

13 JUL. 1971

## INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR QUELQUES BASSINS REPRÉSENTATIFS TROPICAUX

J. RODIER\*\* et G. VUILLAUME\*

C. R. S. T. D. M.

Collection de Référence

• B4849

### 1. INTRODUCTION

Les bassins représentatifs ont généralement pour objet principal ou secondaire de faire comprendre l'action des diverses caractéristiques physiques : sol, sous-sol, relief, végétation, sur les processus hydrologiques transformant les précipitations en écoulement de surface ou en écoulement souterrain. Si les chercheurs exploitant ces bassins parviennent à une compréhension suffisante de ces processus, ils doivent être capables de les reconstituer quantitativement par des modèles. De tels modèles doivent permettre, pour un bassin représentatif donné, de reconstituer toutes les crues de ruissellement d'une année à partir des précipitations (ou des chutes de neige).

Certains modèles, très complets, tel le modèle de STANFORD, décrivent pour un bassin donné les divers processus hydrologiques, mais leur utilisation est assez complexe et exige une masse de données considérable.

Dans les régions tropicales où les averses à forte intensité sont fréquentes, le ruissellement superficiel prend une très grande importance et il est très fréquent que pour des petits cours d'eau, il joue de loin le rôle principal dans la formation de l'écoulement des rivières. On peut dans ce cas, définir des modèles beaucoup plus simples. Un des premiers résultats à obtenir sur un bassin représentatif sera donc ce modèle simplifié qui permettra de s'affranchir des variations particulières des facteurs climatologiques pendant l'échantillon de temps correspondant à la période d'observations, et de déterminer les données hydrologiques permanentes. Si le modèle est bien fait, il doit pouvoir, moyennant l'ajustement de ses principaux paramètres, s'appliquer à d'autres bassins correspondant à des conditions naturelles peu différentes.

Sur un bassin expérimental, la mise au point du modèle peut jouer un rôle capital dans la phase de calibration, l'effet d'un changement de couverture végétale par exemple se verra beaucoup mieux sur les paramètres du modèle que sur les données brutes des débits; l'influence des caractères particuliers de l'abondance relative des précipitations, pendant la période de calibration et la période d'expérimentation, pourra être ainsi facilement éliminée.

### 2. SIMPLIFICATIONS POSSIBLES LORSQUE LE RUISSELEMENT SUPERFICIEL EST PRÉPONDÉRANT

Avant d'illustrer ceci par quelques exemples, nous donnerons quelques indications sur un certain nombre de simplifications utiles dans le cas de petits bassins tropicaux.

Tout d'abord si le ruissellement est bien caractérisé et la surface pas trop grande par rapport à l'étendue couverte par une averse individuelle, on peut considérer un modèle global : le plus simple et le mieux connu est l'hydrogramme unitaire [1]. Si le volume du ruissellement est connu, on trouve par ce procédé, la modulation dans le temps de ce débit.

L'hydrogramme unitaire est loin d'être parfait, son principe constitue déjà une simplification par rapport à ce qui est observé dans la nature, mais il est possible d'éviter plusieurs de ses inconvénients en prenant les précautions suivantes :

\* Conseiller Scientifique à EDF (IGECO) — Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM.

\*\* Chargé de Recherches de l'ORSTOM.

- a) Ne l'appliquer que lorsque le bassin est assez petit par rapport à la dimension de l'averse;
- b) Pour établir les caractéristiques de l'hydrogramme type, ne considérer que les averses de forte durée, ayant donné lieu à un ruissellement homogène sur l'ensemble du bassin ;
- c) Si le bassin ne ruisselle que de façon modérée, considérer s'il le faut plusieurs hydrogrammes unitaires : un pour les faibles crues, l'autre pour les fortes crues. C'est ce qu'il faut faire également si la couverture végétale change au début de la saison des pluies.

Il importe de définir l'hydrogramme type de telle façon que sa détermination soit indépendante de l'opérateur. C'est pourquoi M.A. Roche a mis au point la méthode de l'hydrogramme standard permettant de définir le temps de montée, le temps de base ou de ruissellement et le rapport entre débit maximal et débit moyen pendant la durée de ruissellement (ou le pourcentage de pointe) sans aucun élément subjectif [2].

Nous avons tenté d'établir entre ces paramètres et les caractéristiques physiques du bassin des relations comparables aux formules de Snyder [3] [4], mais jusqu'ici ont été déterminés seulement des réseaux de courbes du temps de base ou du temps de montée en fonction d'un indice de pente. Une étude géomorphologique d'ensemble est en cours pour rechercher quelle combinaison de facteurs il conviendrait d'adopter pour les hydrogrammes types des bassins tropicaux.

En principe l'hydrogramme unitaire ne s'applique qu'au ruissellement superficiel, mais cependant dans le cas d'écoulement intermédiaire très uniforme, par exemple dans le cas de sol volcanique très perméable, on a tenté, avec succès, d'appliquer la méthode de l'hydrogramme unitaire. Les temps de parcours sont beaucoup plus longs, bien entendu. Mais de telles simplifications ne peuvent être faites que dans des cas très particuliers et avec la plus grande prudence.

Nous n'insisterons pas sur la mise au point de l'hydrogramme type qui est bien connu. Pour le calcul du volume de crue, il est tentant d'entreprendre une analyse fine des pertes entre précipitations et ruissellement en faisant intervenir la capacité d'infiltration. En fait, ce genre de recherche est assez délicat, il vaut mieux souvent chercher des relations aussi directes que possible entre la hauteur d'eau ruisselée ou  $H_r$ , et la hauteur d'eau de l'averse  $P_m$ , compte tenu des divers facteurs de l'écoulement. L'étude est faite soit sur la hauteur de ruissellement, soit sur le coefficient de ruissellement  $K_r$ , égal au rapport :  $H_r/P_m$ .

La hauteur de ruissellement a une signification physique plus précise et la différence  $P_m - H_r$ , correspond assez souvent à une hauteur d'eau infiltrée qu'on peut quelquefois mesurer avec une précision suffisante.

Le coefficient de ruissellement présente, sur la hauteur de ruissellement, les avantages suivants :

- Ses variations, en fonction des précipitations, sont souvent linéaires, sauf pour les très faibles ou les très forts ruissellements.
- Il permet des comparaisons assez faciles d'un bassin à un autre, même si les régimes pluviométriques sont différents.
- Enfin, la courbe  $K_r$ , en fonction de  $P$  admet une asymptote 100% alors que pour  $H_r$ , en fonction de  $P$ , il n'y a qu'une direction asymptotique.

Que l'on utilise  $H_r$  ou  $K_r$ , il est assez facile de passer de l'un à l'autre.

Dans le cas de recherches très fines comportant de nombreuses mesures directes de l'infiltration, il peut être utile d'éviter ces simplifications et de revenir à l'analyse de la capacité d'infiltration.

La partie la plus délicate de la mise au point du modèle est la recherche des régressions entre le coefficient de ruissellement  $K_r$  et ses facteurs conditionnels.

### 3. GÉNÉRALITÉS SUR LES RAPPORTS PRÉCIPITATIONS-ÉCOULEMENT

Les facteurs conditionnels, pour un bassin déterminé, sont les suivants : la hauteur de précipitations, les conditions d'humidité antérieures qui peuvent être représentées par un indice d'humidité, l'intensité moyenne ou la durée de l'averse, la température (ses variations dans le temps jouent peu en régions tropicales, en saison des pluies), l'état de la végétation et un indice tenant compte de la plus ou moins bonne adaptation d'un modèle global au type de pluie ou de bassin : tel qu'un facteur d'hétérogénéité de l'averse ou la position de l'épicentre de l'averse par rapport au centre du bassin par exemple.

Nos hydrologues font ces analyses à partir des régressions multiples, on utilise la méthode des résidus par procédés graphiques. Notons que l'analyse est valable, qu'il s'agisse ou non de ruissellement superficiel pur.

tion des débits moyens sur de longues périodes pour de petits cours d'eau, l'influence de telle ou telle transformation sur un bassin donné. Malheureusement, nos modèles actuels de transformation d'un débit en un autre sont...

moyenne moins les fractions d'averse à faible intensité. Les indices d'humidité sont souvent de forme différente. L'indice bien connu de Kohler convient parfaitement pour certains terrains et moins bien pour d'autres, d'où le choix d'autres indices. L'ensemble de facteurs secondaires est différent d'un bassin à un autre. Il est certain qu'il est impossible d'adopter un mode d'analyse standard, mais il est certain aussi qu'on peut faire beaucoup mieux que nous n'avons fait jusqu'ici.

Cependant, comme on le verra plus loin, certaines études comparatives d'un bassin à un autre sont possibles.

Il n'en reste pas moins une dernière difficulté: Comment chiffrer de façon précise un facteur de perméabilité d'ensemble d'un bassin versant ou un facteur global géomorphologique? Des études approfondies sont en cours en AFRIQUE OCCIDENTALE ou en AFRIQUE CENTRALE à ce sujet. Elles ont pour objet notamment de lier les coefficients trouvés par l'analyse des données du ruissellement aux mesures faites habituellement par les spécialistes du sol pour caractériser la perméabilité sous ses différentes formes.

##### 5. DEUX EXEMPLES DE MODÈLES DE TRANSFORMATION PLUIE-DÉBIT

Parmi les trente-trois cas étudiés, nous avons choisi deux exemples: l'un simple concerne un bassin assez imperméable, relativement grand  $41 \text{ km}^2$ , mais de structure simple assez homogène. Il s'agit du Mayo LIGAN au TCHAD. L'autre est le petit bassin de BOUNDJOUK dans l'ADAMAOUA. Sa superficie est de  $1,66 \text{ km}^2$ , son sol est assez perméable, la saison sèche est courte alors qu'elle dure huit mois pour le Mayo LIGAN. Tous deux reçoivent des averses tropicales assez fortes à intensité relativement élevée. La hauteur maximale journalière des précipitations est de l'ordre de  $60 \text{ mm}$  par an, la hauteur décennale de l'ordre de  $100 \text{ mm}$ . L'analyse est faite averse par averse bien entendu, chaque averse ne dure que quelques heures au maximum.

Dans le premier cas, l'ensemble des régressions est classique: on a étudié le coefficient de ruissellement  $K_r$ , rapport du volume ruisselé au volume de précipitation reçu par le bassin. Le facteur principal est la hauteur de précipitation moyenne sur le bassin. Le facteur secondaire est l'indice d'humidité. Cet indice est égal, pour chaque crue élémentaire, à la somme des facteurs  $P_a/t_a$  ( $P_a$  précipitation antérieure à celle ayant précédé la crue,  $t_a$  temps séparant la pluie antérieure  $P_a$  de la pluie génératrice de la crue). Cette série n'est pas convergente, mais étant donné l'existence et la longueur de la saison sèche.

homogène. Sur certains bassins en effet, cette courbe a une position bien définie, beaucoup mieux que la courbe moyenne habituelle, ceci facilite la détermination des autres régressions. En outre, on considère comme variable principale non pas  $P_m$ , mais le corps de l'averse  $C$ , c'est-à-dire la partie de l'averse qui correspond à des intensités moyennes et fortes après élimination des faibles intensités inférieures à une limite précise. Cette limite est fixée en fonction de la perméabilité du sol et souvent voisine de 10 mm/h. Cette notion de corps de l'averse est utile pour l'étude des averses orageuses tropicales. Le choix de  $C$  réduit la dispersion des résultats.

La principale originalité consiste dans l'analyse de l'influence du premier facteur secondaire : l'humidité du sol. De nombreuses recherches à partir des indices habituels ont montré que l'influence de celle-ci se présente sous deux aspects : l'état de la surface

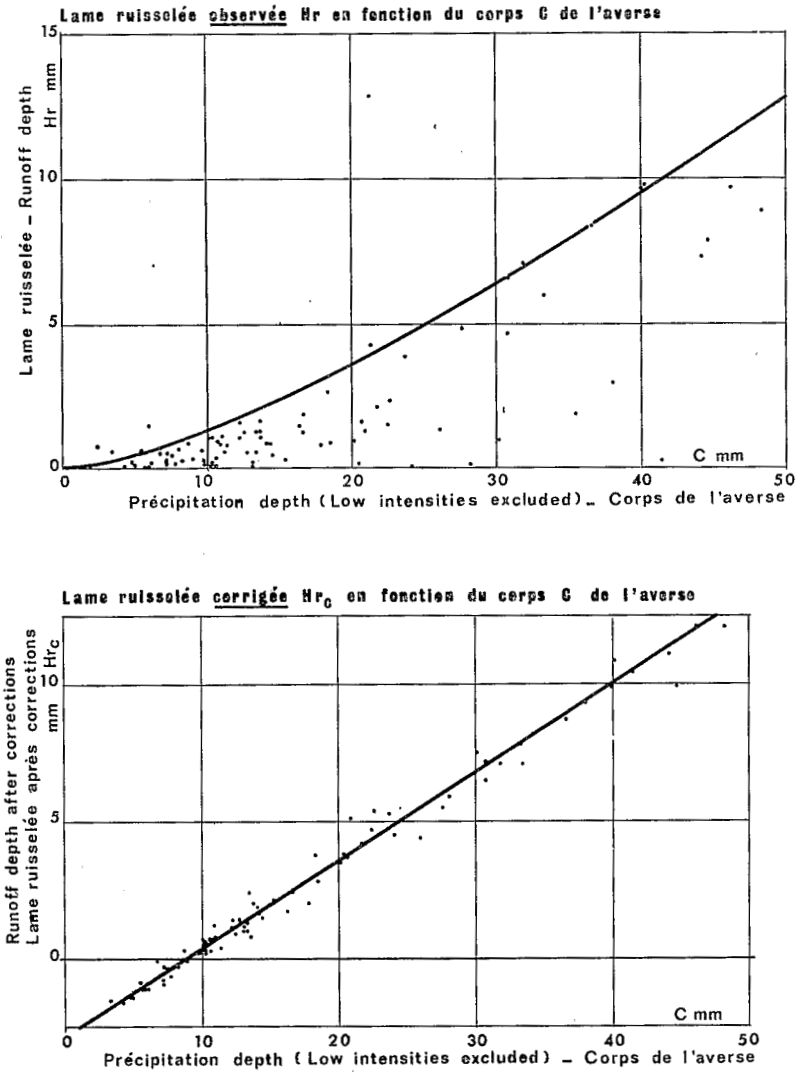


FIGURE 2. Bassin versant du Petit Boundjouk. Analyse du ruissellement (runoff analysis)

du sol correspondant aux précipitations pendant les quelques heures ou, à la rigueur, pendant les quelques jours qui ont précédé l'averse étudiée et l'état de remplissage du lit de la rivière, l'état des couches superficielles du sol, le remplissage des micromares, etc... qui correspondent aux précipitations antérieures sur une période beaucoup plus longue. D'où l'idée de diviser le premier écart  $\Delta H_1$  en deux parties : l'une  $\Delta H_1$  résulte de l'effet du temps  $T$  écoulé depuis la dernière averse susceptible de provoquer une variation du débit, si faible soit-elle, et l'averse étudiée, l'autre  $\Delta H'_1$  du total des précipitations

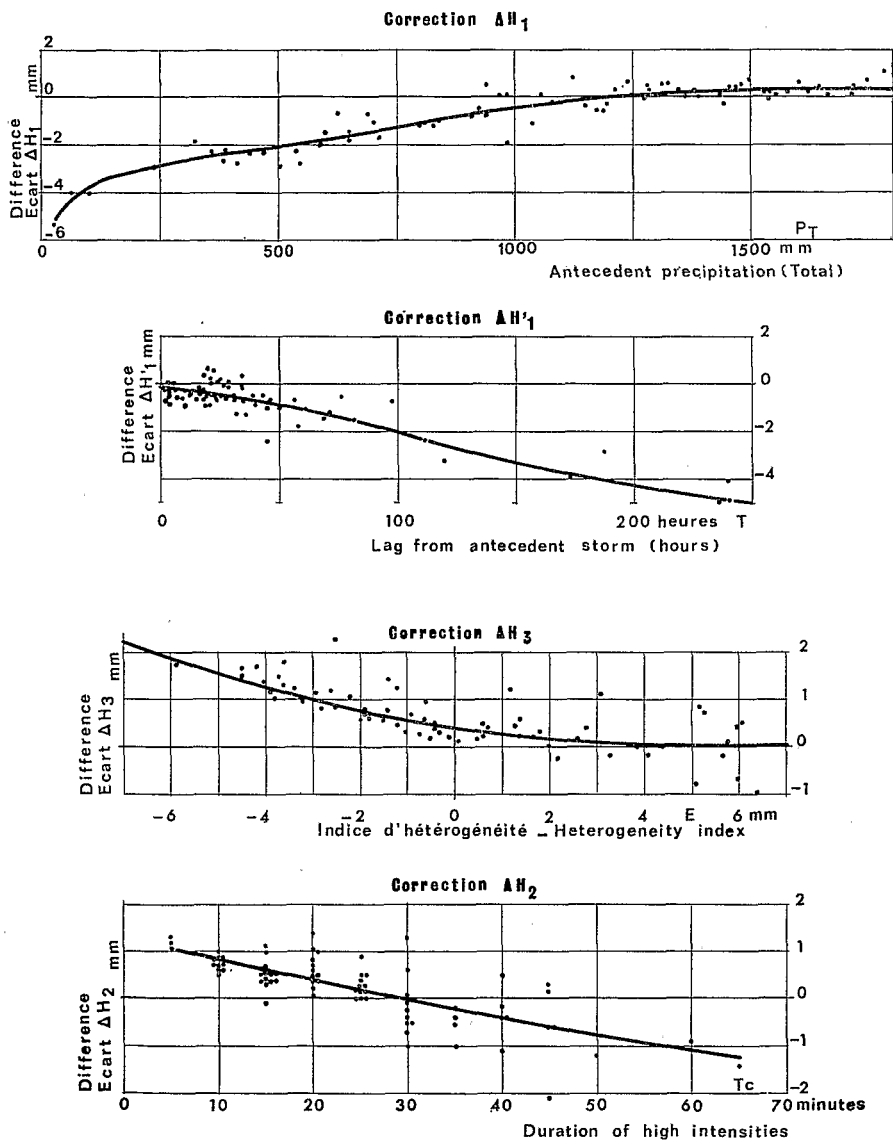


FIGURE 3. Bassin versant du Petit Boundjouk. Analyse du ruissellement (runoff analysis)

observées  $P_T$  entre le début de la saison des pluies et l'averse étudiée. Le partage entre  $\Delta H_1$  et  $\Delta H'_1$  est délicat, on tient le plus grand compte des averses des fins de saisons des pluies abondantes pour lesquelles l'action de  $P_T$  étant maximale, la valeur de  $\Delta H'_1$  correspond à l'asymptote de la courbe  $\Delta H'_{1,P} = f(P_T)$  dont la position est facile à déterminer. Il existe d'autres procédés.

Après correction de la courbe  $H_r = f(C)$  suivant les deux courbes  $\Delta H_1 = f(T)$  et  $\Delta H'_1 = f$ , les écarts résiduels  $\Delta H_2$  sont étudiés en fonction de la durée  $T_C$  du corps de l'averse.

Enfin, l'écart résiduel  $\Delta H_3$  est étudié en fonction d'un indice  $E$  en mm, tenant compte du caractère plus ou moins partiel du ruissellement. Ceci est utile surtout dans le cas de faibles averses : c'est un facteur d'hétérogénéité. Quelle que soit la méthode affectée, cette

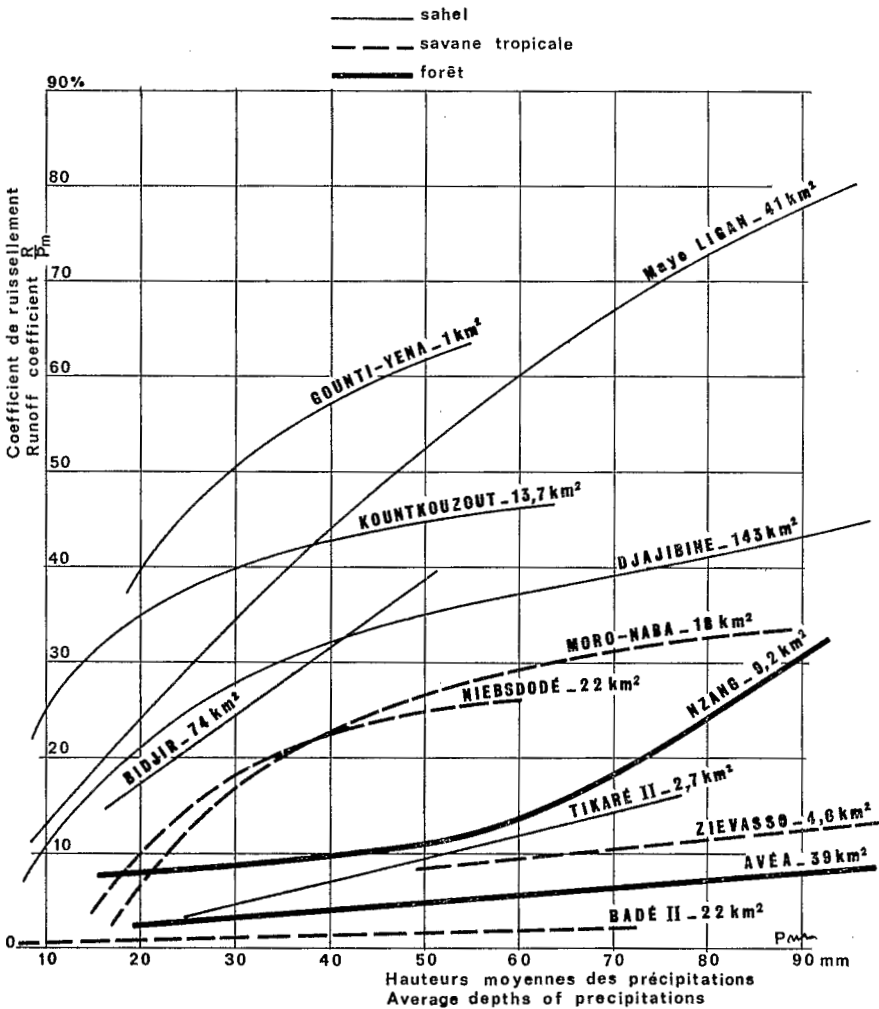


FIGURE 4 Variations du coefficient de ruissellement en fonction de la hauteur moyenne des précipi-



hétérogénéité du ruissellement est souvent le principal facteur de dispersion pour les faibles averses lorsqu'il n'en est pas tenu compte dans les régressions.

Cette méthode, qui a été utilisée sur quatre ensembles de bassins, donne d'excellents résultats : c'est elle qui a conduit sur petits bassins (moins de  $10 \text{ km}^2$ ) à des coefficients de corrélation atteignant 0,99. On en arrive pratiquement à trouver la relation pluie-débit. Malheureusement, il semble qu'elle ne s'applique qu'au cas de bassins à courte saison sèche, avec sol assez perméable et l'étude des régressions  $\Delta H_1$  et  $\Delta H'_1$  est assez délicate. Le choix de l'expression du facteur d'hétérogénéité n'est pas très facile. À noter que le modèle de ruissellement ainsi choisi est valable pour toute la gamme des crues, des petites jusqu'aux plus grandes.

Dans ces régressions, on remplace souvent l'indice d'humidité par le débit de base  $Q_0$  juste avant le début de la crue, on obtient dans l'analyse de très bons résultats, mais pour la synthèse qui, elle, ne peut partir que des précipitations, on doit, pour reconstituer  $Q_0$ , utiliser une régression entre  $Q_0$  et une fonction des précipitations antérieures; cette régression fait perdre la précision gagnée grâce à l'emploi de  $Q_0$ .

Quel que soit le mode de régression utilisé, nous employons pour l'analyse et la synthèse des données de ruissellement, le schéma général suivant (fig. 5) qui, partant des données de pluies et de débits observés, aboutit : à l'hydrogramme standard, à l'ensemble des relations pluies-débits, à la valeur de l'abattement de la pluie (rapport entre la pluie maximale ponctuelle et la pluie moyenne de même fréquence sur le bassin).

Connaissant une averse de fréquence donnée définie par les données du réseau pluviométrique normal, on déduit, à partir de ces trois caractéristiques du bassin la crue correspondante. On peut mettre au point des schémas analogues pour l'érosion.

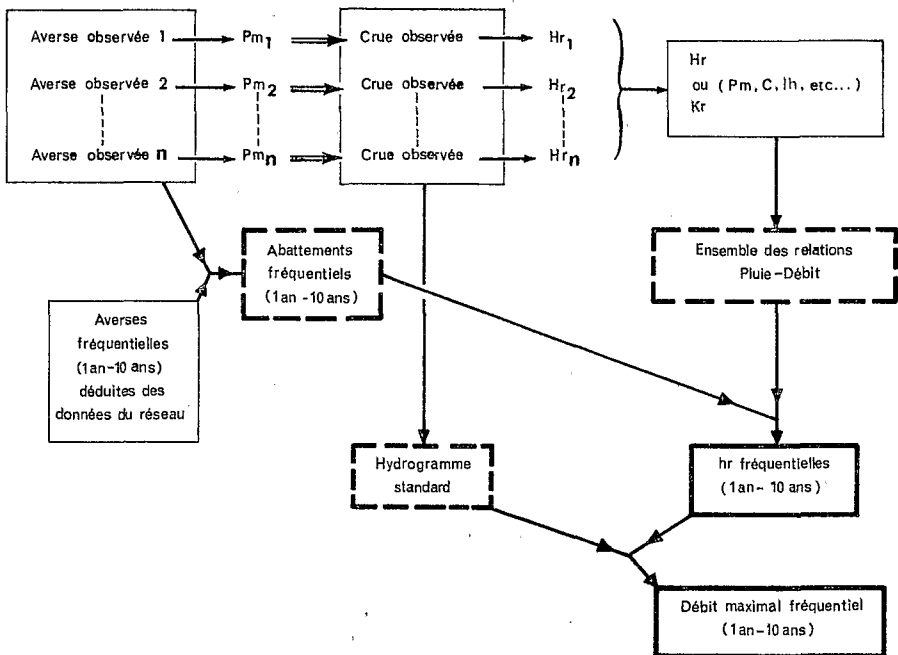


FIGURE 5. Schéma simple d'analyse et de synthèse pour le ruissellement.

6. ÉTUDES COMPARATIVES D'ÉLÉMENTS DE MODÈLES

Comme nous l'avons vu plus haut, on est arrivé à serrer d'assez près la réalité dans d'assez nombreux cas, mais l'analyse n'a pas été conduite en vue de l'obtention de comparaison de modèles (mis à part les hydrogrammes standard). Cependant, si on considère des éléments simples comme les courbes du coefficient de ruissellement  $K_r$ , en fonction de la hauteur de précipitations, on peut, en prenant certaines précautions, les comparer avec fruit : c'est ce qui a été fait pour l'Afrique Occidentale et Centrale. On a choisi douze

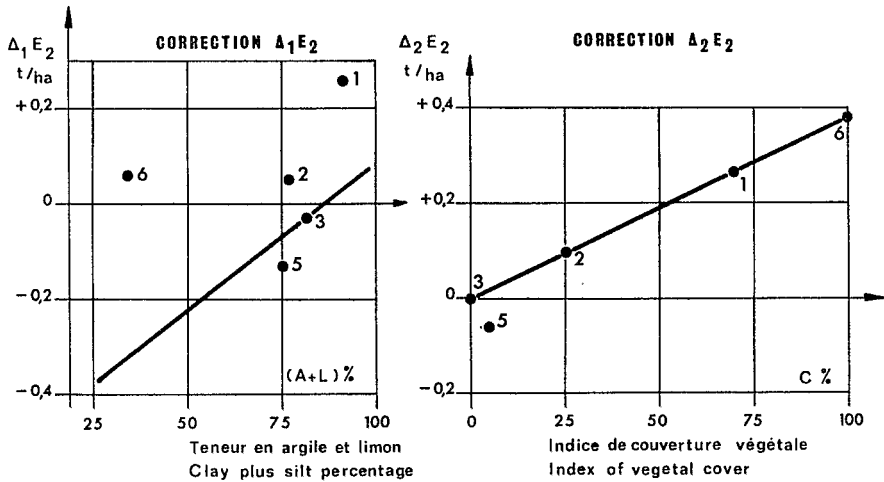
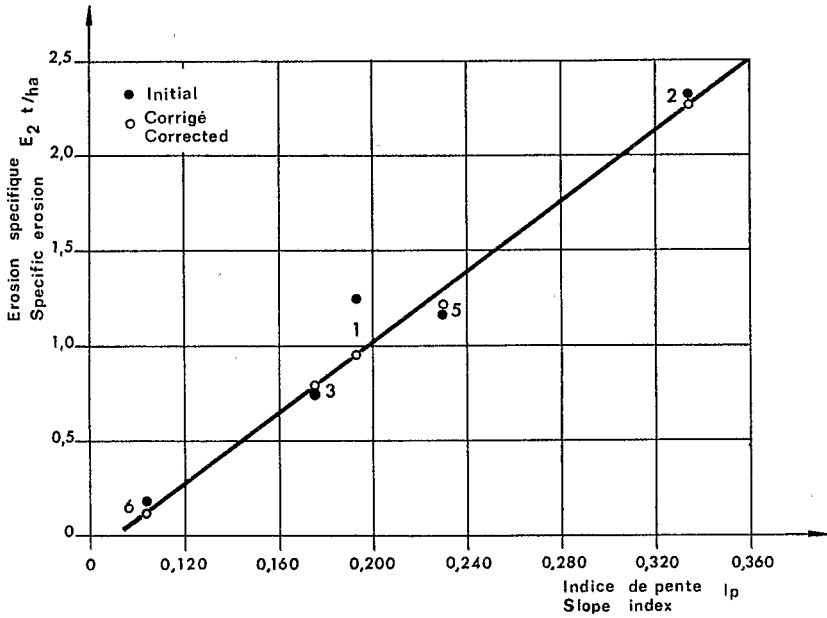


FIGURE 6. Bassin de Kountkouzout. Érosion spécifique de fréquence annuelle en fonction de l'indice de pente  $I_p$ . Specific erosion 1 time/year related to slope index.

exemples parmi les trente-trois connus, pour établir le graphique n° 3. Ces exemples correspondent aux cas les plus typiques, on constate que la position des courbes est parfaitement logique compte tenu des données physiques des bassins (pour tous les cas, les averses sont du type orages tropicaux).

Six bassins :

GOUNTI-YENA (NIGER);  
Mayo LIGAN (TCHAD);  
KOUNTKOUZOUT (NIGER);  
BIDJIR (TCHAD);  
DJAJIBINE (MAURITANIE);  
TIKARE (HAUTE-VOLTA),

sont du type sahélien avec hauteur de précipitations annuelles inférieure à 800 mm par an, longue saison sèche et couverture végétale sans grande influence sur le ruissellement.

Quatre sont du type tropical :

MORO-NABA (HAUTE-VOLTA);  
NIEBSDODE (HAUTE-VOLTA);  
ZIEVASSO (CÔTE D'IVOIRE);  
BADE (TCHAD)

avec saison sèche pas trop longue, savane plus ou moins boisée offrant un freinage non négligeable au ruissellement.

Deux sont couverts par la forêt tropicale :

NZANG (GABON);  
AVEA (CAMEROUN).

La comparaison détaillée serait passionnante mais on ne peut pas la faire ici, nous ne donnerons que quelques indications rapides.

Le GOUNTI-YENA est un bassin urbain qui ruisselle, même pour les pluies assez faibles, cependant il y a des jardins, le sol à l'état naturel est du sable; pour moins de 15 mm, il ruisselle moins que le bassin de KOUNTKOUZOUT dont une partie est naturellement imperméable.

Le bassin du Mayo LIGAN est imperméable avec pente notable. Sur le bassin de DJAJIBINE également peu perméable, la pente est assez faible, le bassin est plus grand que les autres et les berges couvertes de buissons épineux freinent un peu le ruissellement pour de fortes crues.

Le bassin de TIKARE présente une épaisseur notable de gravillons latéritiques sur  
de la zone... il est perméable. Le bassin... perméable... courbe de ruisselle

## 7. APPLICATION À DES BASSINS EXPÉRIMENTAUX

Un bassin étant défini par un modèle de ruissellement, une modification des caractéristiques physiques de ce bassin entraîne obligatoirement une modification d'un élément du modèle : courbe du coefficient de ruissellement du bassin, hydrogramme standard, etc... ou des données qui en résultent : crue de fréquence annuelle ou décennale, érosion de fréquence annuelle ou décennale. Après une série d'opérations telles que celles du schéma 5, il peut être facile de mettre en évidence de telles modifications quelle que soit l'abondance ou les déficiences des saisons des pluies étudiées.

Un exemple lié à une donnée habituellement étudiée sur les bassins expérimentaux, l'érosion, a été extrait des études de G. Vuillaume sur les bassins versants expérimentaux du KOUNTKOUZOUT [7].

Il s'agit de la première phase de recherches avant l'application des mesures de conservation des sols. Nous avons extrait l'analyse de l'érosion de fréquence annuelle : celle qui, en moyenne, se produit pendant une crue par an. On considère plus précisément l'ablation moyenne sur le bassin en tonne par ha, l'analyse de l'érosion est effectuée sur 5 très petits bassins avec fosses à sédiments, en fonction de l'indice de pente de Roche  $I_p$ , de la teneur en argile et limon des sols ( $A + L\%$  : éléments de diamètre inférieur à 50 microns) et d'un indice de pourcentage de culture  $C\%$ . L'indice de pente est ici facteur principal. Les résultats de cette analyse effectuée par régressions multiples (fig. 6) montrent ce que l'on peut attendre de l'emploi de telles méthodes. Il est bien évident qu'une modification de  $C\%$  permettra de vérifier facilement l'effet obtenu sur la courbe de  $E_2$  en fonction de  $I_p$ .

On peut penser que l'emploi du calcul automatique sur les bassins représentatifs et expérimentaux, qui se répand largement maintenant, permettra de faire progresser rapidement ce genre d'analyse, à condition que son utilisation soit faite avec discernement.

## RÉFÉRENCES

1. LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A. et PAULHUS, J.L.H. (1949): Applied Hydrology, New York, McGraw Hill.
2. ROCHE, M. (1967): Recherche d'un hydrogramme standard, Paris, Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, Vol. IV, n° 1.
3. SNYDER, F.F. (1938): Synthetic unit-graphs, *Transactions American Geophysical Union*, 19, 447-54.
4. RODIER, J.A. et AUVRAY, C. (1965): Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique Occidentale, Paris, ORSTOM.
5. BOUCHARDEAU, A. (1959): Méthode d'extrapolation du coefficient de ruissellement sur les bassins expérimentaux de la zone sahélienne du Tchad, *Annuaire hydrologique de l'ORSTOM 1957*, Paris, ORSTOM.
6. BRUNET-MORET, Y. (1965): Étude des facteurs du ruissellement sur un bassin représentatif du Cameroun : petit bassin de Boundjouk, *Publication n° 66 de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique* (Symposium de Budapest).
7. VUILLAUME, G. (1969): Analyse quantitative du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne (Bassin de Kountkouzout, Niger), Paris, Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, Vol. VI, n° 4.