

Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel

Pierre Ribstein
ORSTOM

Introduction

La région d'étude est située au sud du Sahara, entre les isohyètes 200 et 850 mm. Dans cette zone, près d'une centaine de bassins versants inférieurs à 100 km² ont fait l'objet de mesures hydrologiques. Un des principaux objectifs de ces campagnes de mesures a été l'élaboration de méthodes de prédétermination de crues pour le dimensionnement d'ouvrages (évacuateurs de crue par exemple). Cet échantillon important de données a permis de mettre au point plusieurs notes de calcul de la crue décennale encore très utilisées aujourd'hui.

Pour améliorer précision et fiabilité des notes de calcul existantes, il faut affiner nos connaissances sur les mécanismes formateurs des crues et sur leur représentation, et modifier les méthodes en conséquence. Le travail présenté ici contribue à cette amélioration des connaissances et concerne plus particulièrement la modélisation des fortes crues, étape principale pour l'estimation de la crue décennale à partir des observations. Justifiés par les spécificités hydrologiques du milieu sahélien, plusieurs modèles pluie-débit, dérivés du concept d'hydrogramme unitaire, ont été

choisis et testés sur les données de huit petits bassins versants.

Les spécificités du milieu étudié, la présentation des modèles choisis et les résultats obtenus pour les bassins versants observés constituent les trois principales étapes de cet aperçu de notre travail (RIBSTEIN, 1990).

Quelques spécificités du milieu sahélien

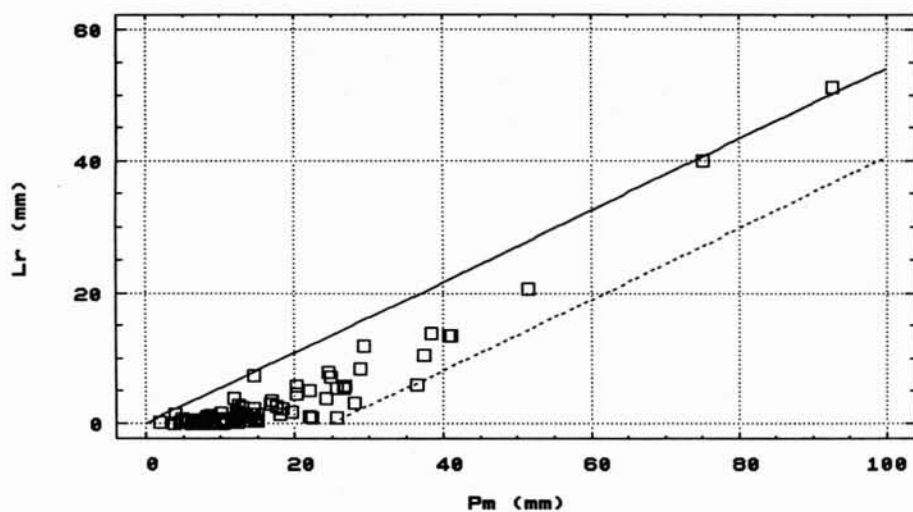
Une analyse des crues des huit bassins versants observés met en évidence quelques particularités hydrologiques liées aux caractéristiques du milieu d'étude.

Comportement hydrologique de quelques bassins versants

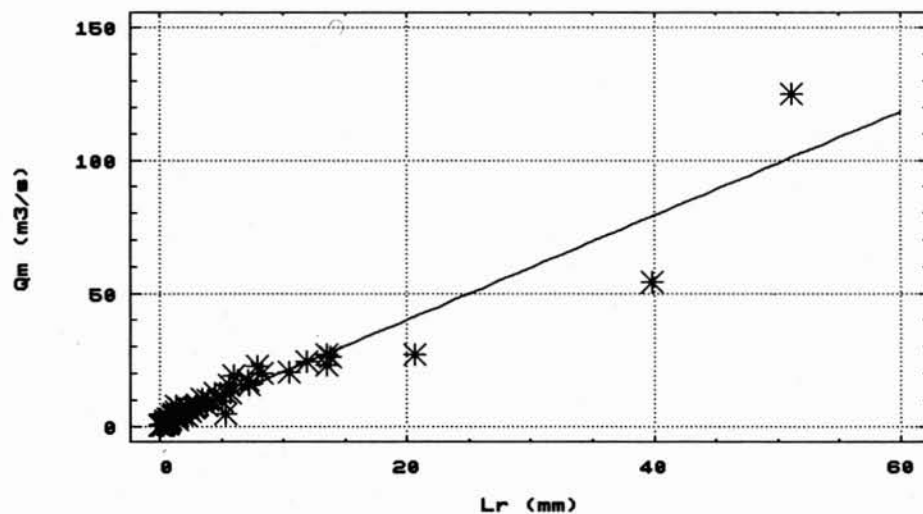
En adoptant la représentation proposée par GIRARD (1975), nous pouvons estimer un coefficient de ruissellement maximum Komax à partir du graphique représentant la lame ruisselée en fonction de la pluie moyenne pour l'ensemble des crues d'un bassin versant. Ce coefficient de ruissellement est égal à la pente des droites qui encadrent

Flood modelling on small watersheds in the Sahel

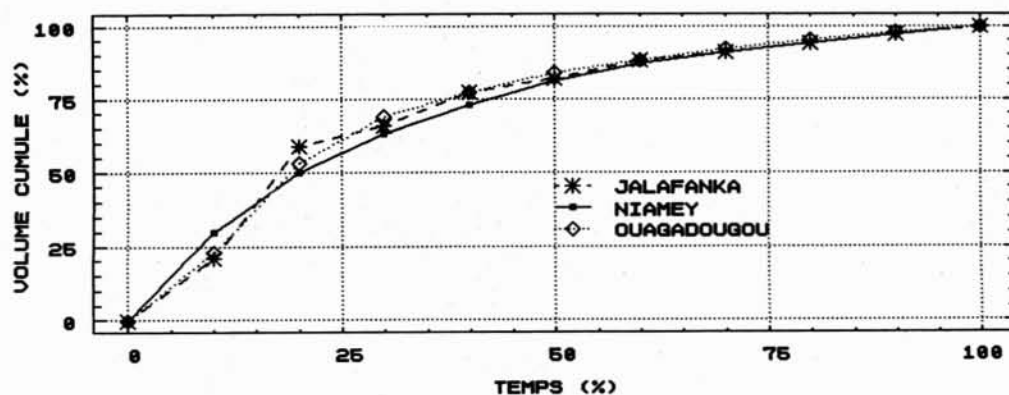
The Sahel is very well suited to the application of the unit hydrograph technique ; several models based on this technique are thus selected. They differentiate from another by the analytical expression of the production function and by the identification algorithms of the linear response function. These models are applied to the modelling of eight small watersheds, the surface of which is less than 100 km². This work allows for a validity study of the various models for flood prediction.



1. Relation pluie moyenne — lame ruisselée (exemple du bassin de Mouda au Cameroun).



2. Régression linéaire lame ruisselée — débit de pointe pour le bassin versant de Mouda.



3. Formes médianes des fortes pluies pour 3 longues séries pluviographiques au Niger et au Burkina Faso.

les points observés (voir *fig. 1* pour le bassin de Mouda au Cameroun). Des valeurs de Komax entre 37 et 85 %, pour les huit bassins sélectionnés (de superficie comprise entre 9,14 et 74,2 km²) indiquent qu'il s'agit de bassins pouvant présenter de forts ruissellements.

Les débits de pointe ont été étudiés à partir d'une régression linéaire simple avec les lames ruisselées pour toutes les crues observées de pluie moyenne supérieure à 10 mm. Pour les huit bassins versants observés, les coefficients de corrélation de cette régression lame ruisselée – débit de pointe sont supérieurs à 0,92 (voir exemple du bassin de Mouda au Cameroun sur la *fig. 2*).

Caractéristiques du milieu et hydrologie

Les différences de valeurs du coefficient de ruissellement s'expliquent d'abord par les différences de comportement des sols, particulièrement des micro-horizons superficiels, et par la répartition dans l'espace de ces horizons (CASENAVE et VALENTIN, 1989). En effet, les sols sahéliens sont fragiles par suite de plusieurs facteurs : faibles teneurs en matière organique, agressivité des pluies tombant sur des horizons très peu protégés par le couvert végétal, alternance des phases assèchement-humidification, ... La fragilité de la couverture pédologique conduit à des réorganisations importantes et à la formation de microorganismes pelliculaires superficielles ou croûtes. Ce sont les caractéristiques de ces croûtes (épaisseur, fragilité, continuité, ...) qui expliquent les différences d'aptitude au ruissellement.

Pour comprendre la relativement bonne linéarité de la régression lame ruisselée-débit de pointe et aussi le faible pourcentage de crues à plusieurs pointes parmi les fortes crues, nous avons étudié la forme des pluies à partir d'une méthode proposée par Huff (1967). Les averse sont représentées sur des diagrammes sans dimension en portant la proportion de hauteur totale précipitée en fonction de la proportion du temps total depuis le début de l'averse. Cette représentation a été appliquée à trois stations pluviographiques de longue durée (Niamey au Niger, Ouagadougou et Jalafanka au Burkina Faso), en considérant toutes les averse présentant une durée supérieure à 10 min. et une hauteur supérieure à la hauteur de période de retour 5 fois par an (critère de séparation des averse : moins de 2 mm h⁻¹ pendant au moins 240 min.).

La *figure 3*, représentant les formes médianes des pluies aux 3 stations, montre l'homogénéité des fortes pluies sahéliennes et indique que les fortes intensités se situent le plus souvent en début d'événements (en 25 % du temps, plus de 50 % du volume a été précipité !). Ces résultats sont compatibles avec les lignes de grains qui sont des systèmes convectifs complexes à l'origine de l'essentiel des pluies sahéliennes. En effet, ces lignes de grains se présentent sous forme d'un « front de rafale » de courte durée se traduisant au sol par de fortes intensités, suivi par une traîne stratiforme avec des précipitations peu intenses mais pouvant durer plusieurs heures.

Par suite de la faiblesse des pluies annuelles, l'humidité initiale avant les fortes averse est assez peu variable et ces

deux facteurs (homogénéité des formes de pluies et faible variabilité d'un indice des précipitations antérieures) expliquent l'alignement des observations dans une représentation lame ruisselée-débit de pointe.

La sélection des modèles pluie-débit

Dans cette étude, nous recherchons le « meilleur » modèle de crue, à utiliser avec le plus grand nombre possible de données sahéliennes, pour élaborer ensuite une méthode de prédétermination de crues sur bassin versant non observé. Sur les bassins sahéliens, nous disposons de séries de pluies et de débits obtenues à petits pas de temps et, pour chaque crue, d'une estimation de la pluie moyenne de tout l'événement et d'une valeur de l'indice de Kohler, indicateur grossier de l'état initial d'humidité du bassin avant la pluie.

Pour les objectifs fixés, et avec les données disponibles, seuls des modèles globaux de type hydrogramme unitaire sont utilisables. De plus, il doit s'agir de modèles par événement, c'est-à-dire activités uniquement pour les crues sélectionnées.

L'application du concept d'hydrogramme unitaire impose un ruissellement généralisé sur toute la superficie, ce qui implique deux conditions principales :

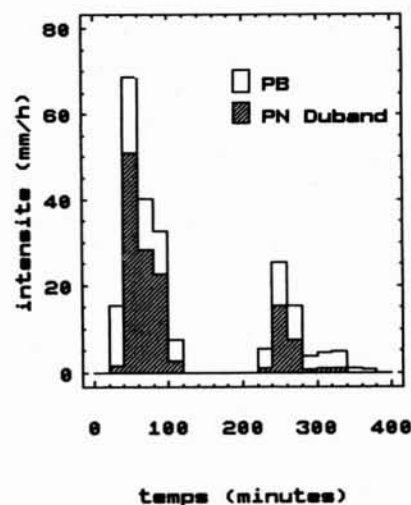
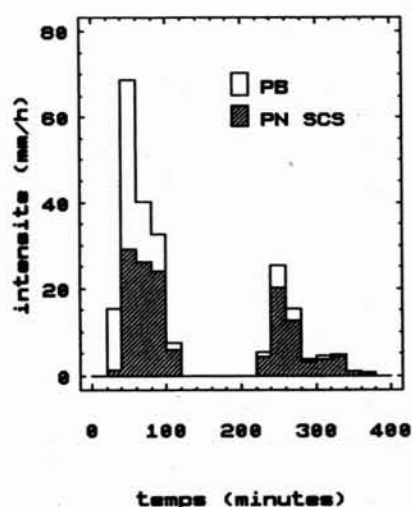
- des précipitations intenses, condition respectée en ne sélectionnant que les plus fortes crues ;
- des bassins versants petits pour avoir la variabilité spatiale des pluies la plus faible possible ; cette condition justifie que les bassins retenus dans cette étude soient de superficie inférieure à 100 km².

Nous pouvons ajouter que les organisations pelliculaires superficielles, fréquentes au Sahel, peuvent être des facteurs favorables au ruissellement de surface.

Les modèles basés sur le concept d'hydrogramme unitaire sont séparés en deux fonctions : la fonction de production d'abord qui transforme les pluies brutes, observées ou estimées, en pluies nettes après soustraction des pertes, et la fonction de transfert ensuite qui reconstitue les débits écoulés à l'exutoire à partir des pluies nettes. Les fonctions de production testées dans ce travail correspondent à des expressions analytiques comportant moins de 5 paramètres qui sont identifiés au moyen d'une méthode d'optimisation numérique, la méthode de ROSENBROCK (1960). Nous avons sélectionné sept expressions analytiques différentes, et nous avons étudié leur comportement, d'abord d'un point de vue théorique, et ensuite par rapport aux données sahéliennes.

Les fonctions de production testées sont la Capacité d'Absorption Moyenne (CAM), la fonction du Soil Conservation Service ou SCS (U.S.D.A., 1972), la fonction PREVIK (DUJARDIN, 1980), les expressions proposées par GUILLOT et DUBAND (1980), LORENT (1975), GIRARD *et al.* (1981) et enfin HOLTAN (1961).

Pour l'identification de la fonction de transfert, quatre méthodes ont été comparées : la distribution Gamma ou hydrogramme de Nash (NASH, 1957), la Différence Première de la Fonction de Transfert ou DPFT (GUILLOT et DUBAND, 1980), un modèle de type ARX (Autorégressif



4. Exemple de la pluie observée (PB) le 16 août 1985 à Mouda : variabilité des pluies nettes (PN) suivant la fonction de production.

à entrée exogène) décrit par WERY *et al.* (1987) et enfin l'Hydrogramme Unitaire Géomorphologique ou GUH de RODRIGUEZ-ITURBE et VALDÈS (1979).

Dans cette présentation de notre travail, nous insisterons sur la fonction de production du SCS et celle proposée par GUILLOT et DUBAND, et sur les méthodes DPFT et hydrogramme de Nash pour l'identification de la fonction de transfert. Ces exemples nous paraissent représentatifs des résultats obtenus.

Dans l'hydrogramme de Nash, il faut identifier les deux paramètres de la loi gamma, et c'est encore la méthode d'optimisation de Rosenbrock que nous utiliserons. Pour identifier les paramètres des fonctions de production, ou de l'hydrogramme de Nash, il faut au préalable choisir une fonction critère qui sera minimisée au cours de l'optimisation. Pour identifier le modèle par rapport aux données, nous avons simplement choisi comme fonction critère une différence des carrés des écarts entre valeurs observées et calculées.

Pour comparer les capacités des modèles, il faut un critère adimensionnel. C'est le critère de NASH et SUTCLIFFE (1970) adapté aux débits, ou aux lames ruisselées, que nous avons sélectionné.

Il s'agit donc d'un système de modélisation modulaire : un modèle de crue sera composé d'une expression analytique pour la production et d'une méthode d'identification de la fonction de transfert. Dans tous les cas, l'identification du modèle portera sur plusieurs crues, dites crues de calibration, et le modèle sera évalué par rapport à sa capacité à représenter des crues de validation, non utilisées au cours de l'étalonnage du modèle.

Quelques résultats de modélisation des crues

Comparaison des fonctions de production

En imposant des contraintes plausibles dans le contexte sahélien, nous avons calculé les paramètres des expressions et comparé les formes de pluies nettes. Ce travail théorique permet de distinguer deux classes de fonction de production ; les fonctions de production commandées par les variations de pluie brute (exemple de la fonction de GUILLOT et DUBAND) produisent une intensité forte de pluie nette à chaque pointe d'intensité de la pluie brute. A l'opposé, les fonctions de production à variation de stock lissent les intensités des pluies brutes, mais présentent de forts coefficients de ruissellement pour la traîne des averses (exemple de la fonction du SCS). La figure 4 illustre cette remarque pour une pluie observée sur le bassin de Mouda au Cameroun.

Les fonctions de production du type variabilité de stock (exemple de la fonction du SCS) donnent de meilleurs résultats que les expressions analytiques sensibles aux variations d'intensités des pluies brutes. Cette tendance s'explique d'abord par les données de pluies utilisées : il s'agit de données d'un seul pluviographe découpées avec des pas de temps fixes et petits (de l'ordre de 20 min.). Les intensités les plus fortes sont très variables d'un point à l'autre d'un bassin, et une fonction du type SCS lisse ces variations et atténue les erreurs dues au mauvais calage dans le temps des appareils de mesure. Mais il est possible aussi que les fonctions de production à variation de stock s'ajustent mieux parce qu'elles prennent en compte un

ruissellement de la traîne de l'averse. Enfin, l'étude des résultats des fonctions de production montre que la quantité et la qualité des données ne permettent pas d'ajuster plusieurs paramètres (deux paramètres au maximum).

Avec des fonctions de production du type SCS, ou celle de Girard, à un ou deux paramètres, l'écart absolu moyen entre lame ruisselée calculée et observée est inférieur à 30 %, sauf pour les deux bassins les plus grands (et recevant le plus de précipitations) pour lesquels l'écart absolu moyen est plus important.

Nous avons calé l'état initial d'humidité du bassin avant chaque crue sur un indice des Précipitations Antérieures de Kohler (IPA). Dans chaque expression analytique, il y a un paramètre qui définit l'état initial. Par une régression linéaire entre ce paramètre et IPA, on introduit 2 coefficients supplémentaires qui augmentent les valeurs du critère en calibration mais pas en validation pour la majorité des bassins.

L'amélioration par l'introduction de IPA n'est sensible que pour les deux bassins les plus grands pour lesquels l'écart absolu moyen sur les lames ruisselées, avec IPA, devient inférieur à 30 %. Cette influence de IPA est liée à la présence, pour ces deux bassins, d'un débit de base non négligeable durant toute la saison des pluies. Pour les autres bassins, plus petits et situés en zone plus sèche, l'indice des précipitations antérieures n'est pas un bon indicateur de l'état initial avant les crues. La forte proportion de sable, la percolation rapide vers les zones profondes et les fortes valeurs d'évaporation expliquent que ces bassins ne gardent pas la « mémoire » des précipitations antérieures.

Analyse des résultats des fonctions de transfert

Une étude assez complète a été menée sur la validité du transfert identifié par la Différence Première de la Fonction de Transfert (DPFT), dans le contexte des petits bassins sahéliens. Il faut rappeler que la DPFT est une méthode de déconvolution directe, définie par 3 principes de base :

- l'équation de convolution est écrite en différences premières des débits et de la fonction de transfert ;
- les pluies nettes sont des inconnues du système ;
- un processus itératif, du type moindres carrés, est utilisé pour résoudre alternativement deux systèmes d'équations, et identifier les deux jeux d'inconnues : les coefficients de la fonction de transfert et les pluies nettes.

Pour palier certaines instabilités numériques, il est possible d'imposer certaines contraintes, en fonction des connaissances hydrologiques : coefficients de la fonction de transfert positifs, fonction de transfert unitaire, exponentielle décroissante à la fin de la fonction de transfert, pluies nettes positives et coefficient de ruissellement inférieur à 1 (pluie nette inférieure à pluie brute à chaque pas de temps). Notre travail a d'abord porté sur la stabilité de la fonction de transfert identifiée par la DPFT. Quel que soit le bassin (parmi les huit bassins sélectionnés) sur lequel nous avons appliqué cette méthode, l'hydrogramme

unitaire identifié varie peu en fonction du pas de temps de calcul, de l'échantillon des crues de calage ou du pluviographe utilisé.

Le principal problème rencontré vient de la modélisation des décrues ; en effet, les données pour les faibles débits sont peu précises par suite des difficultés de mesure dans des rivières dont les fonds sableux sont mobiles. Les fonctions de transfert identifiées étant normées, la fin de l'hydrogramme unitaire a une influence directe sur le coefficient de pointe. Il faut souligner que, par rapport aux écoulements en pays tempérés, les crues sahéliennes ne présentent pratiquement pas de débit de base pour lisser les hydrogrammes.

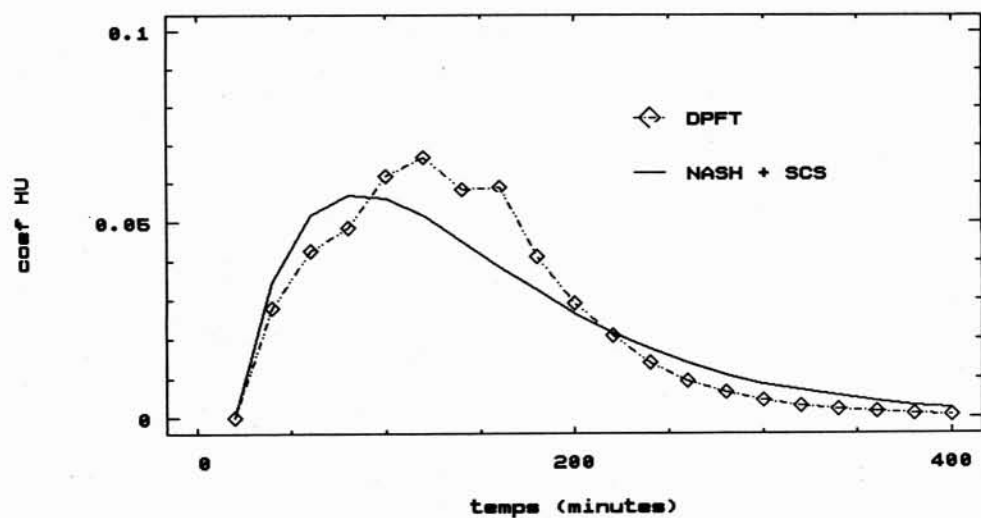
Les méthodes d'identification utilisées conduisent à des fonctions de transfert proches si on impose des contraintes, pour la DPFT, qui modélisent de la même façon les décrues. La *figure 5* (page suiv.) présente les hydrogrammes unitaires identifiés pour le bassin de Mouda avec l'hydrogramme de Nash et avec la DPFT, en imposant la contrainte du coefficient de ruissellement inférieur à 1.

Un modèle composé de la fonction de production du SCS et de l'hydrogramme de Nash (donc un modèle à 3 paramètres) conduit à des écarts absolus moyens inférieurs à 30 %, aussi bien pour les lames ruisselées que pour les débits de pointe. Avec cette gamme de précision, le concept d'hydrogramme unitaire semble donc valable pour les petits bassins sahéliens, et permet de reconstituer correctement les crues de validation (voir exemple de la *figure 6*, page suiv.). Les écarts entre valeurs observées et valeurs calculées s'expliquent autant par des problèmes de mesures (imprécision des décrues, décalage en temps entre les appareils) que par le type de modélisation choisi (utilisation des données d'un seul pluviographe, pas de séparation des hydrogrammes, ...).

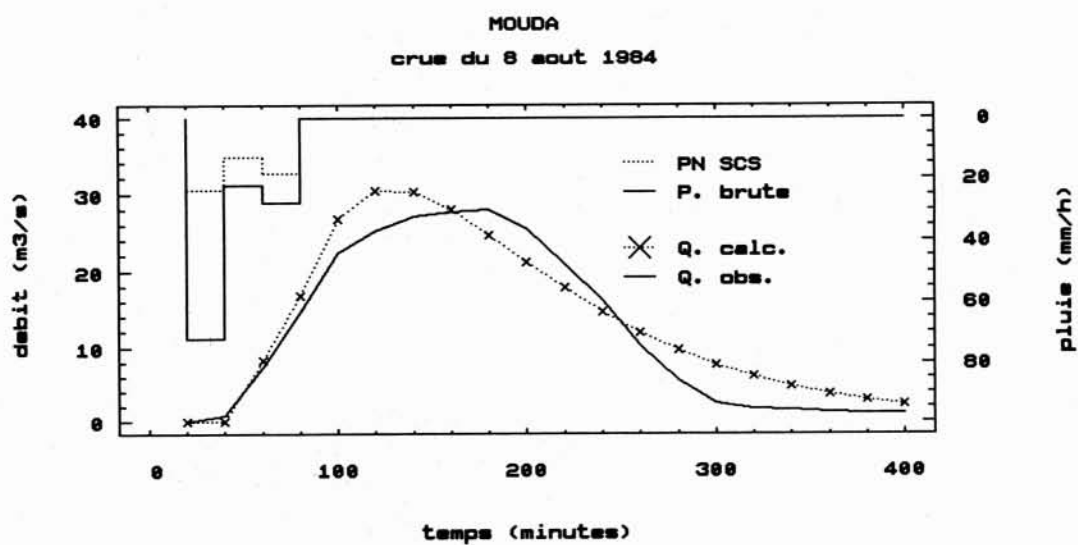
Conclusion

Avec un ruissellement superficiel prépondérant par rapport aux autres formes d'écoulement, les petits bassins sahéliens forment un domaine d'application idéal pour le concept d'hydrogramme unitaire. Mais comment mettre en œuvre ce concept ? Que choisir parmi tous les développements apportés à ce concept depuis près de cinquante ans ? Dans le contexte sahélien, l'analyse de la validité et de la robustesse d'une modélisation de type hydrogramme unitaire constitue le thème principal de notre étude. Ce travail est mené dans un objectif de prédétermination de crues, ce qui interdit l'utilisation de modèles trop sophistiqués qui demandent des données en entrées qui sont rarement disponibles sur des bassins observés.

Le faible nombre de paramètres des modèles retenus est un gage de robustesse, tout en permettant d'atteindre une précision suffisante, malgré les petits pas de temps de calcul utilisés (de dix à vingt minutes). Il s'agit d'une base de modélisation simple, pouvant servir de comparaison pour toute tentative de modélisation plus sophistiquée.



5. Hydrogrammes unitaires du bassin de Mouda identifiés par la DPFT avec contraintes et par l'hydrogramme de Nash avec l'expression du SCS.



6. Modélisation d'une crue de validation avec la fonction de production du SCS et l'hydrogramme de Nash.

Bibliographie

- CASENAVE A. et VALENTIN C. — Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Collection Didactiques*, Editions de l'ORSTOM, 1989.
- DUJARDIN J.M. — Exemples concrets d'annonce des crues dans de petits bassins versants. *La Houille Blanche*, 4/5, pp. 291-295, 1980.
- GIRARD G. — Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, Vol. XII, n° 3, pp. 189-221, 1975.
- GIRARD G., LEDOUX E. et VILLENEUVE J.P. — Le modèle couplé, simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, Vol. XVIII, n° 4, pp. 195-280, 1981.
- GUILLLOT P. et DUBAND D. — Fonction de transfert pluie-débit sur les bassins versants de l'ordre de 1 000 km². *La Houille Blanche*, 4/5, pp. 279-290, 1980.
- HOLTAN H.N. — A concept for infiltration estimates in watershed engineering, U.S. Dept. Agric., *Agricultural Research Service Paper* 41-51, Washington D.C., 1961.
- HUFF F.A. — Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. *Wat. Resour. Res.* Vol. 3, n° 4, pp. 1007-1019, 1967.
- LORENT B. — Modélisation et identification d'une relation pluie-débit : le bassin de la Semois. 7^e Conf. IFIP sur les techniques d'optimisation, Nice, 1975.
- NASH J.E. — The form of the instantaneous unit hydrograph. *Proc. General Assembly of Toronto. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.*, 45 (3), pp. 114-121, 1957.
- NASH J.E. and SUTCLIFFE J.V. — River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles, *J. Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282-290, 1970.
- RIBSTEIN P. — *Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel*. Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 1990.
- RODRIGUEZ-ITURBE I. and VALDES J.B. — The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response. *Wat. Resour. Res.*, Vol. 15, n° 6, pp. 1409-1420, 1979.
- ROSENBROCK H.H. — An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Computer Journal*, 3 (3), pp. 175-184, 1960.
- U.S.D.A. (U.S. Dept. Agric.). Soil Conservation Service. Estimation of direct runoff from storm rainfall. In : *National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology*. Washington D.C., pp. 10.1-10.24, 1972.
- WERY B., LEBEL T. and BASTIN G. — On real time forecasting of riverflows under various climatological conditions : methodology and experimental results. *XIX General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*. Vancouver, 1987.