

Caractéristiques statistiques de la crue régionale en Afrique de l'Ouest

Frank A.K. FARQUHARSON (1), John V. SUTCLIFFE (2), Jeremy R. MEIGH (1)

RÉSUMÉ

Les estimations de débit de crue pour diverses périodes de retour peuvent être nécessaires à des sites à aménager où les hydrologues et les ingénieurs ne disposent pas de mesures de débit. Dans ce cas une analyse régionale peut s'avérer particulièrement utile.

L'étude décrite dans cet article, s'appuie sur des chroniques de crues maximales provenant de 224 stations de jaugeages réparties sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Un total de 4 200 stations-années a été employé pour déduire les relations régionales entre la crue annuelle, la superficie du bassin et les précipitations annuelles moyennes. Ces données permettent d'évaluer les courbes de fréquence de la crue régionale sans dimension.

MOTS CLÉS : Crues des divers risques de dépassement — Analyse régionale — Crue annuelle moyenne — Superficie du bassin — Précipitation annuelle moyenne — Valeur extrême généralisée — Courbe de fréquence des crues.

ABSTRACT

REGIONAL FLOOD STATISTICS IN WEST AFRICA

Flood estimates for various return periods are needed for engineering purposes at sites where long series of flood measurements may not be available for direct statistical analysis. In these circumstances regional analyses provide an alternative to study of storm statistics and basin response to rainfall, or of analyses of maximum recorded floods.

The analyses described in this paper used annual maximum recorded flood series measured at a large number of gauging stations (224 stations and 4 200 station years) throughout West Africa to derive relationships between mean annual flood and readily available basin characteristics : basin area and mean annual rainfall. Complementary relationships between mean annual flood and the flood of different return periods were derived from the same data. These stations were grouped according to countries or regions as well as ranges of basin area and mean annual rainfall.

KEY WORDS : Floods of different return periods — Regional estimates — Mean annual flood — Basin area — Mean annual rainfall — General extreme value — Flood frequency curve.

1. INTRODUCTION

Une large gamme de problèmes techniques rend nécessaire l'estimation du débit de crue pour diverses fréquences. Aux sites où les relevés de débits remontent loin dans le temps, les estimations peuvent être obtenues directement en effectuant une analyse statistique de la série des débits ; lorsque les données de débits disponibles concernent une période plus courte que celle des relevés de précipitations, les estimations de crues peuvent être établies grâce à une analyse statistique des données de précipitations combinée à l'établissement d'un modèle précipitation-ruisellement approprié.

Si sur le site étudié ou à proximité, aucune mesure de précipitation ou de débit n'a été faite, une estimation fiable des crues s'avère malaisée et l'emploi d'études régionales représente une solution utile.

(1) Institute of Hydrology, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB Royaume Uni.

(2) Sir Alexander Gibb & Partners, Reading RG6 1BL Royaume Uni.

Dans cet esprit, le présent article fournit les résultats d'une analyse portant sur un ensemble de crues annuelles issues de 224 bassins hydrologiques répartis sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Un total de 4 200 stations-années en provenance de 12 pays a été analysé. La superficie des bassins est comprise entre 56 et 394 000 km² et les totaux pluviométriques annuels moyens varient de 738 à 3 600 mm.

Une analyse cohérente des données et une combinaison de celles qui proviennent de régimes présentant des similitudes hydrologiques devrait permettre une estimation des crues de diverses périodes de retour aux sites à aménager, que ceux-ci disposent ou non d'observations de débits. Un essai préliminaire des méthodes régionales est présenté ici avec les tests des différents groupements de stations, afin d'établir les groupements présentant les résultats les plus raisonnables. Mais les résultats sont perfectibles et les recherches doivent donc se poursuivre.

Une étude de ce genre donnerait certainement des résultats plus fiables si au lieu de se baser sur les crues annuelles on s'appuyait sur les crues décennales, car pour des régimes irréguliers (distribution à forte asymétrie), la notion de crue annuelle ne veut pas dire grand-chose. Mais l'emploi des seules valeurs décennales aboutirait à un nombre de stations-années beaucoup trop faible. Pour la plupart des régimes le choix de la CAM (confer plus loin) est donc justifié.

2. ÉTUDES DE LA CRUE RÉGIONALE

Les arguments scientifiques et pratiques en faveur d'une étude régionale du type décrit ici proviennent de ce que la crue annuelle moyenne (CAM) et la courbe sans dimension de fréquence des crues peuvent être établies séparément et mises en relation l'une comme l'autre avec les caractéristiques du bassin ou son emplacement. Autrement dit, l'importance et la forme de la courbe de fréquence des crues peuvent être étudiées indépendamment en utilisant tous les relevés de crue d'une région pour donner des résultats qui ne sont pas seulement intéressants d'un point de vue scientifique mais qui peuvent être utiles pour les études d'ingénierie.

Cette étude vise à compléter et non à remplacer les méthodes d'estimation basées sur les fréquences des précipitations, les relations précipitations-ruissellement et l'hydrogramme unitaire, celles fondées sur les études statistiques des précipitations (cf. BRUNET-MORET, 1986), ou les études de bassins représentatifs et de la réponse précipitations-ruissellement (cf. RODIER, 1989). Elle sert également de complément aux études de la crue maximale observée (cf. RODIER et ROCHE, 1984). Elle permet aussi d'utiliser les informations régionales pour mettre la crue d'une période de retour donnée, T , appelée $Q(T)$, en rapport avec la CAM lorsque celle-ci peut être estimée soit directement à partir des relevés soit par interpolation.

L'estimation de la CAM en tant que moyenne arithmétique de la série des crues annuelles maximales forme la base d'une étude régionale de la crue moyenne annuelle, pour tous les sites disposant de relevés. Ces valeurs de la CAM sont ensuite comparées par une analyse de régression statistique aux caractéristiques physiographiques et climatiques des bassins.

Cette analyse devrait utiliser toutes les caractéristiques du bassin qui semblent jouer un rôle dans la production de la crue, mais la nécessité pratique de mesurer les caractéristiques de manière cohérente sur les cartes en limitera probablement le nombre. Une étude comparable entreprise dans les îles britanniques (Nerc, 1975) a permis d'employer un grand nombre de caractéristiques de bassins. Les éléments suivants se sont avérés utiles dans l'analyse : la superficie du bassin, les précipitations annuelles moyennes, un indice journalier des précipitations nettes, la longueur et la pente du cours d'eau principal, la fréquence des cours d'eau (confluence des cours d'eau/superficie), un indice des types de sol, un indice lacustre et un indice urbain. Ces caractéristiques ont été mesurées sur des cartes topographiques détaillées à une échelle au 1/25 000^e ou sur des cartes spéciales ayant trait aux sols ou aux précipitations. Des cartes de ce type n'étant pas très répandues en Afrique de l'Ouest, nombre de ces caractéristiques de bassin ne peuvent pas être incluses dans une étude sur l'ensemble de la région. À ce stade, l'analyse se limite à peu de choses : à la superficie des bassins et aux précipitations annuelles moyennes, mais des études détaillées sur une partie de la région pourraient inclure d'autres caractéristiques.

On pourrait objecter que le meilleur moyen d'estimer la crue annuelle moyenne à un site donné sur les principaux fleuves de l'Afrique de l'Ouest consiste à établir des interpolations entre les stations de jaugeages adjacentes. Les rapports avec les caractéristiques du bassin seront vraisemblablement plus utiles en ce qui concerne les cours d'eau de moindre importance, et leur forme pourra nous aider à mieux comprendre les facteurs de production de la crue.

La courbe de fréquence de la crue régionale est obtenue à partir d'une combinaison des courbes de fréquence de crue sans dimension calculées à chaque station de la région.

Cette approche se base sur le principe que l'incertitude des courbes de fréquence basées sur les relevés à une seule station est due en grande partie à l'échantillon limité fourni par des périodes d'enregistrement de durée moyenne, ce qui peut être compensé en grande partie en combinant un groupe de relevés dans une région donnée.

La courbe de fréquence à une station prise individuellement est rendue sans dimension en divisant chacune des séries de crues annuelles maximales par la CAM au site. Une courbe régionale est alors obtenue en combinant les séries sans dimension à toutes les stations d'une région. On pense que cette courbe régionale donne, à part quelques exceptions, une estimation plus précise de la courbe de fréquence à long terme pour tout site donné de la région.

Cette combinaison des relevés dans l'estimation tant de la CAM que du rapport $Q(T)/CAM$ sous-entend que la région est raisonnablement homogène. Cette région peut être définie en termes géographiques, ou peut être basée sur des gammes de tailles de bassins versants ou de valeurs de précipitations annuelles moyennes. Toutes ces approches ont été essayées ; les stations ont été analysées sur des gammes de longitudes, de dimensions de bassins versants et de valeurs de précipitations annuelles moyennes. Les résultats sont présentés en plus de l'analyse des stations des pays pris séparément et des grands bassins, où les données sont suffisantes ; ces groupements sont artificiels, mais les résultats présentent une base de comparaison.

3. TECHNIQUES D'ANALYSE : CRUE ANNUELLE MOYENNE

L'analyse de la crue à un site donné a été prise comme étant la crue annuelle moyenne, CAM, définie comme suit :

$$CAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

où Q_i représente la série des crues annuelles maximales avec des valeurs allant de 1 à n . En principe, la série peut se composer des débits de pointe instantanés enregistrés sur un limnigraphe, des valeurs de pointe des relevés de débits journaliers, ou du maximum de la série des débits journaliers moyens. Les séries utilisées dans la présente étude sont principalement obtenues à partir des Monographies hydrologiques Orstom et sont basées sur la lecture deux fois par jour de l'échelle limnimétrique (dans de nombreux cas la cote de la crue maximale a également été relevée), des limnigraphes étant installés sur les bassins de plus petite taille. Pour les plus grands bassins, il est peu probable que les débits journaliers moyens extrêmes soient très différents des débits de pointe instantanés, mais on peut constater des différences sur les bassins concernant moins de 5 000 ou 10 000 km².

Dans certaines études la crue annuelle médiane a été adoptée, parce qu'elle fournit une base d'estimation plus solide lorsque la série correspond à une distribution à forte asymétrie. Ceci n'a pas été jugé nécessaire ou approprié pour les régions où le rapport entre la crue maximale observée et la crue annuelle moyenne est généralement faible.

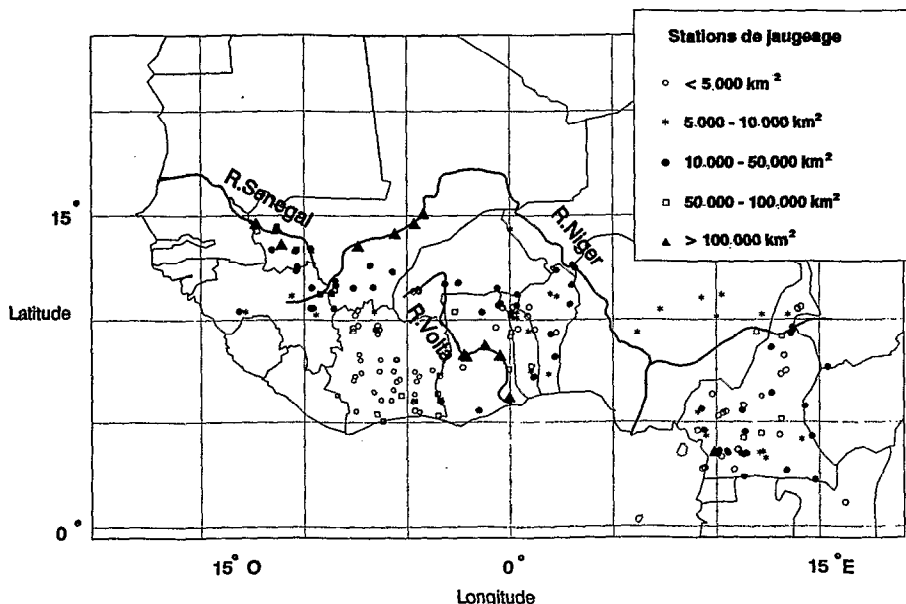


FIG. 1. — Carte des stations hydrométriques utilisées.
Map showing location of gauging stations used.

Les estimations de la crue annuelle moyenne (CAM) à chaque station sont assemblées comme l'illustre le tableau I de même que les caractéristiques du bassin, à savoir la superficie et les précipitations annuelles moyennes (PAM). Les rapports entre la CAM et les caractéristiques du bassin versant sont obtenus au moyen d'une étude de régression multiple.

TABLEAU I
Extrait des stations utilisées dans l'étude
Details of flow stations used in the analysis

Numéro et Nom de la station	CAM m ³ /s	S km ²	PAM mm	Qmax/CAM	Nb. années	Latitude	Longitude
SEN 901 Sénégal à Bakel	4 519	218 000	850	1,80	82	14°54 N	12°27 W
SEN 902 Falcme à Kidira	1 529	28 900	1 100	2,04	34	14°27 N	12°13 W
SEN 903 Falcme à Gourbassy	1 111	17 100	1 250	1,77	31	13°23 N	11°38 W
SEN 904 Sénégal à Kayes	3 618	157 400	920	1,89	82	14°27 N	11°26 W
SEN 905 Sénégal à Galougo	3 523	126 900	1 000	1,95	34	13°51 N	11°03 W
SEN 906 Bafing à Soukoutali	1 673	27 800	1 425	1,51	18	13°12 N	10°27 W
SEN 907 Bafing à Bafing-Makana	1 471	21 700	1 475	1,60	19	12°33 N	10°16 W
SEN 908 Bafing à Dakka-Saidou	1 461	15 700	1 550	2,36	32	12°15 N	10°20 W
SEN 909 Bakoye à Oulia	1 192	84 400	850	2,43	28	13°36 N	10°23 W
SEN 910 Bakoye à Toukoto	571	16 000	1 150	2,26	27	13°27 N	9°53 W
SEN 911 Baoule à Sirama-kana	348	58 000	750	2,49	16	13°34 N	9°53 W
SEN 912 Colombine à Kabate	58	25 000	500	1,47	11	14°31 N	11°13 W
SEN 915 Gorgol Blanc à Agueilat	51	8 370	200	1,67	7	16°26 N	12°46 W
TOG 101 Oti à Mango	895	35 650	1 000	1,96	28	10°18 N	0°28 E
TOG 102 Oti à Mandouri	570	29 100	980	1,50	20	10°15 N	0°51 E
TOG 103 Pendjari à Porga	422	22 280	970	1,50	21	11°03 N	0°58 E
TOG 104 Kara à Lama Kara	420	1 560	1 470	1,72	26	9°32 N	1°11 E
TOG 105 Kara à Kpesside	642	2 790	1 450	1,79	17	9°37 N	0°57 E
TOG 106 Keran à Naboulgou	589	5 470	1 300	1,44	18	10°09 N	0°49 E

Les résultats de cette analyse peuvent être jugés par le coefficient de corrélation multiple, le pourcentage de variance expliquée ainsi que par les valeurs et les écarts-types des coefficients. L'erreur type des équations de régression est également un outil d'estimation de la qualité des résultats.

4. COURBE DE FRÉQUENCE DE LA CRUE RÉGIONALE

Les séries de crues à chaque station de jaugeage ont été réduites à une forme sans dimension en divisant chacune d'entre elles par la CAM, et ont été ajustées sur une distribution de fréquence appropriée. La loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV) a été sélectionnée dans le Flood Studies Report au Royaume-Uni (Nerc, 1975) et, dans d'autres études (FARQUHARSON *et al.*, 1987), elle s'est avérée souple et généralement applicable. Elle contient trois paramètres, u , a et k , qui représentent respectivement l'interception, le gradient et la courbure.

Les séries de crues ont donc été ajustées sur la distribution de la GEV qui se présente sous la forme suivante :

$$F(q) = \exp - \left(1 - \frac{k(q-u)}{a} \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{si } k \neq 0.$$

Si $k = 0$, la distribution GEV est réduite à la distribution de Gumbel ou distribution EV1 :

$$F(q) = \exp \left(- \exp \left(- \frac{(q-u)}{a} \right) \right)$$

En introduisant la variable aléatoire réduite de Gumbel, y , nous obtenons :

$$q = u + a (1 - e^{-ky}) / k \quad \text{si } k \neq 0$$

ou

$$q = u + ay \quad \text{si } k = 0$$

Une courbe de fréquence régionale des crues a été obtenue en amalgamant toutes les courbes sans dimension à l'intérieur de régions homogènes sur le plan hydrologique par la méthode des moments de probabilité pondérés (MPP) proposée par HOSKING *et al.* (1984).

Des courbes de fréquence de crues groupées ont été établies par pays ou bassins et, par la suite, pour un nombre d'autres groupements décrits ultérieurement dans cet article. Ces courbes de fréquences régionales permettent d'estimer des crues de diverses périodes de retour une fois que l'on dispose des estimations de l'indice de la crue, la CAM, pour tout site pouvant susciter de l'intérêt. Les méthodes d'estimation de la CAM sont présentées plus loin.

5. SOURCE DES DONNÉES

La plupart des relevés de crues utilisés ont été tirés des Monographies hydrologiques Orstom des bassins du Sénégal, de la Volta et du Niger, auxquelles vient s'ajouter celle du Cameroun. Les débits journaliers jusqu'en 1965 sont donnés dans la Monographie du Sénégal (ROCHETTE, 1974), et les maxima annuels, peuvent en être déduits ; des débits supplémentaires et révisés ont été obtenus auprès de l'Orstom et des services hydrologiques nationaux au cours d'études récemment entreprises sur le Sénégal (SUTCLIFFE et LAZENBY, 1989). Des séries de débits maximaux annuels ont été déduits pour 11 stations, deux autres stations ayant été rejetées car trop arides.

Les débits maximaux annuels de 36 stations du bassin de la Volta sont récapitulés dans la Monographie de la Volta, aux pages 363-366 (MONIOD *et al.*, 1977). Bien que la Monographie du Niger (BRUNET-MORET *et al.*, 1986) privilégie les données mensuelles, les débits journaliers sont inclus en microfiches et les séries maximales annuelles des stations sont présentées sous forme de tableaux. Des données maximales annuelles à 55 stations figurent également dans la Monographie du Cameroun (OLIVRY, 1986).

Les deux catalogues sur les grandes crues publiés par l'Unesco (1976) et l'Aish (RODIER et ROCHE, 1984) sont également une source de données sur les crues. En outre, des enregistrements de crues ont été obtenus lors des études sur les ressources en eau au Nigéria (Bassin de Gongola), en Guinée ainsi qu'au Togo et au Bénin (SUTCLIFFE et PIPER, 1986), et en Côte-d'Ivoire.

Dans le cadre de ces dernières études, les données ont été vérifiées au moyen des courbes d'étalonnage. Des évaluations de nature semblable ayant été effectuées au cours de la préparation des monographies, les données publiées

ont été acceptées sans vérification supplémentaire. Par contre, certaines stations ont été omises parce que leurs relevés ne seraient pas représentatifs de la superficie du bassin ; par exemple, les stations du bras principal du Niger en aval du delta intérieur (cuvette lacustre). Les stations pour lesquelles on dispose de relevés sur une période de moins de cinq ans ont également été rejetées, en partant du principe que les relevés peuvent ne pas être représentatifs.

Même si l'on constate une certaine redondance des relevés entre les différentes sources, le nombre de stations utilisées et de stations-années correspondantes est important et les relevés couvrent une vaste région de l'Afrique de l'Ouest, allant du Sénégal au Cameroun.

6. ESTIMATION DE LA CAM

Les bassins utilisés dans l'analyse, ainsi que leurs superficie topographique (S) et précipitations annuelles moyennes (PAM) sont portés au tableau I (l'ensemble des résultats ne pouvant être publié ici, est à la disposition des lecteurs sur demande auprès des auteurs).

La crue annuelle moyenne des bassins jaugés a été mise en relation avec les caractéristiques du bassin versant au moyen de regression multiples de la forme suivante :

$$\log \text{CAM} = \log c + a \log S + b \log \text{PAM}$$

ou

$$\text{CAM} = c S^a \text{PAM}^b$$

Un certain nombre de modèles de prévision ont été essayés. Du fait que cette étude était le fruit de l'investigation de régions spécifiques, par exemple la Guinée, le Togo/Bénin et le bassin du Sénégal, le premier modèle devait

TABLEAU II
Équations de calcul de la CAM pour des pays ou bassins individualisés
MAF prediction equations for individual countries or regions

Groupe	Variab. Indep.	Coeff.	Ecart Type	Niveau signif.	Variance exp. (R ²)	Erreur Type (ET)	10ET	Log C	Const C
1	Guinée	(17 bassins)							
	(1) log S	0,772	0,118	***	0,739	0,232	1,706	-0,100	0,794
	(2) log S+ log PAM	0,935	0,051	***	0,961	0,093	1,238	-12,358	4,385E-13
		3,551	0,398	***					
2	Cote-d'Ivoire	(57 bassins)							
	(1) log S	0,747	0,043	***	0,846	0,266	1,843	-0,538	0,290
	(2) log S+ log PAM	0,801	0,031	***	0,925	0,187	1,539	-10,818	1,52E-11
		3,206	0,426	***					
3	Togo et Bénin	(21 bassins)							
	(1) log S	0,306	0,144	*	0,192	0,244	1,754	1,409	25,652
	(2) log S+ log PAM	0,856	0,130	***	0,715	0,149	1,409	-18,490	3,233E-19
		5,772	1,004	***					
4	Cameroun	(55 bassins)							
	(1) log S	0,776	0,058	***	0,772	0,304	2,014	-0,305	0,496
	(2) log S+ log PAM	0,778	0,058	***	0,775	0,305	2,018	-1,296	0,051
		0,306	0,354						
5	Bassin du Sénégal	(11 bassins)							
	(1) log S	0,464	0,211		0,350	0,285	1,926	1,016	10,375
	(2) log S+ log PAM	1,143	0,150	***	0,878	0,131	1,351	-12,878	1,324E-13
		3,543	0,599	***					
6	Bassin du Niger	(40 bassins)							
	(1) log S	0,783	0,058	***	0,829	0,250	1,780	-0,449	0,355
	(2) log S+ log PAM	0,887	0,038	***	0,937	0,154	1,425	-9,983	1,041E-10
		2,865	0,359	***					

() non significatif.
(*) significatif au niveau 95 %.
(**) significatif au niveau 98 %.
(***) significatif au niveau 99 %.

utiliser un groupement géographique des données, regroupant les stations dans les limites des pays ou de bassins pour tenter de fournir des équations de prévision de la CAM pour ces groupements. Il n'a pas été possible de procéder à un tel groupement pour tous les pays, le nombre de stations étant insuffisant dans certains cas. Toutefois, les résultats des régressions réalisées pour les pays ou les bassins possédant un nombre de stations adéquat sont reportés tableau II.

Dans la plupart des cas, les équations de régression ajustées semblent raisonnables, seul le bassin de la Volta ayant une équation qui explique moins de 60 % de la variance originale. Dans la plupart des autres cas, la variance expliquée est très élevée. Néanmoins, le groupement par pays est un peu artificiel et d'autres bases de groupement ont été mises à l'essai. Au cours des tests, une carte géographique de CAM/S a été préparée, qui montre que les valeurs sont assez uniformes par région, sauf les valeurs fortes correspondant aux zones à pente et précipitation élevées. Ensuite des relations graphiques des valeurs de CAM/S en fonction de la PAM ont été faites : les relations paraissent non-linéaires, mais la réponse semble varier d'une région à l'autre.

Pour cette raison, les stations sont regroupées en régions plus grandes que les pays, et sont définies par la latitude et la longitude ; les résultats des régressions entre la CAM et la S et la PAM sont reportés tableau III. Les coefficients de S et PAM sont raisonnables et significatifs dans toutes les équations, lorsque la région à l'est de 9° E est divisée entre une partie nord et une partie sud. La variance expliquée est élevée, avec R² comprise entre 0,819 et 0,943. L'erreur d'estimation est raisonnable et entre 0,138 et 0,204 en forme logarithmique.

TABLEAU III
Équations de calcul de la CAM pour des groupements par longitude et latitude
MAF prediction equations for groupings by longitude and latitude

Groupe	Variab. Indep.	Coeff.	Ecart type	Niveau signif.	Variance exp. (R ²)	Erreur Type (ET)	10ET	log C	Const. C
1 Stations à l'Ouest de 8° Ouest (35 bassins)									
	(1) log S	0,594	0,068	***	0,699	0,249	1,772	0,513	3,262
	(2) log S+ log PAM	0,933	0,055	***	0,910	0,138	1,376	-8,105	7,861E-09
		2,260	0,262	***					
2 Stations de 8° Ouest à 2° Ouest (86 bassins)									
	(1) log S	0,705	0,040	***	0,788	0,302	2,004	-0,396	0,402
	(2) log S+ log PAM	0,807	0,029	***	0,905	0,204	1,599	-11,37	4,222E-12
		3,378	0,336	***					
3 Stations de 2° Ouest à 4° Est (41 bassins)									
	(1) log S	0,659	0,054	***	0,794	0,234	1,715	0,003	1,007
	(2) log S+ log PAM	0,747	0,051	***	0,856	0,199	1,579	-6,134	7,338E-07
		1,887	0,467	***					
4 Stations de 9° Est à 16°10' Est (62 bassins)									
	(1) log S	0,755	0,056	***	0,753	0,302	2,004	-0,224	0,597
	(2) log S+ log PAM	0,760	0,056	***	0,757	0,302	2,003	-1,228	0,0591
		0,309	0,306						
5 Stations de 9° Est à 16°10' Est et au Nord de 8° Nord (16 bassins)									
	(1) log S	0,458	0,095	***	0,626	0,260	1,819	1,099	12,571
	(2) log S+ log PAM	0,335	0,076	***	0,819	0,188	1,541	-5,412	3,872E-06
		2,308	0,601	***					
6 Stations de 9° Est à 16°10' Est, et 0° Nord à 8° Nord (46 bassins)									
	(1) log S	0,850	0,058	***	0,831	0,268	1,853	-0,644	0,227
	(2) log S+ log PAM	0,929	0,035	***	0,943	0,157	1,436	-9,553	2,800E-10
		2,652	0,287	***					

() non significatif.
(*) significatif au niveau 95 %.

(**) significatif au niveau 98 %.
(***) significatif au niveau 99 %.

Sauf dans le cas de la Guinée et des bassins du Sénégal et du Niger, les équations régionales du tableau III présentent les meilleures estimations de la CAM. Des modèles de régression alternatifs dans lesquels les bassins sont classés en fonction de leur superficie ou sur la base de leurs précipitations annuelles moyennes ont été mis à l'épreuve (tableaux IV et V) mais les équations ajustées sont généralement médiocres, parce que les étendues des variables indépendantes sont diminuées par ces groupements. Les relations entre la CAM et la S et la PAM des différentes régions sont illustrées en figures 2 et 3 ; par exemple les équations entre la CAM et la S pour la PAM typique de 1 500 mm, et entre la CAM et la PAM pour la S typique de 10 000 km² sont présentées. Néanmoins il faut garder de vue qu'il faut limiter l'application des équations aux limites des données. En particulier, les stations des petits bassins sont en nombre réduit ; il n'y a que 12 bassins de superficie inférieure à 500 km². En même temps, il n'y a que 3 stations ayant une PAM inférieure à 800 mm, et de telles limites doivent être respectées.

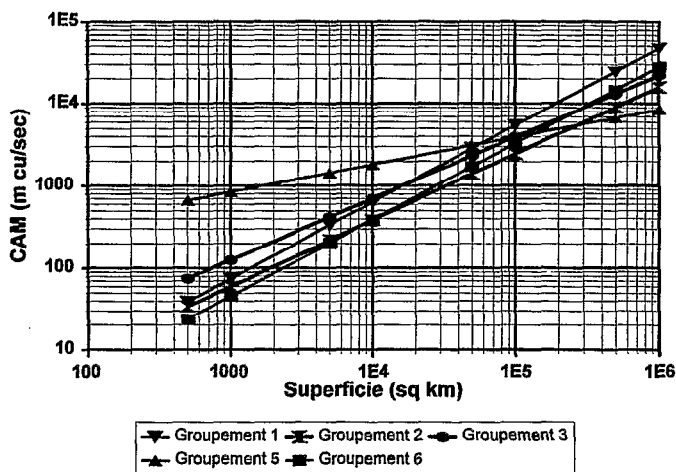


FIG. 2. — Crue annuelle moyenne (CAM) en fonction de la superficie pour différents groupements par latitude et longitude pour une PAM de 1 500 mm.
 Mean Annual Flood (MAF) against area for various groupings by latitude and longitude for an annual average rainfall of 1 500 mm.

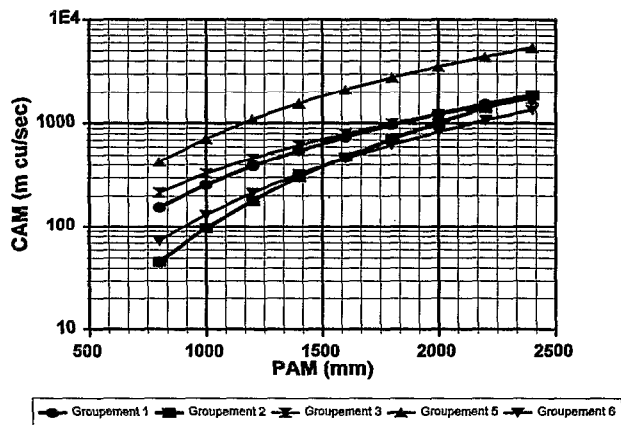


FIG. 3. — Crue annuelle moyenne (CAM) en fonction de la pluviométrie pour des groupements par latitude et longitude pour un bassin de 10 000 km².
 Mean Annual Flood (MAF) against annual rainfall for various groupings by latitude and longitude for a basin area of 10 000 km².

TABLEAU IV

Équations de calcul de la CAM pour des groupements de bassins versants répartis en fonction de leur superficie
MAF prediction equations for different catchment area groupings

Groupe	Variab. Indep.	Coeff.	Ecart type	Niveau signif.	Variance exp. (R ²)	Erreur type (ET)	10ET	log C	Const. C
1 Superficie S <1 000 km² (26 bassins)									
	(1) log S	0,899	0,241	***	0,367	0,388	2,444	-0,814	0,153
	(2) log S+ log PAM	0,906	0,246	***	0,371	0,395	2,484	0,090	1,231
		-0,292	0,758						
2 Superficie S de 1 001 à 10 000 km² (87 bassins)									
	(1) log S	0,641	0,136	***	0,208	0,351	2,245	0,092	1,235
	(2) log S+ log PAM	0,743	0,120	***	0,399	0,308	2,031	-5,088	8,17 E-06
		1,513	0,293	***					
3 Superficie S de 10 001 à 100 000 km² (97 bassins)									
	(1) log S	0,705	0,109	***	0,304	0,299	1,992	-0,195	0,639
	(2) log S+ log PAM	0,699	0,094	***	0,496	0,256	1,803	-3,486	0,0003266
		1,068	0,178	***					
4 Superficie S >100 001 km² (14 bassins)									
	(1) log S	0,633	0,333		0,232	0,218	1,653	0,216	1,241
	(2) log S+ log PAM	0,674	0,303	*	0,419	0,198	1,579	-3,355	0,000442
		1,094	0,581						

() non significatif.
(*) significatif au niveau 95 %.
(**) significatif au niveau 98 %.
(***) significatif au niveau 99 %.

TABLEAU V

Équations de calcul de la CAM pour différents groupes répartis selon les précipitations annuelles moyennes
MAF prediction equations for various annual average rainfall groupings

Groupe	Variab. Indep.	Coeffi.	Ecart type	Niveau signif.	Variance exp. (R ²)	Erreur Type (ET)	10ET	log C	Const. C
1 PAM de moins de 1 000 mm (22 bassins)									
	(1) log S	0,413	0,112	***	0,404	0,379	2,350	0,983	9,614
	(2) log S+ log PAM	0,391	0,112	***	0,450	0,366	2,321	-0,397	0,4
		0,507	0,401						
2 PAM de 1 001 à 1 250 mm (54 bassins)									
	(1) log S	0,757	0,057	***	0,772	0,280	1,906	-0,515	0,305
	(2) log S+ log PAM	0,747	0,057	***	0,780	0,278	1,897	-6,264	5,44E-07
		1,892	1,402						
3 PAM de 1 251 à 1 500 mm (51 bassins)									
	(1) log S	0,815	0,066	***	0,755	0,343	2,203	-0,691	0,204
	(2) log S+ log PAM	0,845	0,065	***	0,777	0,330	2,140	-16,425	3,756E-17
		4,980	2,281	*					
4 PAM de 1 501 à 1 750 mm (70 bassins)									
	(1) log S	0,868	0,027	***	0,938	0,179	1,511	-0,770	0,17
	(2) log S+ log PAM	0,869	0,027	***	0,940	0,178	1,507	-6,588	2,58E-07
		1,814	1,376						
5 PAM > 1 751 mm (27 bassins)									
	(1) log S	0,813	0,103	***	0,715	0,215	1,641	-0,187	0,649
	(2) log S+ log PAM	0,881	0,064	***	0,896	0,132	1,357	-7,899	1,262E-08
		2,243	0,346	***					

() non significatif.
(*) significatif au niveau 95 %.
(**) significatif au niveau 98 %.
(***) significatif au niveau 99 %.

7. ESTIMATION DES CRUES DE DIVERSES PÉRIODES DE RETOUR

On peut obtenir des estimations des pointes de crue de diverses périodes de retour, $Q(T)$, à des sites où l'on ne dispose pas de données sur les crues par les équations de régression présentées ci-dessus pour l'estimation de la CAM et par une courbe de fréquence sans dimension appropriée des crues. Une courbe de fréquence groupée ou moyenne des crues a été obtenue au moyen de la méthode des MPP pour chacun des groupes de pays ou de bassins et pour les groupes établis en fonction de la latitude, de la superficie et des précipitations annuelles moyennes. Les résultats sont présentés figures 4 à 9 et tableau VI.

TABLEAU VI a
Courbe de fréquence régionale des crues groupées par pays ou bassins
Regional flood frequency curve for groupings by country and river basins

Groupe	Stat.	Stat. année	u	a	k	Facteur d'augmentation $Q(T)/CAM$, pour divers T					
						5	10	50	100	200	500
PAYS											
GUINEE	17	311	0,908	0,228	0,210	1,20	1,32	1,52	1,58	1,64	1,70
COTE D'IVOIRE	57	802	0,779	0,440	0,083	1,40	1,68	2,25	2,46	2,67	2,92
TOGO	21	469	0,816	0,409	0,144	1,37	1,60	2,04	2,19	2,33	2,49
BENIN											
CAME-ROUN	55	1 072	0,908	0,205	0,145	1,18	1,30	1,52	1,60	1,67	1,75
BASSINS											
SENEGAL	11	403	0,822	0,424	0,186	1,38	1,60	2,00	2,13	2,25	2,39
NIGER	40	797	0,877	0,280	0,159	1,25	1,41	1,69	1,79	1,88	1,98
VOLTA	36	636	0,836	0,352	0,125	1,32	1,53	1,92	2,07	2,20	2,36

TABLEAU VI b
Courbe de fréquence régionale des crues groupées pour des bassins répartis en fonction de leur latitude et longitude
Regional flood frequency curve for groupings by latitude and longitude

Groupe	Stat.	Stat. année	u	a	k	Facteur d'augmentation $Q(T)/CAM$, pour divers T					
						5	10	50	100	200	500
Ouest de 8°W	35	809	0,862	0,324	0,176	1,29	1,46	1,78	1,88	1,98	2,09
2 à 8°W	86	1 370	0,803	0,393	0,084	1,36	1,61	2,11	2,30	2,48	2,71
2°W à 4°E	41	832	0,834	0,379	0,160	1,34	1,55	1,93	2,07	2,19	2,33
9 à 16°10' E	62	1 165	0,899	0,217	0,125	1,20	1,32	1,57	1,66	1,74	1,84
9 à 16°10'E plus de 8° N	16	266	0,865	0,313	0,168	1,28	1,45	1,76	1,87	1,96	2,07
9 à 16°10'E moins de 8° N	46	899	0,909	0,189	0,105	1,17	1,29	1,51	1,60	1,68	1,77

TABLEAU VI c
Courbe de fréquence régionale des crues pour des bassins groupés en fonction de leur superficie
Regional flood frequency curve for groupings by basin area

Superf. (km ²)	Groupe stat.	Stat. années	u	a	k	Facteurs d'augmentation, $Q(T)/CAM$ pour divers T					
						5	10	50	100	200	500
Infér. à 1 000	26	304	0,804	0,314	-0,044	1,29	1,55	2,14	2,41	2,68	3,05
1 001 à 10 000	87	1 363	0,850	0,313	0,108	1,28	1,47	1,85	1,98	2,11	2,26
10 001 à 100 000	97	1 979	0,843	0,346	0,141	1,31	1,51	1,88	2,02	2,13	2,28
Sup. à 100 001	14	530	0,883	0,304	0,235	1,27	1,41	1,66	1,74	1,80	1,88

TABLEAU VI d
 Courbe de fréquence régionale des crues pour des bassins groupés répartis selon leurs précipitations annuelles moyennes
Regional flood frequency curve for groupings by basin average annual rainfall

PAM (mm)	Station	Stat. années	u	a	k	Facteurs d'augmentation, Q(T)/CAM, pour divers T					
						5	10	50	100	200	500
600 à 1 000	23	574	0,841	0,370	0,174	1,33	1,53	1,89	2,01	2,12	2,25
1 001 à 1 250	53	1 034	0,806	0,424	0,136	1,38	1,63	2,09	2,26	2,41	2,59
1 251 à 1 500	51	795	0,813	0,390	0,110	1,35	1,59	2,05	2,22	2,38	2,57
1 501 à 1 750	70	1 286	0,881	0,234	0,076	1,21	1,37	1,67	1,79	1,90	2,04
Plus de 1 751	27	487	0,908	0,219	0,183	1,20	1,31	1,52	1,59	1,65	1,72

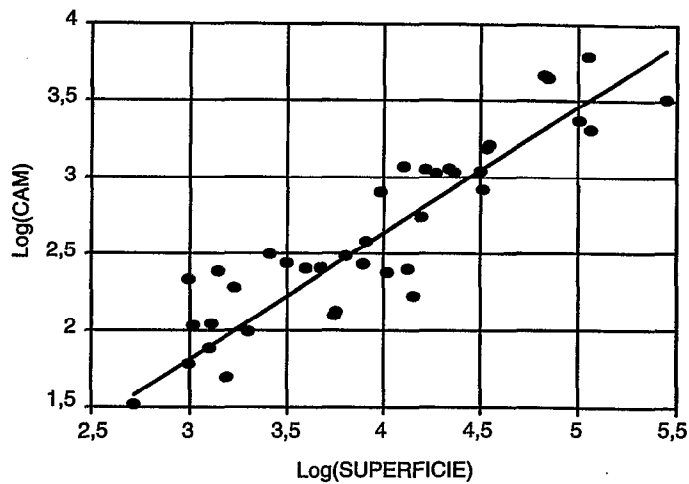


FIG. 4. — Comparaison des CAM observées et calculées en fonction de la superficie, pour le bassin du Niger.
Comparison of observed and predicted MAF against area for the Niger basin.

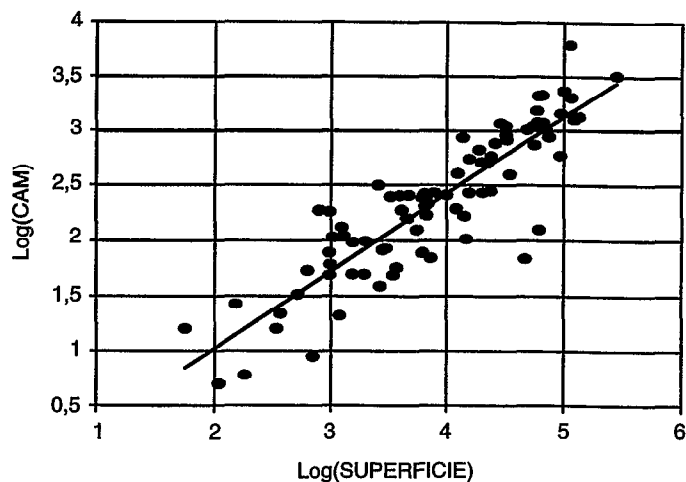


FIG. 5. — Comparaison des CAM observées et calculées en fonction de la superficie, pour la zone comprise entre 8° ouest et 2° ouest.
Comparison of observed and predicted MAF against area for the region latitude 8° West to 2° West.

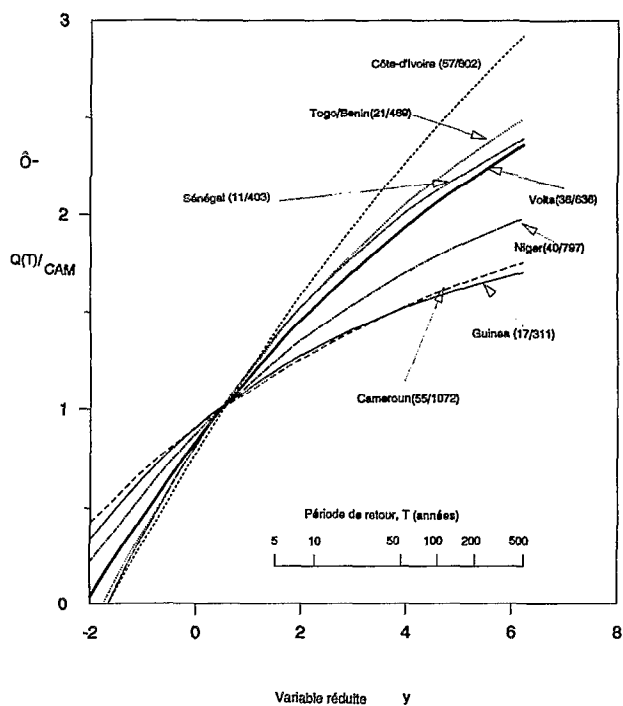


FIG. 6. — Courbes de fréquence régionale pour différents pays et cours d'eau.
Regional flood frequency curve for countries and river basins.

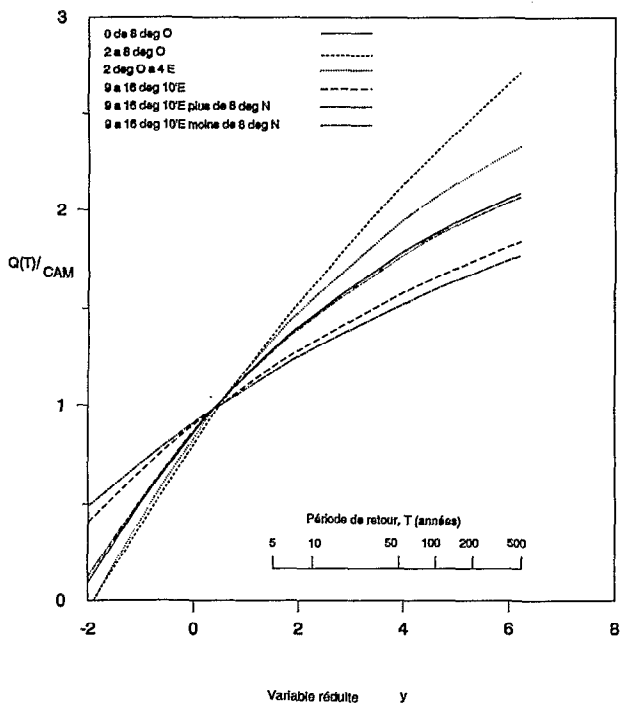


FIG. 7. — Courbes de fréquence régionale en fonction de la latitude et la longitude.
Regional flood frequency curve for groupings by latitude and longitude.

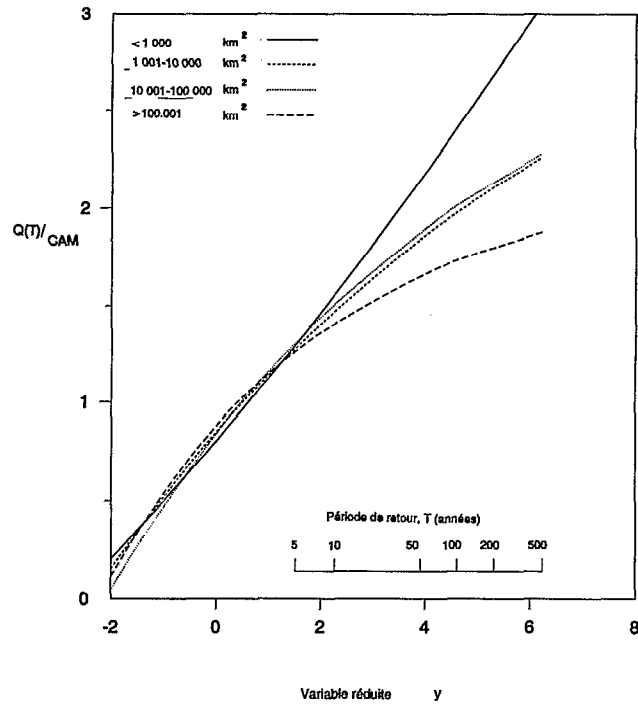


FIG. 8. — Courbes de fréquence régionale en fonction de la superficie.
Regional frequency curve for groupings by basin area.

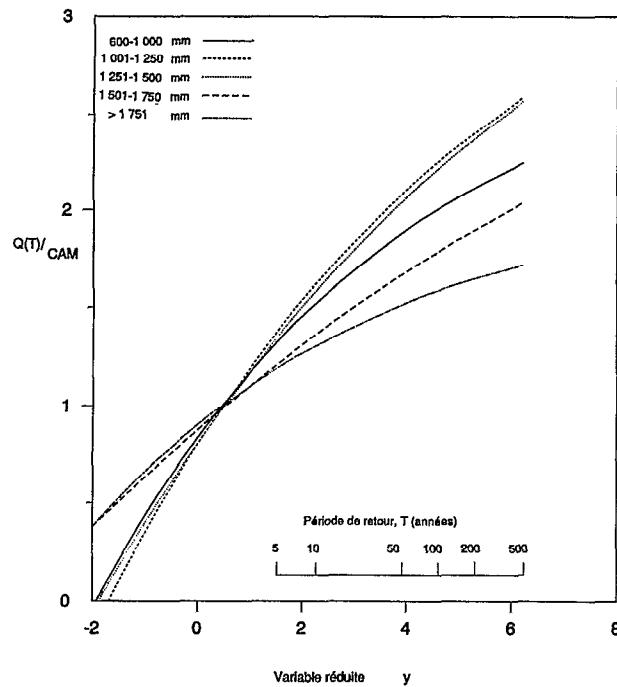


FIG. 9. — Courbes de fréquence régionale en fonction de la pluviométrie annuelle moyenne.
Regional flood frequency curve for groupings by basin average annual rainfall.

Il faut d'abord insister sur le fait que les différences entre les courbes de fréquences régionales sont modérées, et que toutes les courbes sont extrêmement plates et les multiples $Q(T)/CAM$ modérés par comparaison aux autres régions du monde (FARQUHARSON *et al.*, 1987). Les courbes des différents pays sont évidemment différentes ; les courbes de la Guinée et du Cameroun, où les valeurs de la PAM sont élevées, sont très plates alors que les courbes de la Côte d'Ivoire et du Togo/Bénin sont plus pentues. Les groupes établis en fonction de la latitude ne sont pas constants, mais au cours de l'étude les valeurs de C_{max}/CAM ont été reportées sur la carte géographique. Les valeurs de C_{max}/CAM ont tendance à augmenter du sud au nord, avec des valeurs élevées au nord-est de la Côte-d'Ivoire. L'explication la plus probable, en conformité avec les résultats d'autres régions du monde, est que la variabilité de crue et donc de la pente de la courbe de fréquence, se rapporte aux précipitations moyennes en première approximation.

La pente de la courbe a tendance à varier avec la superficie des bassins ; la pente et les multiples $Q(T)/CAM$ sont élevés dans le cas des bassins de moins de 1 000 km², et sont faibles dans le cas des bassins de plus de 100 000 km². Néanmoins, les courbes des bassins moyens se ressemblent. Il y a une tendance pour les courbes de fréquence à varier selon les précipitations et en particulier la PAM. La pente de ces courbes diminue tant que la PAM augmente ; une exception est observée pour les bassins ayant une PAM de moins de 1 250 mm, mais ce groupe est dominé par les stations de longue durée des grands bassins comme les stations du fleuve Sénégal. Il est suggéré que les courbes de fréquences soient choisies à partir des courbes de fréquence de la PAM appropriée, sauf pour les bassins de PAM inférieure à 1 000 mm où la courbe PAM de 1 001 à 1 250 mm est préférable.

Il est donc possible d'établir des estimations de pointes de crue d'une période de retour maximale de 500 ans environ à l'aide des régressions CAM et des courbes de fréquence régionale des crues. On peut penser que ces estimations des crues sont d'une précision satisfaisante aux fins des études de planification ou de faisabilité, mais il serait nécessaire de procéder à des études hydrologiques plus complètes pour les études détaillées d'avant-projet.

Si l'on possédait quelques années de débits observés au ou à proximité du site concerné, il serait possible d'obtenir une meilleure estimation de la CAM à partir de la moyenne de la série des crues annuelles maximales. Cette estimation améliorée de la CAM entraînerait à son tour une meilleure estimation de $Q(T)$.

Toutefois, à moins qu'il n'existe une très longue série d'enregistrements des débits au site concerné, il est suggéré que les courbes de fréquences régionales groupées des crues présentées dans le tableau VI d et à la figure 9 produisent vraisemblablement des estimations plus fiables de $Q(T)$ que les estimations qui pourraient être obtenues par l'analyse d'une courte série de relevés des débits à un site donné. La courbe régionale groupée produira la meilleure estimation critique de la fréquence des crues pour les régions hydrologiques sélectionnées.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 17 juin 1993

BIBLIOGRAPHIE

- BRUNET-MORET (Y.), CHAPERON (P.), LAMAGAT (J.P.) et MOLINIER (M.), 1986. — Monographie hydrologique du fleuve Niger. *Monographie hydrologique n° 8*, Orstom Paris.
- FARQUHARSON (F.A.K.), GREEN (C.S.), MEIGH (J.R.) et SUTCLIFFE (J.V.), 1987. — *Comparison of flood frequency curves for many different regions of the world*. Regional Flood Frequency Analysis, (Ed. V.P. Singh) : 223-256, D. Reidel Publishing Co.
- HOSKING (J.R.M.), WALLIS (J.R.) et WOOD (E.F.), 1984. — Estimation of the Generalised Extreme Value distribution by the method of probability weighted moments. *Technometrics*, vol. 27 : 251-261.
- MONIOD (F.), POUYAUD (B.) et SECHET (P.), 1977. — Le bassin du fleuve Volta. *Monographie hydrologique n° 5*, Orstom Paris.
- Natural Environment Research Council, 1975. — *Flood Studies Report*.
- OLIVRY (J.C.), 1986. — Fleuves et rivières du Cameroun. *Monographie hydrologique n° 9*, Orstom, Paris.
- RODIER (J.A.), 1989. — *Caractères généraux de l'hydrologie superficielle des zones arides et semi-arides en Afrique : leurs conséquences sur les études des ingénieurs*. Proc. of the Sahel Forum, Ouagadougou, Burkina Faso : 19-37.
- RODIER (J.A.) et ROCHE (M.), 1984. — World Catalogue of Maximum Observed Floods, International Association of Hydrological Sciences Publication n° 143.
- ROCHETTE (C.), 1974. — Le bassin du fleuve Sénégal. *Monographie hydrologique n° 1*, Orstom, Paris.
- SUTCLIFFE (J.V.) et LAZENBY (J.B.C.), 1989. — *Hydrology and river control on the Niger and Senegal*. Proc. of the Sahel Forum, Ouagadougou, Burkina Faso : 611-620.
- SUTCLIFFE (J.V.) et PIPER (B.S.), 1986. — Bilan hydrologique en Guinée et au Togo/Bénin. *Hydrol. contin.*, Vol. 1 (1) : 51-61.
- Unesco, 1976. — *World Catalogue of Very Large Floods*. The Unesco Press, Paris.