

**CARACTERES GENERALES des REGIMES HYDROLOGIQUES
des GRANDS FLEUVES d'AFRIQUE TROPICALE
dans l'HEMISPHERE NORD**

par J.A. BOUIER

Conseiller Scientifique à ELECTRICITE de FRANCE

Chef du Service Hydrologique de
l'OFFICE de la RECHERCHE SCIENTIFIQUE et TECHNIQUE OUTRE-MER

Au moment où les hydrologues de l'ORSTOM et de l'EDF achèvent trois importantes monographies concernant le SENEGAL, le NIGER et le LOGONE, monographies qui viennent compléter les travaux remarquables de H.H. 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 km environ, de SAINT-LOUIS du SENEGAL aux Hauts Plateaux de l'ETHIOPIE 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 jaugeages aménagés 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 en JORDAN et en EGYPTES 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 50 ans et de relevés beaucoup plus nombreux sur 15 à 20 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 levés 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, permettent une étude satisfaisante du régime des pluies, tant au moins sur les grands bassins.

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 de RÈGIME :

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

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 "le mousson" d'Afrique. Le déplacement régulier des masses d'air humide équatoriales du Nord au Sud de Janvier à Juin, puis du Sud au Nord de Septembre à Décembre et, par suite, celui du Front Inter-tropical qui sépare ces masses d'air de l'air continental bordal, 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 orages se succèdent ainsi régulièrement, tout au moins dans les régions tropicales, jusqu'au retour du Front Inter-tropical dans son déplacement vers le Sud qui marque la fin de la saison des pluies. Sauf sous les latitudes relativement élevées des régions sahéliennes, le 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 mm d'eau par an, alors que l'évapotranspiration potentielle est au maximum de 1 400 mm pour le sol dans ces régions. Or, la saison des pluies ne dure que 5 ou 6 mois au maximum. Il y a donc, en année moyenne, un excédent des précipitations de plusieurs centaines de mm sur l'évaporation. Il en résulte que les pertes par évaporation varient très peu d'une année à l'autre, les fluctuations inter-annuelles des précipitations annuelles ne conduisent pas à des variations trop explicites des écoulements qui en résultent, ainsi 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-Ouest du MEXIQUE par exemple, où les saisons des pluies sont moins régulières et l'excédent des précipitations moins marqué, l'irrégularité intermittente des volumes écoulés dans les cours d'eau est très grande, ce qui entraîne des conséquences désastreuses.

En général, les premières averse 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 averse 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 5 mois 1/2. Elle est plus courte plus au Nord. Les averse sont constituées, en grande partie, par des averse orageuses dont la partie intense dure de 30 minutes à 1 h.30 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 30 à 40 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 torrents surviennent donc de fortes crues.

La hauteur de champs 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 présentent, pour cette raison, un caractère très marqué d'hétérogénéité, les données obtenues se prêtent à des transitions faciles sur de très grandes distances si la configuration de 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 les Colorado en Avril) et à un tarissement prolongé des rivières qui peuvent donner lieu à des sécheresses 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 averse rencontrent alors des conditions assez voisines des averse d'été au MEXIQUE, 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 caractéristiques de la géographie physique des bassins est la faible pente. Les massifs montagneux : FOUTA DJALLI et massif sénouso, dévalent entre CASAMANCE et GUINÉE, plateaux d'AMBOSSIM, ne sont pas absents de cette zone mais ils occupent une superficie assez limitée ; en outre, ils sont souvent étagés de telle façon qu'ils ne constituent qu'accidentellement à des régions torrentielles. Un bon exemple est fourni par le plateau de l'ADAMASSIA. Sur ce plateau, les rivières ont un cours assez parcouru avec un débit non négligeable de débitages, mais elles descendent par une série d'avalanches 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.

Conjugués avec une couverture végétale de densité non négligeable, ces faibles pentes conduisent à des débits de crues assez réduits dès que la superficie du bassin dépasse quelques milliers de km². En effet, la végétation naturelle est généralement constituée par une couche boisée plus dense au sud et à mesure que l'on descend vers le sud, avec une certaine tendance à passer à la prairie en altitude. Les 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'OUANGUI.

La mise en culture favorise l'écoulement et l'érosion, surtout si elle est négligée et conduite de façon peu rationnelle. Mais la culture moderne constitue une exception. En outre, la culture traditionnelle nécessite des jachères de plusieurs années : parfois plus de 10 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 zones karstiques et très peu de schistes assez perméables que les schistes bédouliens, par exemple, à l'ouest du CONGO ; ce que l'on trouve, ce sont des sols lamellaires 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 rencontres de dépôts éoliques 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. 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 coule du Sud vers le Nord, rencontrant des pentes de plus en plus faibles. Au voisinage de la zone sahélienne, la dénivellation hydrographique se produit avec succession de défilés, de plaines d'inondation de plusieurs dizaines de kilomètres de largeur où les pertes par évaporation sont énormes : les deux exemples les plus typiques sont le delta intérieur du Niger, la Méopotamie tchadienne, les marais du SUD sur le NIL Blanc.

II - VARIATIONS SAISONNIÈRES 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 5 mois avec une saison sèche dont la période sans pluie dure 3 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'appartiennent qu'à 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 crues sont plus fréquentes, le sol reste relativement humide entre les crues, le régime hydrographique est en eau, les crues se renouvellent et sont plus fortes qu'au début de la saison des pluies. Cependant, la croissance de la végétation cause un certain freinage, sur les très petits bassins les sources 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'OURAHOU), les débits commencent à décroître, c'est le début de tarissement.

L'hydrogramme se déforme de l'ouest vers l'est. 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 composé 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 BENUE à GARGUA. Si le cours d'eau collecteur coule vers le Sud, c'est uniquement le cas de la SAHARA et de l'OUBANGUI ainsi que des affluents de la BENUE inférieure. Les pointes de crue de Mai, Juin et Juillet se conservent, donnant lieu à une "dentelle accentuée".

Néanmoins, 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 crue et d'étiage.

III - DEBETS MOYENS ANNUELS et leurs VARIATIONS INTER-ANNUELLES :

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.km², on peut utiliser le volume annuel en millions de m³/km² ou, en m, 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 trouve ainsi pour le NIGER moins de 1 l/s.km², pour le CHARI à FORT-LAMY, un peu plus de 2 l/s.km² alors que pour la SAHARA, le module spécifique vers l'embouchure est de 16 l/s.km². C'est que les régions 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, sahariennes et sahélo-sahariennes 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 : SENEGAL, NIGER, CHARI et NIL, sont faussés par la prise en compte de ces régions plus ou moins arides. Le jugement peut être également faussé par la prise en compte de débits provenant de zones équatoriales : ceci n'intervient que pour le NIGER pour lequel la situation est suffisamment complexe pour justifier quelques explications : le NIGER BLANC apporte, par an, une dizaine de milliards de m³ (après en avoir perdu autant dans le SAHARA), le NIGER NOIR, le NIGER et l'ATARA, cours d'eau tropicaux, en apportent six fois plus donc l'influence équatoriale est faible et l'hydrogramme, à la sortie des marais du SAHARA, est extrêmement plat. Par contre, les trois autres branches ou affluents exportent des parties notables de leur bassin en zone sahélo-saharienne ou sahélo-saharienne.

Si l'on considère des stations ne couvrant aucune portion de bassin fluvial, subséquent ou schifano ou si on effectue les corrections correspondantes, on arrive aux résultats suivants dans le tableau suivant :

	Module m ³ /s	Module spécifique l/s.km ²
SENEGAL à GALOUZO - GOUINA	680	5
NIGER (SUDAN) à NGULNERO	1 550	13
NIGER à CAROTA	375	6
NIGER à NIENGO	400	11,5
CHARI (SUDAN)	300	(4)
CHAD à BAKELI	(4 300)	8,5
NIL BLU	(1 600)	(7,5)
GAMBIE à NIKA	2 150	(16)
VOLTA à ANKORO	1 100	(4)

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

• SENEGAL	: 770 m ³ /s
• NIGER	: 7 000 m ³ /s
• CHARI	: 1 225 m ³ /s
• NIL à ASSOUAN	: 2 820 m ³ /s (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 3 mois 1/2 à 4 mois avec saisons sèche longue et sèche et le régime tropical de transition pour lequel les pluies durent 5 mois environ. Tous les cours d'eau présentés dans ce tableau ont en moins une partie de leur haut bassin dans la zone de régime tropical de transition, le reste du bassin correspondant 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 SENEGAL à GAMBIE, la NIGER à GAOUVA ont presque tout leur bassin en régime tropical pur ; la VOLTA, le CHARI et le NIL BLEU en ont une bonne partie. Le SAHARA, au contraire, a tout son bassin dans la zone tropicale de transition, l'OURAL une très grande partie. On constate donc, et ceci est vérifié par les modules d'un grand nombre de stations constituant des bassins moins importants, qu'en régime tropical de transition, les modules varient de 2 l/s.km² à 22 l/s.km². Si on considère des petits cours d'eau très diversifiés 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 1 000 mm ou plus plus de 2 000 mm par an.

Pour le régime tropical pur, on trouve entre 2,5 et 5 l/s.km² mais certaines cours d'eau en plaine, avec hydrographie très dégradée, peuvent donner beaucoup moins : on trouve 0,75 l/s.km² pour l'AGUL, 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 valable générale, ce qui ne doit pas être impossible à trouver.

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

On peut représenter l'irrégularité interannuelle par le coefficient de variation mais un autre coefficient est plus parlant : c'est le rapport K_2 entre le module le plus humide qui se reproduit en moyenne tous les 20 ans et le module le plus sec de même fréquence. On trouve les valeurs suivantes :

- SENEGAL	$K_2 = 2,49$
- NIHER à NIGERINO	$K_2 = 1,97$
- INHÉRE à GAMBIA	$K_2 = 1,83$
- NIEL à ASSOUAN	$K_2 = 1,69$
- LOUHÉ à NOUNOU	$K_2 = 1,57$
- CHARI à FORT-LAMY	$K_2 = 1,35$
- OUBANGUI à BANGUI	$K_2 = 1,4$
- SAMBÈ à NIHA	$K_2 = 1,3$

Si l'on considère que, pour le NIHER à BANGUI, $K_2 = 1,51$, pour le NIHER à OUBANGUI, $K_2 = 1,64$, pour la SENÈ à PARIS, $K_2 \neq 1$ 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 2 catégories : les cours d'eau méditerranéens tropicaux de transition avec K_2 compris entre 1,3 et 1,7 et les cours d'eau tropicaux purs avec K_2 compris entre 1,8 et 2,5 à moins que des plaines d'inondation basses n'entraînent une régularisation naturelle (cas du CHARI à FORT-LAMY et du NIEL 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 se sent d'autant plus frappant que l'année est plus sèche ou plus humide. L'année 1913, par exemple, est bien connue par son caractère catastrophique pour tous nos grands fleuves tropicaux. L'année 1955 par son abondance. Deux ans, 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 SENEGAL-NIHER	$K = 0,67$
- " " NIHER-CHARI	$K = 0,55$
- " " CHARI-NIEL	$K = 0,72$

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 "saison" présente en tantive, abondante en son sur tout le territoire qu'elle inonde.

A cette notion de module ou de loss d'eau écoulée se rattache celle de déficit d'écoulement ou différences entre hauteur de précipitations annuelle et loss 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-Ouest de la GAMBIE d'IVOIRE, le Nord du GUINÉE, le centre du TOGO et du BÉNIN présente des hauteurs de précipitations nettement inférieures à 1 500 mm ; immédiatement, le coefficient K d'irrégularité interannuelle 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 NIGER, au pied des plateaux d'AFRIQUE.

IV - CRUES :

Les crues des petits cours d'eau peuvent être assez fortes du fait des intempéries locales des zones montagneuses tropicales mais les débits spécifiques restent encore très en dessous des records mentionnés. On a calculé de façon systématique les crues de fréquence décennale pour un très grand nombre de petits bassins : ramené à la superficie standard de 25 km², les débits de crue 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 prévisionnels ont été établis pour permettre de tenir compte de leur influence sur les paramètres principaux des crues : coefficient de ruissellement et temps de module, on en trouvera trois ex-emplo. (P est un indice de perméabilité, B un indice de pente, P₂ terrains imperméables, H, zones de collines, K₂ plaines).

La couverture végétale joue un rôle important : en régime tropical pur et en décadité 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 de sol s'exerce en sens inverse.

La hauteur de précipitations annuelle est sans action journalière sur le ruissellement : lorsqu'elle croît de 1 000 mm à 1 400 mm par an, les crues sont plus fortes et plus nombreuses : en effet, les sources ne sont pas plus intenses mais la couverture végétale naturelle est plus dense. La mise en culture accroît singulièrement les débits de crues, 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 quelquefois la triste expérience aux ETATS-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 ne sont fortes dans un ensemble qui se varie quelque 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 élevés, 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 par an, on trouve des chiffres supérieurs à 100 l/s.km². En GUINEE, le NIGER présente des crues annuelles de 100 l/s.km² et on trouve plus de 150 l/s.km² pour le VOLTA au GAMBIE, mais ce cas n'est pas fréquent : il se limite à une partie du FOUTA DJALLON et de son prolongement vers le LEBERIA, une partie de la dorsale cameronienne et de l'ETHIOPIE et peut-être certaines régions les plus occidentales de l'ANGOLA, mais les rivières sont les bassins n'étant en altitude sur des plateaux à relief assez peu prononcé des crues annuelles de débit inférieur à 90 l/s.km². Des cours d'eau sur bassins extrêmement plats et marécageux présentent, contrairement aux vifs 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 (AGUK 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. Le CHARI, l'ETHIOPIE 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

MOYENNES, il semble que la perméabilité relative du sol et l'existence d'épaves 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 décaennales, presque tous les grands cours d'eau ont des débits spécifiques compris entre 25 et 125 l/s.km². Pour les très grands cours d'eau, si on fait abstraction des crues subfluviales et subfortiques, on trouve souvent des chiffres voisins de 50 l/s.km². On peut faire les mêmes constatations que pour les crues annuelles. En somme, on trouve, 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 évoqué déjà à plusieurs reprises. En effet, si l'on considère la plupart des grands fleuves, en tenant sur les bassins supérieurs (branches-cônes ou premiers gros affluents), par exemple sur le **LOGBE** à **MOUMBI**, les distributions statistiques de crues sont cycloïdiques par rapport à la valeur médiane, c'est-à-dire que, pour des fréquences cycloïdiques : 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 établir avec distributions normales sont celles de **MOUMBI** ou de **PLAQUE III**. Quant 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 5 grands cours d'eau (en l/s) :

	Crue : médiane	Crue : quinzeième	Crue : dixième	Crue : cinquième	Crue : centième	Crue millénaire
MOUMBI à GALEND	4 000	5 000	5 400	6 600	7 700	
MOUMBI à MOUMBI	6 200	7 300	8 000	9 700	11 000	
MOUMBI à MOUMBI	5 000	4 500	4 000	5 700		
MOUMBI à MOUMBI	10 200	11 500	12 000	14 500	15 500	
MOUMBI à MOUMBI	6 600	7 200	7 400	7 900	8 200	

Il arrive souvent que, vers l'avril, l'écartement des crues par les pluies d'insémination soit tel que la courbe de distribution devienne dissymétrique au sens inverse du sens habituel : les crues de fréquence 1/20 s'écarteraient moins de la médiane que les crues de fréquence 19/20. Dans certains cas, LOUIS et probablement MEL HARK à la sortie du SUD, les crues tendent rapidement vers une limite pratique, pour des fréquences centennales peut-être. On trouve, en moins nombreuses, des distributions de ce genre pour certains climats du CAMEROUN. Ceci tient probablement à l'influence conjuguée de certains particularités du régime des pluies et des épaves galeries forestières.

Si l'on cherche à classer ces crues par rapport aux crues ordinaires connues dans le monde, comme l'a fait Maurice PARDÉ et ceux, à sa suite, mais sans excepté de le faire avec Jacques FRANCK, on trouve des valeurs très inférieures aux valeurs normales : 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 normaux pour K sont voisins de 6. Or, pour un bassin de 100 000 km², un coefficient K = 3, correspondrait 7 700 m³/s et un coefficient K = 6, 63 000 m³/s. Ceci montre bien la valeur médiocre 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'OCÉANIE 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 crues d'eau du YUCCO et du DANUBE pour lesquels les distributions statistiques sont très irrégulières, mais crues d'ordinaire. Ils ne requièrent 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 années normales.

V - REGIME DES HAUTES EAUX - ETAGES - COURSES DE L'AMONT :

Le régime des hautes eaux est strictement lié aux conditions générales du torréfaction 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 relief topographique, la constitution du sol et la nature de la couverture végétale. Le régime des températures est le même sur d'immenses surfaces, mais l'altitude peut les diminuer considérablement ; 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).

Pour certains, la durée de la saison sèche sous un ciel profondément bleu est la raison principale pour laquelle on évacue une très nette différence entre les valeurs relatives des débits en régime tropical par 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 pluie est l'annulation des débits apparents sur les petites, les moyennes et une bonne partie des grandes cours d'eau. Il reste un certain inféodé dans les basses de sable du lit, inféodé que qui est largement utilisé par les populations, mais ceci suppose une masse d'alluvions suffisamment dans le profil en travers. Dans ce parlons un peu plus loin, de général, bien avant la fin de la saison sèche, les réserves dans le sol (sovent importante) sont nulles ou elles sont de trop faible importance pour alimenter le réseau hydrographique de façon normale. Les réserves dans le lit ne pour produisent souvent un très faible débit, de même que les réserves dans le lit agissent, comme nous verrons de la voir. Bien entendu, il existe des sources, par exemple dans les grès orthoclinaux, mais ces sources ne sont ni nombreuses, ni abondantes. Sur les très grands fleuves, il y a souvent un très faible déclinement à l'échelle élevée, pour les sections 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 rivières du lit majeur et du lit apparemment prennent parfois les pertes par évaporation. On donne plus loin quelques autres.

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 rivières du sol alimentent effectivement les rivières. En particulier, à la base des sols ferrugineux tropicaux, qui couvrent une partie très importante de la zone qui nous intéresse, et des sols ferrallitiques qui couvrent une petite partie de la frange méridionale, il existe un type fourmillant des débits non négligeables : 0,3 l/s.km² à 2 2/3 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 granitiques de l'ADRIATICA présentent des débits modestes. Le principal résultat est un régime à écoulement permanent sans pour certains très petites rivières. En altitude, les débits d'élevage 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'élevage de 4 l/s.km². On trouve plus dans certains zones très arides mais leur extension est très faible.

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

→ SENEGAL à GAMBODO-GOJINA	:	3 à 5 m ³ /s
→ NIGER à BOULIBREDO	:	32 m ³ /s
→ LOKOLE à NEUNDOU	:	28 m ³ /s
→ OUBANGUI à BANGUI	:	910 m ³ /s
→ NIGER à CHERRHA	:	1 500 m ³ /s
→ NERKHE à GANOUA	:	0,4 m ³ /s
→ VOLTA à ANOSCHOU	:	28 m ³ /s
→ CHARI à POPE-LANY	:	100 m ³ /s
→ SAHARA à ENNA	:	390 m ³ /s

Les deux premiers cours d'eau sont presque de régime tropical pur, le débit d'étiage est annuel presque en saison très sèche sur le SENEGAL. L'OUBANGUI et la SAHARA 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 sèche du NIGER Supérieur rejoignent le bief inférieur, donc le débit minimal n'a plus de signification.

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, Q₀ le débit à un instant donné t₀, t le temps écoulé depuis t₀.

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 préférable 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 semblerait très intéressant et pas trop difficile d'étudier les relations entre α , 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 pluies 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/ha 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 collutions. 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 souvent de trouver en crue des turbidités faibles, de 300 g/m³ en moyenne, 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/ha. 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 médiocres, turbidité des eaux assez faible ne nécessitant pas de combler les rapides les grands barrages. Par contre, l'irrégularité saisonnière et, en particulier, la sévérité des étages 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 aversea orageuses tropicales.