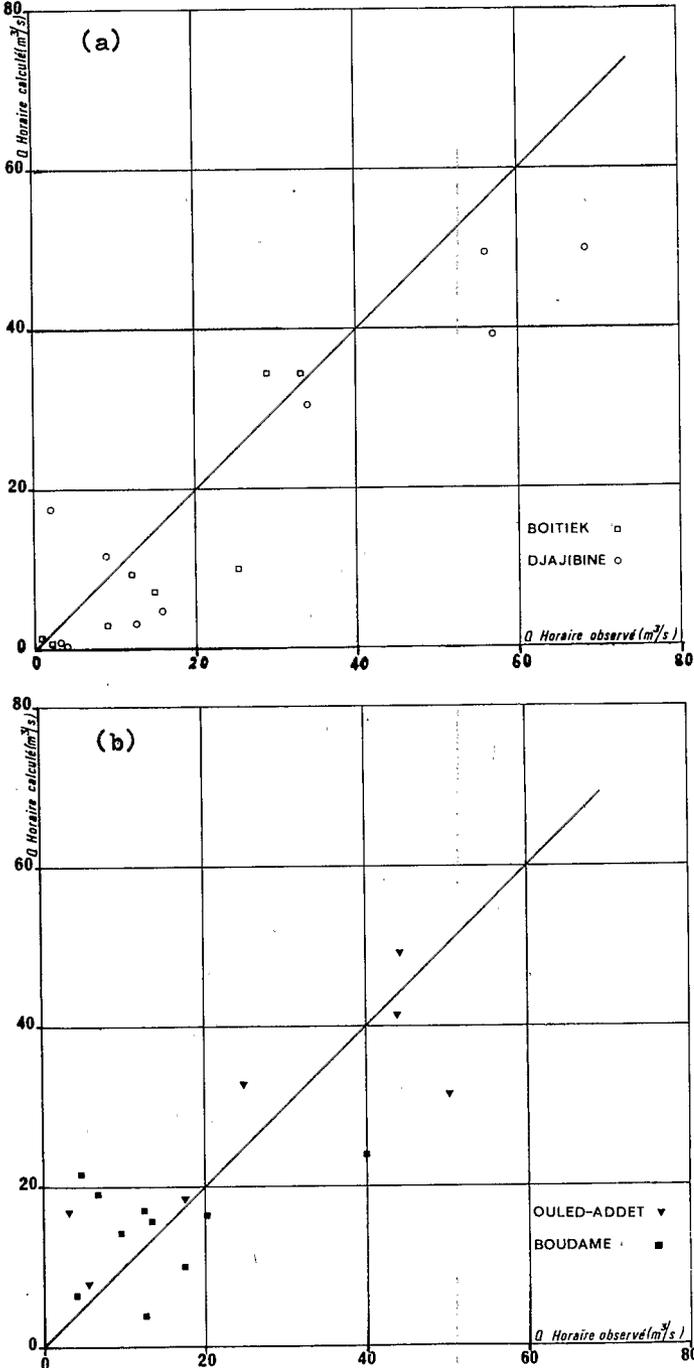


FIGURE 2 (a) Comparaison des crues horaires calculées et observées sur les bassins de Boitiek (250 km²) et Djajibine (148 km²), et (b) sur les bassins Ouled-Addet (1 129 km²) et Boudame (562 km²).

carreau partiel en admettant une porosité efficace de 5 pour cent de la tranche de sol atteignant une épaisseur de 2 m.

Le stockage total du bassin atteint 3 800 000 m³ mais la perte peut-être de 5 300 000 m³ pour une crue de durée 5 jours (Jacon et Camus, 1967).

Règlage aux divers pas de temps

Préréglé sur une période de deux mois en 1967 au pas de temps horaire puis passé sur 2 années en 1966 et 1967 au pas de temps journalier le modèle a fourni des résultats aussi bien sur les débits horaires de pointe (Fig. 2) que sur les lames écoulées annuellement (Fig. 4).

Les effets de dégradation du réseau hydrographique, joints à ceux des temps de réponse différents pour les bassins soumis à des précipitations extrêmement variables dans l'espace, sont responsables de la *faiblesse de débits maximaux*.

Les facteurs hydrologiques déterminants :

- (1) perméabilité des sols en surface et sa variabilité,
- (2) épaisseur des zones de stockage temporaire ou endoreïques des eaux souterraines,
- (3) zone d'épandage du flot de crue,

s'ils sont bien préssentis par l'hydrologue, ne peuvent être que très rarement caractérisés numériquement. Il en découle automatiquement une dose excessive d'empirisme dans l'élaboration des modèles.

EXTENSION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES ET GENERATION DES SERIES HYDROLOGIQUES JOURNALIERES

Extension en surface des données pluviométriques

Quarante-deux postes pluviométriques exploités au cours de quatre saisons des pluies sur le bassin versant du Ghorfa de superficie 1 120 km² ont permis d'établir, pour ces couples de stations de distance croissante de 4 en 4 km, la valeur de la covariance entre les précipitations journalières et les liaisons existantes entre la variance ponctuelle de ces précipitations et la variance de la pluie moyenne sur des superficies concentriques croissantes. Il en résulte que la distribution des pluies moyennes sur un bassin de 2 500 km² est identique à celle fournie par la moyenne à deux postes pluviométriques fictifs indépendants. Ce serait une manière d'aborder le problème de la génération des pluies sur un bassin dont on connaît la série pluviométrique journalière à une seule et unique station de référence (Fig. 3). Nous préférons utiliser une seconde méthode plus simple.

La méthode utilisée consiste tout d'abord à choisir une distance entre stations (10 km par exemple) puis à simuler à l'aide de la matrice de probabilité de transition des états E_1 à E_4 du jour J au jour $J+1$ aux couples de stations (station de référence (SR) — station à générer (SG)) l'état E_{J+1} à la station SG connaissant les états au jour J aux deux stations et l'état E_{J+2} à la station SR et enfin d'utiliser la matrice des probabilités conditionnelles qui fournit la probabilité d'obtenir une certaine hauteur à la station SG étant donné la hauteur enregistrée à la station SR. Il est bien entendu que ces deux jeux de matrices proviennent de l'exploitation intensive de l'étude pluviométrique, à partir de 24 000 points (Tableau 1).

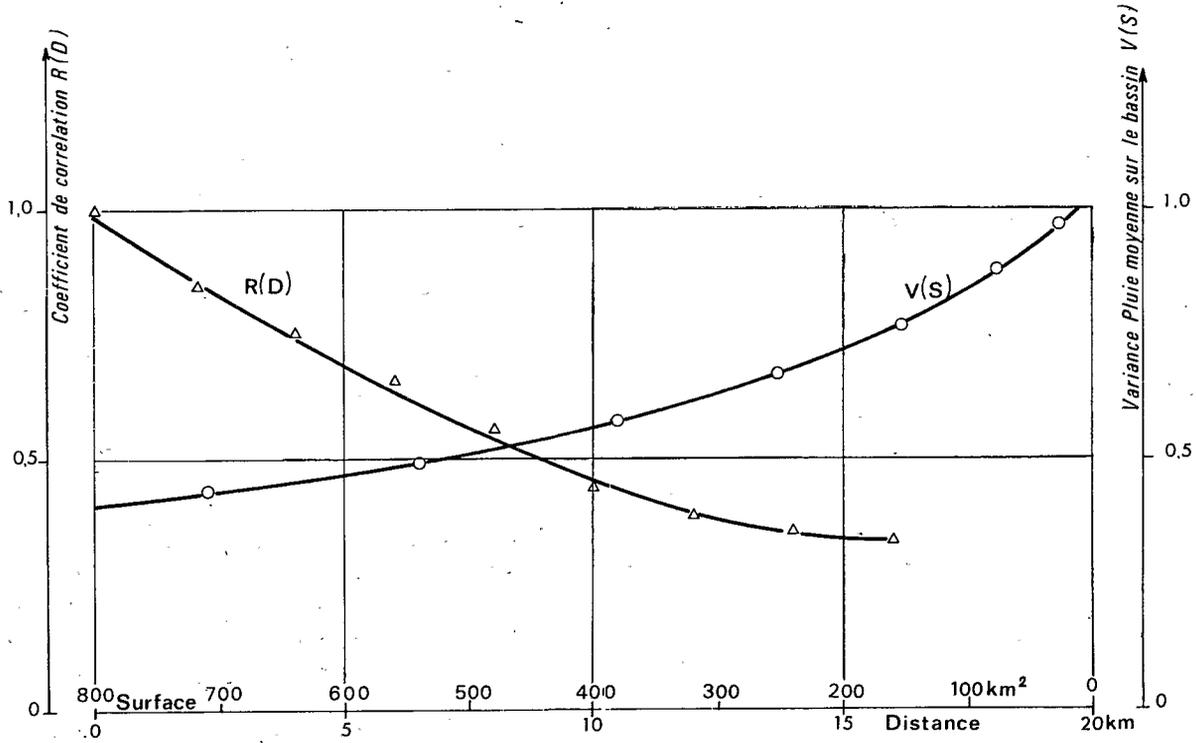


FIGURE 3. Etude des pluies journalières sur le bassin du Ghorfa.

TABLEAU 1. Matrice de probabilité de transition des états E_1 à E_4 pour des postes situés à 12 km

Etat au jour J	Etat au jour $J+1$			
	E_1	E_2	E_3	E_4
	S_1S_2	S_1P_2	P_1S_2	P_1P_2
<i>Mois de mai-juin</i>				
$E_1 S_1S_2$	0.8288	0.0203	0.0377	0.1132
$E_2 S_1P_2$	0.8000	0.0	0.0	0.2000
$E_3 P_1S_2$	0.8000	0.0	0.0	0.2000
$E_4 P_1P_2$	0.5345	0.0	0.0	0.4655
<i>Mois de juillet-août</i>				
$E_1 S_1S_2$	0.7278	0.0425	0.0192	0.2105
$E_2 S_1P_2$	0.9023	0.0326	0.0046	0.0605
$E_3 P_1S_2$	0.7931	0.0276	0.0276	0.1517
$E_4 P_1P_2$	0.7222	0.0525	0.0525	0.1728
<i>Mois de septembre-octobre</i>				
$E_1 S_1S_2$	0.6906	0.0379	0.0557	0.2158
$E_2 S_1P_2$	0.4538	0.1385	0.1615	0.2462
$E_3 P_1S_2$	0.6694	0.1653	0.0496	0.1157
$E_4 P_1P_2$	0.3853	0.0881	0.0512	0.4754

E_1 ou S_1S_2 = jour sans pluie à la station 1 et à la station 2

E_2 ou S_1P_2 = jour sans pluie à la station 2 et pluie à la station 2

E_3 ou P_1S_2 = pluie à la station 1 et jour sans pluie à la station 2

E_4 ou P_1P_2 = pluie à la station 1 et à la station 2

La matrice des probabilités conditionnelles des hauteurs par classes de 2.5 en 2.5 mm compte alors 2 500 positions mémoire.

L'extension des données pluviométriques s'effectue donc par deux tirages au hasard successifs à partir des données d'observations à la station de référence pour des postes concentriques équidistants l'un pour obtenir l'état $J+1$ à la station SG, l'autre pour y obtenir la hauteur de pluie.

Cette seconde méthode a l'avantage de pouvoir au préalable positionner les stations pluviométriques sur la carte afin de permettre l'affectation de ces postes pluviométriques aux carreaux du modèle à discrétisation spatiale enfin de pouvoir simuler les pluies à ces postes dans le modèle.

Génération des séries hydrologiques

Quelques modifications apportées au modèle à discrétisation permettent de générer au fur et à mesure des années les précipitations journalières à chaque station périphérique et d'évaluer les débits journaliers à chacun des six bassins versants de l'Oued Ghorfa.

A l'aide des 38 années d'observations pluviométriques ponctuelles à la station de M'Bout, des 4 années d'observations hydropluviométriques complètes, et du modèle nous présentons les caractéristiques hydrologiques suivantes.

Distribution comparée des lames annuelles écoulées à chacune des stations hydrométriques pour des superficies de 36, 150, 250, 560 et 1 120 km²

Nous pouvons noter l'influence de la taille du bassin sur la variabilité

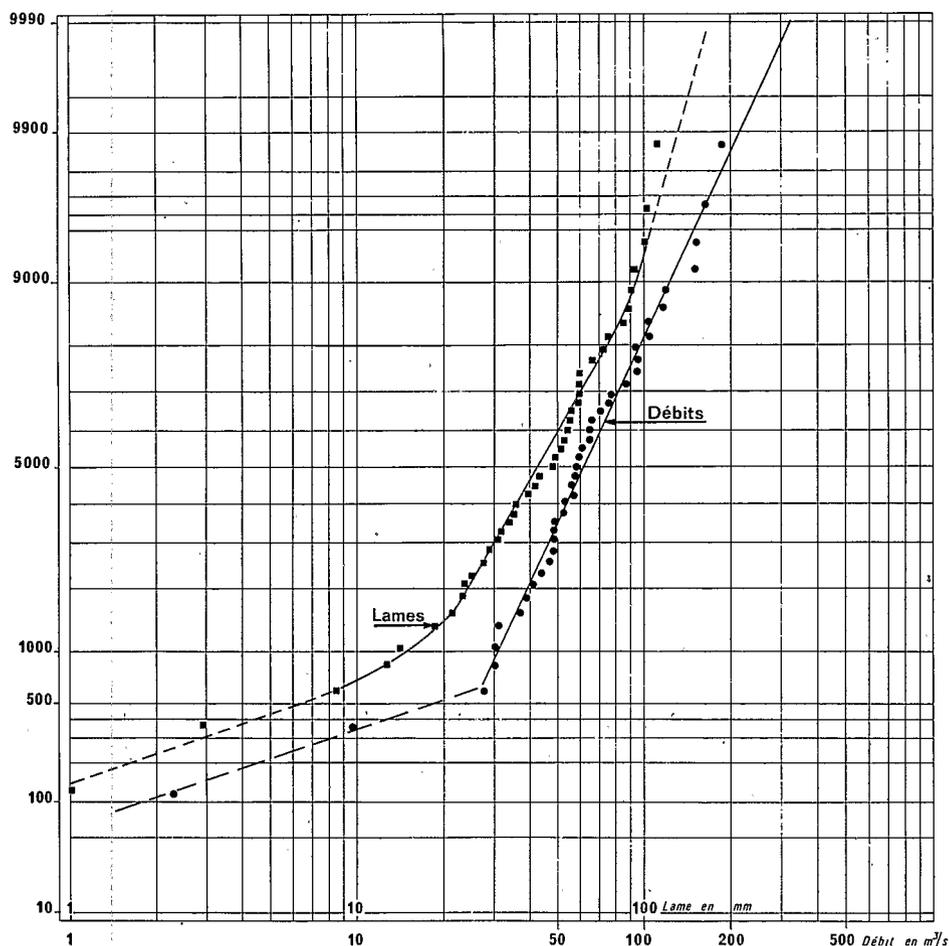


FIGURE 4. Distribution des débits journaliers maximaux annuels et des lames annuelles simulés de l'Oued Ghorfa à Ouled-Addet (1 120 km²) à partir de la série pluviométrique de M'Bout.

temporelle des modules spécifiques des bassins versants de ces régions. Cette influence induite par la variabilité spatiale des précipitations est affectée par l'état de dégradation spécifique du réseau hydrographique (Fig. 4).

Distribution statistique des débits maximaux journaliers à ces mêmes stations

L'action de la dégradation du réseau hydrographique reste encore prépondérante sur les débits maximaux, bien que l'effet d'extension limité dans l'espace des précipitations soit encore très réel (Fig. 4).

Evaluation des débits de crue à partir des données sur les situations météorologiques exceptionnelles

De nombreux documents météorologiques doivent être étudiés pour évaluer les caractéristiques des averses exceptionnelles qui peuvent être observées sur ces bassins versants. Ebauchées ces études ne nous fournissent que certains éléments de réponse :

TABLEAU 2. Estimation des pluies journalières et horaires aux postes du bassin du Ghorfa telle que l'averse ponctuelle maximale journalière ait une période de retour 1 000 ans et que l'abattement soit de 0.54

Pluie journalière	1 ^{re} heure	2 ^e heure	3 ^e heure
234	68	123	43
195	57	102	36
165	49	86	30
140	40	75	25
123	35	65	23
110	32	58	20
98	28	52	18
88	26	46	16
80	23	43	14
75	22	40	13

Débit maximum horaire à Ouled-Addet = 420 m³/s.

Débit moyen journalier = 332 m³/s.

Débit moyen journalier par extrapolation de la courbe de distribution des débits journaliers maximaux annuels = 320 m³/s.

- (1) forme et hauteur de l'averse décennale, centennale ponctuelle (Brunet Moret, 1965)
- (2) abattement de la précipitation journalière ponctuelle sur un bassin versant (Vuillaume, 1974).

Pour une pluie décennale ponctuelle de 93 mm, les coefficients d'abattement ont comme valeurs :

$S = 150 \text{ km}^2$	$CA = 0.67$
$S = 250 \text{ km}^2$	$CA = 0.64$
$S = 560 \text{ km}^2$	$CA = 0.59$
$S = 1\,120 \text{ km}^2$	$CA = 0.54$

Si l'on envisage la détermination de la crue exceptionnelle due à une situation météorologique donnée dans des conditions hydrologiques données, le modèle fournit immédiatement les réponses. Par exemple en prenant l'enveloppe des intensités maximales observées autour de l'intensité centrale, on peut escompter une séquence horaire de 68, 123, 43 mm soit 234 mm de total journalier ponctuel pour une période de retour de l'ordre de 1 000 ans. Ces valeurs ne sont que des ordres de grandeur dont la détermination sort du cadre de l'étude. Toutes autres valeurs peuvent être utilisées lors d'un projet (Tableau 2).

Se pose alors le problème de la génération dans l'espace des précipitations à des postes donnés. Par approximation et compte tenu de l'étude de l'abattement, les estimations sont acceptables. En premier lieu la crue la plus défavorable est celle résultante d'une averse exceptionnelle centrée sur la région de Djajibine plus favorable au ruissellement. On notera la bonne concordance entre les débits maximaux calculés de deux manières différentes (Tableau 2).

Le modèle devient un outil capable de simuler les débits selon les conditions météorologiques différentes compte tenu des réactions spécifiques des diverses parties du bassin. Ceci nécessite la connaissance des conditions météorologiques exceptionnelles.

TRANSPOSABILITE DU MODELE AUX BASSINS VERSANTS REGIONAUX

Cet outil est susceptible de pouvoir être utilisé directement sur des bassins versants régionaux à la condition indispensable de connaître parfaitement toutes les caractéristiques physiographiques des carreaux de ces bassins versants, qui interviennent individuellement sur les valeurs des paramètres même du modèle.

La connaissance précise des conditions naturelles du bassin versant de chaque élément de surface est essentielle pour l'utilisation de ce modèle. Examen des photographies aériennes, télédétection sont des moyens graduellement plus efficaces d'accroître cette connaissance spatiale. Enfin la télédétection assure dans le temps les variabilités spécifiques des caractéristiques des sols selon les conditions d'humidité et les diverses périodes de végétation.

En l'absence de ces informations impératives, il convient de signaler que les études hydrométéorologiques complètes sur quelques années permettent de réaliser un calage acceptable.

CONCLUSION

Les applications actuelles du modèle à discrétisation spatiale portent essentiellement sur l'établissement des séries chronologiques de débits journaliers à partir d'une série de précipitations journalières à un poste de référence mais avec une connaissance approfondie des éléments pluviométriques dans l'espace et des études hydrométéorologiques complètes sur quelques années.

En ce qui concerne les déterminations des débits de crue exceptionnelle sur un ensemble de bassins, elles exigent une parfaite connaissance de l'information pluviométrique à un pas de temps plus court de l'ordre de l'heure ou la demi-heure dans l'espace ce qui présente d'énormes difficultés.

Enfin la transposition du modèle ne peut se réaliser qu'à partir de la connaissance spatio-temporelle des caractéristiques propres de chacune des parties du bassin versant, caractéristiques que seules les méthodes de télédétection permettront de fournir.

BIBLIOGRAPHIE

- Brunet Moret, Y. (1965) Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. *République Islamique de Mauritanie ORSTOM-Hydrologie*, juin.
- Girard, G., Morin, G. et Charbonneau, R. (1972) Modèle précipitations — débits à discrétisation spatiale: *Cahier Hydrologie ORSTOM IX*, No. 4.
- Jaccon, G. et Camus, H. (1967) Étude hydrologique des Oueds Ghorfa et Niorde et des Oualos en amont de Kaedi. *ORSTOM Hydrologie*, août.
- Vuillaume, G. (1974) L'abattement des pluies journalières en Afrique intertropicale variabilité et sensibilité. *Cahier Hydrologie ORSTOM XI*, No. 3.