

Application de modèles mathématiques déterministes à l'étude des crues et de l'écoulement annuel – zones sahéliennes

G. GIRARD et J. A. RODIER ORSTOM, Paris, France

Résumé. Les auteurs présentent, pour le Sud Tunisien, un modèle rustique de prédétermination des écoulements de crues sur de très petits bassins versants. Ce modèle fournit une série chronologique des lames d'eau ruisselées à partir de la série des intensités du poste pluviographique longue durée le plus représentatif du régime des précipitations. Pour le Sahel tropical, Girard (1975a) a mis au point un modèle simplifié qui donne, pour la lame écoulée résultant d'une crue individuelle, une valeur médiocre, mais une valeur acceptable pour l'ensemble des crues d'un mois et une bonne valeur pour la lame écoulée annuelle. On peut ainsi établir la courbe de distribution statistique de l'écoulement annuel à partir des précipitations journalières pour la plupart des petits bassins du Sahel. La transposabilité de ces modèles à des bassins non observés demande une solide information pluviographique de base pour la Tunisie, pluviométrique pour le Sahel tropical, la connaissance des caractéristiques des sols et l'évaluation de la susceptibilité au ruissellement des formations géomorphologiques. On donne quelques indications pour le cas de bassins dépassant 100 km².

Application of deterministic models to the study of floods and annual flow in Sahelian areas

Abstract. The authors present a simple model for the prediction of flood flow in very small basins in the south of Tunisia. This model gives a time series of the depth of surface runoff using a long-term series of recorded rainfall intensities representative of the precipitation regime of the area. For the tropical Sahel, Girard (1975a) established a simplified rainfall-runoff model which gives relatively poor predictions of the depth of runoff from individual storms, but good results for monthly runoff and excellent results for annual runoff. In this way it is possible to compute the statistical distribution curve for the depth of annual runoff from a series of daily rainfall values for most small basins in the Sahel. To transpose these models to basins with no observation data it is necessary to have sound rainfall records for Tunisia, daily raingauge records for the tropical Sahel, a knowledge of the soil characteristics and the susceptibility of different geomorphological formations to surface runoff. Some details are given for basins of more than 100 km².

INTRODUCTION

L'utilisation à des fins agricoles des eaux d'écoulement de surface provenant des têtes de petits bassins versants (maximum de superficie 50 km²) demande que soient connus d'une part la chronologie et le volume de chacun des apports journaliers des crues et d'autre part les débits maximaux de ces crues afin d'assurer la protection des ouvrages de petites hydrauliques; la connaissance de ce débit maximal est utile également pour les projets de ponts ou de dalots.

Cette chronologie des apports doit porter sur un nombre suffisant d'années en vue d'obtenir une estimation acceptable des données du projet.

Les observations hydrologiques directes d'un petit bassin versant pour une longue période représentent une opération délicate et coûteuse. On y remédie par la mise au point, après quelques années d'observations hydrométéorologiques complètes, d'un outil susceptible de fournir la chronologie des écoulements à partir soit des données pluviométriques journalières longue durée à un poste de référence, soit des données pluviographiques.

C'est ainsi que pour la zone méditerranéenne (Sud Tunisie) où l'on observe une très grande variabilité de la fréquence des diverses intensités pluviométriques, un modèle utilisant des informations pluviométriques sur des pas de temps de 5 à 10 min a été

développé. Il fournit les lames d'eau écoulées à chaque pas de temps et au cours de la journée.

Par contre, pour la zone du Sahel tropical africain où les précipitations sont dues dans la presque totalité des cas à des averses orageuses, un modèle simplifié utilisant les précipitations journalières a permis de fournir la chronologie des apports journaliers à partir de la série des précipitations de 24 h observées à la station de référence.

Après la mise au point de ces modèles, on a présenté leur possibilité de transposition à des petits bassins versants non observés et les applications qui en ont été faites dans le Sahel. Quelques indications seront fournies pour le cas de bassins versants dont la superficie dépasse 100 km².

MODELE HYDROLOGIQUE D'APPORT A COURT PAS DE TEMPS

Ce modèle global qui ne concerne que le ruissellement superficiel utilise comme donnée d'entrée les intensités des précipitations mises sous forme de Relevés Pluviographiques Intégraux (hauteur d'eau cumulée à pas de temps variable au cours duquel l'intensité est estimée constante), désignés par R.P.I.

Il comporte trois parties essentielles (Fig. 1):

(1) Lecture des R.P.I. et détermination, pour de courts pas de temps constants DT de la hauteur de pluie élémentaire tombée dans cet intervalle de temps exprimé en minutes.

(2) Détermination de la lame d'eau écoulée dans l'intervalle de temps en faisant appel aux notions élémentaires d'hydrologie: intervalle de temps entre deux averses successives, pluie d'imbibition préliminaire au ruissellement, taux d'infiltration initial lié soit à l'intensité de l'averse ou soit au contenu en eau de la tranche superficielle du sol, taux d'infiltration variable à chaque pas de temps (décroissance exponentielle) ou de toutes autres lois basées sur des données expérimentales. Cette partie essentielle du modèle est transformable à la demande.

(3) Prélèvement sur le réservoir sol de l'eau destinée à l'évapotranspiration du couvert végétal.

Il traite également le cas où une faible partie des informations sur les intensités des précipitations font défaut.

Principe de construction du modèle

Soit P_i la hauteur de la précipitation effectivement reçue par le bassin au cours du pas de temps (p.d.t.) i de la journée j . (i varie de 1 à 1440/ DT).

Le vecteur $PPANT(n)$ contenant l'ensemble des précipitations élémentaires de chaque p.d.t. sur un intervalle maximal de ITR p.d.t. antérieurs permet d'évaluer à tout instant i les pluies antérieures de $i - 1$ à $i - ITR$.

A partir de l'instant où P_i est nul, on détermine par un compteur ITA le nombre de p.d.t. au cours desquels la précipitation est nulle. Ce nombre servira à calculer la valeur de la pluie préliminaire ou d'imbibition que l'averse à venir devra satisfaire avant de pouvoir produire du ruissellement. La pluie d'imbibition PP s'exprime d'après les

FIGURE 1. Organigramme A.

IA compteur des p.d.t. avec pluies consécutives - S = stock en eau du sol;

IPP = index, $IPP = 1$ imbibition satisfaite, $IPP = 0$ pluie préliminaire insuffisante;

ITA nombre de p.d.t. antérieurs avec précipitation nulle;

ITR durée en p.d.t. de la cinétique rapide de ressuyage des sols;

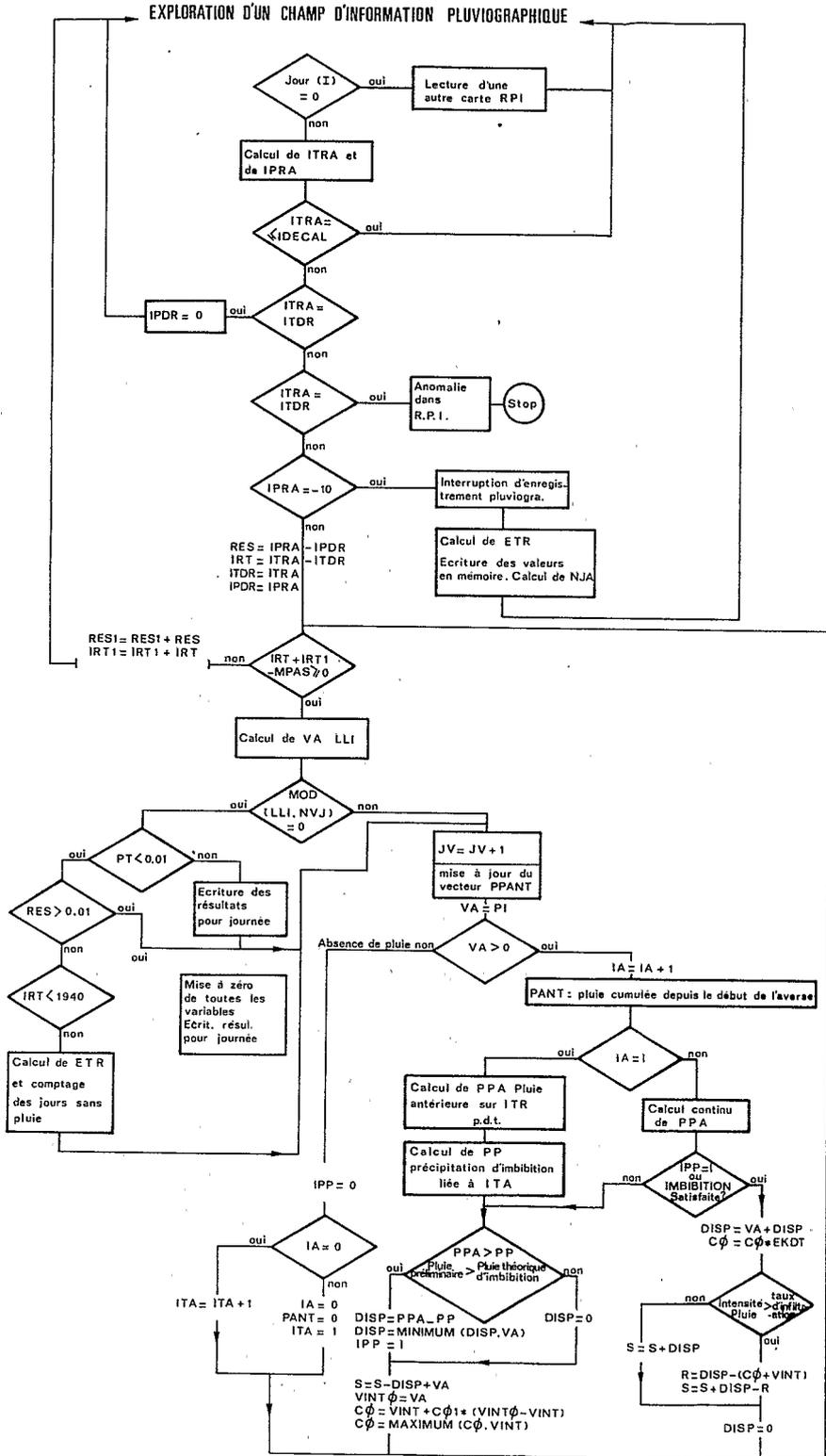
PP pluie théorique d'imbibition liée à ITA ;

PPA pluie préliminaire cumulée sur les ITR p.d.t. précédents;

$VINT$ infiltration minimale sur p.d.t. - R = ruissellement calculé;

$C\phi I$ coefficient K du texte - VA = pluie P_i au p.d.t. i .

ORGANIGRAMME A



expérimentations sur simulateur de pluie (Lafforgue, 1977) par une relation de la forme

$$PP = a - b \exp(-c \cdot ta)$$

avec $ta = ITA \cdot DT/60$ (temps antérieur exprimé en heure), et a, b, c , des coefficients liés aux caractéristiques de morphologie superficielle, de couvert végétal et de nature des sols. a est sensiblement égal à la précipitation maximale d'imbibition. b est a duquel on a soustrait la lame d'eau stockée en surface avant l'apparition du ruissellement. Si ta est inférieur à TR (durée de la cinétique rapide de ressuyage des sols par les pores les plus gros), la valeur de c est de l'ordre de 0,02 pour un sol sablo-argileux. Sinon c passe brutalement à la valeur $c = 0,0026$.

La pluie d'imbibition étant satisfaite pour une averse donnée, la valeur de la capacité d'absorption initiale (C_0) liée à l'intensité présente de la précipitation I_0 sera déterminée par deux relations établies dans une étude fine de l'écoulement (Camus *et al.*, 1976)

$$C_0 - FN = K(I_0 - FN)$$

et $C_0 = \text{constante} = C$ pour

$$I_0 = I_s > \frac{C - FN(1 - K)}{K}$$

où FN capacité minimale d'infiltration, K coefficient égal à 1 moins la fraction de la superficie du bassin versant recouvert par la litière et les plantes basses, zone où l'amortissement des fortes intensités favorise l'infiltration.

Au-delà du seuil d'intensité I_s , la capacité d'absorption initiale C_0 devient constante et égale à C . Le ruissellement est alors généralisé sur l'ensemble du bassin versant.

Les valeurs choisies pour le bassin du Sud Tunisien sont

$$FN = 3 \text{ mm/h}, \quad K = 0,75, \quad I_s = 45 \text{ mm/h}$$

A chaque nouveau pas de temps et si la précipitation ne cesse pas, la décroissance de la capacité d'absorption sera exponentielle

$$C_i = C_{i-1} \times EKDT$$

avec

$$EKDT = \exp(-kDT)$$

$k = 0,05$ (valeur décroissante quand la superficie croît).

La lame d'eau ruisselée est déduite directement du bilan entre la pluie P_i au cours du pas de temps i et de la hauteur d'eau susceptible d'être infiltrée $(C_i + FN) DT/60$.

Si la pluie cesse, la capacité d'absorption C_0 va de nouveau être calculée au début de la prochaine averse selon le processus indiqué.

Les résultats obtenus à chaque pas de temps sont cumulés au cours d'une journée avec pluie et présentés globalement à l'issue de cette journée. A chaque pas de temps pour lequel il y a ruissellement, tous les termes du bilan sont présentés. De telle sorte que toutes les crues y compris la crue annuelle et par suite la lame d'eau annuelle, peuvent être reconstituées avec les éléments obtenus.

En cas de longues périodes sans pluie, le modèle travaille au pas de temps de 24 h et fournit toutes les indications sur les variables à la veille du jour avec précipitation.

En cas de courte interruption des enregistrements pluviographiques, on considère qu'il n'y a pas eu de précipitation. Le modèle fonctionne comme dans le cas précédent. Stock d'eau dans le sol et évapotranspiration: à chaque p.d.t. il est prélevé dans le stock en eau du sol une quantité d'eau proportionnelle: à l'évapotranspiration poten-

tielle, au rapport du stock d'eau disponible pour l'évapotranspiration au stock d'eau maximal disponible pour l'évapotranspiration et inversement proportionnelle au nombre de p.d.t. par jour. L'ETP utilisée est l'ETP moyenne mensuelle.

A la fin de l'année calendaire, l'ensemble des données traitées et les résultats obtenus sont présentés: pluie annuelle, précipitation maximale observée au cours du p.d.t. *DT*, évapotranspiration réelle calculée, état du stock d'eau, lame ruisselée totale.

Les applications du modèle d'apport

Le calage a été effectué à l'aide des résultats des expérimentations sur simulateur de pluie et des mesures d'infiltration minimales *FN*.

A l'échelle annuelle les résultats sont satisfaisants pour les cinq années d'observation du bassin de la citerne Telman (Tunisie) (Tableau 1).

A l'échelle de l'averse on constate que dans 25 pour cent des cas l'erreur sur le volume est supérieure à 100 pour cent mais que l'erreur absolue maximale n'est que de 10 mm (Tableau 2).

TABLEAU 1.

Année	Pluie [mm]	Ruissellement [mm]:	
		observé	calculé
1972	89,0	18,8	14,0
1973	362,2	221,1	220,9
1974	92,0	23,1	17,1
1975	164,0	18,0	24,7
1976	309,0	46,5	81,1

TABLEAU 2.

Date	Pluie [mm]	Lame ruisselée [mm]:	
		observée	calculée
4.12.72	24,6	13,5	9,4
5.12.72	39,7	14,5	9,5
27.02.73	29,4	3,9	5,6
4.12.73	35,1	5,8	4,7
12.12.73	256,0	211,1	210,4
27.03.76	34,1	1,21	2,6

Phase extension

Avant la phase extension qui demande une étude critique de la documentation pluviographique saisie, une phase contrôle a été réalisée pour l'ensemble des stations pluviographiques environnantes, situées sur l'ensemble de bassins versants représentatifs du Sud Tunisien voisins du bassin étudié. Les résultats obtenus présentent des écarts sensiblement plus faibles. Le produit attendu de ce modèle est la chronologie des apports journaliers et annuels sur ce bassin à l'aide de 28 années d'observations pluviographiques ainsi que la chronologie des contenus en eau dans le sol au début et à la fin de chaque épisode pluvieux. L'étude des maximums de crue du bassin est envisageable à partir des éléments d'information obtenus.

MODELE SIMPLIFIE D'APPORT AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

Ce modèle du type global a été développé à partir des informations hydropluviométriques recueillies au cours des trois années d'études sur un ensemble de bassins versants représentatifs (1 à 50 km²) de l'ORSTOM en zone sahélienne africaine (Fig. 2)

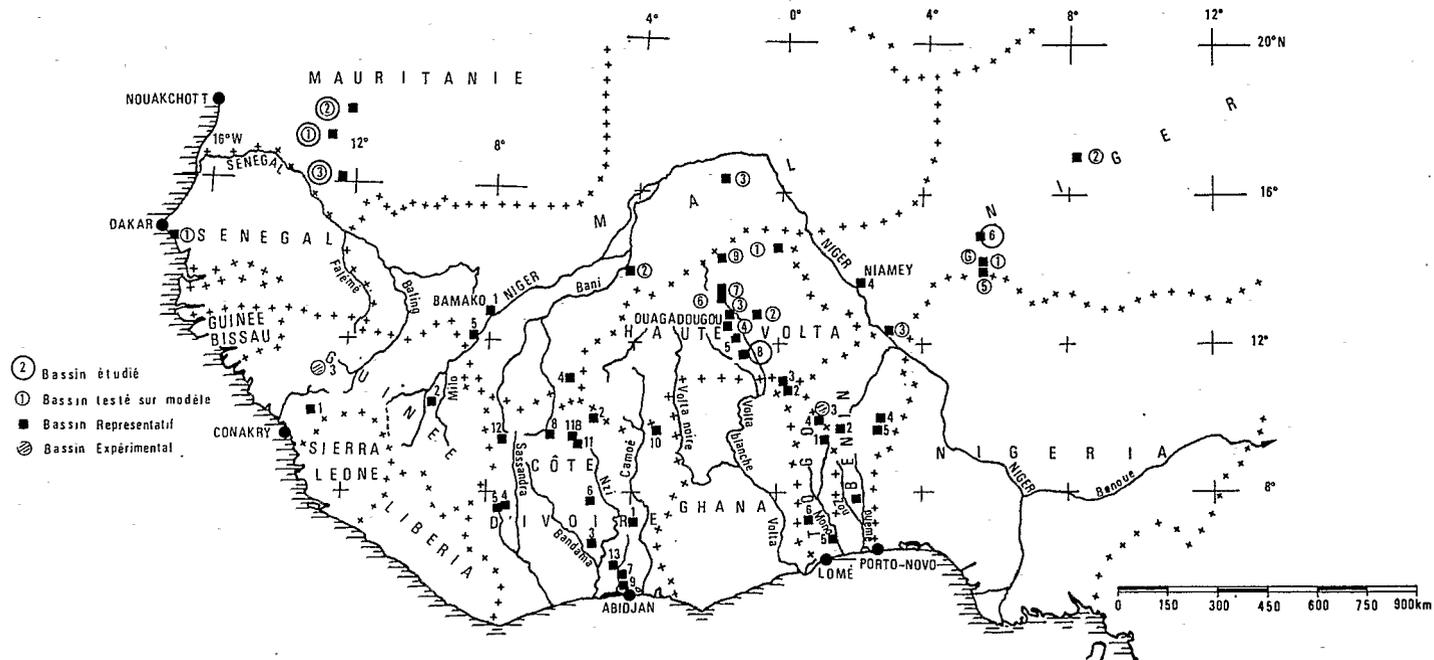


FIGURE 2. Bassins représentatifs en Afrique occidentale:

Mauritanie

- 1 – Dionaba
2 – Seloumbo
3 – Ghorfa

Senegal

- 1 – Sebikotane

Mali

- 1 – Dounfing
2 – Koumbaka
3 – Tin Adjar
4 – Farako
5 – Kangaba

Guinée

- 1 – Mayonkoure
2 – Kundala
3 – Timbis

Côte d'Ivoire

- 1 – Ifou
2 – Flakoho
3 – Toumodi
4 – Nion

Haute Volta

- 5 – Tonkoui
6 – Bouake
7 – Guessigou
8 – Ponondougou
9 – Agbeby
10 – Varale

Niger

- 11 – Loserigou
11B Korhogo
12 – Douni
13 – Amitiouro

Benin

- 1 – Gagara
2 – Boulsa
3 – Lumbila
4 – Ouagadougou
5 – Nabagale

Togo

- 1 – Sara
2 – Fosse aux Lions
3 – Nadjoundi
4 – Hidenwou
5 – Lac Elia
6 – Daye

Niger

- 1 – Maggia
2 – Razel Mamoulmi
3 – Koulou
4 – Niamey
5 – Kaouara
6 – Kountkouzout
G – Galmi

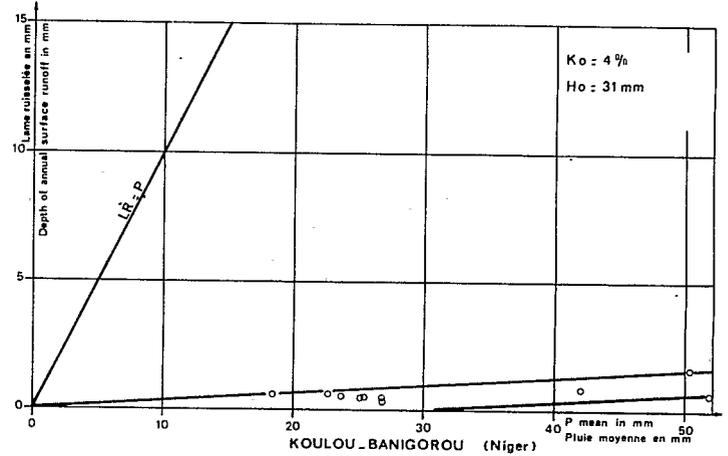
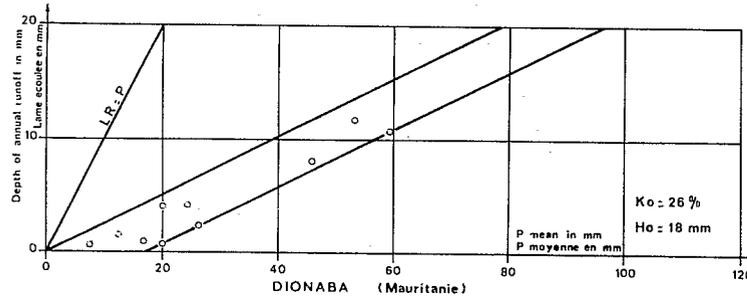
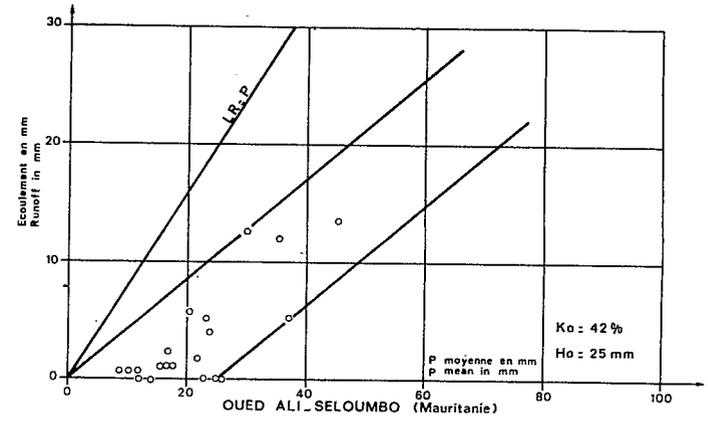
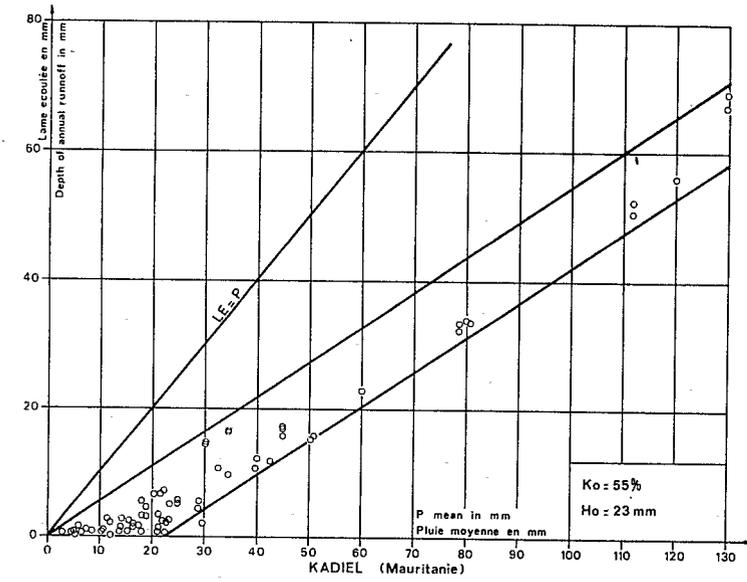


FIGURE 3. Relations entre la lame écoulée ou ruisselée et la pluie moyenne d'une averse pour quatre bassins versants représentatifs.

en vue de reconstituer la chronologie des écoulements annuels et leur distribution statistique à l'aide des relevés pluviométriques journaliers aux postes présentant une longue série d'observations (Girard, 1975a).

La Fig. 3 présente pour quatre bassins versants représentatifs les relations existantes entre la lame écoulée ou ruisselée et la pluie moyenne d'une averse (données extraites du recueil des données de base des bassins représentatifs de l'ORSTOM par Dubreuil *et al.*, 1972). Pour chaque pluie moyenne, le point figuratif de la lame ruisselée est situé entre deux droites parallèles, sa position étant plus ou moins élevée selon les pluies antérieures et la violence propre de l'averse. Il est bon de noter que dans la presque totalité des cas, la pluie journalière est due à une unique averse orageuse classique qui présente des caractéristiques voisines (forme du hyétogramme et durée pour une même hauteur).

Principe du modèle simplifié

La hauteur de précipitation P_j d'une averse ou de la pluie journalière ponctuelle du jour j à une station située vers le centre du bassin est supposée homogène sur celui-ci.

La hauteur de la lame d'eau écoulée R_j est de la forme:

$$R_j = Ko(P_j - (Ho_{\max} - Ho_j)) \quad (1)$$

Ko est un paramètre lié à la portion de surface du bassin qui contribue efficacement au ruissellement et à l'inverse de la perméabilité des sols en surface et de la superficie du bassin versant ($Ko \rightarrow 1$ quand le bassin devient imperméable et ne présente aucune zone sableuse absorbante).

Ho_j est une variable liée à l'humidité des sols, à l'amplitude de variation annuelle du stock d'eau des sols, à la structure des précipitations, et varie entre 0 et une valeur maximale Ho_{\max} . La relation de récurrence entre Ho_{j-1} et Ho_j est

$$Ho_j = (Ho_{j-1} + P_{j-1}) \cdot C \quad (2)$$

C est un paramètre d'ajustement compris entre 0 et 1 mais généralement voisin de 0,7. Si $Ho_j > Ho_{\max} - ac$ (ac varie de 2 à 4 mm et représente l'interception) la valeur de Ho_j utilisée dans (1) est prise égale à $Ho_{\max} - ac$.

Les trois paramètres de réglage du modèle Ko , C et ac sont prédéterminés par les relations établies à la suite de l'interprétation des données du recueil Dubreuil *et al.* (1972) cité plus haut. Ils sont alors réajustés, en particulier C et ac , à l'aide du contrôle des valeurs calculées aux valeurs observées.

Si PU_j désigne la partie de la pluie tombée avec une intensité supérieure à un seuil fixe S voisin du taux d'infiltration minimal du bassin, il a été vérifié sur les données pluviographiques que l'on obtenait à l'échelle journalière $PU_j = a(P_j - S)$ avec $a \rightarrow 1$ quand $S \rightarrow 0$. S est exprimé en mm/jour.

Par ailleurs, la liaison entre LR_j et PU_j (lame ruisselée et pluie utile au niveau de l'averse) a une forme parabolique dans toutes les études réalisées et l'asymptote de cette 'parabole' admet implicitement la notion d'un coefficient de ruissellement maximal constant

$$LR_j = K(PU_j - Ds)$$

Ds caractérisant le déficit de saturation des sols.

Il est donc possible de passer de LR_j à R_j et de PU_j à P_j pour obtenir la relation (1). LR_j peut durer plus de 24 h.

Afin de vérifier si cette relation apparemment simpliste était réaliste pour les paysages sahéliens, les valeurs de Ko et Ho_{\max} ont été recherchées pour 33 bassins versants représentatifs observés par l'ORSTOM dans le Sahel: Ko varie de 0,04 à 0,80 et Ho_{\max} de 11 mm à 54 mm. La Fig. 3 présente pour quatre bassins les couples $LR_j - P_j$.

Les applications directes du modèle simplifié

Rappelons que l'objectif pratique de ce modèle simplifié composé des équations (1) et (2) est la détermination de lames écoulées journalières à partir des séries pluviométriques journalières observées de longue durée; les lames écoulées mensuelles et annuelles qui en découlent et la courbe de distribution statistique de ces lames d'eau annuelles sont les seules données valables et exploitables. La reconstitution des lames journalières écoulées n'est valable qu'en moyenne et ne devient satisfaisante que pour une période de 30 jours.

Les applications directes ont été effectuées sur les bassins versants suivants:

(1) *Dionaba* (Mauritanie), superficie = 111 km², pluie annuelle 260 mm (médiane), un seul calage, lame annuelle écoulée médiane 18 mm, décennale sèche 2 mm, décennale humide 49 mm.

(2) *Abou Goulem* (Tchad), superficie = 12 km², pluie annuelle 500–520 mm (médiane), calage difficile, lame annuelle écoulée médiane 17 mm, décennale sèche 9 mm, décennale humide 60–70 mm.

(3) *Kadiel* (Mauritanie), superficie = 39 km², pluie annuelle 450–460 mm (médiane), un seul calage, lame annuelle écoulée médiane 86 mm, décennale sèche 30 mm, décennale humide 200 mm.

(4) *Oued Ali* (Mauritanie), superficie = 10,4 km², pluie annuelle 220 mm (médiane), deux calages, lame annuelle écoulée médiane 27 mm, décennale sèche 2,3 mm, décennale humide 68 mm.

(5) *Kountkouzout* (Niger), superficie = 16,6 km², pluie annuelle 390–400 mm (médiane), plusieurs calages de C, deux anomalies sur les pluies journalières d'entrée ont été détectées par la critique des résultats par suite de l'effet amplificateur de la transformation pluie débit.

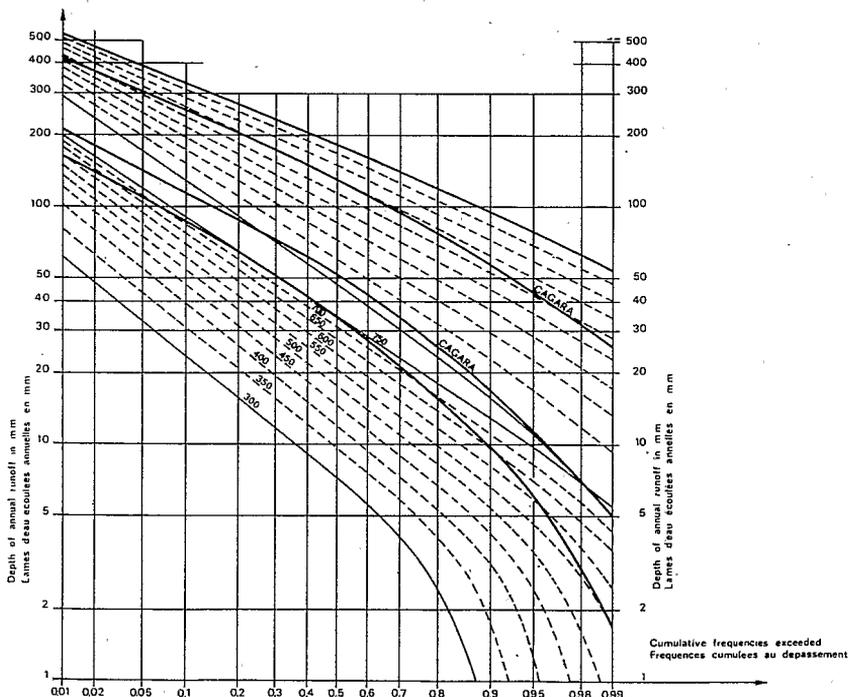


FIGURE 4. Ecoulement annuel pour un bassin versant de 25 km² — régions sahéliennes.

On a montré à la fois la souplesse du modèle et l'homogénéité du régime des précipitations au Sahel en simulant les écoulements sur le bassin de Kadiel à partir des résultats des stations de Mbout (Mauritanie) et de Madaoua (Niger) recevant à peu près la même hauteur annuelle de précipitations. Les liaisons entre lames écoulées et hauteur annuelle de précipitations sont très comparables. Ces deux caractères sont très utiles car pour l'étude des volumes annuels très faibles correspondant à la dernière sécheresse, il faut faire passer par le modèle de longues séries de précipitations annuelles de plusieurs postes, car un seul relevé de 50 ans ne suffit pas pour apprécier la valeur centennale; la station a pu être épargnée par la sécheresse ou plus durement affectée que toutes les autres.

TRANSPOSABILITE DES MODELES

L'extension des séries hydrologiques à partir des séries pluviométriques exige de disposer de mesures hydrométéorologiques intensives sur des bassins représentatifs et d'une information pluviométrique de base dépourvue d'anomalies. On ne peut pallier cette difficulté que par l'utilisation de plusieurs longues séries pluviométriques.

La transposabilité des modèles sur des bassins régionaux n'ayant fait l'objet d'aucune mesure hydrométéorologique pose à l'heure actuelle de sérieuses difficultés de quantification des paramètres utilisés, liés à la perméabilité du sol et du sous-sol du bassin, à l'amplitude de variation annuelle du stock des sols (fonction du couvert végétal), à la superficie du bassin et à la pente de celui-ci. L'étude sur le terrain de la caractérisation des facteurs conditionnels de l'écoulement devient nécessaire après consultation des cartes existantes (topographiques, géologiques, pédologiques, géomorphologiques, de végétation) ou des photographies aériennes.

Pour l'application du modèle d'apport à court pas de temps, la détermination de la pluie d'imbibition en fonction du temps antérieur sans pluie, de la capacité d'infiltration minimale, de la capacité d'infiltration maximale, de la fraction du bassin recouvert de litière et de plantes basses et de la valeur du ressuyage rapide, demande une étude détaillée de terrain et l'utilisation d'un appareil susceptible de fournir ces indications dans un temps minimal. L'ORSTOM s'engage dans cette voie en construisant plusieurs mini-simulateurs de pluie (Côte d'Ivoire, Tunisie, Niger).

Pour l'application *du modèle simplifié*, la détermination des paramètres essentiellement K_0 et $H_{0\max}$ demande une connaissance aussi exacte que possible des caractéristiques physiques du bassin versant en ce qui concerne la distribution de la perméabilité et de l'épaisseur des sols, la dégradation du réseau hydrographique, mais aussi les liaisons qui existent entre ces deux paramètres et les caractères physiques des bassins.

Ce problème n'est pas encore prêt d'être résolu, mais il existe de multiples approches qui permettent grâce aux connaissances acquises depuis trente années d'évaluer une fourchette de variation des écoulements annuels et de leur variation dans le temps.

Lors de l'étude générale de l'écoulement au Sahel tropical africain (Rodier, 1975), on a considéré pour chaque zone homogène, par exemple, les bassins avec substratum cristallin à pente modérée, des bassins types correspondant chacun à des proportions données de sols de différentes formations que l'on rencontre dans cette zone. Pour chaque bassin type, il existait un ou plusieurs bassins représentatifs déjà étudiés. Dans ce cas particulier, trois bassins types: type Abou Goulem assez perméable déjà étudié avec le modèle simplifié, type Barlo moins perméable, type Cagara sur vertisols peu perméables. Pour deux bassins étudiés sur modèle, Abou Goulem et Kadiel imperméables, on a tracé, grâce au modèle, non seulement la courbe de distribution statistique des écoulements annuels (précipitation annuelle respectivement 410 et 450 mm) mais en plus les familles de courbes correspondant à des valeurs de précipitations médianes annuelles variant de 300 à 750 mm/an. La répartition saisonnière des pluies et le diagramme d'intensité des précipitations varient peu entre ces deux régimes

extrêmes, la couverture végétale varie mais n'est pas assez dense pour jouer un rôle important. Ceci permet de déduire sans grand risque les familles de courbes, des deux courbes primitives (410 et 450 mm) en s'appuyant sur les données de divers bassins représentatifs, pour ces bassins types.

Pour le bassin type Cagara, la connaissance des relations averse—crues pendant deux ans a permis d'évaluer sans trop de risques d'erreur l'écoulement annuel et le coefficient d'écoulement correspondant pour la valeur médiane et pour les fréquences décennales sèche et humide. Par comparaison avec les courbes de même précipitation annuelle (400—420 mm) du système de courbes Abou Goulem et Kadiel, on a pu extrapoler la courbe pour des fréquences plus faibles. On peut d'autre part avoir une idée assez exacte des variations du coefficient d'écoulement pour la valeur médiane sur un bassin de ce type en fonction de diverses valeurs médianes des précipitations annuelles entre 300 et 750 mm, d'où l'on déduit les valeurs médianes de l'écoulement sur ce bassin pour 300 et 750 mm et les courbes de distribution passant par les points représentatifs de ces deux valeurs médianes. On est guidé dans la mise au point de ces courbes à la fois par les deux familles de courbes Kadiel et Abou Goulem, les données des bassins représentatifs et une très solide connaissance du terrain.

Le nombre de bassins types déjà étudiés correspond à plus de 50 pour cent des cas rencontrés dans le Sahel. On a ainsi établi les familles de courbes de distribution statistique de l'écoulement annuel pour des bassins de 5 et 25 km². Ceci permet des évaluations pour des superficies atteignant 50 km². Mais il serait préférable de recouper ces résultats par l'emploi direct du modèle simplifié après détermination des paramètres.

La transposabilité du modèle à court pas de temps à des zones arides du Brésil, de l'Afrique du Nord et du Sud Méditerranéen, ne doit pas être exclue, il suffit de réunir les deux conditions suivantes: utilisation d'un mini-simulateur pour définir les paramètres du modèle, disponibilité d'une longue série d'enregistrements pluviographiques de qualité (35 années, vitesse de déroulement supérieure ou égale à 12 mm/h).

La transposabilité du modèle simplifié à d'autres zones arides que le Sahel africain semble être exclue sauf si les averse présentent, d'une manière générale, des fortes intensités sur de courtes durées.

CAS DE BASSINS VERSANTS DE PLUS GRANDES SUPERFICIES

L'extension temporelle des séries hydrologiques de courte durée, obtenues lors des études hydrométéorologiques intensives sur les bassins représentatifs, est assurée grâce à l'utilisation d'un modèle hydrologique global convenablement calé pour cette période de courte durée et à l'aide d'une longue série pluviométrique journalière observée (ou pluviographique) à la station de référence située dans une même zone pluviométrique homogène.

Cette extension valable pour des bassins de petites superficies l'est encore pour de plus grands bassins mais nécessite une connaissance plus approfondie de la répartition spatiale des précipitations journalières (ou à court pas de temps). De plus, au-delà de quelques centaines de km², les zones à fort ruissellement côtoient les zones endoreïques et les cours d'eau se dégradent très vite, multiples bras, plaines d'inondation, zones préférentielles d'alimentation des nappes d'eau souterraines.

La complexité du milieu physique conduit tout naturellement à la mise en oeuvre du modèle à discrétisation spatiale créé en 1972. L'application d'un tel modèle au bassin de l'oued Ghorfa (Mauritanie) de superficie 1200 km² (Girard, 1975) a posé certaines difficultés: l'information physiographique par maille manque souvent dans ces régions, le comportement de lits démesurés, vides entre les crues, à fort pouvoir d'absorption est souvent mal connu; la superficie du bassin est telle que pour l'extension temporelle des séries hydrologiques à partir des données pluviométriques au poste de référence longue durée, il a été nécessaire de mettre au point une technique de

génération des pluies dans l'espace en se basant sur une matrice de probabilité de transition des états 'pluie' et 'non pluie' et sur une matrice de probabilité conditionnelle des hauteurs de pluies journalières à une station étant donné la hauteur enregistrée à la station de référence.

La violence des crues ne peut être bien reproduite que si le modèle est d'abord utilisé et réglé sur un pas de temps horaire. Il sert alors à calculer la crue maximale probable sur l'ensemble des sous-bassins à partir des informations sur la hauteur ponctuelle journalière de récurrence donnée, sur les hyétogrammes classés des averses décennales et centennales ponctuelles et sur l'abattement de la précipitation journalière ponctuelle sur un bassin versant (Vuillaume, 1974).

Le modèle est ensuite utilisé selon un pas de temps journalier pour reconstituer une longue série de modules, objectif primordial pour l'étude des écoulements dans le Sahel africain.

La transposition d'un tel modèle à un bassin quelconque de régime sahélien pose des problèmes importants de connaissance détaillée sur le rôle des sols et du sous-sol dans l'espace : perméabilité des sols en surface et sa variabilité, épaisseur des sols et amplitude de variation annuelle du stock d'eau des sols, épaisseur des zones de stockage temporaires ou endoreïques des eaux souterraines sur les petits bassins, identification des zones d'épandage du flot de crue le long du réseau hydrographique. Ceci suppose le même type d'études que pour les petits bassins.

CONCLUSIONS

Au terme de 10 années d'expériences en ce qui concerne le développement de nombreux modèles, allant des plus simplistes (deux équations) aux plus complexes (modèle à discrétisation spatiale) et l'application de ceux-ci pour des zones climatiques extrêmes (zones arides aux zones équatoriales, zones tempérées avec période hivernale de six mois), nous estimons nécessaire de montrer les contraintes d'application des modèles hydrologiques et plus particulièrement celles des trois modèles présentés.

Modèle d'apport à court pas de temps

Caractérisation des processus de ruissellement sur les sols constitutifs du bassin versant (à l'aide du mini-simulateur de pluie).

Information pluviographique d'excellente qualité portant sur le plus grand nombre d'années (accroissement de la densité des stations pluviographiques des réseaux nationaux — vitesse de déroulement 15 mm/h).

Modèle simplifié

Connaissance de la variation de la perméabilité sur le bassin, zone endoreïque, zone absorbante, stock d'eau maximal disponible pour l'évapotranspiration.

Information pluviométrique d'excellente qualité (critique continue des données recueillies et constitution de fichier opérationnel au sein des organismes nationaux de gestion).

Modèles ORSTOM

La paramétrisation de tous les facteurs physiques hydrologiquement importants aux niveaux des fonctions de production des eaux d'écoulement et du transfert des eaux dans le réseau hydrographique pose de sérieuses difficultés au niveau actuel de nos moyens d'investigation. Peut-être obtiendra-t-on de la télédétection, pour des bassins bien définis, des informations suffisantes sur les caractéristiques présentant une constante dans le temps (géomorphologie, occupation des sols . . .) ou bien une variabilité dans le temps (température superficielle, extension des zones d'inondations, variation de l'état du couvert végétal, humidité des sols . . .). Pour de très petites

surfaces, ces informations peuvent être obtenues par un groupement de spécialistes. Mêmes exigences que plus haut sur la qualité de l'information pluviométrique.

L'outil qu'est le modèle mathématique hydrologique, pour réaliser l'extension des séries hydrologiques, présente d'énormes avantages sur les autres outils utilisés par l'hydrologue. En contrepartie, il est exigeant en ce qui concerne la caractérisation du milieu sur lequel il est appliqué et demande des séries pluviographiques (ou pluviométriques) d'excellente qualité.

REFERENCES

- Camus, H., Chaperon, P., Girard, G. et Molinier, M. (1976) Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire Korhogo. *Travaux et Documents de l'ORSTOM no. 52.*
- Dubreuil, P., Chaperon, P., Guiscafre, J. et Herbaud, J. (1972) *Recueil des Données de base des Bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM.* ORSTOM, Paris.
- Girard, G. (1975a) Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol. XII, no. 3.*
- Girard, G. (1975b) Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin versant de l'oued Ghorfa (Mauritanie). *Cah. ORSTOM, sér. hydrol. XII, no. 3.*
- Lafforgue, A. (1977) Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol. XIV, no. 4.*
- Rodier, J. A. (1975) Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. *Travaux et Documents de l'ORSTOM, no. 46.*
- Vuillaume, G. (1974) L'abattement des pluies journalières en Afrique intertropicale, variabilité et sensibilité. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol. XI, no. 3.*