

Exemple d'application des méthodes de prédétermination de crues décennales

Le plan directeur de la haute vallée du fleuve Sénégal

Jacques ALBERGEL (1), Jean-Pierre LAMAGAT (1) et Bertrand MARIEU (1)

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'aménagements hydro-agricoles ou de génie civil, les hydrologues sont fréquemment sollicités pour estimer les paramètres de crues exceptionnelles sur des bassins non jaugés, dans un délai très bref et avec peu de données.

A l'occasion d'une étude de ce type réalisée pour les besoins du plan directeur d'aménagement du haut bassin du fleuve Sénégal, il nous a paru intéressant de faire le point sur les moyens dont on dispose pour répondre à de tels problèmes dans la zone sahélienne, et d'analyser les limites et les difficultés d'utilisation des modèles existants.

MOTS CLÉS: Afrique de l'Ouest — Fleuve Sénégal — Petits bassins versants — Crue décennale.

ABSTRACT

METHODS OF ESTIMATING FLOOD FREQUENCIES: UPPER SENEGAL BASIN

Hydrologists are frequently asked to estimate the parameters related to exceptional floods on small ungauged catchments, with few data and within a very short time, and this for agricultural and engineering works.

Based on such a study made for the master plan for the development of the upper basin of the river Senegal, the following paper analyses the different ways of solving such problems as well as their limitations and difficulties of use, in the sahelian context.

KEY-WORDS: West Africa — Senegal river — Small catchments — Ten year storm-flow.

INTRODUCTION

En 1989, L'Orstom s'est vu confier une étude hydrologique dans le cadre du plan directeur d'aménagement du haut bassin du Sénégal.

Cette étude a débuté par une synthèse hydrologique et climatologique sur l'ensemble du haut bassin, présentée sous la forme de deux rapports publiés en novembre 1989 et en janvier 1990 (LAMAGAT et ALBERGEL, 1989-90).

Le troisième volet de l'intervention de la section hydrologie de l'Orstom de Dakar a consisté d'une part dans la détermination des lignes d'eau au droit de certaines sections, et d'autre part dans l'estimation de paramètres hydrologiques (crue décennale et apports annuels) sur différents points d'impact prévus pour la mise en œuvre d'aménagements hydro-agricoles (LAMAGAT, MARIEU et ALBERGEL, 1990).

Ces sites, au nombre de 16 répartis en quatre secteurs (Bakel, Kidira, Kayes et Melgue), se situent entre les isohyètes 500 et 700 mm dans la zone du climat nord-soudanien qui appartient au domaine sahélien.

Nous reprenons dans la présente communication l'expertise relative à l'estimation des crues d'études et de projet sur les points retenus (ALBERGEL et LAMAGAT, 1991).

(1) Orstom, section hydrologie, BP 1386, Dakar Sénégal.

Après un bref rappel concernant les méthodes de prédétermination de crues décennales existant pour le Sahel, nous nous sommes attachés à démontrer comment l'hydrologue pouvait contribuer à l'étude de faisabilité d'ouvrages hydrauliques par l'estimation du risque naturel encouru. Les différentes méthodes ont été appliquées sur les 16 sites considérées. Les résultats obtenus ont ensuite été analysés et comparés.

LA PRÉDÉTERMINATION DES CRUES AU SAHEL

HISTORIQUE ET DÉFINITIONS

La nécessité de mettre au point une méthode d'évaluation des débits de pointe des crues exceptionnelles sur les petits bassins versants est apparue en Afrique dans les années cinquante, afin de proposer des éléments de calcul rationnels pour la construction des ouvrages de génie civil, en particulier les constructions de franchissement de routes et voies ferrées. La méthode du «curve number» du Geological Survey, utilisée auparavant dans les régions intertropicales n'avait pas donné satisfaction au Sahel.

Le premier bassin représentatif d'Afrique de l'Ouest a été aménagé par l'Orstom sur le Mayo Monbarroua (Cameroun) en 1953 et en 1955, une convention d'études avec le service fédéral de l'hydraulique de l'AOF, permet d'équiper 10 bassins versants représentatifs et lancer de nombreuses recherches sur les méthodes de prédétermination des crues.

Ce programme d'étude des petits bassins versants expérimentaux et représentatifs a permis à RODIER et AUVRAY, grâce aux données hydrologiques acquises sur une soixantaine de bassins, de proposer en 1965 une méthode d'estimation des débits de crue décennaux, pour les bassins de superficie inférieure à 200 km².

La crue décennale considérée, aussi appelée crue d'étude, est en réalité la crue provoquée par une averse journalière sur l'ensemble du bassin de récurrence décennale, les autres conditions, en particulier l'état de saturation des sols et la végétation, étant moyennes.

Parallèlement à la crue d'étude, on définit la crue de projet qui correspond à une crue de caractère exceptionnel dont la récurrence dépend du risque que les projets acceptent de courir. Par exemple si on choisit de se prémunir contre une crue se produisant en moyenne deux fois par siècle (période retour égale à 50 ans), le débit maximum de la crue de projet sera celui d'une crue cinquantennale obtenue par divers procédés à partir de la crue décennale. Pour les bassins les plus imperméables, le coefficient de ruissellement reste constant pour toutes les pluies supérieures à la décennale, et il suffit de multiplier le débit maximum de la crue décennale par le rapport de la pluie journalière de période de retour 50 ans sur la pluie journalière décennale. Pour les autres, la loi de distribution des maximums de crue est plus fortement asymétrique que celles des averses qui les engendrent et il faut prendre une marge de sécurité plus forte.

Pendant une vingtaine d'années la méthode de RODIER-AUVRAY a été la seule disponible. En 1984, PUECH et CHABI-GONNI du Comité Inter-africain d'études hydrauliques ont réalisé une étude statistique à partir des données des 160 bassins de superficie comprise entre 0,07 et 2 500 km² jusqu'alors observés par l'Orstom. Ces auteurs ont obtenu par régressions multiples des relations donnant le débit maximum de la crue décennale en fonction d'un petit nombre de paramètres.

En 1988, RODIER et RIBSTEIN ont apporté des corrections à la méthode initiale de prédétermination mise au point par RODIER et AUVRAY, pour les bassins de superficie inférieure à 10 km², en proposant notamment une «check list» permettant de prendre en compte les particularités de certains bassins. Ces études sont en voie d'achèvement pour les bassins de superficie excédant 10 km² et allant même jusqu'à 2 000 km².

MÉTHODES DE PRÉDÉTERMINATION DE LA CRUE DÉCENNALE

La méthode de RODIER et AUVRAY peut s'appliquer à des bassins versants de superficie inférieure à 200 km², dans des zones de pluviométrie n'excédant pas 1 700 mm. La limite de validité dépasse donc largement le domaine sahélien. En ce qui concerne la superficie des bassins, on considère qu'au-delà de 200 km², il devient difficile et souvent impossible de déterminer la lame précipitée de fréquence décennale à partir de l'averse ponctuelle de même récurrence.

A partir des résultats de 60 bassins observés entre 1955 et 1965, RODIER et AUVRAY ont proposé une estimation du débit de pointe de la crue décennale par une méthodologie résumée par la relation suivante:

$$Q_{10} = K.P_{10j}.Kr_{10}.S.a.TB^{-1}$$

avec:

K: le rapport de la pluie ponctuelle à la pluie moyenne sur le bassin, aussi appelé coefficient d'abattement,

P_{10j} : la pluie journalière décennale en mm,

Kr_{10} : le coefficient de ruissellement correspondant à la pluie décennale,

S: la superficie du bassin versant en km^2 ,

a: le rapport du débit maximal sur le débit moyen pendant le temps de base,

Tb: le temps de base en s.

La détermination des caractéristiques hydrologiques (Kr_{10} , Tb et Tm le temps de montée) se fait au moyen d'abaques en fonction de la superficie (S), de classes de perméabilité (P) et de relief (R).

Le schéma de la figure 1 illustre les différents concepts cités ci-dessus.

La relation énoncée par RODIER et AUVRAY peut se décomposer en deux parties: la fonction de production $K.P_{10j}.Kr_{10}.S$ qui correspond au volume ruisselé, et le coefficient de passage a/Tb qui permet d'obtenir le débit de pointe à partir du volume ruisselé. La perméabilité (P) est le facteur explicatif dominant du coefficient de ruissellement Kr_{10} , tandis que le relief (R) joue surtout un rôle dans la fonction de transfert par l'intermédiaire du temps de base.

La variable P intègre l'absorption d'eau par le sol et la végétation. Elle est divisée en 5 classes, P1 représentant un bassin rigoureusement imperméable, et P5 un bassin très perméable avec un couvert végétal important.

Le paramètre R est divisé en 6 classes, en fonction des pentes longitudinale et transversale.

Enfin, l'étude de RODIER et AUVRAY donne une estimation de K et de a en fonction de S.

Le coefficient d'abattement K est un des paramètres clés de ce modèle; il fixe en particulier la limite de validité de la méthode à la superficie de $200 km^2$. On a pu constater en effet qu'au-delà de cette surface, il est difficile de mettre en évidence une relation générale entre l'averse ponctuelle décennale et la lame précipitée sur le bassin de même fréquence.

En 1974, G. VULLAUME a élaboré une formule d'estimation de l'abattement plus précise que ce qui avait été proposé jusque là:

$$K = 1 - (9 \text{ Log } r - 42.10^3.P + 152).10^{-3} \text{ Log } S$$

avec:

r: la récurrence de la pluie journalière,

P: la pluviométrie moyenne annuelle,

S: la superficie du bassin,

Log: le logarithme décimal.

Les précipitations journalières de fréquence donnée s'obtiennent en ajustant à une série de valeurs journalières la loi de Pearson III tronquée (BRUNET-MORET, 1968).

Lorsqu'on emploie la méthode de RODIER, on peut soit utiliser les données de la station pluviométrique la plus proche du bassin étudié, soit, à défaut, se reporter aux cartes d'averses exceptionnelles établies par BRUNET-MORET pour l'Afrique occidentale ou à celles du CIEH.

En toute rigueur, le débit Q_{10} doit être majoré de la valeur du débit de base pour obtenir le débit maximum écoulé. Le débit de base constitué des écoulements hypodermiques et souterrains peut généralement être estimé par

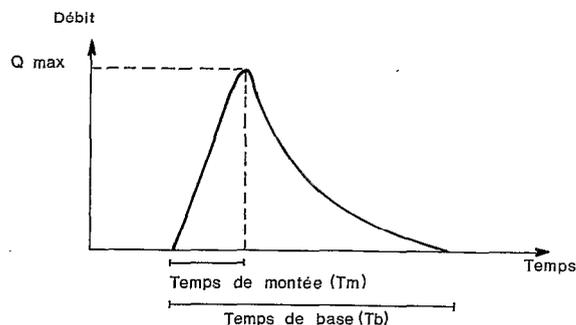


FIG. 1. — Caractéristiques de l'hydrogramme.

l'observation du débit d'étiage. D'après P. DUBREUIL (1986), les débits d'étiage pour les bassins de moins de 200 km² sont presque toujours nuls sur l'ensemble de la zone sahélienne.

Le modèle de RODIER et RIBSTEIN repose sur la même méthodologie que le modèle de 1965, mais est limité aux bassins de moins de 10 km². Les abaques ont été réactualisés pour cette catégorie de bassins, en substituant aux classes de relief R les indices de pente Ig, corrigés de la pente transversale, qui leur correspondent. L'indice de pente corrigé s'obtient par la relation suivante: $I = I_g/2 + IT/2$, avec Ig l'indice global de pente et IT la pente transversale moyenne. La corrélation entre les indices I et R est la suivante:

$$I = 60 \text{ (R6)}$$

$$I = 25 \text{ (R5)}$$

$$I = 15 \text{ (R4)}$$

$$I = 10 \text{ (R3-R4)}$$

$$I = 7 \text{ (R3)}$$

$$I = 3 \text{ (R2)}$$

Cette méthode comporte en outre une «check list» préliminaire permettant à l'utilisateur de prendre en compte les particularités des bassins: présence d'un goulot d'étranglement, réseau hydrographique dégradé ou en éventail, zone très perméable en tête de bassin, etc.

La méthode de PUECH et CHABI-GONNI repose sur l'étude statistique de 160 bassins dont la superficie varie entre 0,07 et 2 500 km², pour des pluies annuelles comprises entre 100 et 2 500 mm.

La relation énoncée ci-dessous est la meilleure, au sens de la régression multiple, ne comportant pas le coefficient de ruissellement Kr₁₀, toujours très délicat à estimer pour des bassins non jaugés:

$$Q_{10} = 131.S^{0.68}.I_g^{0.56}.Pan^{-0.68}$$

avec:

Q₁₀: le débit de pointe décennal,

S: la superficie du bassin,

I_g: l'indice global de pente,

Pan: la pluviométrie moyenne annuelle.

$I_g = dH/L$, dH étant la différence d'altitude entre l'amont et l'aval du bassin, et L la longueur du rectangle équivalent ayant la même superficie et le même périmètre que le bassin.

On remarque dans la relation obtenue par régression multiple que Q₁₀ est inversement proportionnel à la pluie annuelle. Ceci s'explique par le fait que plus les précipitations sont faibles, plus la végétation est clairsemée et les sols imperméables, autant de facteurs qui augmentent le ruissellement alors que les maxima journaliers varient peu avec la latitude.

PUECH et CHABI-GONNI fournissent également dans leur étude une relation faisant intervenir le coefficient de ruissellement Kr₁₀. Cette modification, si elle semble apporter une amélioration sur le coefficient de corrélation de la régression, enlève une grande part de l'intérêt principal de la méthode, à savoir sa simplicité.

Sur l'échantillon de bassins versants utilisés, les auteurs montrent que cette méthodologie est satisfaisante pour des conditions de perméabilité et de relief moyennes. Des conditions extrêmes peuvent entraîner de fortes erreurs.

APPLICATION A L'ÉTUDE DU HAUT BASSIN DU SÉNÉGAL

La carte de situation de la figure 2 donne l'emplacement des sites d'aménagement projetés dans le cadre du plan directeur.

CONDITIONS GÉNÉRALES DE DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE

Le nombre relativement élevé de points à étudier et le délai assez court imparti à l'étude ont rendu impossible une reconnaissance préliminaire des bassins sur le terrain. La détermination des caractéristiques morphologiques des bassins et des conditions d'écoulement a donc été réalisée uniquement à partir des documents cartographiques, des informations bibliographiques, des photographies aériennes de la mission OMVS (1980-81) et de la banque de données pluviométriques disponibles sur la région.

La couverture cartographique des zones à étudier comportait les cartes IGN au 1/200 000, complétées par des cartes au 1/20 000 réalisées par le bureau d'études Dames and Moore pour les besoins du plan directeur. Ces derniers documents ne couvraient que partiellement les bassins versants. L'ensemble de ces cartes a permis de délimiter les

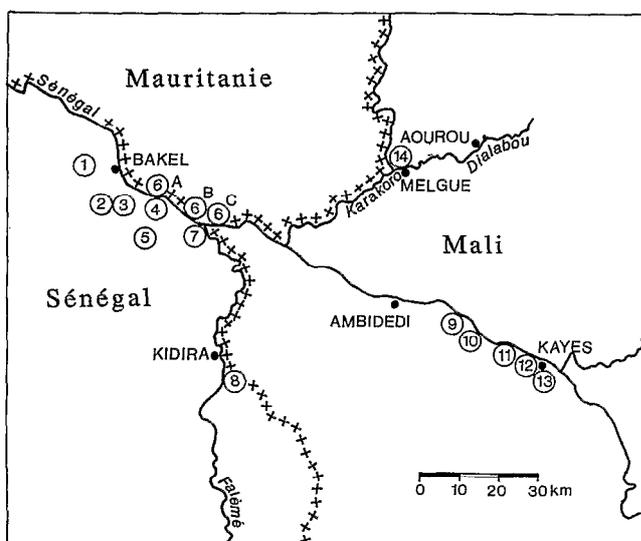


FIG. 2. — Carte de situation des aménagements projetés.

bassins versants, d'analyser le relief, et d'estimer les paramètres morphologiques des bassins: superficie, longueur du rectangle équivalent, indices de pente et de compacité.

L'analyse des facteurs explicatifs de l'écoulement a résulté d'une synthèse des études et cartes concernant la géologie, les sols et la couverture végétale et de l'observation des photos aériennes. L'information très fractionnée existant à ce sujet a constitué, surtout en l'absence de missions de terrain, une des contraintes majeures de l'étude.

En ce qui concerne la pluviométrie, l'Orstom dispose pour le traitement des précipitations journalières de la banque de données gérées par le logiciel Pluviom et d'un programme permettant d'ajuster automatiquement la loi de Pearson III tronquée et Gausso-logarithmique. Par commodité, une période de référence unique (1951-1980) a été choisie pour déterminer les valeurs de pluie journalière, pour les récurrences décennale à centennale, sur quatre stations pluviométriques situées sur les zones d'aménagement, et installées avant 1951. Cette période de référence comporte une douzaine d'années de sécheresse et sept années très excédentaires (1955 à 1961).

La probabilité d'occurrence d'une averse forte est la même dans une période de sécheresse que dans une période d'abondance, alors que les facteurs écologiques du ruissellement (végétation, organisations superficielles des sols) sont plus favorables dans la période sèche pour les bassins du Sahel (ALBERGEL, 1987).

Dans la phase de calcul des crues décennales, nous avons choisi d'appliquer les deux modèles, déterministe et statistique, afin d'effectuer des comparaisons.

ANALYSE DES BASSINS VERSANTS

Pluviométrie

Le tableau I récapitule les paramètres pluviométriques nécessaires à l'estimation des crues décennales sur les différents bassins étudiés.

La valeur de la pluie journalière décennale à Bakel est la plus forte alors que c'est la station où la pluie moyenne annuelle est la plus faible. Ce phénomène peut s'expliquer par l'apparition d'un relief ondulé à l'est d'une grande plaine (zone de contact entre le sédimentaire et le socle).

Le tableau II donne les valeurs de précipitations journalières (en mm), en fonction du temps de retour sur les quatre stations considérées.

Caractéristiques des bassins

Les principaux paramètres morphologiques des bassins sont présentés dans le tableau III.

Ic est l'indice de compacité égal à $0,28 P/S^{0,5}$, P étant le périmètre du bassin et S sa surface. Plus Ic est élevé, plus le bassin est allongé, avec un réseau hydrographique comportant un cours d'eau principal et des affluents d'égale importance.

TABLEAU I
Paramètres pluviométriques Pan (pluie annuelle moyenne) et P 10j (pluie journalière décennale)

| Bassin (n° ident.) | Station de référence | Pan (mm) | P10j (mm) |
|--------------------|----------------------|----------|-----------|
| Tourimé (1) | Bakel | 499 | 100 |
| Béma (2) | Bakel | 499 | 100 |
| Gounia (3) | Bakel | 499 | 100 |
| Golmi (4) | Bakel | 499 | 100 |
| Gabou (5) | Bakel | 499 | 100 |
| Moulessimou (6A) | Bakel | 499 | 100 |
| Golmikaré (6B) | Bakel | 499 | 100 |
| Diogountourou (6C) | Bakel | 499 | 100 |
| Aroundou (7) | Bakel | 499 | 100 |
| Nahé (8) | Kidira | 662 | 90 |
| Tanboukane (9) | Kayes | 695 | 92 |
| Diakandape (10) | Kayes | 695 | 92 |
| Dar Salam (11) | Kayes | 695 | 92 |
| Diyalla (12) | Kayes | 695 | 92 |
| Papara (13) | Kayes | 695 | 92 |
| Melgue (14) | Aourou | 573 | 87 |

Pan : pluie annuelle moyenne
P10j : pluie journalière décennale

TABLEAU II
Précipitations journalières pour diverses périodes de retour

| Station | Temps de retour moyen | | | |
|---------|-----------------------|--------|--------|---------|
| | 10 ans | 20 ans | 50 ans | 100 ans |
| Bakel | 99,6 | 113,2 | 131,4 | 145,2 |
| Kidira | 90,1 | 101,7 | 116,9 | 128,5 |
| Kayes | 91,5 | 102 | 115,9 | 126,4 |
| Aourou | 86,9 | 97 | 110,4 | 120,4 |

TABLEAU III
Paramètres morphologiques

| Bassin | S en km ² | lc | lg en m/km | Classe de relief |
|---------------|----------------------|------|------------|------------------|
| Tourimé | 46 | 1,11 | 7,1 | R3 |
| Béma | 67 | 1,37 | 4,4 | R3 |
| Gounia | 39 | 1,21 | 6,7 | R3 |
| Golmi | 220 | 1,36 | 2,9 | R3 |
| Gabou | 128 | 1,24 | 4,2 | R3 |
| Moulessimou | 7,4 | 1,13 | 3 | R2 |
| Golmikaré | 98 | 1,24 | 2,2 | R2 |
| Diogountourou | 8,5 | 1,34 | 3,6 | R2 |
| Aroundou | 9 | 1,4 | 10 | R3 |
| Nahé | 4 | 1,12 | 2,5 | R2 |
| Tanboukane | 235 | 1,39 | 6,8 | R3 |
| Diakandape | 130 | 1,23 | 9,2 | R3 |
| Dar Salam | 82 | 1,11 | 2,2 | R2 |
| Diyalla | 66 | 1,31 | 14,6 | R4 |
| Papara | 21 | 1,22 | 27,9 | R4 |
| Melgue | 930 | - | 4 | - |

Ig est l'indice global de pente égal à dH/L , dH étant la pente longitudinale du bassin et L la longueur du rectangle équivalent. Rappelons que ce paramètre intervient dans la méthode de prédétermination du PUECH et CHABI-GONNI. Les cartes topographiques au 1/20 000 ne couvrant pas la totalité des bassins versants, son estimation est entachée d'une incertitude parfois importante, due à la précision insuffisante des cartes au 1/200 000.

Dans le tableau IV sont mentionnés pour chaque bassin les types de substratum géologique et les types de sols, d'après ROCHETTE (1974) et GAC *et al.* (1990). Ces informations permettent d'affecter aux différents bassins l'indice de perméabilité (selon la nomenclature de RODIER-AUVRAY) qui définit le mieux leur aptitude au ruissellement.

Précisons en outre que le couvert végétal naturel (steppe arbustive), allié au faible développement de l'activité agricole en dehors du lit majeur du Sénégal, semblent favoriser le ruissellement au détriment de l'infiltration. Les photographies aériennes montrent peu de végétation dense sur toute la zone étudiée.

Les sols ferrugineux sur matériaux gréseux dans la région de Kayes (bassins 9 et 13) forment fréquemment une carapace latéritique plus ou moins désagrégée.

TABLEAU IV
Types de substratums et types de sols

| Bassins | Géologie | Sols | Perméabilité |
|-------------------|--|---------------------------------------|--------------|
| 1,2,3 6A,6B,6C | schistes et quartzites | peu évolués | P2 |
| 4,5 | 90 % schistes et quartzites 10 % granite | peu évolués | P2 |
| 7 | Cambrien sédimentaire | sols bruns et vertisols | P2 |
| 8 | Alluvions | sols hydromorphes | P2 |
| 9,10,11 | 40 % grés 60 % argiles | sols ferrugineux vertisols | P2 |
| 12 | 70 % grés 30 % argiles | sols ferrugineux sols hydromorphes | P3 |
| 13 | 80 % grés 20 % argiles | sols ferrugineux sols hydromorphes | P3 |
| 14 | 90 % granite 10 % volcano- sédimentaire | sols d'érosion | P3-P4 |

P2 : bassin globalement imperméable

P3 : bassin assez imperméable avec des zones perméables

P4 : bassin globalement perméable

RÉSULTATS ET CORRECTIONS

Le tableau V récapitule les principales caractéristiques des bassins versants étudiés et donne les paramètres de la crue décennale sur chacun de ces bassins.

Ces résultats étant acquis, certains bassins présentent des particularités dont il convient de tenir compte pour réviser les valeurs de débit de pointe obtenues.

Le bassin de Golmi (n° 4) présente dans sa partie aval un réseau hydrographique très dégradé et des zones marécageuses. On peut minorer le débit maximum décennal d'au moins 30%. La même correction peut s'appliquer aux petits bassins de Moulessimou (6A), Diougountourou (6C), Aroundou (7) et Nahé (8), dont la partie aval est occupée par des mares.

Le cas du bassin de Dar Salam (n° 11) est assez délicat. En effet, il présente dans sa partie amont une zone de faible étendue à forte pente. Dans notre étude pour le plan directeur, nous avons choisi d'en tenir compte, et rangé ce bassin dans la catégorie R3 avec un I_g de 18,3 m/km. Il semble *a posteriori* plus justifié de faire abstraction de cette portion du bassin, auquel cas on opte pour la classe de relief R2, l'indice global de pente étant alors égal à 2,2 m/km. Cette correction entraîne une réduction du débit de pointe décennal supérieure à 50%.

Cet exemple permet de se rendre compte du risque d'erreur que comporte ce type d'estimations, celles-ci étant encore plus aléatoires quand aucune observation de terrain n'a été effectuée.

TABLEAU V
Caractéristiques des bassins étudiés

| BV n° | Surface km² | PJ (10) mm | K | PB (10) mm | Kr10 % | Tb h | Tm mm | a | Qm10 (R.A.) m³/s | Qm10(CIEH) m³/s |
|-------|-------------|------------|------|------------|--------|------|-------|-----|------------------|-----------------|
| 1 | 46 | 100 | 0,95 | 95 | 47 | 19 | 260 | 2,9 | 87 | 78 |
| 2 | 67 | 100 | 0,9 | 90 | 45 | 23 | 330 | 3 | 98 | 77 |
| 3 | 39 | 100 | 0,95 | 95 | 49 | 17,5 | 250 | 2,8 | 81 | 67 |
| 4 | 220 | 100 | 0,8 | 80 | 35 | 35 | 540 | 3 | 147 | 136 |
| 5 | 128 | 100 | 0,85 | 85 | 40 | 30 | 440 | 3 | 121 | 116 |
| 6A | 7,4 | 100 | 1 | 100 | 57 | 13 | 170 | 2,6 | 23 | 14 |
| 6B | 98 | 100 | 0,9 | 90 | 31 | 40 | 900 | 3 | 57 | 67 |
| 6C | 8,5 | 100 | 1 | 100 | 56 | 15 | 200 | 2,6 | 23 | 17 |
| 7 | 9 | 100 | 1 | 100 | 65 | 8 | 110 | 2,6 | 53 | 31 |
| 8 | 4 | 90 | 1 | 90 | 59 | 9 | 120 | 2,6 | 17 | 7 |
| 9 | 235 | 92 | 0,8 | 74 | 35 | 35 | 540 | 3 | 145 | 183 |
| 10 | 130 | 92 | 0,85 | 78 | 40 | 30 | 440 | 3 | 113 | 145 |
| 11 | 82 | 92 | 0,9 | 83 | 40 | 25 | 360 | 3 | 91 | 156 |
| 12 | 66 | 92 | 0,9 | 83 | 30 | 10 | 135 | 3 | 137 | 119 |
| 13 | 21 | 92 | 1 | 92 | 35 | 7 | 90 | 2,5 | 67 | 78 |
| 14 | 930 | 87 | - | - | - | - | - | - | - | 396 |

PJ (10) : pluie journalière ponctuelle de fréquence décennale
 K : coefficient d'abattement
 PB (10) : lame précipitée sur le bassin de fréquence décennale
 Kr10 : coefficient de ruissellement décennal

Tb : temps de base
 Tm : temps de montée
 a : rapport du débit maximum sur le débit moyen
 Qm10 : débit maximum de la crue d'étude décennale

Toutes ces observations étant faites, nous proposons dans le tableau VI les valeurs approchées les plus probables du débit de pointe décennal, ainsi que les débits spécifiques correspondants, et la lame ruisselée sur les bassins ($L_r = K \cdot P_{10} \cdot Kr_{10}$).

La figure 3 offre une comparaison entre les débits maxima résultant de la méthode Orstom et de la méthode CIEH. On constate que les écarts ne sont pas excessifs.

Le graphique de la figure 4 met en évidence la décroissance du débit spécifique de la crue décennale en fonction de la surface des bassins. A noter que cette décroissance serait parfaitement linéaire (en coordonnées bilogarithmiques) si la surface était le seul facteur explicatif de l'écoulement. On aurait alors une relation de la forme: $Q_{max} = a \cdot S^b$, avec $b < 1$.

A l'échelle régionale, pour des bassins dont les caractéristiques physiographiques sont voisines, on peut parfois obtenir une relation de ce type. C'est le cas, par exemple, pour les bassins du Sud du Mali (LAMAGAT, 1980) ou pour les bassins de Basse-Casamance au Sénégal (ALBERGEL, 1989).

TABLEAU VI
Débit de pointe décennal absolu et spécifique et lame ruisselée

| Bassin | Q ₁₀ m³/s | Q ₁₀ /S l/s.km | L _{r10} mm |
|---------------|----------------------|---------------------------|---------------------|
| Tourimé | 70 | 1 522 | 36,1 |
| Béma | 80 | 1 194 | 33,5 |
| Gounia | 65 | 1 667 | 38,1 |
| Golmi | 85 | 386 | 23,5 |
| Gabou | 100 | 781 | 28,2 |
| Moulessimou | 10 | 1 351 | 38,6 |
| Golmikaré | 50 | 510 | 22,4 |
| Diogountourou | 12 | 1 412 | 37,4 |
| Aroundou | 30 | 3 333 | 41,6 |
| Nahé | 7 | 1 750 | 39,7 |
| Tanboukane | 130 | 553 | 22,1 |
| Diakandape | 100 | 769 | 26,5 |
| Dar Salam | 45 | 549 | 22,7 |
| Diyalla | 115 | 1 742 | 21 |
| Papara | 60 | 2 857 | 26,6 |

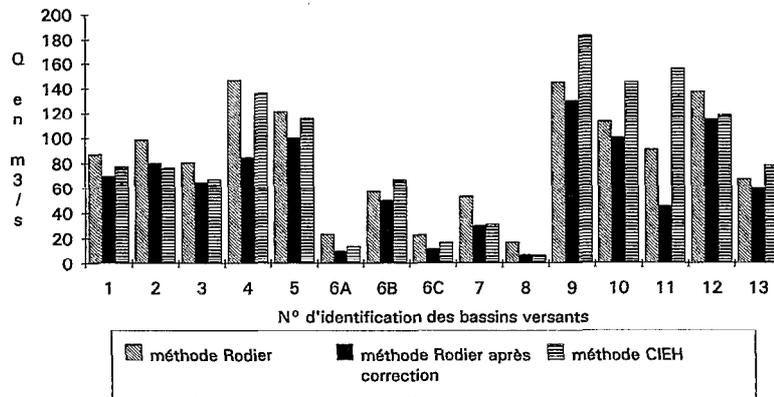


FIG. 3. — Débit de pointe de la crue décennale.

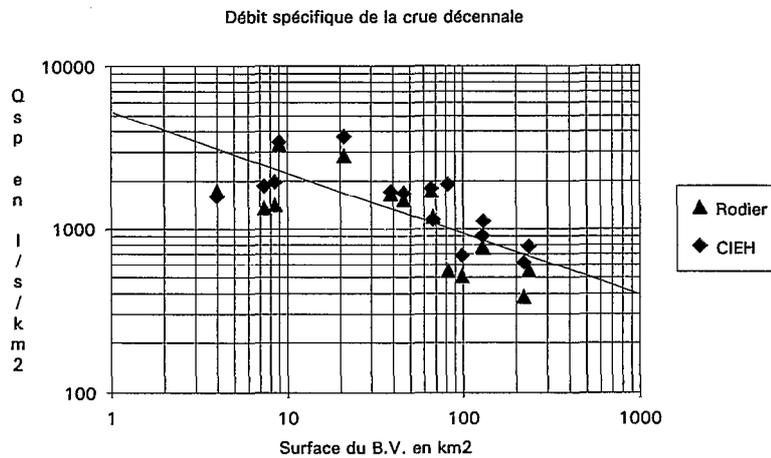


FIG. 4. — Relation débit spécifique, surface.

Pour les bassins considérés dans cette étude, la tendance linéaire du graphique montre que la superficie est le facteur explicatif prépondérant du débit de pointe, mais les écarts sont trop importants pour qu'on puisse établir une telle relation.

En ce qui concerne la crue de projet, d'après les données pluviométriques du tableau II et en appliquant la méthode énoncée précédemment, une majoration des débits de pointe de 50 % garantit une sécurité centennale. Pour une sécurité vingtennale (20 ans), une majoration de 15 % est suffisante.

COMMENTAIRES ET PERSPECTIVES

Le choix de la méthode à employer pour une étude ponctuelle dépend à la fois des caractéristiques des bassins et des contraintes liées au déroulement de l'étude (financement et temps impartis à l'étude, importance des données).

Le modèle déterministe de RODIER (Orstom) donne des résultats semblant mieux approcher la réalité au sens de l'expert, que la méthode statistique de PUECH et CHABI-GONNI (CIEH). Par contre, il nécessite une connaissance détaillée des bassins et ne s'applique plus systématiquement lorsque la superficie dépasse 200 km².

La méthode du CIEH, basée sur des régressions multiples, est d'une utilisation aisée et ne nécessite aucune intervention sur le terrain. Elle repose sur la détermination de paramètres physiographiques, obtenus facilement à partir de cartes topographiques toujours disponibles. Malheureusement, on a constaté sur des bassins, ayant fait l'objet d'un suivi hydrologique, des écarts entre les débits de pointe réels et estimés pouvant dépasser 100 % (RIBSTEIN, 1990).

De plus, cette méthode ne permet pas de prendre en compte les particularités des bassins, même si celles-ci sont visibles sur les documents cartographiques dont on dispose.

Dans notre étude, il se trouve que la majeure partie des bassins correspondent aux conditions moyennes des bassins utilisés par les régressions de la méthode CIEH et les écarts entre les deux méthodes sont relativement faibles.

En définitive, on ne peut recommander cette méthode que dans les cas suivants : la superficie du bassin est largement supérieure à 200 km², auquel cas c'est la seule méthode utilisable actuellement, ou bien le délai de l'étude est très court et ne permet qu'une analyse sommaire sur carte des bassins.

Dans les autres cas, il est préférable d'appliquer le modèle de RODIER-AUVRAY pour les superficies comprises entre 10 et 200 km² (voire jusqu'à 400 km² pour des conditions de pluviométrie et de ruissellement très homogènes), et le modèle de RODIER-RIBSTEIN pour les bassins de moins de 10 km².

La principale difficulté d'application des modèles élaborés par l'Orstom réside dans le choix de l'indice de perméabilité du bassin considéré. Les cartes géologiques et pédologiques se révèlent souvent insuffisantes, en l'absence de reconnaissance sur le terrain. De nouvelles méthodes sont susceptibles de résoudre en partie ces difficultés. Nous pensons notamment à la cartographie des états de surface à partir des images satellitaires. CASENAVE et VALENTIN (1989) ont proposé des fonctions de production de la lame ruisselée pour les divers types d'états de surface rencontrés au Sahel. La confirmation de l'intérêt d'une telle approche (états de surface et télédétection) a été obtenue en effectuant des estimations de crues sur des bassins observés et en comparant ensuite les résultats obtenus aux débits effectivement observés (CHEVALLIER *et al.*, 1985; ALBERGEL *et al.*, 1987).

CONCLUSION

L'étude que nous venons de présenter n'a d'autres prétentions que de faire le point sur l'état actuel des connaissances en matière de prédétermination de crue au Sahel, et de donner un exemple concret d'application. La validation de ces méthodes de prédétermination et leur comparaison nécessite leur application sur les bassins versants observés, comme l'a fait RIBSTEIN (1990).

Il nous a paru cependant intéressant de présenter un travail tel qu'il est demandé la plupart du temps aux hydrologues travaillant au Sahel, et de montrer que les connaissances sur les mécanismes qui gouvernent l'écoulement sur les petits bassins versants peuvent être appliquées au problème d'aménagement et de développement.

En l'absence de modèle sûr pour l'estimation des débits exceptionnels, la connaissance du terrain et l'expérience des hydrologues demeurent des facteurs déterminants de la fiabilité des résultats. Une intervention, même limitée, sur les sites d'aménagement peut s'avérer d'une grande utilité en apportant le complément d'information nécessaire à une meilleure estimation des fonctions de production (lame ruisselée) et de transfert (débit de pointe), que la seule analyse sur cartes ou photos aériennes ne peut fournir. C'est ainsi, par exemple, que l'observation des hauteurs d'eau à l'exutoire d'un bassin pendant une seule saison des pluies permet de connaître le temps de montée et le temps de base d'une crue provoquée par une averse unitaire (ROCHE et OLIVRY, 1981).

L'évaluation de la lame ruisselée demeure le point crucial et imparfaitement résolu de la prédétermination des crues dans la zone intertropicale. Sans faire preuve d'un optimisme exagéré, on peut cependant penser que la voie actuellement explorée, consistant dans l'analyse des états de surface avec l'appui de la télédétection, apportera à terme une solution satisfaisante à ce problème délicat.

Les estimations de crues présentées ici et celles de la ressource en eau ont permis au plan directeur de mieux cibler ses choix d'aménagement. Cinq autres sites ont été étudiés en fonction de ces premiers résultats. Ces estimations pourront être affinées au niveau des avant-projets de chaque aménagement.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), 1987. — Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso. Du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Th. d'université Paris 6. Coll. *Etudes et thèses*, Orstom, 340 p.
- ALBERGEL (J.), 1989. — Une méthode expert pour la conception des barrages anti-sel dans les bas-fonds de Basse et Moyenne Casamance. Orstom, Dakar, 13 p.
- ALBERGEL (J.) *et al.*, 1987. — D'Oursi à Gagara: transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina-Faso). *Hydrologie continentale*, vol. 2, n° 2, Orstom, p. 77-86.
- ALBERGEL (J.), LAMAGAT (J.P.), 1991. — Fleuve Sénégal, plan directeur de la haute vallée. rap. de synthèse. Orstom, Dakar, 124 p.

- BRUNET-MORET (Y.), 1968. — Étude des averses exceptionnelles en Afrique occidentale, Orstom, Paris.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1989. — Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. Orstom, Paris, 229 p.
- CHEVALLIER (P.) *et al.*, 1985. — Pluies et crues au Sahel, hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina-Faso). *Trav. et doc.* n° 190, Orstom, Paris, 251 p.
- DUBREUIL (P.), 1986. — L'évaluation et l'utilisation des ressources en eau des régions semi-arides et intertropicales. Acte séminaire mondiale, 15 et 16 mai 1986, Orstom, Paris, p. 93-140.
- GAC (J.Y.) *et al.*, 1990. — Le haut bassin versant du fleuve Sénégal. Orstom, Dakar, 108 p.
- LAMAGAT (J.P.), 1980. — Région Sud du Mali, bilan des observations hydrologiques. Orstom, Bamako, 13 p.
- LAMAGAT (J.P.), ALBERGEL (J.), 1989. — Fleuve Sénégal, plan directeur de la haute vallée, rapport n° 1, hydrologie, Orstom, Dakar, 75 p.
- LAMAGAT (J.P.), ALBERGEL (J.), 1990. — Fleuve Sénégal, plan directeur de la haute vallée, rapport n° 2, hydrologie et climatologie, Orstom, Dakar, 28 p.
- LAMAGAT (J.P.), MARIEU (B.), ALBERGEL (J.), 1990. — Fleuve Sénégal, plan directeur de la haute vallée, rapport n° 3, expertise hydrologique sur les sites d'aménagement projetés. Orstom, Dakar, 25 p.
- PUECH (C.), CHABI-GONNI (D.), 1984. — Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et centrale. CIEH, Ouagadougou, 91 p.
- RIBSTEIN (P.), 1990. — Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Th. d'université Montpellier. Coll. *Etudes et thèses*, Orstom, 317 p.
- ROCHE (M.), OLIVRY (J.C.), 1981. — Gisement de fer de la Falémé, construction de barrages sur les rivières Daléma et Koila-Kobé, campagne d'observations hydrologiques 1980 et calcul des crues de projet. Orstom, Dakar, 40 p.
- ROCHETTE (C.), 1974. — Le bassin du fleuve Sénégal. *Monographies hydrologiques* n° 1, Orstom, Paris, 343 p. et annexes.
- RODIER (J.A.), AUVRAY (C.), 1965. — Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale. Orstom, 30 p.
- RODIER (J.A.), RIBSTEIN (P.), 1988. — Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant de 1 à 10 km². Orstom, Montpellier, 133 p.
- VUILLAUME (G.), 1974. — L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale, variabilité et précision du calcul. *Cah. Orstom, série hydrologie*, vol. XI, n° 3: 205-225.