

CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES RÉGIMES HYDROLOGIQUES DES GRANDS FLEUVES D'AFRIQUE TROPICALE DANS L'HÉMISPHERE NORD

PAR

Jean-A. RODIER

chef du Service hydrologique
de l'Office de la Recherche scientifique et technique outre-mer

RÉSUMÉ. — Ces caractères s'expliquent par la nature des facteurs conditionnels. La mousson d'Afrique est un phénomène qui se reproduit régulièrement et qui apporte en saison des pluies des précipitations généralement très supérieures aux besoins de l'évaporation; le ruissellement superficiel est presque toujours très important; les saisons sèches sont bien marquées; les pentes sont généralement faibles ou très faibles; les sols sont souvent imperméables; les plaines d'inondation sont étendues et absorbent les excédents des grandes crues.

On observe des périodes de hautes eaux et des périodes de basses eaux très marquées; ces dernières correspondent souvent à des débits très faibles. Les débits moyens annuels présentent une distribution statistique souvent normale, avec des écarts assez faibles d'une année à l'autre (K_3 rapport des deux déciles extrêmes varie de 1,3 à 2,5); leur moyenne varie généralement entre 4 et 16 l/s.km². Entre le module d'un grand fleuve et celui de son voisin il y a une bonne corrélation.

Les débits de crue des grands fleuves sont liés à la hauteur de précipitation annuelle. Leur distribution est souvent normale ou voisine de la normale, elle peut même être hypogaussique. Ces débits sont modérés : pour 100 000 km² on trouve généralement moins de 8 000 m³/s pour la crue millénaire. Les débits de basses eaux sont généralement caractérisés par une courbe de tarissement très régulière.

L'érosion est forte sur petits bassins cultivés, mais le dépôt se fait très vite, une grande partie du sol est inculte ou en jachère, de sorte que les transports solides ne sont pas très importants.

SUMMARY. — These characters can be explained by the influence of the factors of runoff : the African « monsoon » is a regular phenomenon, during the rainy season, the height of the precipitations far exceeds the needs of evaporation; the surface runoff is always very important; dry seasons are severe; generally speaking the slopes are gentle, the soils are often impervious, flood plains catch the excesses of big floods.

17.

O. R. S. T. O. M.

Collection de Références

n°/3926

The hydrological regimens offer periods of high water and low flow quite well defined. The low discharges are very small, often null. Mean annual discharges often offer a normal statistical distribution. Their average is included in general between 4 and 16 l/s.km². The mean discharges from one year to another do not differ too much. The K₃ ratio between extreme deciles varies between 1,3 and 2,5. The flood discharges of the big rivers are tied up to the depth of annual precipitations. Their statistical distributions are normal or not too far from the normal. It is possible to find hypogaussian distribution. These flood discharges are not too high. For 100 000 km², one finds generally less than 8 000 m³/s for the 1 000 year-flood. The low flow discharges present often a very regular recession curve. Erosion is important in the small cultivated areas but the deposit is rapid, the most part of the soil is not cultivated. Therefore, the solid transportation is not important in the big rivers.

Au moment où les hydrologues de l'ORSTOM et de l'E.D.F. achèvent trois importantes monographies concernant le Sénégal, le Niger et le Logone, monographies qui viennent compléter les travaux remarquables de H. E. Hurst et de ses successeurs sur le Nil, il paraît assez facile de dégager les caractères communs des régimes des cours d'eau de cette région de l'Afrique tropicale qui s'étend de l'ouest à l'est sur 6 000 kilomètres environ, de Saint-Louis du Sénégal aux hauts plateaux de l'Éthiopie et qui est limitée : au nord, par la zone semi-aride voisine du Sahara, au sud par les régions équatoriales.

Les données de base disponibles pour l'étude de l'écoulement proviennent :

— pour l'Afrique centrale et l'Afrique de l'Ouest, des quelques stations limnimétriques installées au début du siècle pour la navigation et du réseau beaucoup plus complet de stations de jaugeage aménagé vers 1948 par l'ORSTOM, l'administration des Travaux Publics ou les compagnies de navigation du Nigeria;

— pour le bassin du Nil, de l'ensemble de stations plus anciennes mises en service au Soudan et en Égypte pour l'exploitation du premier barrage d'Assouan et d'autres objectifs économiques. On dispose ainsi des relevés à quelques stations de référence portant sur au moins cinquante ans et de relevés beaucoup plus nombreux sur quinze à vingt ans. Avec les régimes relativement réguliers de ces cours d'eau, les échantillons statistiques fournis par ces relevés sont assez solides pour permettre des études sérieuses.

Ces données sont complétées par les résultats de plusieurs dizaines de bassins représentatifs qui, à une échelle plus fine, permettent l'analyse des rapports entre l'écoulement et ses facteurs conditionnels, notamment les précipitations et les publications des Services météorologiques qui, généralement, rendent possible une étude satisfaisante du régime des pluies, tout au moins sur les grands bassins.

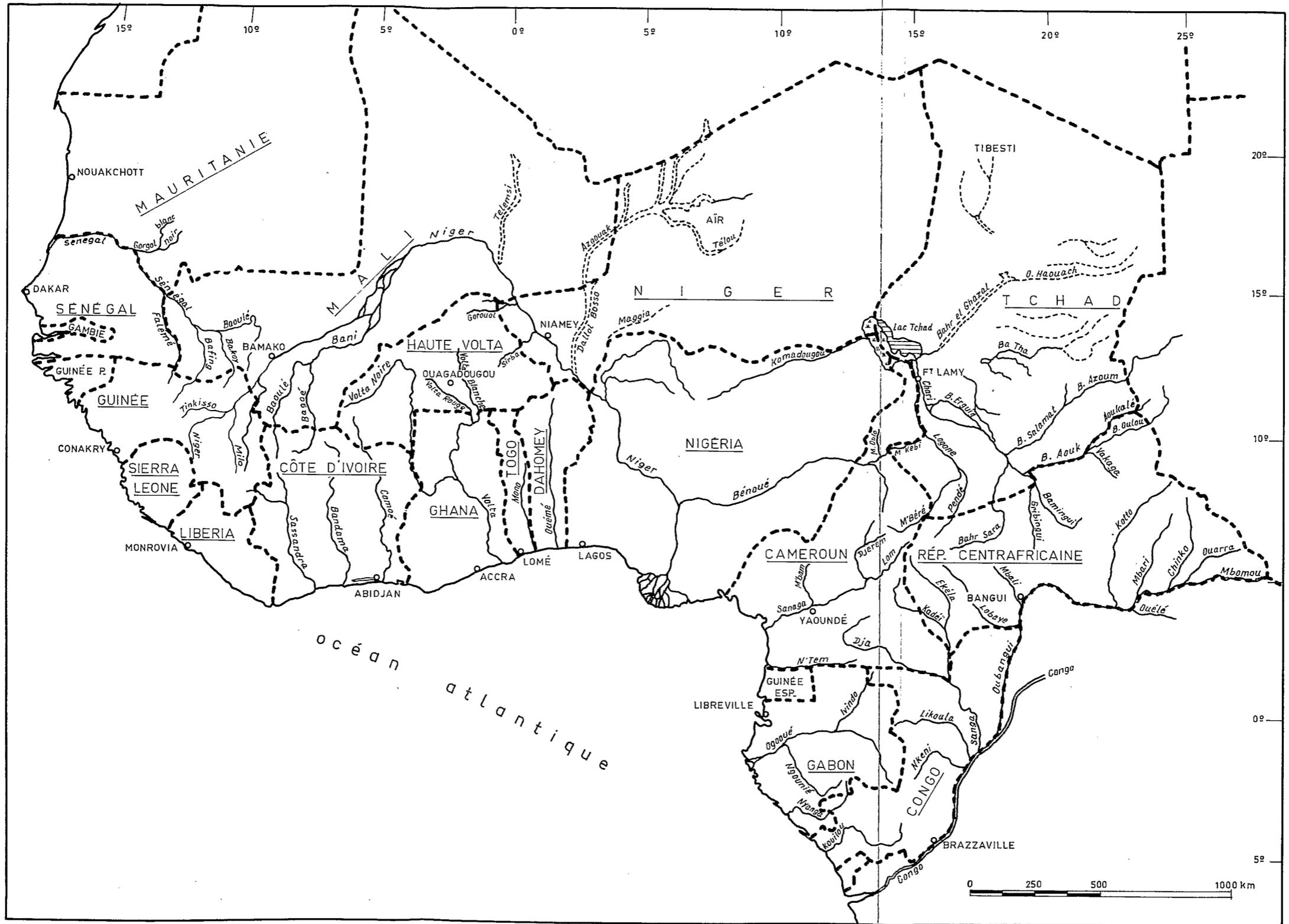


FIG. 1

Avant d'entreprendre l'examen des régimes hydrologiques des cours d'eau des régions qui nous intéressent, il est utile de donner quelques indications sur les caractères physiques des bassins versants et les données climatologiques qui interviennent dans la formation de l'écoulement.

I. Facteurs conditionnels du régime

De nombreux facteurs sont de nature à donner au régime hydrologique certains caractères de régularité, qu'il conviendrait cependant de ne pas exagérer.

Le facteur le plus important sous ces latitudes, les précipitations, résulte d'un phénomène qui se reproduit très régulièrement : ce que l'on appelle improprement « la mousson » d'Afrique. Le déplacement régulier des masses d'air humide équatoriales du nord au sud de janvier à août, puis du sud au nord de septembre à décembre et, par suite, celui du Front intertropical qui sépare ces masses d'air de l'air continental boréal, donnent lieu tous les ans à l'apparition des pluies un peu après le passage de ce front dans son déplacement vers le nord. Les averses se succèdent assez régulièrement, tout au moins dans les régions tropicales, jusqu'au retour du Front intertropical dans son déplacement vers le sud qui marque la fin de la saison des pluies. Sauf sous les latitudes relativement élevées des régions subdésertiques, la saison des pluies se reproduit tous les ans à une époque variable suivant la latitude mais qui est presque toujours la même pour une latitude déterminée.

Autre élément de régularité : les bassins d'alimentation de la zone tropicale reçoivent, en général, entre 1 500 et 2 000 millimètres d'eau par an, alors que l'évapotranspiration potentielle est au maximum de 1 400 millimètres pour douze mois dans ces régions. Or, la saison des pluies ne dure que cinq ou six mois au maximum. Il y a donc, en année moyenne, un excédent des précipitations de plusieurs centaines de millimètres sur l'évaporation. Il en résulte que les pertes par évaporation variant très peu d'une année à l'autre, les fluctuations interannuelles des précipitations annuelles ne conduiront pas à des variations trop amplifiées des écoulements qui en résulteront, comme c'est le cas lorsque le montant des précipitations annuelles ne dépasse que de peu celui de l'évapotranspiration.

Ceci n'est pas une règle absolue dans toutes les régions tropicales. Au nord-est du Brésil par exemple, où les saisons des pluies sont moins régulières et l'excédent des précipitations moins marqué, l'irrégu-

larité interannuelle des volumes écoulés dans les cours d'eau est très grande, ce qui entraîne des conséquences désastreuses.

En général, les premières averses tombent en avril dans le sud de la zone d'alimentation mais elles ne commencent à devenir fréquentes qu'en mai et c'est en juin que les sols partiellement saturés par les averses précédentes commencent à ruisseler, provoquant des crues notables qui se succèdent alors et ne s'arrêtent que vers la fin d'octobre avec parfois des pluies isolées en novembre. La partie efficace de la saison des pluies, en ce qui concerne l'écoulement, dure cinq mois à cinq mois et demi. Elle est plus courte plus au nord. Les averses sont constituées, en grande partie, par des averses orageuses dont la partie intense dure de trente minutes à une heure trente avec des intensités qui dépassent facilement 100 mm/h. Un second type d'averse dure plus longtemps : quelques heures avec des pointes moins brutales, mais l'intensité atteint et dépasse fréquemment trente à quarante mm/h.

Le sol en pleine saison des pluies ayant une capacité d'absorption souvent inférieure à 30 mm/h, on voit que le ruissellement superficiel est un phénomène absolument courant, beaucoup plus qu'en Europe occidentale. Les petits bassins auront donc de fortes crues.

La hauteur de chaque averse varie peu d'un point à l'autre de cette zone. Si on considère, par exemple, l'averse maximale de fréquence annuelle, elle est, en général, comprise entre 65 et 85 mm. Elle ne dépasse la limite de 85 mm que dans les chaînes de montagnes ne couvrant qu'une superficie très limitée. Les crues sur petits bassins présenteront, pour cette raison, un caractère très marqué d'homogénéité, les données obtenues se prêtent à des transpositions faciles sur de très grandes distances si la constitution du sol, la couverture végétale et le relief sont analogues.

L'absence quasi totale de pluies en saison sèche, la durée de celle-ci et les températures qui approchent 40° (moyenne mensuelle des températures diurnes) en mars-avril, conduisent à une forte évaporation (7 à 8 mm par jour en moyenne sur bac Colorado en avril) et à un tarissement prolongé des rivières qui peuvent donner lieu à des débits d'étiage sévères.

En pleine saison des pluies, les températures passent par un minimum voisin de 30° pour la température diurne et 20° pour la température nocturne. Les averses rencontrent alors des conditions assez voisines des averses d'été en France, sauf au début de la saison où elles tombent sur un sol beaucoup plus desséché et s'écoulent dans un réseau hydrographique presque à sec.

Un des caractères les plus courants de la géographie physique des bassins est la faible pente. Les massifs montagneux : Fouta Djallon et massifs annexes, dorsale entre Cameroun et Nigeria, plateaux d'Abyssinie, ne sont pas absents de cette zone mais ils occupent une superficie assez limitée; en outre, ils sont souvent organisés de telle façon qu'ils ne conduisent qu'accidentellement à des régimes torrentiels. Un bon exemple est fourni par le plateau de l'Adamaoua. Sur ce plateau, les rivières ont un cours assez paresseux avec un nombre non négligeable de marécages, puis elles descendent par une série d'escaliers de ce plateau sans que les débits de crues s'en trouvent amplifiés. De temps en temps cependant, la géomorphologie est moins favorable. Le bassin présente sur la majeure partie de sa surface de fortes pentes et les débits de crues sont immédiatement multipliés par 2 ou 3.

Conjuguées avec une couverture végétale de densité non négligeable, ces faibles pentes conduisent à des débits de crues assez modérés dès que la superficie du bassin dépasse quelques milliers de kilomètres carrés. En effet, la végétation naturelle est généralement constituée par une savane boisée plus dense au fur et à mesure que l'on descend vers le sud, avec une certaine tendance à passer à la prairie en altitude. Des galeries forestières plus ou moins denses bordent les cours d'eau, freinant l'écoulement des crues. Ceci est particulièrement net en Afrique centrale, en particulier dans le bassin de l'Oubangui.

La mise en culture favorise l'écoulement et l'érosion, surtout si elle est mécanisée et conduite de façon peu rationnelle. Mais la culture mécanique constitue une exception. En outre, la culture traditionnelle nécessite des jachères de plusieurs années : parfois plus de dix ans. Il en résulte que la majeure partie des bassins est constituée par de la végétation naturelle : d'origine (ce qui est très rare) ou qui s'est reconstituée.

Les sols ne sont que rarement très perméables. Il n'y a pas de zone karstique et très peu de sables aussi perméables que les sables batékés, par exemple, à l'ouest du Congo; ce que l'on trouve, ce sont des sols ferrallitiques ou ferrugineux avec une perméabilité moyenne sur quelques mètres, un pouvoir de rétention modéré : rien qui, en général, puisse donner lieu à des sources très abondantes; les débits de la saison sèche resteront donc très faibles en général. Bien entendu, il y a quelques recouvrements éruptifs récents qui ne sont d'ailleurs très perméables que tant qu'ils n'ont pas été altérés, des formations de sables et de grès altérés en République Centrafricaine.

caine. Mais, même dans ce cas, la perméabilité est rarement telle qu'elle joue un rôle très important dans les variations des débits.

Pour en finir avec les caractères physiques du bassin, notons que les vallées ont conservé leur morphologie naturelle, les fleuves sont bordés par de vastes plaines d'inondation qui régularisent les crues. Ce phénomène est encore accentué par le fait qu'une bonne partie des grands cours d'eau coulent du sud vers le nord, rencontrant des pentes de plus en plus faibles. Au voisinage de la zone sahélienne, la dégradation hydrographique se produit avec apparition de défluent, de plaines d'inondation de plusieurs dizaines de kilomètres de largeur où les pertes par évaporation sont énormes : les trois exemples les plus typiques sont le delta intérieur du Niger, la Mésopotamie tchadienne, les marais du Sudd sur le Nil blanc.

II. Variations annuelles du débit

Pour des raisons qu'il serait trop long d'expliquer ici, les têtes de bassins sont situées presque toutes vers le sud de la zone tropicale, c'est-à-dire dans des régions où la saison des pluies dure au moins cinq mois avec une saison sèche dont la période sans pluie dure trois mois environ. L'hydrogramme annuel, tel que celui que l'on trouve ci-contre, comporte, après les crues de la saison de hautes eaux, une courbe de tarissement assez régulière, troublée parfois en novembre par quelques petites pointes de crues qui n'apportent que de faibles modifications à la courbe théorique. La pente de la courbe devient très faible vers le minimum annuel, en avril ou mai où le débit devient faible mais nettement différent de zéro, en général, dès que le bassin dépasse 100 à 200 km².

En mai et juin, parfois avril, apparaissent quelques pointes de crues avec des débits inférieurs à ceux d'août et de septembre. De juillet à septembre, les averses sont plus fréquentes, le sol reste relativement humide entre les averses, le réseau hydrographique est en eau, les crues se resserrent et sont plus fortes qu'au début de la saison des pluies. Cependant, la croissance de la végétation exerce un certain freinage; sur les très petits bassins les formes de certains hydrogrammes de crues tendent à être plus molles qu'au début de la saison des pluies. En octobre sur les petits cours d'eau (novembre dans certaines parties du bassin de l'Oubangui), les débits commencent à décroître, c'est le début du tarissement.

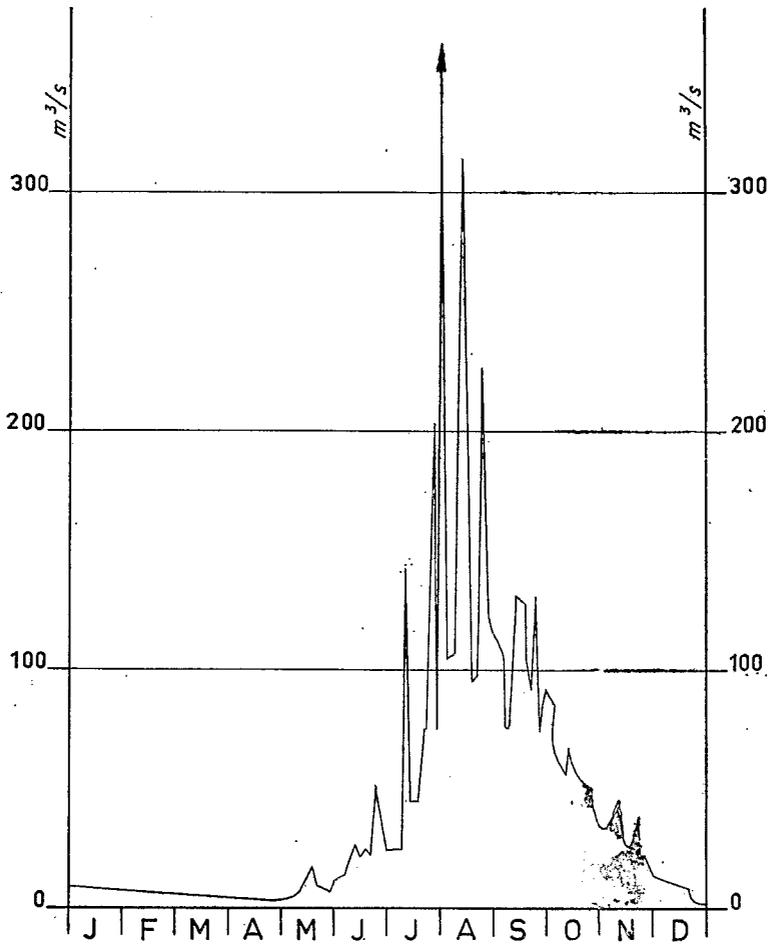


FIG. 2. — Le Samou à Grandes-Chutes (Guinée), 964 km². Débits en 1953

L'hydrogramme se déforme de l'amont vers l'aval. Si le cours d'eau collecteur coule vers le nord, les pointes de crues de mai et juin, qui ne se sont produites que dans le sud, s'estompent. Les apports des affluents successifs sont de plus en plus faibles et l'action régularisatrice des plaines d'inondation se développe. L'hydrogramme complexe de hautes eaux, véritable dentelle vers le sud, tend vers une courbe en cloche dont l'exemple le plus typique est celui du Chari à Fort-Lamy. Si les pentes restent assez fortes, le diagramme reste pointu comme celui de la Bénoué à Garoua. Si le cours d'eau

collecteur coule vers le sud, c'est uniquement le cas de la Sanaga et de l'Oubangui ainsi que des affluents de la Bénoué inférieure, les pointes de crues de mai, juin et juillet se conserveront, donnant lieu à une « dentelle ascendante ».

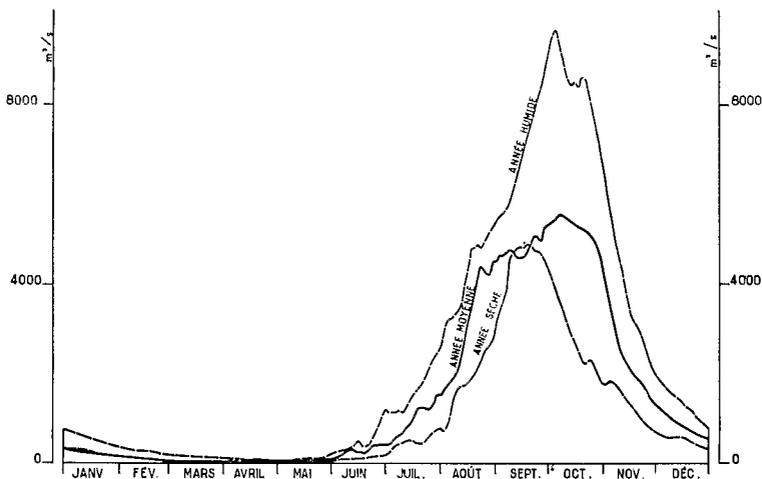


FIG. 3. — Le Niger à Koulikoro

Notons que, pour certaines régions particulièrement humides, les basses eaux peuvent être troublées par quelques petites crues.

Nous donnerons plus loin quelques indications quantitatives concernant les débits de crues et d'étiages.

III. Débits moyens annuels et leurs variations interannuelles

Le débit moyen annuel ou module, lorsqu'il est ramené à l'unité de superficie de bassin versant, est un des indices les plus utilisés pour caractériser l'abondance des cours d'eau d'une région. Au lieu de ce module spécifique en $l/s.km^2$, on peut utiliser le volume annuel en milliers de m^3/km^2 ou, en millimètres, la lame d'eau équivalente répartie sur la surface unité. Les grands fleuves issus de la zone tropicale africaine présentent, pour les modules, des valeurs extrêmement variées, si la station de référence est prise très à l'aval; on trouverait ainsi pour le Nil moins de $1 l/s.km^2$, pour le Chari à Fort-Lamy, un peu plus de $2 l/s.km^2$, alors que, pour la Sanaga,

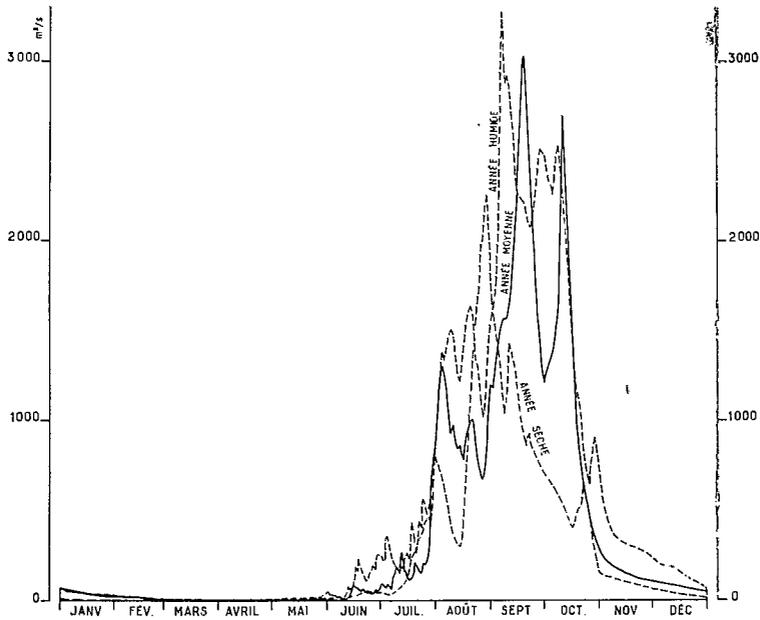


FIG. 4. — La Bénoué à Garoua

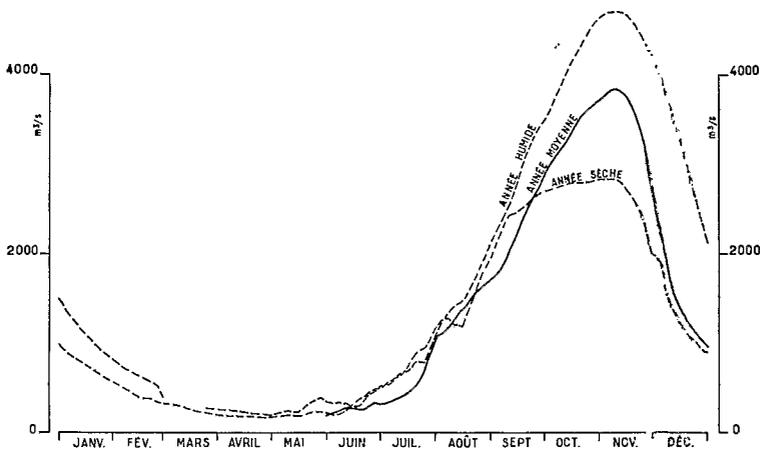


FIG. 5. — Le Chari à Fort-Lamy

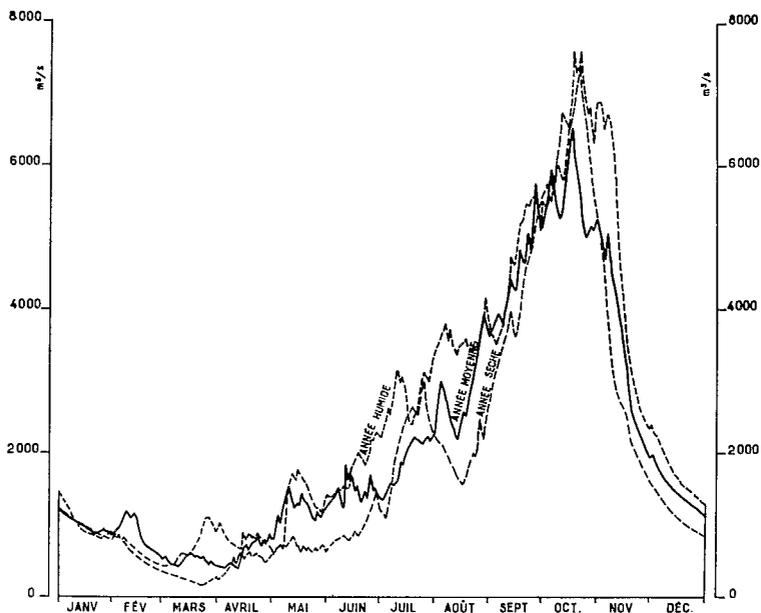


FIG. 6. — La Sanaga à Edéa

le module spécifique vers l'embouchure est de 16 l/s.km^2 . C'est que les régimes hydrologiques de nombre de ces bassins ne sont pas homogènes, ils comportent des superficies très importantes en dehors de la zone qui nous intéresse. En particulier, les régions désertiques, subdésertiques et sahéliennes n'apportent pratiquement rien à ces fleuves, alors qu'elles couvrent souvent une bonne partie de la superficie des bassins versants. C'est ainsi que les calculs des débits spécifiques pris vers l'extrémité aval des fleuves suivants : Sénégal, Niger, Chari et Nil, sont faussés par la prise en compte de ces régions plus ou moins endoréiques. Le jugement peut être également faussé par la prise en compte de débits provenant de zones équatoriales : ceci n'intervient que pour le Nil pour lequel la situation est suffisamment complexe pour justifier quelques explications : le Nil blanc apporte, par an, une douzaine de milliards de mètres cubes (après en avoir perdu autant dans le Sudd), le Nil Bleu, le Sobat et l'Atbara, cours d'eau tropicaux, en apportent six fois plus; donc l'influence équatoriale est faible et l'hydrogramme, à la sortie des marais du Sudd, est extrêmement plat. Par contre, les trois autres branches ou affluents comportent des parties notables de leur bassin en zone sahélienne ou subdésertique.

Si l'on considère des stations ne contrôlant aucune portion de bassin équatoriale, subdésertique ou sahélienne ou si on effectue les corrections correspondantes, on arrive aux résultats présentés dans le tableau suivant :

	Module	Module spécifique
	(m ³ /s)	(l/s. km ²)
Sénégal à Galougo-Gouina.....	680	5
Niger supérieur à Koulikoro.....	1 550	13
Bénoué à Garoua.....	375	6
Logone à Moundou.....	400	11,5
Chari supérieur.....	300	(4)
Oubangui à Bangui.....	(4 280)	8,5
Nil bleu.....	(1 600)	(7,5)
Sanaga à Édéa.....	2 160	(16)
Volta à Akosombo.....	1 180	(4)

Rappelons les modules de quelques-uns de ces cours d'eau juste avant la zone deltaïque de l'embouchure :

— Sénégal.....	770 m ³ /s
— Niger.....	7 000 —
— Chari.....	1 225 —
— Nil à Assouan.....	2 800 — (1)

(1) Ce chiffre varie légèrement suivant la période d'observation considérée.

Les débits spécifiques présentés dans notre tableau ne varient plus que de 4 à 16 l/s.km² : ceci est encore beaucoup. La raison en est la suivante : les cours d'eau que nous étudions se rattachent à deux types de régimes hydrologiques : le régime tropical pur pour lequel la saison des pluies dure de trois mois et demi à quatre mois avec saison sèche longue et sévère et le régime tropical de transition pour lequel les pluies durent cinq mois environ. Tous les cours d'eau présentés dans ce tableau ont au moins une partie de leur haut bassin dans la zone du régime tropical de transition, le reste du bassin correspond au régime tropical pur. Le régime tropical de transition étant nettement plus abondant que ce dernier, suivant la répartition des superficies à attribuer aux deux régimes, le module spécifique variera dans de larges limites. En fait, le Sénégal à Galougo, la Bénoué à Garoua ont presque tout leur bassin en régime tropical pur ; la Volta, le Chari et le Nil Bleu en ont une bonne partie. La Sanaga, au contraire, a tout son bassin dans la zone tropicale de transition, l'Oubangui une très grande partie. On constate donc, et ceci est vérifié par les modules d'un grand nombre de stations contrôlant des bassins moins importants, qu'en régime tropical de transition les modules varient de 8 l/s.km² à 20 l/s.km². Si on considère des petits cours d'eau très défavorisés ou, au contraire, très bien pourvus, il faudrait compter entre 5 et 22 l/s.km² avec quelques chiffres exceptionnels plus élevés dans des régions qui reçoivent plus de 1 800 mm ou même plus de 2 000 mm par an.

Pour le régime tropical pur, on trouve entre 2,5 et 5 l/s.km² mais certains cours d'eau en plaine, avec hydrographie très dégradée, peuvent donner beaucoup moins : on trouve 0,75 l/s.km² pour l'Aouk, affluent du Chari, et on doit trouver encore beaucoup moins pour certains affluents secondaires du bassin du Nil.

Il doit être certainement possible de lier par des formules le module spécifique aux précipitations annuelles et mensuelles. Des études ont déjà été faites dans un bon nombre de cas particuliers mais les éléments de base ont manqué jusqu'ici pour la mise au point d'une formule d'application vraiment générale, ce qui ne doit pas être impossible à première vue.

Comment varient ces débits moyens annuels d'une année à l'autre ? En général, ils sont très raisonnables : ils suivent une distribution conforme à la loi de Gauss, les fréquences se répartissent suivant une magnifique courbe en cloche parfaitement symétrique, les fréquences cumulées, plus fréquemment utilisées, représentent une droite en coordonnées gaussiennes particulièrement commode pour les modules de diverses fréquences.

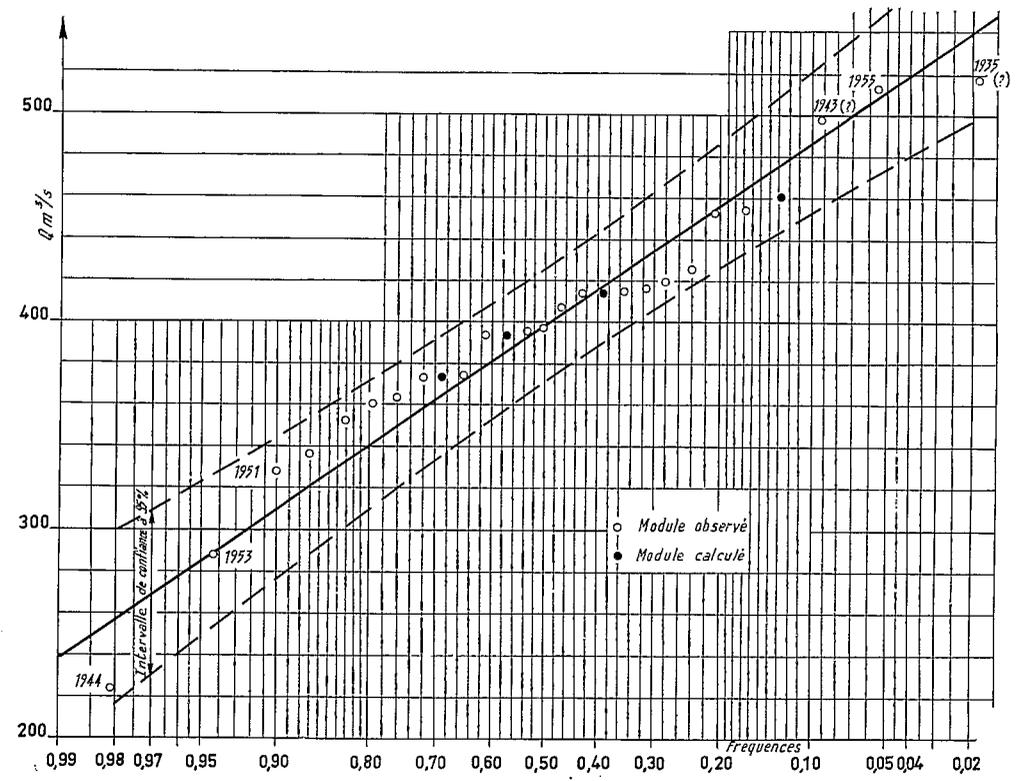


FIG. 7. — Distribution statistique des modules annuels du Logone à Moundou

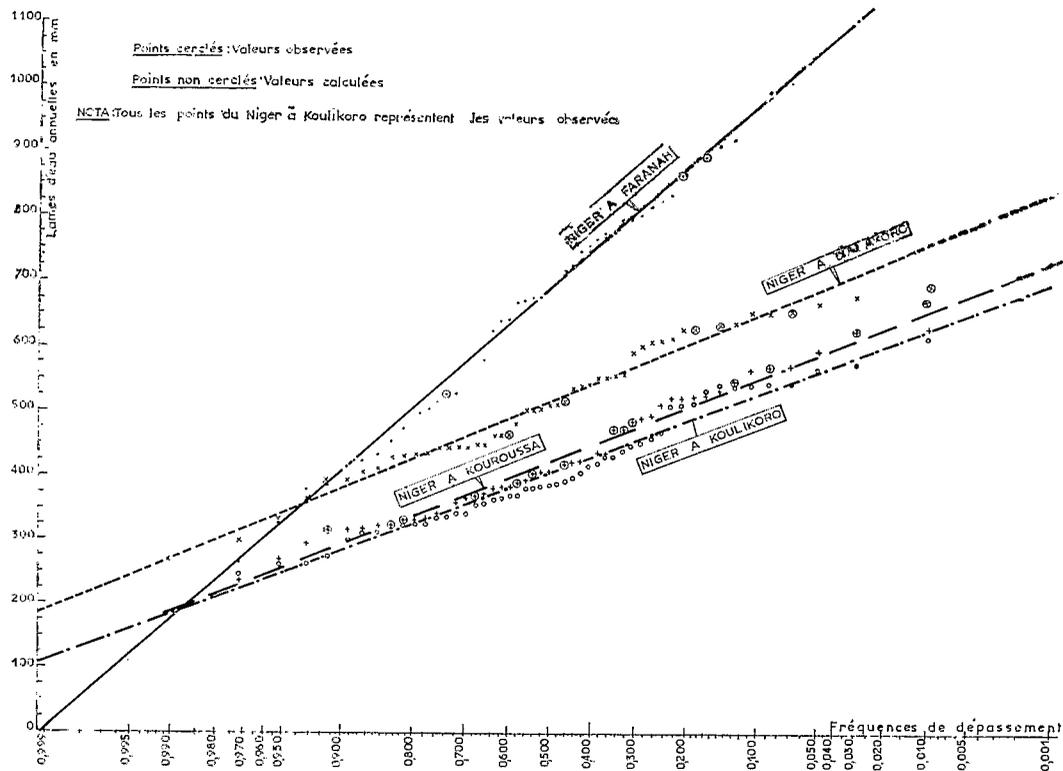


FIG. 8. — Bassin du Niger supérieur, cours principal. Distribution statistique des lames d'eau écoulées annuelles

On peut représenter l'irrégularité interannuelle par le coefficient de variation mais un autre coefficient est plus parlant : c'est le rapport K_3 entre le module le plus humide qui se reproduit en moyenne tous les dix ans et le module le plus sec de même fréquence. On trouve les valeurs suivantes :

— Sénégal	$K_3 = 2,49$
— Niger à Koulikoro	$K_3 = 1,89$
— Bénoué à Garoua	$K_3 = 1,83$
— Nil à Assouan	$K_3 = 1,68$
— Logone à Moundou	$K_3 = 1,57$
— Chari à Fort-Lamy	$K_3 = 1,35$
— Oubangui à Bangui	$K_3 = 1,4$
— Sanaga à Edéa	$K_3 = 1,3$

Si l'on considère que, pour le Rhin à Bâle, $K_3 = 1,51$, pour le Rhône à Génissiat, $K_3 = 1,64$, pour la Seine à Paris, $K_3 \neq 4$ comme pour les cours d'eau méditerranéens, on voit que la réputation de régularité de ces cours d'eau tropicaux n'est pas usurpée. Encore doit-on les partager en deux catégories : les cours d'eau nettement tropicaux de transition avec K_3 compris entre 1,3 et 1,7 et les cours d'eau tropicaux purs avec K_3 compris entre 1,8 et 2,5 à moins que des plaines d'inondation immenses n'entraînent une régulation naturelle (cas du Chari à Fort-Lamy et du Nil à Assouan).

Dans l'ordre chronologique, les années fortes ou faibles se succèdent avec un certain parallélisme d'un cours d'eau à l'autre. Ce parallélisme étant d'autant plus frappant que l'année est plus sèche ou plus humide. L'année 1913, par exemple, est bien connue par sa sécheresse catastrophique pour tous nos grands fleuves tropicaux. L'année 1955 par son abondance. Nous avons, il y a quelques années, étudié les corrélations entre débits moyens annuels de cours d'eau « voisins » de cette zone tropicale : les coefficients de corrélation suivants ont été obtenus :

Corrélation Sénégal-Niger	$K = 0,89$
Corrélation Niger-Chari	$K = 0,55$
Corrélation Chari-Nil	$K = 0,72$

Ces valeurs sont significatives et même bonnes ou très bonnes pour le premier et le dernier coefficients. Cette corrélation résulte tout simplement du caractère que présente la « mousson » précoce ou tardive, abondante ou non sur tout le territoire qu'elle intéresse.

A cette notion de module ou de lame d'eau écoulée se rattache celle de déficit d'écoulement ou différence entre hauteur de précipitations annuelle et lame d'eau écoulée annuellement.

En régime tropical pur, ce déficit varie entre 700 et 1 000 mm avec la hauteur de précipitations annuelle. En régime tropical de transition, il varie généralement entre 1 100 et 1 300 mm, il peut descendre en dessous de 1 000 mm à plus de 1 200 m d'altitude.

Quelques régions peu étendues font exception à ces caractères de régularité : par exemple une zone couvrant le Nord-Est de la Côte d'Ivoire, le Nord du Ghana, le Centre du Togo et du Dahomey présente des hauteurs de précipitations nettement inférieures à 1 500 mm; immédiatement, le coefficient K_3 d'irrégularité inter-annuelle passe à des valeurs comprises entre 6 et 20. La distribution statistique des modules tend à ne plus suivre une loi de Gauss. On doit trouver des régions présentant les mêmes caractéristiques dans le bassin du Nil, au pied des plateaux d'Abyssinie.

IV. Crues

Les crues des petits cours d'eau peuvent être assez fortes du fait des intensités élevées des averses orageuses tropicales mais les débits spécifiques restent encore très en dessous des records mondiaux. On a calculé de façon systématique les crues de fréquence décennale pour un très grand nombre de petits bassins : ramenés à la superficie standard de 25 km², les débits de crues de cette fréquence semblent ne pas devoir dépasser 10 000 l/s.km², dans le cas de pentes fortes, de sol imperméable avec une couverture végétale assez faible. Les valeurs de cette crue décennale sont très variables entre les limites 300 l/s.km² et 10 000 l/s.km², toujours pour 25 km². Les facteurs les plus importants sont la perméabilité du sol et la pente; des diagrammes provisoires ont été établis pour permettre de tenir compte de leur influence sur les paramètres principaux des crues : coefficient de ruissellement et temps de montée, on en trouvera trois ci-contre (P est un indice de perméabilité, R un indice de pente, P₂ terrains imperméables, R₄ zones de collines, R₂ plaines).

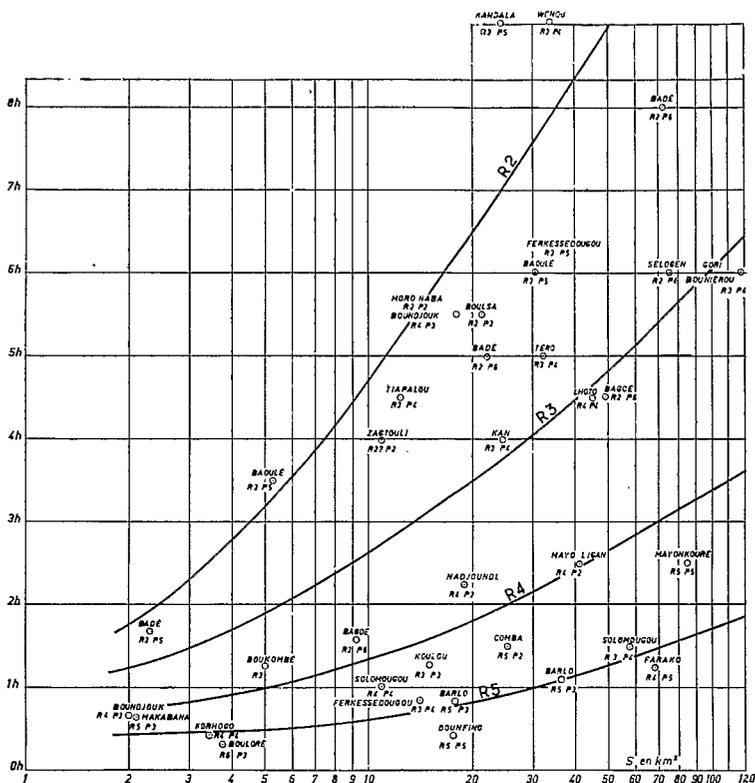


FIG. 9. — Régimes tropicaux et tropicaux de transition.
Temps de montée en fonction de R et de S.

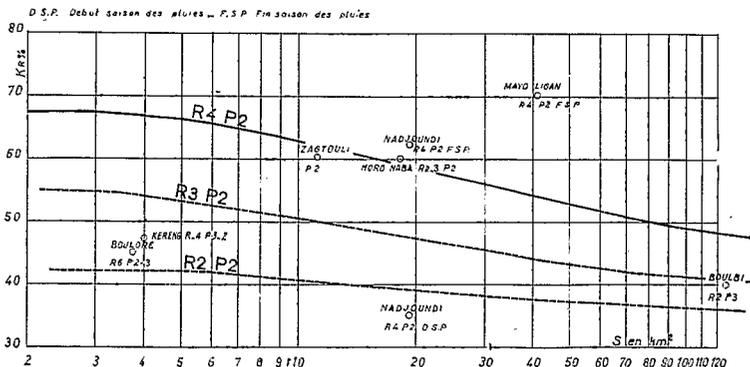
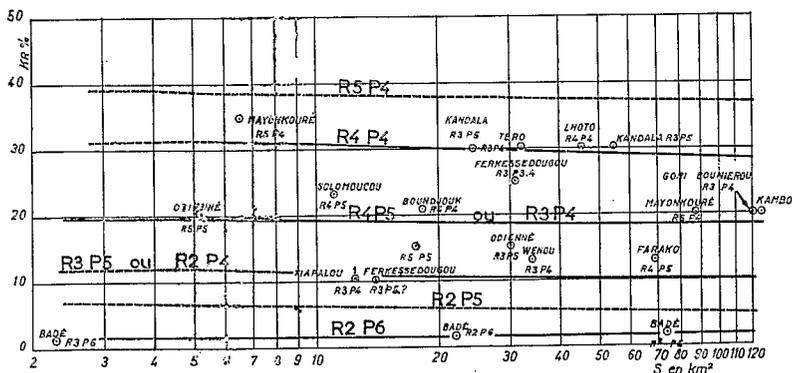


FIG. 10. — Coefficient de ruissellement.
Régimes tropicaux et tropicaux de transition (P varie de 800 à 1 600 mm).
Perméabilité P2.

La couverture végétale joue un rôle important : en régime tropical pur où sa densité varie beaucoup entre le début et la fin de la saison des pluies, les crues peuvent être nettement plus violentes au début qu'à la fin, mais la question est complexe car l'influence de la saturation du sol s'exerce en sens inverse.



1. Galerie épaisse

FIG. 11. — Coefficient de ruissellement.

Régimes tropicaux et tropicaux de transition (P varie de 800 à 1 600 mm).
Perméabilité P4 et P5.

La hauteur de précipitations annuelle est sans action lorsqu'elle varie peu : lorsqu'elle croît de 1 000 mm à 1 400 mm par an, les crues tendent à décroître; en effet, les averses ne sont pas plus intenses mais la couverture végétale naturelle est plus dense. La mise en culture accroît singulièrement les débits de crue, ils peuvent être multipliés par 2 pour un type d'agriculture traditionnelle, par plus pour une mise en valeur agricole « moderne » mal faite comme on en a fait autrefois la triste expérience aux États-Unis.

Pour les crues des grands cours d'eau (bassins de plus de 10 000 km²), la proportion de la surface du bassin occupée par des plaines ou des régions faiblement ondulées devient prépondérante (par suite des caractéristiques générales de cette partie de l'Afrique). Les singularités relatives à la constitution du sol se sont fondues dans un ensemble qui ne varie qu'assez peu d'un grand bassin à l'autre, tout au moins en ce qui concerne la perméabilité et la capacité de rétention; enfin, les plaines d'inondation ont joué leur rôle d'amortisseurs de crues. Il en résulte que celles-ci sont devenues modérées et varient relativement peu d'un régime à l'autre.

Si l'on considère la crue annuelle, on trouve des chiffres situés, en général, dans l'intervalle 20 à 90 l/s.km². Pour les quelques cours d'eau où les fortes pentes se maintiennent sur une grande partie de la surface du bassin et où les précipitations sont fortes : plus de 1 500 mm/an et souvent plus de 2 000 mm/an, on trouve des chiffres supérieurs à 100 l/s.km². En Guinée, le Konkouré présente des crues annuelles de 180 l/s.km² et on trouve plus de 150 l/s.km² pour le Wouri au Cameroun, mais ce cas n'est pas fréquent : il se limite à une partie du Fouta Djallon et de son prolongement vers le Libéria, une partie de la Dorsale camerounaise et de l'Adamaoua et peut-être certaines régions les plus accidentées de l'Abyssinie, mais les rivières dont les bassins s'étendent en altitude sur des plateaux à relief assez mou présentent des crues annuelles de débit inférieur à 90 l/s.km². Des cours d'eau aux bassins extrêmement plats et marécageux présentent, contrairement aux vrais cours d'eau de montagne, des débits beaucoup plus faibles : entre 1,5 et 8 l/s.km². On rencontre ces rivières dans le bassin supérieur de la Volta, sur certains affluents rive droite du Chari (Aouk par exemple), sur certains affluents et surtout sous-affluents du Nil.

En mettant à part ces conditions un peu exceptionnelles, les débits de crues sont surtout influencés, pour ces grands cours d'eau, par la hauteur de précipitations annuelle. La Guinée, l'Adamaoua présentent souvent des débits spécifiques de crues de 60 à 90 l/s.km². En général, les précipitations annuelles tendent à décroître, toutes choses restant égales par ailleurs, de l'ouest à l'est. Sur le haut bassin du Chari et de l'Oubangui, il semble que la perméabilité relative du sol et l'existence d'épaisses galeries forestières conduisent à de faibles débits de crues : 15 à 30 l/s.km².

Si, au lieu des crues annuelles, on considère les crues décennales, presque tous les grands cours d'eau ont des débits spécifiques compris entre 25 et 120 l/s.km². Pour les très grands cours d'eau, si on fait abstraction des zones sahéliennes et subdésertiques, on trouve souvent des chiffres voisins de 50 l/s.km². On peut faire les mêmes commentaires que pour les crues annuelles. On relève, en particulier, des débits spécifiques faibles de 20 à 40 l/s.km² pour les mêmes régions de la République Centrafricaine que plus haut.

Pour les crues de fréquence rare, on est amené à étudier la distribution statistique des crues et on retrouve là un des caractères de régularité que nous avons évoqués déjà à plusieurs reprises. En effet, si l'on considère la plupart des grands fleuves, on trouve sur les bassins supérieurs (branches mères ou premiers gros affluents), par exemple sur le Logone à Moundou, des distributions statistiques

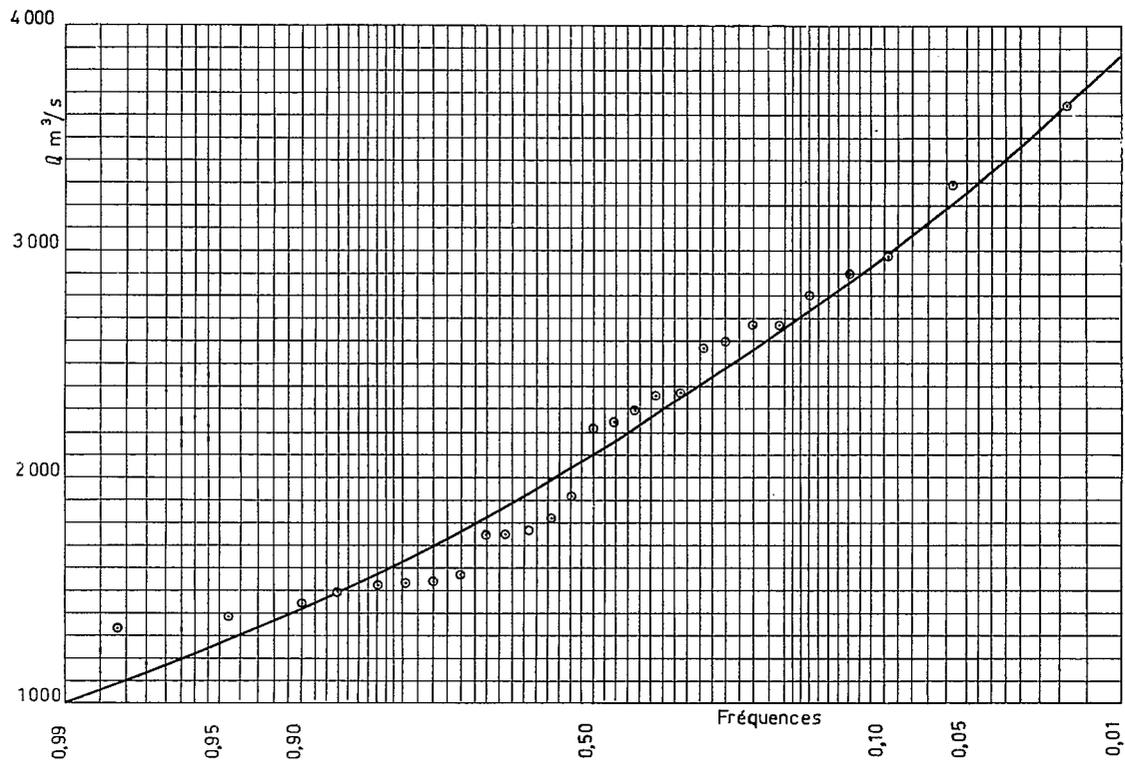


FIG. 12. — Le Logone à Moundou. Distribution statistique des maxima annuels

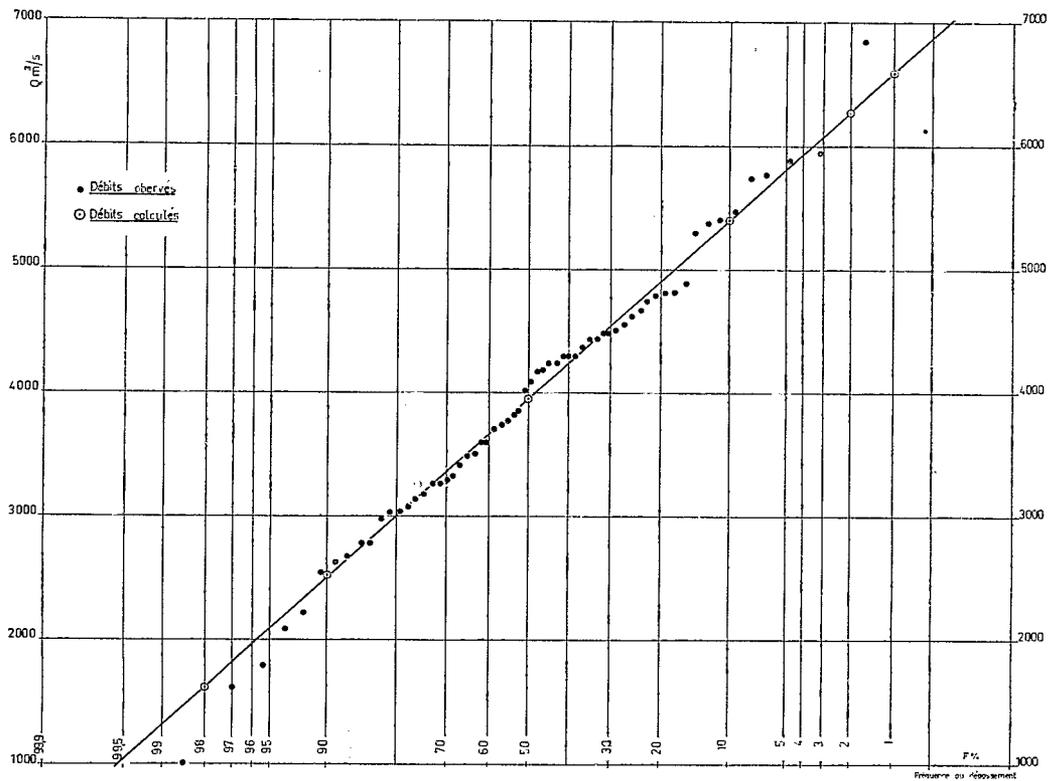


FIG. 13. — Le Sénégal à Kayes. Débits maximaux annuels (62 années)

de crues non symétriques par rapport à la valeur médiane, c'est-à-dire que, pour des fréquences complémentaires : par exemple 1/20 ou 19/20, on trouve des débits présentant par rapport à la médiane une plus grande différence pour le débit de fréquence 1/20 que pour le débit de fréquence 19/20, mais cependant cette dissymétrie est peu marquée : les crues ne croissent plus très vite lorsque leur fréquence diminue. Les relations mathématiques qu'on peut ajuster aux distributions naturelles sont celles de Goodrich ou de Pearson III. Quand le fleuve prend de l'importance, la régularité s'accroît, la dissymétrie disparaît et la distribution devient normale ou gaussienne. Indiquons, par exemple, pour des fréquences décroissantes, les débits successifs de cinq grands cours d'eau (en m³/s) :

	Crue médiane	Crue quinquennale	Crue décennale	Crue centenaire	Crue millénaire
Sénégal à Galougo. . .	4 000	5 000	5 400	6 600	7 700
Niger à Koulikoro. . .	6 200	7 300	8 000	9 700	11 000
Chari à Fort-Lamy. . .	3 800	4 500	4 880	5 700	
Oubangui à Bangui. . .	10 250	11 500	12 000	14 500	15 500?
Sanaga à Edéa.	6 620	7 200	7 420	7 900	8 200

Il arrive souvent que, vers l'aval, l'amortissement des crues par les plaines d'inondation soit tel que la courbe de distribution devient dissymétrique en sens inverse du sens habituel : les crues de fréquence 1/20 s'écartent moins de la médiane que les crues de fréquence 19/20. Dans certains cas, Logone et probablement Nil Blanc à la sortie du Sudd, les crues tendent rapidement vers une limite pratique, pour des fréquences centenaires peut-être. On trouve, en moins marquées, des distributions de ce genre pour certains fleuves du Cameroun. Ceci tient probablement à l'influence conjuguée du caractère particulier du régime des pluies et des épaisses galeries forestières.

Si l'on cherche à classer ces crues par rapport aux crues célèbres connues dans le monde, comme l'a fait Maurice Pardé et comme, à sa suite, nous avons essayé de le faire avec Jacques Francou, on trouve des valeurs très inférieures aux valeurs mondiales : par exemple, le coefficient K caractérisant les crues dans le diagramme à coordonnées logarithmiques pour les surfaces et les débits serait au maximum de 3,5. Plus généralement, il est compris entre 2 et 3 alors que les records mondiaux pour K sont voisins de 6. Or, pour

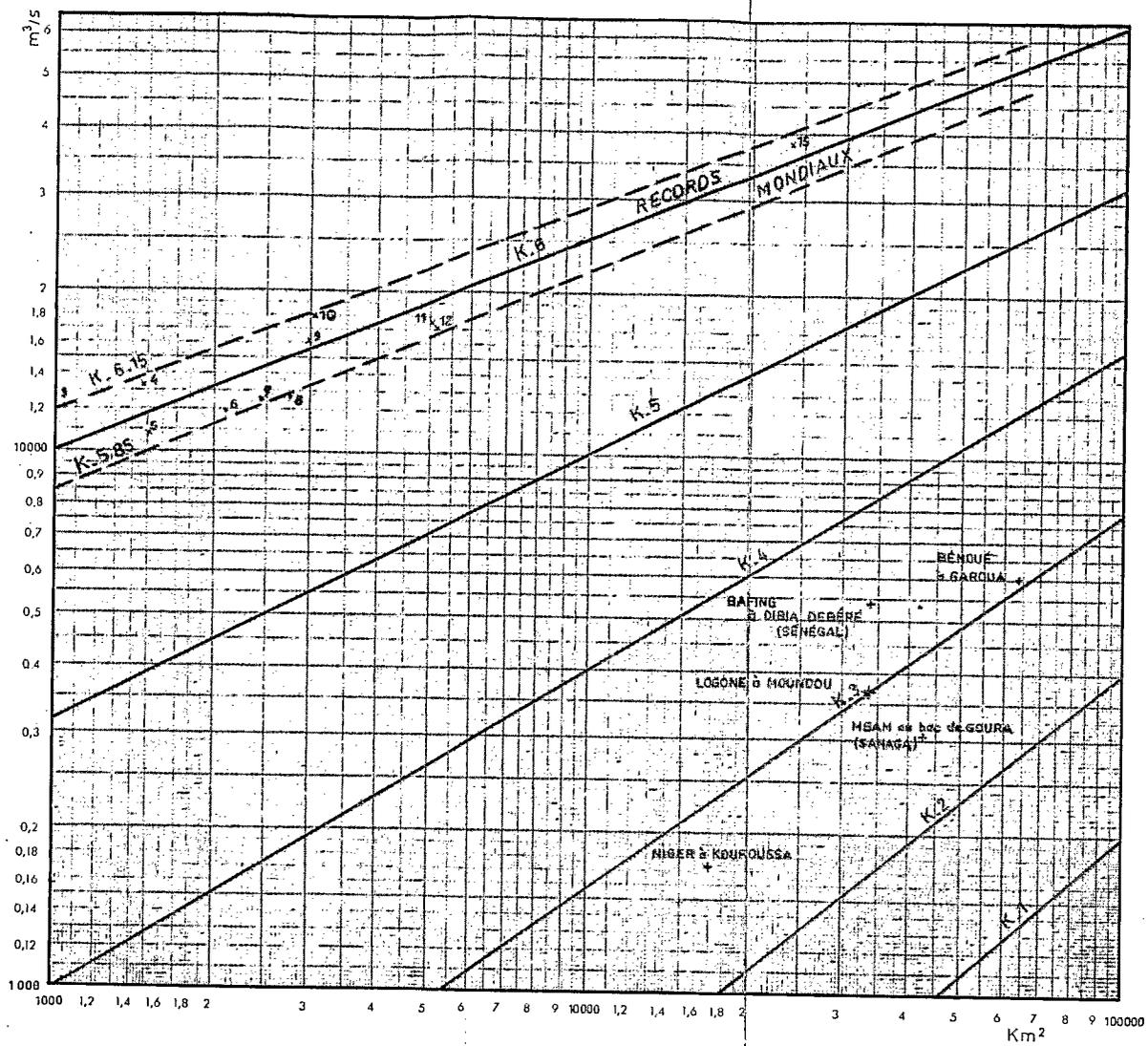


FIG. 14. — Diagramme de classification des crues maximales observées.

$$\text{Définition de } K : \frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{S}{S_0} \right)^4 - \frac{K}{10}$$

un bassin de 100 000 km², au coefficient $K = 3$, correspondent 7 700 m³/s et au coefficient $K = 6$, 63 000 m³/s. Ceci montre bien la valeur modérée de nos grandes crues tropicales d'Afrique. On doit cette situation privilégiée à l'absence de pluies cycloniques qui dans certaines régions tropicales d'Amérique du Nord, d'Asie et de l'océan Indien produisent des débits beaucoup plus élevés non seulement par l'abondance des pluies, mais par leur simultanéité sur de très grandes surfaces.

Font cependant exception les cours d'eau du Togo et du Dahomey pour lesquels les distributions statistiques sont très irrégulières, mais, comme d'ordinaire ils ne reçoivent pas de pluies très abondantes, les débits les plus élevés à craindre ne sont pas considérables en valeur absolue; par contre, ils contrastent fortement avec les valeurs observées en année normale.

V. Débits de basses eaux, étiages, courbes de tarissement

Le régime des basses eaux est étroitement lié aux conditions générales du tarissement qui suit la période de hautes eaux. Les principaux facteurs intervenant sont la durée de la période pratiquement sans pluie, la température de l'air pendant ces quelques mois de saison sèche, la nature du réseau hydrographique, la constitution du sol et la nature de la couverture végétale. Le régime des températures est le même sur d'immenses surfaces, seule l'altitude peut les diminuer sensiblement; d'autre part, pour un même mois, elles varient peu d'une année à l'autre, en général le facteur température joue peu (sauf en montagne).

Par contre, la durée de la saison sèche joue un rôle prépondérant. C'est la raison principale pour laquelle on observe une très nette différence entre les valeurs minimales des débits en régime tropical pur et en régime tropical de transition. Dans le premier régime, la période sans pluie dure environ 6 mois alors qu'elle dure beaucoup moins dans le second, parfois 3 mois.

Dans le régime tropical pur, la règle est l'annulation des débits apparents sur les petits, les moyens et une bonne partie des grands cours d'eau. Il reste un certain inféoflux dans les bancs de sable du lit, inféoflux qui est largement utilisé par les populations, mais ceci suppose une masse d'alluvions suffisante dans le profil en travers. Nous en parlons un peu plus loin. En général, bien avant la fin de la saison sèche, les réserves dans le sol (souvent imperméable)

sont nulles ou elles sont de trop faible importance pour alimenter le réseau hydrographique de façon sensible. Les réserves dans le lit majeur produisent souvent un très faible débit, de même que les réserves dans le lit apparent, comme nous venons de le voir. Bien entendu, il existe des sources, par exemple dans les grès ordoviciens, mais ces sources ne sont ni nombreuses ni abondantes. Sur les très grands fleuves, il y a souvent un très faible écoulement à l'étiage absolu, pour les raisons suivantes : il est bien rare que, sur des superficies de plus de 50 000 km², il n'y ait pas quelques sources, un ou deux lacs, et les restitutions du lit majeur et du lit apparent compensent parfois les pertes par évaporation. On donnera plus loin quelques chiffres.

Dans le régime tropical de transition, la saison sèche étant courte, à la fin de la saison, le réseau hydrographique a à peine fini de se vider, les nappes du sol alimentent effectivement les rivières. En particulier, à la base des sols ferrugineux tropicaux, qui couvrent une partie très importante de la zone que nous étudions, et des sols ferrallitiques qui couvrent une petite partie de la frange méridionale, il existe une nappe fournissant des débits non négligeables : 0,3 l/s.km² à 2 l/s.km². Les grès et les sols volcaniques de ces régions présentent des réserves souterraines qui n'ont pas le temps de s'épuiser avant la fin de la saison sèche, mais les sources abondantes restent rares, même les sources dans les roches éruptives de l'Adamaoua présentent des débits modérés. Le principal résultat est un régime à écoulement permanent, sauf pour certaines très petites rivières. En altitude, les débits d'étiages sont plus élevés par suite d'une saison sèche moins sévère et de températures plus faibles : il n'est pas rare de trouver des débits d'étiage de 4 l/s.km². On trouve plus dans certaines zones très arrosées mais leur extension est très faible.

Nous donnons, ci-après, les débits d'étiages absolus pour quelques grands cours d'eau :

Sénégal à Galougo-Gouina.....	3 à 5	m ³ /s
Niger à Koulikoro.....	32	—
Logone à Moundou.....	28	—
Oubangui à Bangui.....	910	—
Niger à Onitsha.....	1 500	—
Bénoué à Garoua.....	0,4	—
Volta à Akosombo.....	28	—
Chari à Fort-Lamy.....	180	—
Sanaga à Edéa.....	390	—

Les deux premiers cours d'eau sont presque de régime tropical pur, le débit d'étiage s'annule presque en année très sèche sur le Sénégal. L'Oubangui et la Sanaga sont bien arrosés et, en plus, ils drainent quelques zones équatoriales qui renforcent le débit. Quant au Niger près de son embouchure, le régime est tellement complexe que la saison des pluies des derniers affluents intervient quand les apports de saison humide du Niger supérieur rejoignent le bief inférieur, donc le débit minimal n'a plus de signification.

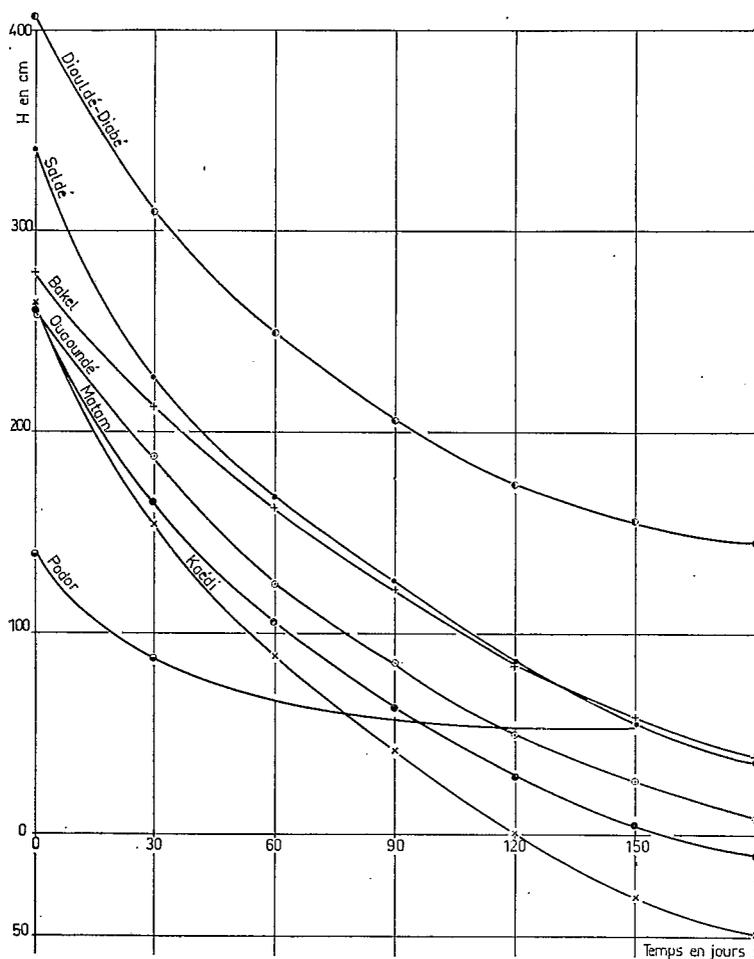


FIG. 15. — Courbes moyennes de tarissement

Les courbes de tarissement sont souvent fort régulières et quelques études isolées ont été faites. Cette courbe peut toujours être représentée par l'équation :

$$Q = Q_0 e^{-at}$$

où Q est le débit à l'instant t , Q_0 le débit à un instant donné t_0 , t le temps écoulé depuis t_0 .

Le coefficient a est assez souvent compris entre 0,016 et 0,020 pour les très grands bassins ($1/a$ est compris entre 50 et 62 jours), mais il est prématuré d'en déduire des règles générales.

En régime tropical de transition, le tarissement, troublé par quelques crues, est souvent moins net, mais il est cependant encore facile d'établir l'équation de la courbe.

Il serait très intéressant et pas trop difficile d'étudier les relations entre a , les températures moyennes diurnes et la constitution du sol : nous n'avons jamais eu le temps de le faire.

VI. Érosion, transports solides

C'est là une caractéristique hydrologique à aborder avec précaution. Tant que le sol est recouvert de sa végétation naturelle, sans feux de brousse, l'érosion est faible. Si les feux de brousse sont faits au bon moment, les dégâts ne sont pas très importants, mais dès que le sol est mis en culture, les averses très intenses produisent un entraînement très important des particules des couches superficielles du sol dissociées par le choc des gouttes de pluie; au nord de la zone tropicale, si les cultures traditionnelles sont faites sans précautions particulières, les pertes par érosion atteignent et dépassent 500 t/an/km² pour des superficies de 5 à 20 hectares. On doit trouver davantage pour des cultures mécanisées mal faites. Mais les superficies mises en culture sont de surface limitée, la majeure partie des matériaux érodés se dépose au bas des pentes sous forme de colluvions. Ce qui entre dans le réseau hydrographique se dépose en grande partie, dès les premiers confluent, dans les zones d'inondation et il reste assez peu de choses dans les fleuves par rapport à ce qui a quitté les zones cultivées (qui ne couvrent qu'une partie assez faible de la surface totale, le reste étant en jachère ou plus ou moins vierge). C'est pourquoi il est courant de trouver en crue des turbidités faibles, de 200 g/m³ au maximum, pour des fleuves ayant un bassin de 100 000 km². Si on suppose 100 g/m³ en moyenne

pour 120 000 km² et un volume annuel de 50 milliards de m³, on en déduirait une érosion spécifique de 42 t/an/km². On voit à ce propos la difficulté de l'estimation de l'érosion spécifique à partir des données des stations des grands cours d'eau. Ce cas particulier de forte érosion sur parcelles cultivées conjuguée avec des turbidités relativement faibles dans les rivières de quelque importance est absolument courant sur les bassins des grands fleuves tropicaux d'Afrique.

En conclusion, les grands cours d'eau tropicaux d'Afrique bénéficient, tout au moins ceux de l'hémisphère nord, de régimes hydrologiques dont certains caractères sont favorables à leur utilisation : périodes de hautes eaux se reproduisant tous les ans, débits moyens annuels variant relativement peu d'une année à l'autre, crues modérées, turbidité des eaux assez faible ne menaçant pas de comblement rapide les grands barrages. Par contre, l'irrégularité saisonnière et, en particulier, la sévérité des étiages imposent souvent une régularisation préalable avant utilisation des eaux.

Il conviendrait de ne pas étendre sans réserves ces propriétés du régime des eaux aux cours d'eau africains de l'hémisphère austral pour lesquels les conditions climatologiques générales ne sont pas les mêmes, malgré certaines ressemblances inévitables comme, par exemple, l'intensité des averses orageuses tropicales.

BIBLIOGRAPHIE

- H. E. HURST, P. PHILLIPS, R. P. BLACK, Y. M. SIMAIKA, *The Nile Basin* :
- Vol. I, HURST and PHILLIPS, *General description of the basin, meteorology, topography of the White Nile Basin*, Cairo, Government Press, 1931.
- Vol. II and Suppl., HURST and PHILLIPS, *Measured discharges of the Nile and its tributaries*, Cairo, Government Press, 1932.
- Vol. III and Suppl. 3, HURST and PHILLIPS, *Ten-day mean and monthly mean gauge readings of the Nile and its tributaries*, Cairo, Government Press, 1933.
- Vol. IV and Suppl. 3, HURST and PHILLIPS, *Ten-day mean and monthly discharges of the Nile and its tributaries*, Cairo, Government Press, 1933.
- Vol. V, HURST and PHILLIPS, *The hydrology of the Lake Plateau and Bahr El Jebel*, Cairo, Schindler's Press, 1938.
- Vol. VI and Suppl. 1, HURST and BLACK, *Monthly and annual rainfall totals and number of raining days at stations in and near the Nile basin*, Cairo, Schindler's Press, 1944.
- Vol. VII, HURST and SIMAIKA, *The future conservation of the Nile*, Cairo, S.O.P. Press, 1946.
- Vol. VIII, HURST, *The hydrology of the Sobat and White Nile and the topography of the Blue Nile and Atbara*, Cairo, Government Press, 1950.
- H. E. HURST, Y. M. SIMAIKA, R. P. BLACK, *The Nile Basin (last supplements) [Nile Control Department papers]*.
- NETHERLANDS ENGINEERING CONSULTANTS (NEDECO), *River studies and recommendations on improvement of the Niger and Benue*, The Hague, 1959.
- OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER (ORSTOM) (sous la direction de C. ROCHETTE), *Monographie du Sénégal* (en préparation). Disponible actuellement édition provisoire ronéotypée : 2^e partie « Les données d'observations hydrologiques » - Tome I : « Stations du Haut-Bassin » - Tome II : « Stations de la vallée ». - 3^e partie : « Analyse des éléments du régime hydrologique ». - 4^e partie : « Recueil de données numériques » (5 tomes), Paris, 1966.
- ORSTOM (sous la direction de P. TOUCHEBEUF de LUSSIGNY), *Monographie du Niger* (en préparation) - Disponible actuellement édition provisoire ronéotypée : Niger supérieur et bani (4 tomes) - Cuvette lacustre (4 tomes) - Niger moyen (4 tomes), Paris, 1958-1962.
- ORSTOM (sous la direction de A. BOUCHARDEAU, M. ROCHE et J. RODIER), *Monographie du Logone* (en préparation). Disponible actuellement édition provisoire ronéotypée : *Monographie hydrologique du Logone supérieur*, Paris 1953.; *Monographie hydrologique du Logone inférieur* et Suppléments, Paris, 1954-1958.
- J. A. RODIER, *Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo*, Paris, Gauthier-Villars, 1964.
- J. A. RODIER et C. AUVRAY, *Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km²*, Paris, ORSTOM, 1965.
- J. FRANCOU et J. A. RODIER, *Essai de classification des crues maximales observées dans le monde* (Communication présentée à la Commission pour l'étude des débits de la Société hydrotechnique de France, 9 mai 1967, et au colloque de Léningrad sur les crues et leur évaluation, 15-22 août 1967), Paris, EDF-ORSTOM, 1967.

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE
COMITÉ DES TRAVAUX HISTORIQUES ET SCIENTIFIQUES

BULLETIN
DE LA
SECTION DE GÉOGRAPHIE

TOME LXXX

ANNÉE 1967

Extrait

J. Rodier

Caractères généraux des régimes hydrologiques
des grands fleuves d'Afrique tropicale
dans l'hémisphère nord

PARIS
BIBLIOTHÈQUE NATIONALE
1969

B 13926