Grands Bassins Fluviaux, Paris, 22-24 novembre 1993

LE REGIME HYDROLOGIQUE DU NIGER SUPERIEUR ET LE DEFICIT DES DEUX DERNIERES DECENNIES

J.C. OLIVRY, J.P. BRICQUET, F. BAMBA & M. DIARRA

RESUME :

Troisième fleuve d'Afrique, le Niger a un bassin supérieur qui totalise, avec celui du Bani, 250 000 km^2 à l'amont de la Cuvette lacustre. Le régime hydroclimatique du Niger supérieur est bien connu, les observations sur les débits à Koulikoro remontant au début du siècle. Les précipitations varient de plus de 1500 mm an^{-1} dans les montagnes de Guinée à environ 200 mm an^{-1} dans le delta intérieur. Les chroniques de débits permettent de suivre l'hydraulicité du fleuve et montrent un appauvrissement de la ressource en eau depuis deux décennies de déficits pluviométriques. Le volume annuel écoulé a diminué de 20% pendant la décennie 70 et de 46% pendant la décennie 80. Cet appauvrissement durable, en dépit de déficits pluviométriques moins importants, est lié à un amenuisement des ressources souterraines mis en évidence dans l'observation d'une phase de tarissement nettement plus rapide au cours des dernières années. Cette contribution réduite de l'écoulement de base à l'hydrogramme de crue explique aussi la persistance de faibles maximums annuels.

ABSTRACT :

The Niger river is the third largest African river. The upper Niger is defined before the inner delta at the station of Koulikoro. In addition with the Bani river, its surface basin is of 250 000 km^2. The Niger rivers flows from the humid Guinean mounts (annual precipitations more than 1500 mm year^{-1}) to the semi-arid areas (precipitations less than 200 mm year^{-1}). Hydrological and climatic parameters are defined on the Niger basin. African drought and rainfall deficits observed during the last twenty years had important repercussions on the runoff of the Niger river (annual deficit of 20% during the 70's and of 46% during the 80's). During the last few years, the rainfall deficits have been less important but the runoff kept on decreasing. A large reduction of the groundwater storage, shown in the study of the yield recession curves, explains the persistant degradation of the hydrological resource and also the lower values of the annual floods.

INTRODUCTION

Issu de la Dorsale Guinéenne qui sépare la Moyenne Guinée et la Guinée Forestière de la Sierra Léone et du Libéria, le Niger, troisième fleuve d'Afrique par sa longueur (4200 km) s'écoule suivant une direction générale Nord-Est jusqu'aux confins du Sahara. Il décrit une grande boucle dans sa traversée des régions sahéliennes et subdésertiques où il perd dans la cuvette lacustre une bonne part de ses apports hydriques avant de retrouver la route de l'océan au fond du golfe de Guinée où son régime est devenu tout à fait original pour la région. M. Pardé (1933) l'a décrit ainsi : *"Le bas Niger, par sa courbe à deux maxima, fait croire à une alimentation double, et c'est une impression fausse. En réalité, dans tout son bassin, ce fleuve ne connaît qu'une seule et même période pluvieuse, celle de l'été tropical. Mais les particularités du tracé en plan et du profil en long et en travers dédoublent curieusement la saison des hautes eaux... Le Niger sénégalien vers Bamako et le tronçon inférieur en aval de Say éprouvent à la fois une crue saillante d'été avec maximum de septembre. Mais le volume liquide mis en mouvement sur le cours supérieur s'attarde bientôt à l'excès, et s'épuise en partie par évaporation et infiltration, avant le coude de Tombouctou, à cause de l'insignifiance de la pente et de l'énormité du champ d'inondation où les eaux s'étalent et s'immobilisent presque. Le flot principal, qui est passé à Koulikoro vers le 25 septembre en moyenne, arrive à Tombouctou seulement vers le 1er janvier; puis il ne franchit Niamey, très aplati, que vers le 2 février, donc six mois après les pluies qui l'ont produit. Sur le bas Niger cette crue sénégalienne,* ***ralentie de façon nulle par ailleurs constatée sur le globe****, ne participe pas à l'intumescence locale d'été ; mais elle freine la baisse des eaux, à partir de novembre ou de décembre ; elle finit même par prendre l'avantage sur elle et par provoquer une montée graduelle jusqu'à un maximum de mars bien inférieur à celui de septembre. C'est l'exemple le plus grandiose de l'influence que*

peuvent exercer les conditions d'écoulement dues au relief sur le régime des eaux courantes." (Fig. 1).

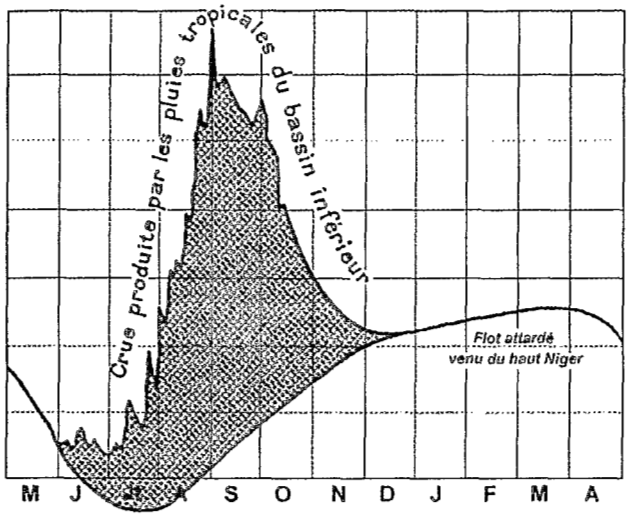

Figure n°1

Exemple de limnigramme du Niger à son arrivée dans le delta maritime ; 1 carreau correspond à 1 mètre de hauteur d'eau ; d'après Pardé 1933.

1 - HYDROLOGIE DU NIGER SUPERIEUR

Le Niger supérieur a un régime tropical plus classique. Le Haut-Niger reçoit sur le territoire guinéen en amont de Siguiri trois affluents importants : le Tinkisso, le Niandian et le Milo puis parvenu au Mali, il reçoit à l'amont de Bamako, le Sankarani d'origine essentiellement guinéenne. Le Niger ne reçoit plus ensuite que des affluents mineurs jusqu'à son confluent avec le Bani à Mopti dont le bassin versant est à peine plus petit que celui du Niger supérieur. (Fig. 2).

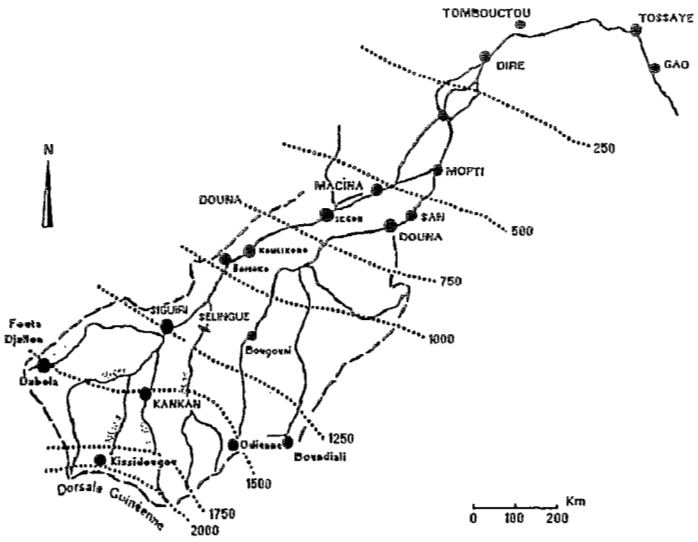

Figure n°2

Bassin supérieur du Niger et isohyètes interannuelles en mm

La durée et l'abondance plus ou moins grandes des précipitations et l'extension des différentes zones climatiques intéressant le bassin du Niger supérieur permettent de distinguer :

* **Le domaine guinéen** qui concerne les têtes de bassin du Niger et de ses affluents. Le climat tropical de transition est appelé ici climat guinéen ; les précipitations annuelles sont supérieures à 1500 mm.
* **Le domaine sud-soudanien** correspondant au climat tropical pur. Il est centré sur Siguiri-Bougouni-Sikasso. Les précipitations annuelles sont comprises entre 1000 et 1500 mm.
* **Le domaine nord-soudanien** qui constitue une variante plus sèche avec des précipitations comprises entre 750 et 1000 mm.
* **Le domaine sahélien**, avec des précipitations comprises entre 400 et 750 mm et réparties sur 3 à 4 mois, qui intéresse les régions de Ségou, Mopti et la partie sud de la cuvette lacustre.
* **Le domaine subdésertique**, recevant autour de 250 mm de précipitations (150 - 400 mm) réparties sur les 3 mois d'été, qui intéresse la majeure partie de la cuvette lacustre.

Pour toutes ces régions climatiques, la saison des pluies est centrée sur le mois d'août (Fig. 3).

Tableau 1 :

Quelques caractéristiques climatiques du bassin du fleuve Niger

	Guinée			Mali			
Paramètres	Macenta	Kankan	Siguiri	Bamako	Ségou	Mopti	Tombouctou
T° moy. ann.	24.0	26.0	26.9	28.5	28.6	27.7	29.1
T° x mois (x)*	(3)34.6	(3)36.2	(3)38.0	(4)39.4	(4)41.2	(5)40.0	(5)43.2
T°n mois (n)*	(12)14.0	(12)14.2	(1)13.8	(1)17.6	(1)15.4	(1)14.0	(1)13.0
Üx ann% **	96	90	85	73	74	75	54
Ün ann% **	58	45	39	33	32	31	21
1/2 (Üx+Ün) % mars	69	51	40	26	31	30	21 (avril)
1/2 (Üx+Ün) % août	85	82	81	79	80	78	68
P (Précipitations interannuelles) mm	2100	1508	1250	985	650	415	180
Nbre de mois secs ***	1 à 2	4 à 5	6	7	8	8 à 9	10

* Entre parenthèses, le numéro du mois de température maximum (x) et minimum (n)

** Üx et Ün sont respectivement les humidités relatives moyennes annuelles maximale et minimale ; (Üx + Ün)/2 correspond aux humidités relatives moyennes du mois le plus sec (mars) et du mois le plus humide (août).

*** Suivant la définition de Gaussen, un mois est dit sec lorsque Pmm < 2T°C.

La chronique des débits du Niger constitue avec celle du Sénégal à Bakel, l'information intégrée la plus complète que l'on ait sur les variations hydroclimatiques de l'Afrique de l'Ouest depuis le début du siècle. La première station hydrométrique du fleuve Niger a été installée à Koulikoro en 1907 ; le bassin versant du Niger couvre à cette station une superficie de 120 000 km² dont seulement un cinquième au Mali. Le débit moyen interannuel calculé sur 83 ans est de 1420 $m^3 s^{-1}$ soit un module spécifique (ramené à l'unité de surface) de 11,8 $l s^{-1} km^{-2}$. Avec une hauteur de précipitation interannuelle estimée à 1600 mm et une lame d'eau écoulée de 370 mm, le coefficient d'écoulement moyen atteint 23% ; la reprise par évaporation serait de 1230 mm (Brunet - Moret et al, 1986).

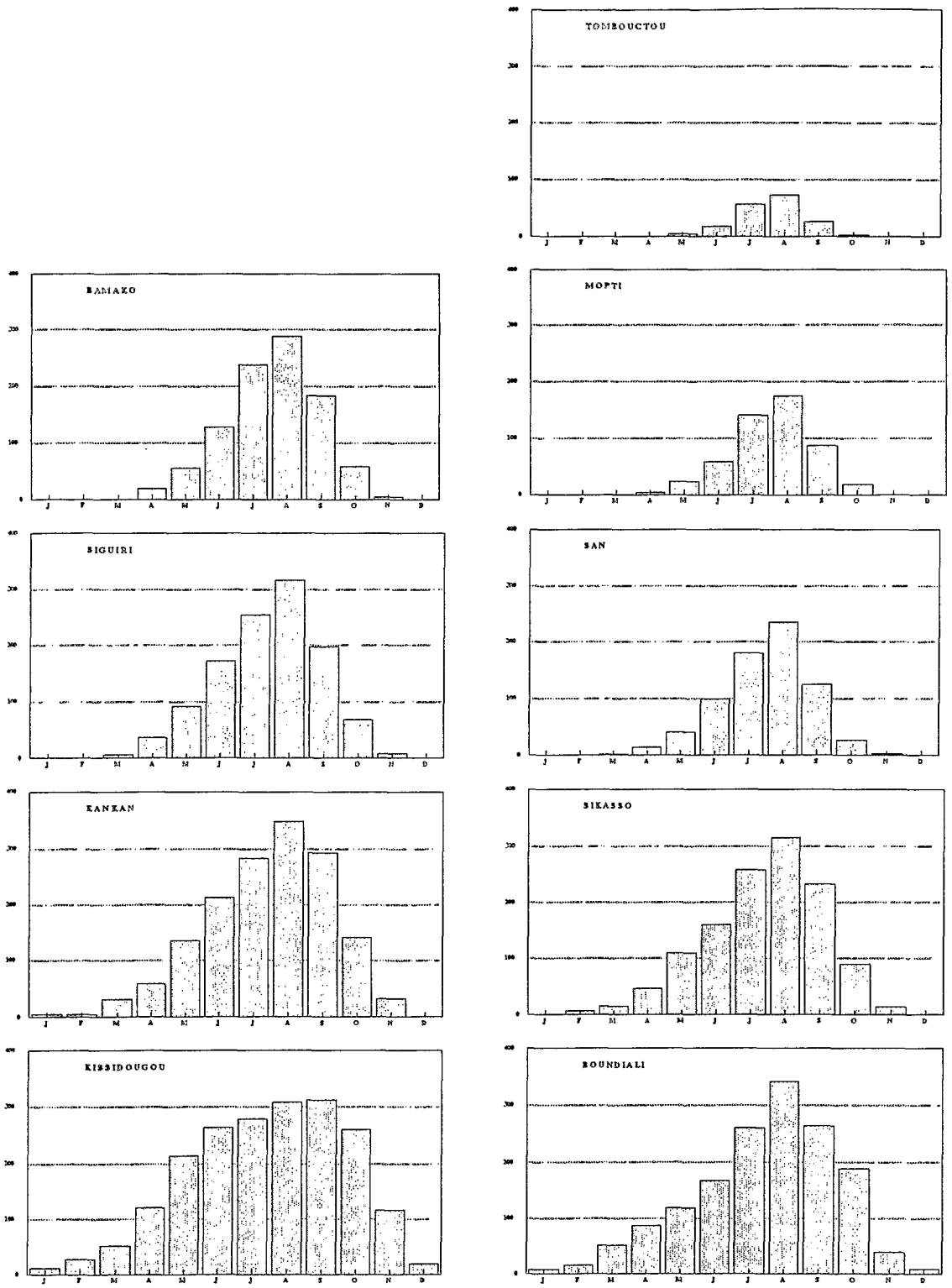

Figure n° 3

Histogrammes des précipitations mensuelles interannuelles sur le bassin du Niger (en mm).

Le régime des précipitations commande la grande variabilité saisonnière des débits du fleuve. Pendant 6 mois, de janvier à juin, les débits des basses eaux représentent moins de 7% du débit annuel. La remontée des débits s'annonce en mai, mais ne devient vraiment significative qu'au mois de juillet. Le coefficient mensuel du mois d'août est de 17%, il passe à 30% en septembre et 25% en octobre ; le maximum de la crue a lieu généralement dans la seconde quinzaine de septembre. La décrue est rapide et dès la fin novembre, on se trouve en phase de vidange des réserves souterraines.

Le barrage hydro électrique de Sélingué sur le Sankarani - avec une réserve de 2 10^9 m^3 (moins de 5% de l'écoulement total interannuel) - n'affecte pas de manière significative le régime des hautes eaux ; en revanche, les étiages se trouvent renforcés.

La dernière station du Niger avant son entrée dans la cuvette lacustre est celle de Ké-Macina (dont le bassin est de 141 000 km²). Les modules ont perdu de 250 à 50 m^3 s^{-1} suivant les années ; le prélèvement naturel (évaporation) et celui dû aux irrigations (Office du Niger en particulier) serait en moyenne de 135 m^3 s^{-1}, soit près de 10% de l'apport hydrique initial. Le module interannuel est de 1207 m^3 s^{-1} sur la période 1952-1990.

En rive droite du Niger, le Bani draine les eaux d'un bassin versant à peine moins important que celui du Niger. Le bassin du Bani dont les limites Sud se situent près d'Odienné et Boundiali en Côte d'Ivoire est nettement moins arrosé (1200 mm) que le Haut Niger guinéen. Il est soumis au climat tropical pur. Le bassin a une superficie de 101 600 km² à la station de Douna, observée de manière fiable depuis le début des années 50. Sur la période 1953-1990, le module interannuel est de 419 m^3 s^{-1}, soit un module spécifique de 4,12 l s^{-1} km^{-2} ce qui correspond à une valeur presque trois fois plus faible que celle du Niger calculée sur la même période (11,2 l s^{-1} km^{-2}). La lame écoulée est de 130 mm, soit un coefficient d'écoulement de 10,8.%. La variabilité saisonnière des débits montre une longue période de faibles écoulements (moins de 5% de l'écoulement annuel transitent à Douna sur 6 mois). A l'étiage, on a pu observer dans les années récentes un arrêt de l'écoulement. Le tiers de l'écoulement annuel transite en septembre, près des quatre cinquièmes d'août à octobre. La crue du Bani atteint le plus souvent son maximum dans la seconde quinzaine de septembre ou début octobre ; il n'y a pas coïncidence de date entre les maximums du Niger et du Bani. La variabilité saisonnière interannuelle des débits mensuels observés aux trois stations est indiquée dans le tableau 2.

Tableau 2 :

Débits moyens mensuels interannuels à Koulikoro (1), Ké-Macina (2) et Douna (3) sur la période 1953-91 en m^3s^{-1}

	M	J	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Année
1	97	321	1105	2931	4878	4178	1912	779	348	172	96	68	1342
2	46	182	889	2500	4077	3490	1653	711	321	151	79	51	1207
3	16	31	133	780	1712	1564	699	244	111	60	24	17	419

Dans le tableau 3, on a réuni quelques valeurs significatives de l'étude statistique des modules de Koulikoro, de Ké-Macina et Douna pour ce qui caractérise les entrées dans le Delta Central ; les maximums de crue ont été également étudiés. On verra plus loin que ces distributions montrent le regroupement des valeurs actuelles dans une gamme très déficitaire. Le tableau 3 est complété par les résultats de l'analyse fréquentielle des modules de Diré et Tossaye, à l'aval du Delta et celle de la hauteur maximum de crue à Mopti.

La figure 4 propose trois hydrogrammes caractéristiques de la série des observations du Niger à Koulikoro (maximum, minimum et année moyenne) ; les trois hydrogrammes les plus récents correspondant aux années d'étude du Projet Environnement et Qualité des apports du Niger au Sahel (EQUANIS) y ont également été représentés. Les hydrogrammes du Bani de 1990,1991 et 1992 sont donnés dans la figure 5.

Tableau 3 :

Analyse fréquentielle de quelques paramètres hydrologiques observés sur le bassin du Niger (modules et maximums)

	Années humides			Médiane	Années sèches		
Période de retour en années	100	20	10	2	10	20	100
Modules en m^3s^{-1}							
KOULIKORO (NIGER)	2366	2089	1940	1419	898	750	472
KE MACINA (NIGER)	2259	1985	1838	1322	807	661	387
DOUNA (BANI)	918	854	827	419	153	84	70
DIRE (NIGER)	1753	1521	1399	979	574	462	255
TOSSAYE (NIGER)	1596	1395	1287	908	528	421	219
Maximum de crue en m^3s^{-1}							
KOULIKORO (NIGER)	9330	8290	7735	5590	3800	3300	2260
KE MACINA (NIGER)	6534	6240	6060	5470	2950	2590	1990
DOUNA (BANI)	4460	3560	3480	2425	806	565	364
Hauteur Max à Mopti (cm)	759	745	733	655	527	483	394

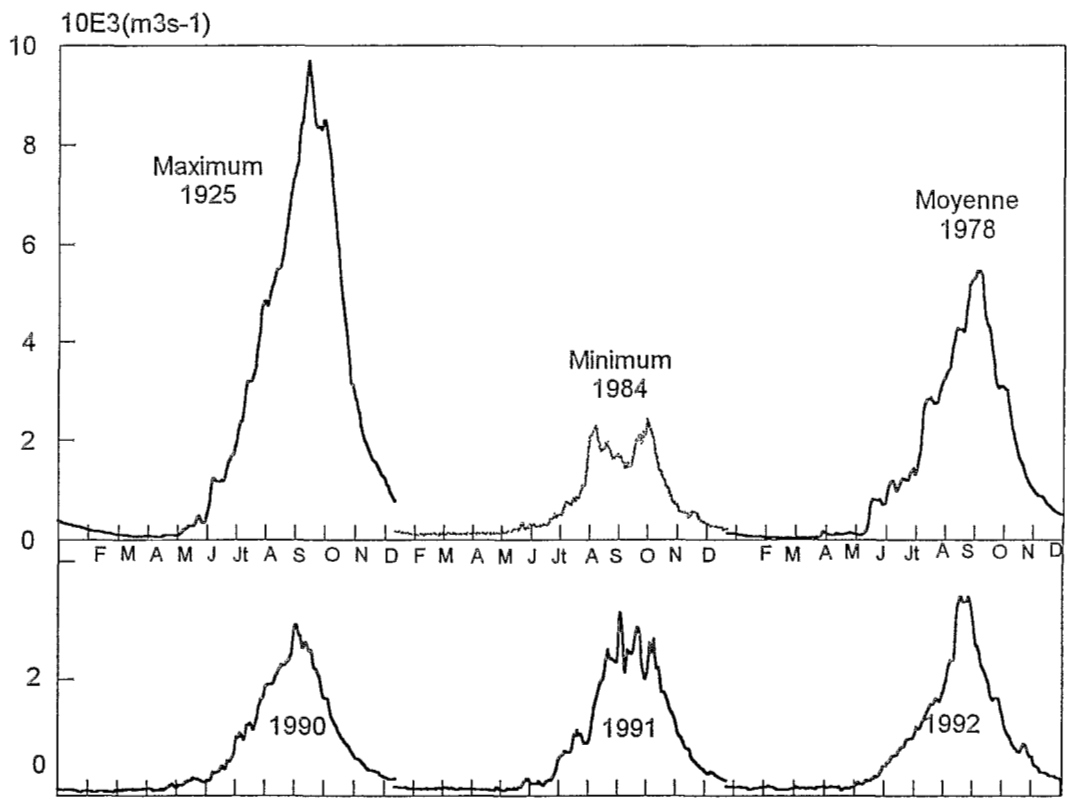

Figure n°4

Hydrogrammes caractéristiques du Niger à Koulikoro

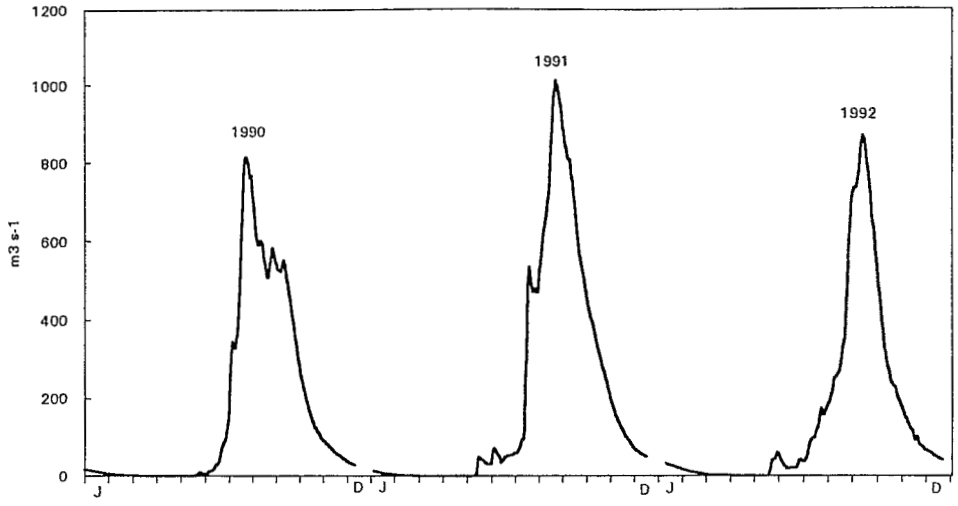

Figure N°5
Hydrogrammes du Bani à Douna

2 - LE CONTEXTE DEFICITAIRE REGIONAL

2.1- L'évolution récente des précipitations et des écoulements

En Afrique tropicale sèche les déficits pluviométriques, marqués par une première phase aiguë dans les années 1972 et 1973, n'ont jamais cessé, même s'ils ont varié en extension et en intensité suivant les années. Une recrudescence notable de la sécheresse s'est manifestée en 1983 et 1984 et les déficits restent la règle jusqu'à la période actuelle. Ceux-ci se sont exacerbés au niveau des écoulements des grands fleuves. L'ampleur géographique du phénomène et sa durée, sans équivalence connue dans les chroniques hydroclimatiques (Sircoulon, 1987, 1989), ont conduit certains auteurs à parler de rupture climatique (Carbonnel & Hubert 1985).

Dans les régions soudano-sahéliennes, les hauteurs annuelles de précipitation montrent une tendance à la baisse particulièrement accusée dès 1968 avec des valeurs presque toujours inférieures aux médianes. Certains indices régionaux (Lamb, 1985, Nicholson *et al,* 1988) montrent cette dégradation constante depuis vingt ans. Une amélioration récente a été observée mais reste encore très relative puisque les précipitations annuelles sont toujours déficitaires. La figure 6 actualise les travaux de S. Nicholson (op.cit) jusqu'en 1990.

Jusqu'à une période récente, on a pensé que la variabilité de l'écoulement annuel constituait, par l'intégration spatiale du régime des précipitations qu'il suppose sur l'ensemble d'un bassin versant, un paramètre de choix dans l'étude des fluctuations climatiques (Olivry 1983, 1987). De fait, les déficits pluviométriques se sont largement répercutés, et généralement amplifiés, dans l'écoulement des bassins fluviaux au point que dans la période la plus récente les paramètres hydrologiques ne sont plus en phase avec la variation pluviométrique annuelle (Fig. 6).

La chronique des modules du Niger à Koulikoro a souvent été comparée à celle du fleuve Sénégal. Dans la période récente on a relevé qu'en dépit de certains sursauts d'une relative abondance en 1974, 75, 76 puis en 1979, l'hydraulicité des fleuves de la région n'a cessé de se dégrader, d'abord dans les années 72-73, première sécheresse catastrophique, puis de manière plus dramatique encore dans les années 1983 et 84. La figure 7 reproduit la chronique des modules du Niger à Koulikoro et Diré et du Bani à Douna.

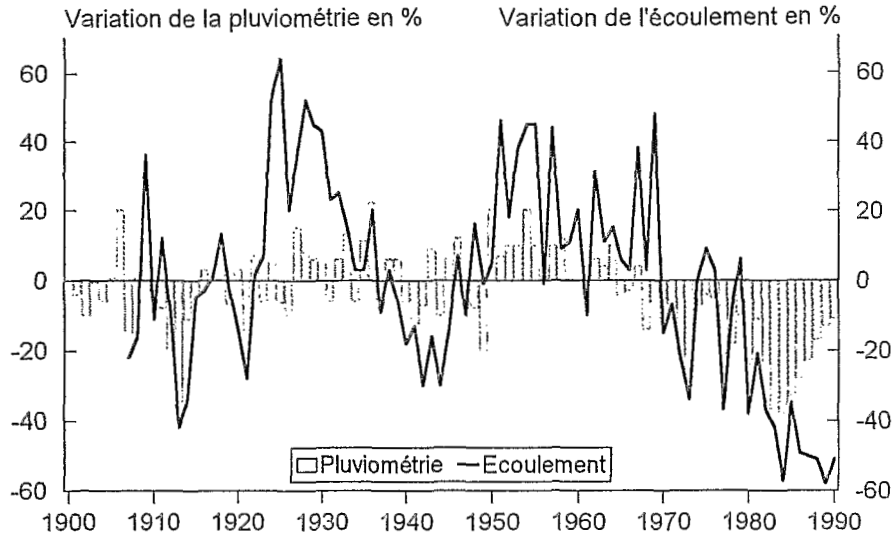

Figure n°6

Index pluviométrique et variation de l'écoulement sur le bassin du Niger exprimés en écart à la moyenne (d'après Nicholson, 1988 et Olivry, 1992).

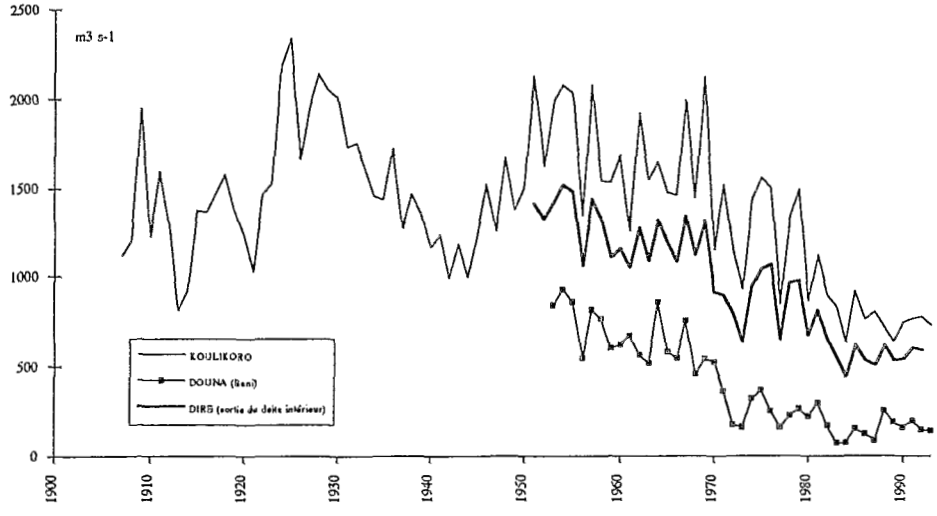

Figure n°7

Evolution des modules annuels, depuis l'origine des observations, du Niger à Koulikoro et Diré et du Bani à Douna

Soulignons qu'après le "minimum minimorum" de 1984, le module le plus bas est celui de 1989 sur le Niger.

Les fluctuations récentes montrent que la ressource en eaux de surface a diminué de moitié sur la dernière décennie.

Les lames écoulées moyennes des quatre dernières décennies ont été indiquées dans le tableau 4 en regard des précipitations. Cette tendance persistante à la baisse doit être soulignée car elle montre une dégradation durable du système hydrologique malgré un retour assez sensible à de meilleures conditions de précipitations.

Tableau 4 :
Pluviométrie, Lame écoulée et Coefficient d'écoulement du bassin du Niger pendant les quatre dernières décennies.

	1951 -1960	1961 - 1970	1971 - 1980	1981 - 1990
P mm	1649	1527	1403	1315
He mm	472	420	326	218
Ke %	28.6	27.5	23.2	16.6

Le régime hydrologique des fleuves d'Afrique intertropicale est directement influencé par celui des précipitations mais subit aussi, avec un effet retard, l'incidence du cumul de déficits pluviométriques répétés.

Les apports des fleuves de l'Afrique sèche (Sénégal, Gambie...Niger et Bénoué...) totalisent en moyenne 235 km^3 an^{-1} (275 km^3 an^{-1} avec le système Chari, tributaire du lac Tchad). L'appauvrissement de la ressource en eau est pour la décennie 1971-80, de 30 km^3 an^{-1} en Afrique sèche atlantique. Pour la décennie 1981-90, le déficit est de 65 km^3 an^{-1} (Olivry et al, 1993 ; Mahé, 1993).

2.2- La maladie des basses eaux et l'hypertarissement

Le régime naturel des basses eaux sur le Niger à Banankoro et le Bani à Douna est très gravement affecté par la sécheresse actuelle. Les étiages absolus des deux dernières décennies sont systématiquement les plus faibles de la série avec même arrêt complet de l'écoulement sur le Bani. L'évolution de la phase de tarissement constitue le processus majeur responsable de l'appauvrissement des basses eaux.

Après transfert à la station d'observation des écoulements rapides (ruissellements), on observe à partir d'un certain stade de la décrue de l'hydrogramme annuel, une décroissance régulière des débits ou phase de tarissement. Celle-ci correspond à la période où la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau de la région.

Pour les cours d'eau tropicaux, cette décroissance des débits suit une loi exponentielle classique :

$$Qi = Qo\, e^{-\alpha (ti-to)}$$

avec Qi et Qo, débits aux instants ti et to exprimés en jours et α, coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère qui a la dimension de l'inverse d'un temps.

Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique des fleuves soudano-sahéliens. L'étude des coefficients de tarissement montre jusqu'aux années 1972-73 une relative régularité des valeurs.

Les choses changent du tout au tout au cours des années les plus récentes ; on observe alors un véritable bond des valeurs de α (Fig. 8).

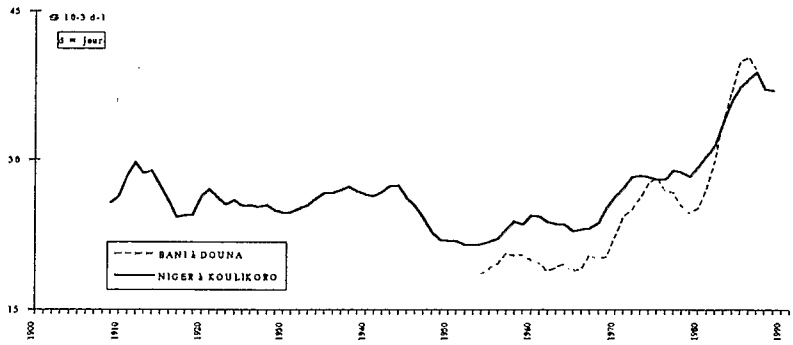

Figure n°8
Evolution des coefficients de tarissement sur le Niger et le Bani.

Ainsi sur le fleuve Niger à Koulikoro (bassin de 120 000 km^2), les données montrent un tarissement antérieur à 1975 partagé entre une première période de 40 ans avec un coefficient moyen de 0,026 j^{-1} et une seconde période "humide" de 20 ans avec un coefficient moyen de 0,023 j^{-1}. Dans la période actuelle, après 8 années à coefficient moyen d'environ 0,028 j^{-1} on observe une montée brutale dans l'évolution des coefficients de tarissement jusqu'à des valeurs de 0,040 j^{-1} au début des années 90. Les valeurs récentes ont été déduites de l'étude du Niger à Banankoro qui a conservé son régime naturel.

Dans le cas du Bani, principal affluent du Niger (102 000 km^2 à Douna), l'évolution du tarissement est tout aussi significative. De 1950 à 1975, le coefficient moyen est de 0,023 j^{-1} ; il passe à 0,03 j^{-1} à la fin des années 70 et à 0,04 j^{-1} à la fin des années 80.

On peut multiplier les exemples dans la région soudano-sahélienne (Sénégal, Chari). On retiendra que le temps nécessaire pour que le débit de tarissement des cours d'eau soudano-sahéliens diminue dans le rapport de 10 à 1 est passé grosso modo de 4 mois à 2 mois (Olivry, 1993 a).

Cette faiblesse quasi générale des étiages traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des bassins fluviaux résultant du cumul des déficits pluviométriques.

2.2.1 Interprétation du fonctionnement des aquifères

La similitude des tarissements observés en milieu intertropical dans les chroniques de débit antérieures à la période de sécheresse doit être soulignée. Les valeurs du coefficient α se situent dans la gamme de 0,015 à 0,025 j^{-1}, en moyenne 0,02 j^{-1}, qu'il s'agisse de grands cours d'eau drainant des bassins de taille très variable ou de petites rivières aux bassins versants très limités, pour autant que les précipitations annuelles dépassent 1000-1100 mm. Les exceptions sont relevées, avec des tarissements plus lents, sur les bassins dont la géologie révèle de larges aquifères continus (nappes de plateaux gréseux : plateau Bateke au Congo, *pro parte* plateaux du Fouta Djalon en Guinée). Des tarissements plus rapides dans les régions moins arrosées traduisent une dégradation des aquifères.

Au Cameroun (Olivry, 1976), une bonne relation a pu être établie entre les variations du coefficient de tarissement moyen (compris entre 0,015 et 0,027 j^{-1}) et celles du coefficient de drainage de différents bassins étudiés. Le coefficient de drainage introduit la notion de largeur moyenne des interfluves. Des interfluves, on passe naturellement au concept de nappes phréatiques de versant.

L'alimentation des basses eaux des rivières apparaît comme principalement due au cumul des vidanges de petites nappes de versant assez semblables et caractéristiques de la géomorphologie générale de l'Afrique intertropicale. Ceci explique la similitude des tarissements pour des cours d'eau d'importance très variable.

D'après la loi de Darcy, le coefficient de tarissement est directement proportionnel à la conductivité hydraulique (perméabilité), à la porosité, à la surface d'échanges nappe-rivière et inversement proportionnel aux dimensions de l'aquifère. Pour un même bassin, les trois premiers termes ne varient pas ou peu, la surface d'échange nappe-rivière étant davantage liée à la largeur de la section du cours d'eau qu'à son niveau. L'augmentation considérable du coefficient de tarissement dans la période sèche correspond donc essentiellement à une réduction de l'extension des aquifères et donc de la largeur des nappes de versant.

La baisse importante du niveau piézométrique est une constante des observations hydrogéologiques des régions soudano-sahéliennes. L'augmentation considérable de l'épaisseur de la tranche aérée du sol au dessus de la surface piézométrique ne permet pas une réalimentation facile des nappes. Les eaux infiltrées connaissent un long cheminement interstitiel qui n'aboutit pas toujours à la nappe. La zone non saturée peut piéger l'ensemble de la lame d'eau infiltrée de l'année. Celle-ci pourra être reprise par évaporation ou rester en partie en attente d'apports complémentaires des années suivantes. Ceux-ci, s'ils sont assez abondants, et donc que l'on observe de bonnes précipitations, finiront, (effets pistons successifs), par aboutir à une recharge de la nappe.

C'est dans la partie amont de la nappe de versant que l'épaisseur de la zone aérée est la plus grande et donc que les problèmes de réalimentaion sont les plus cruciaux. La sécheresse en privant l'aquifère amont des apports de l'infiltration a conduit à une réduction de l'extension de la nappe de versant soit par épuisement des réserves de l'amont, soit par coupure des liaisons entre les aquifères des parties aval et amont. La recharge éventuelle de l'aquifère amont reste

dépendante d'un fonctionnement hydrogéologique pluriannuel et, dans la période actuelle , on observe bien un effet mémoire de la sécheresse inscrit dans l'évolution des réserves souterraines.

2.2.2 Les perspectives

Le retour à des débits plus soutenus en saison sèche suppose d'abord la reconstitution des aquifères. Celle-ci ne peut-être immédiate et cela s'est bien vu dans la faible incidence d'une meilleure pluviométrie sur le tarissement. Il n'y a pas concordance entre les variations de l'indice pluviométrique de Lamb et celles du coefficient de tarissement. Du fait même des aquifères, les réactions sont plus lentes dans la restitution des basses-eaux ; elles nécessitent un temps de réponse de plusieurs années et ne sont effectives qu'avec le cumul de variations climatiques de même sens.

A la sécheresse climatique se surimpose avec un décalage pluriannuel une sécheresse spécifique aux cours d'eau qu'on pourrait appeler "sécheresse phréatique". Les lois de l'hydrogéologie sont telles que, dans de bonnes conditions de pluviosité, l'amélioration du régime de basse-eaux pourrait demander un temps comparable à celui qui a conduit à son actuelle dégradation.

Le moteur des évolutions possibles reste bien évidemment l'évolution climatique des prochaines décennies.

Plusieurs scénarios sont possibles :

- poursuite ou aggravation de l'état de sécheresse : les processus mis en évidence sont exacerbés ; les fleuves cesseront assez rapidement d'être pérennes en saison sèche par suite de l'épuisement des réserves. C'est le schéma qui conduit au régime des cours d'eau sahéliens et subdésertiques et, à long terme, aux réseaux hydrographiques fossiles du Sahara.
- apparition d'une longue période humide, comparable en durée à la période déficitaire actuelle : un retour progressif aux basses eaux antérieures est prévisible, avec une abondance retrouvée des ressources en eau dans ces régions au terme de dix ou quinze ans dans le contexte actuel.
- reprise momentanée de la pluviosité excédentaire (moins de dix années consécutives) : on observera une légère amélioration, mais le retour aux basses eaux antérieures sera interrompu par de nouveaux épisodes secs ; de la durée de ceux-ci dépendra l'évolution future du régime des cours d'eau. Alternant avec des épisodes humides, ce scénario conduit à une stabilisation des coefficients de tarissement à un niveau supérieur à celui observé lors des décennies antérieures à 1975, et donc à un appauvrissement durable des ressources de saison sèche.

Sans s'attarder aux conséquences du scénario le plus pessimiste, il convient de souligner que l'occurrence d'une situation climatique médiane conduit à pérenniser la dégradation du régime hydrologique des fleuves de la région et que dans la perspective la plus optimiste, les effets de l'actuelle sécheresse se feront encore sentir pendant plusieurs années (Olivry et al,1992).

Le déficit d'alimentation des fleuves par les nappes souterraines, apparent en saison sèche et étudié ici, est bien entendu sous-jacent en période de crue et ceci explique aussi la faible hydraulicité et les modestes maximums de crue que l'on continue d'observer malgré une certaine reprise de la pluviosité.

2.3. Evolution de la puissance des maximums de crue annuels

Sur la base du calcul du coefficient de crue défini par P. Myer, A. Coutagne et M. Pardé (A : $Q/ S^{0,5}$ en $m^3 s^{-1} km^{-2}$ où Q est le débit et S l'aire du bassin versant), les valeurs extrêmes des maximums annuels de crue ont des coefficients de 28 à 6 pour le Niger, 35 à 4 pour le Bani, 20 à 2 pour le Sénégal, ce qui traduit la médiocrité de la puissance des crues en Afrique tropicale.

Au cours des deux dernières décennies, l'affaiblissement de la puissance des crues n'a fait que s'accentuer ; par rapport aux valeurs moyennes, les coefficients de crue ont été divisés par 2,2 sur le Niger, 4 sur le Bani, 5 sur le Sénégal.

Les chroniques de débits maximums annuels du Niger à Koulikoro et du Sénégal à Bakel montrent des variations globalement très voisines (Fig. 9).

Pour l'Afrique soudano-sahélienne de l'Ouest, la baisse des maximums de crue paraît intervenir dès 1968 pour le Sénégal après une séquence de fortes crues pratiquement continue

depuis 1950 ; la tendance s'accentue dans les années 72 et 73, années où elle apparaît sur le Niger, le Bani et l'ensemble des cours d'eau de la région. Une reprise en 1974 et 1975 laisse supposer un temps que l'épisode déficitaire est comparable à ceux déjà observés dans le siècle en 1913 et au début des années 40, mais la tendance à la baisse reprend dès 1976 attestant d'un phénomène climatique majeur dans les années qui suivent. Le creux de la vague paraît atteint dans les années 1983, 84 mais l'évolution ultérieure montre globalement une stagnation de l'amplitude des crues.

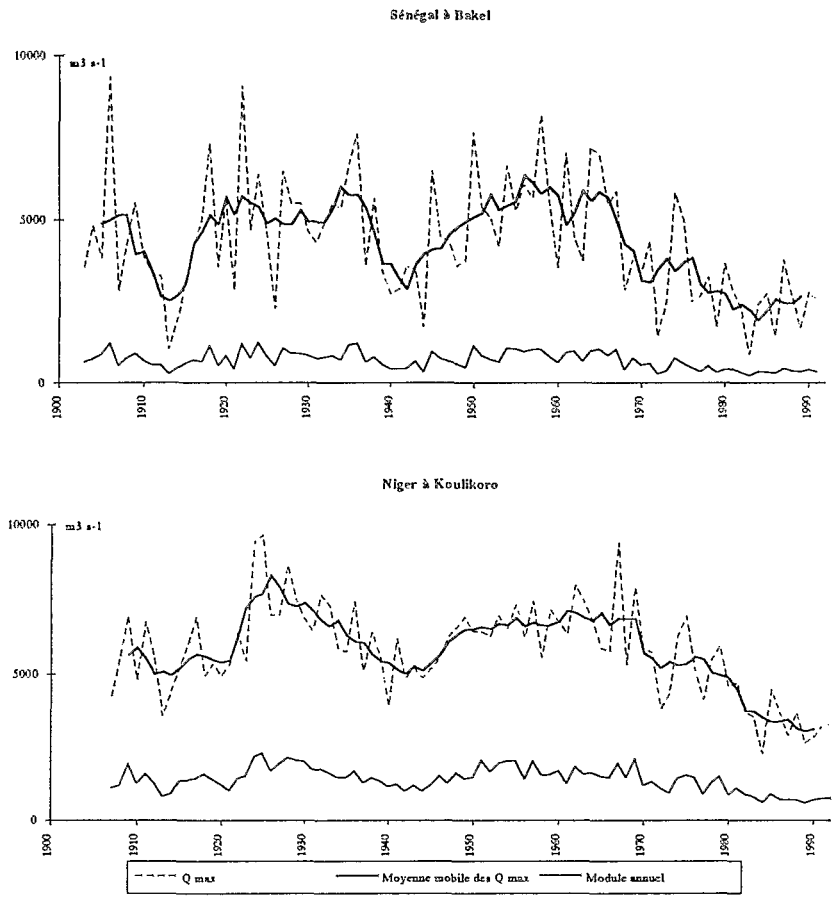

Figure n° 9

Variations des débits maximums de crue et des modules pour le Sénégal et le Niger (en trait fort, moyenne mobile sur 5 ans des Qmax).

Sur le plan statistique, le Niger montre sur les 25 dernières années, 19 années à maximum inférieur à la médiane ; pour les onze dernières années, dix ont un maximum inférieur à la valeur décennale sèche.

Par opposition à l'étude des étiages ou de l'écoulement annuel pour lesquels l'évaluation du risque se situe en termes de potentialités des ressources en eau, les études de prédétermination des crues s'intéressent principalement à l'évaluation du risque de fortes crues ; cependant pour nombre d'hydrosystèmes où la crue annuelle est, avec l'inondation de plaines, promesse de cultures de décrue ou de ressources halieutiques, l'analyse statistique des événements de période sèche est tout aussi importante. La tentation est forte, en parlant de rupture climatique, de traiter deux populations différentes : avant et depuis la "grande sécheresse". La comparaison des prédéterminations ajustées aux différentes séries de valeurs (série complète, série antérieure à 1970, série de 1971 à 1992) montre, pour la seule période actuelle, une sous-estimation pour les crues exceptionnelles de 24% pour le Niger. Bien évidemment, pour ce qui est de la prévision des

faibles crues, la série actualisée à 1992 donne des valeurs nettement inférieures à celle qui s'arrête en 1970. (Tableau 5)

Tableau 5

Etude fréquentielle des maximums annuels du Niger à Koulikoro pour différentes périodes

Echantillon Statistique	Période de retour sèche (ans)				Médiane	Période de retour humide (ans)			
	100	50	20	10	2	10	20	50	100
1907 1992	2260	2680	3300	3800	5590	7735	8290	8910	9330
1907 1970	3400	3730	4240	4690	6290	7880	8330	8840	9180
1971 1992	1340	1680	2200	2660	4280	5900	6360	6870	7220

La comparaison des hydrogrammes de crue des différents fleuves étudiés montre dans la période actuelle deux types de situation :

- un hydrogramme tronqué sans maximum nettement affirmé correspondant à une saison des pluies normale en durée mais très déficitaire au coeur de la saison.
- un hydrogramme réduit en durée correspondant à une saison des pluies tardive ou écourtée.

Dans les deux cas, le volume de la crue et le maximum sont faibles.

Les coefficients de pointe, évalués ici comme le rapport du débit maximum au module annuel, montrent que la tendance générale de la période actuelle est caractérisée par des hydrogrammes de crue plus étroits. Ainsi par rapport à la moyenne de ce coefficient calculé sur les 40 dernières années, on observe des coefficients moyens qui augmentent sur les deux dernières décennies. On passe sur le Niger de 3,8 à 4,9.

La mise en régression des variables, modules/maximum annuel sur l'ensemble de la période d'observation, avec deux séries bien individualisées (avant et après 1970) aboutit à de bonnes relations globales (Fig. 10).

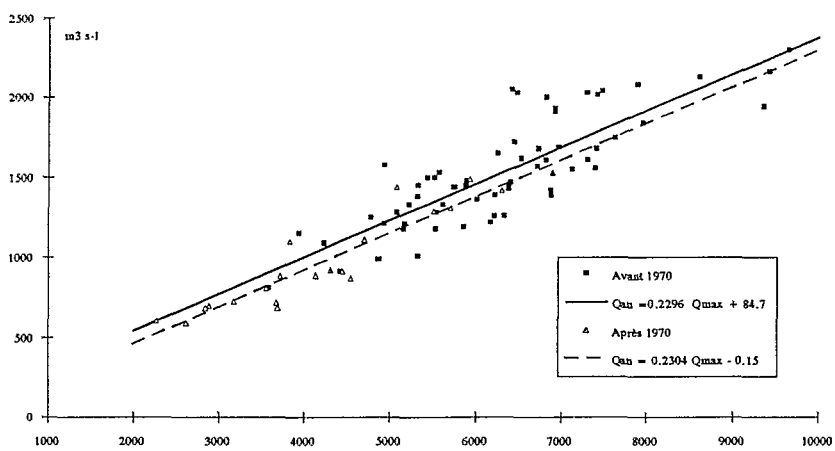

Figure n° 10

Relations des modules annuels en fonction des Q_{MAX}

La persistance de faibles maximums annuels malgré un certain retour à de meilleures conditions de pluviosité constitue un fait d'observation pour l'ensemble de la sous-région (Olivry, 1993 b).

On constate notamment que pour des saisons des pluies équivalentes le maximum de crue de la période actuelle reste nettement plus faible que dans le passé. Ainsi, sur le bassin du Niger, les précipitations se sont rapprochées de la normale en 1991 pour la plus grande satisfaction des populations rurales dont les cultures pluviales ont été de bon niveau, mais le fleuve lui-même n'a pas marqué de réaction très sensible.

La même année, des études du ruissellement sur petits bassins représentatifs au Mali ont permis d'observer quelques événements pluviométriques journaliers intenses, dont certains de fréquence décennale, et des conditions générales de genèse des crues sans modification significative par rapport aux observations effectuées une trentaine d'années auparavant (Joignerez et Olivry, 1992). Ces observations rejoignent les conclusions de nombreux auteurs. Il arrive même parfois en zone soudano-sahélienne que la dégradation du milieu ait entraîné de meilleures conditions de ruissellement et des débits de pointe de crue plus élevés pour le même type d'averse. A l'échelle de grands bassins, dans de mêmes conditions pluviométriques, la contribution à l'hydrogramme de crue des écoulements rapides (ruissellement et écoulement hypodermique) sera identique.

La persistance de l'amoindrissement de la puissance des crues doit être recherchée dans une contribution réduite des apports d'origine souterraine.

Ceci nous ramène aux observations effectuées sur le tarissement principal de ces grands fleuves. La part de cet écoulement de base est difficile à chiffrer sur les grands bassins ; elle est probablement plus importante qu'on ne l'imaginait, mais a considérablement diminué dans la période actuelle. On a reconstitué le schéma théorique de composition de ces écoulements pour deux hydrogrammes de crue correspondant aux périodes étudiées et à des conditions pluviométriques identiques. Le volume "ruisselé" est le même ; le volume d'origine phréatique ("écoulement de base") est déduit de la courbe du tarissement principal. Les hydrogrammes montrent un maximum de crue nettement plus faible dans la situation actuelle (Fig. 11). Un retour à la normale nécessitera une reconstitution des aquifères superficiels qui suppose plusieurs années consécutives de bonnes précipitations.

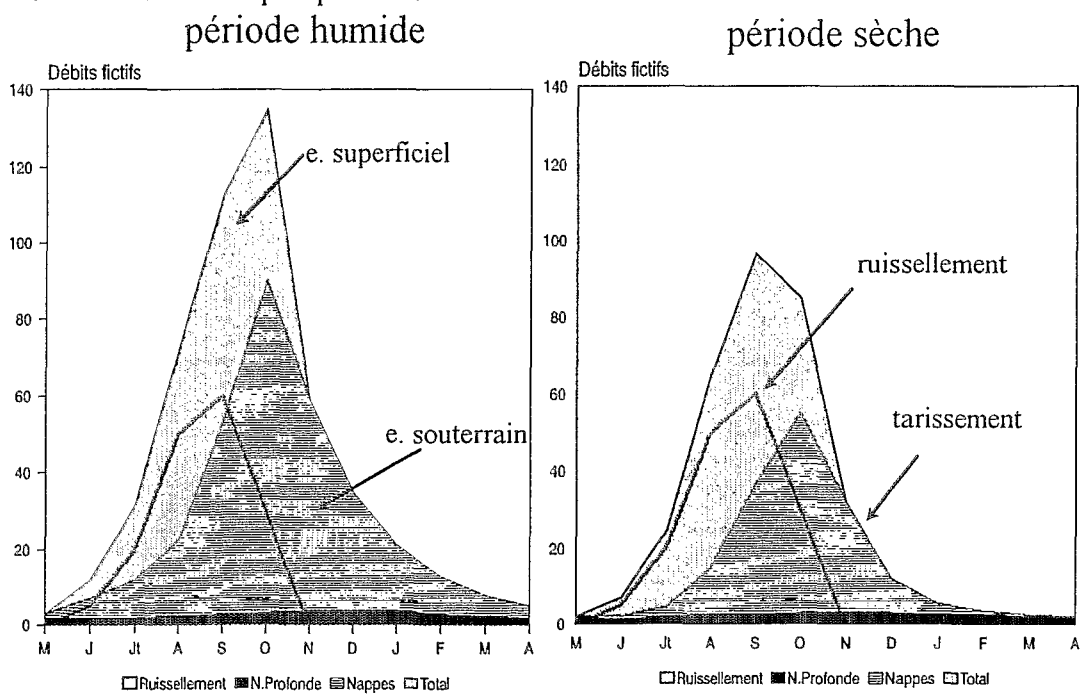

Figure n°11

Schéma théorique de décomposition de l'hydrogramme de crue pour les périodes sèche et humide.

Le régime déficitaire des précipitations de la période actuelle est bien évidemment responsable de la baisse de puissance des crues. Il a d'abord un effet immédiat, avec des crues réduites en puissance et (ou) en durée suivant la saison des pluies. Il a ensuite un effet mémoire avec le cumul de déficits des années antérieures et des apports réduits des nappes phréatiques. On doit donc s'attendre à une certaine persistance des faibles maximums de crue même dans l'éventualité d'un retour à une séquence humide.

2.4. - Conclusions

On a montré que l'appauvrissement des ressources en eau de l'Afrique intertropicale résultait à la fois de la crise climatique que connaît le continent Africain et de l'effet cumulé des déficits pluviométriques. La persistance de déficits hydriques aigus, au delà des crises majeures des précipitations, indique que les fluctuations hydrologiques ne peuvent être traitées au seul pas de temps annuel.

L'implication des aquifères des bassins - leur épuisement, la réduction de leur extension - à travers la contribution des écoulements de base, conduit à une minoration durable de l'abondance de la ressource hydrologique dans la région. Un éventuel retour à des conditions de précipitations excédentaires devra être soutenu sur plusieurs années pour permettre la reconstitution des aquifères et un retour à des conditions hydrologiques "normales".

Pour revenir au cadre plus étroit de cette étude, aux régions soudano-sahéliennes et aux "fleuves malades de l'Afrique sèche", il semble qu'un minimum de dix années de bonnes conditions climatiques soit nécessaire pour cette "normalisation". Dans l'attente d'un changement climatique favorable, l'appauvrissement des ressources en eau de l'Afrique sèche a donc toutes chances de rester une constante de l'hydrologie régionale jusqu'à la fin du XXème siècle.

BIBLIOGRAPHIE

BRUNET - MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P. et MOLINIER M. (1986) Monographie hydrologique du fleuve Niger, Tome I : Niger supérieur 396 p., Tome II Cuvette Lacustre et Niger moyen 506 p., Coll. Monog. Hydrol. n° 8, ORSTOM, Paris.

CARBONNEL J.P. et HUBERT P. (1985) Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex. Haute Volta). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t; 301, série II, n° 13, pp. 941 - 944.

JOIGNEREZ A. et OLIVRY J.C. (1992) Régionalisation des écoulements non pérennes sur petits bassins au Mali. In Colloques et Séminaires ORSTOM. VIIIèmes Journées hydrologiques de Montpellier Sept 1992.

LAMB, P. (1985) Rainfall in subsaharian West Africa during 1941-83. Zeit. Gletscherk Glazialgeologie,21 : 131-139.

MAHE G. (1993) Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. *coll. Etudes et Thèses.* ORSTOM Paris. 438 p.

NICHOLSON S.E., KIM J & HOOPINGARNER J. (1988) Atlas of African rainfall and its interannual variability. *Departement of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Florida USA.*

OLIVRY J.C. (1976) Régimes hydrologiques en pays bamiléké (Cameroun). Cahiers ORSTOM Paris, série hydrologie, Vol. XIII, n° 1, pp. 37 - 71.

OLIVRY J.C. (1983) Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux Iles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). Cahiers ORSTOM, Paris, Vol. XX, n°1, pp. 47 - 70

OLIVRY J.C. (1987) Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse Casamance. *(Proc. Vancouver Symp. Août 1987) 501-512, IAHS Publ. no168.*

OLIVRY J.C., SIRCOULON J. et TOURE M. (1992) The ills rivers of Africa. in Colloque ICID Impactos de variacoes climaticas e desenvolvimento sustentavel em regios semi-aridos. Fortaleza (Brazil).

OLIVRY J.C., BRICQUET J.P.et MAHE G. (1993) Vers un appauvrissemnt durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? In Hydrology of warm humid regions (J.S Gladwell Ed. Sci.). *Proc. Yokohama Symp. Juillet 1993. 67-78. IAHS Publ. n° 216.*

OLIVRY J.C. (1993a) Evolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale. In "l'eau, la terre et les hommes, hommage à René Frécaut". Madeleine Griselin Ed. Presses Universitaires de Nancy. pp. 181 - 190.

OLIVRY J.C. (1993b) De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies.in Journées hydrologiques de Grenoble ; Centenaire Maurice Pardé ; 22/24 Septembre 1993.

PARDE M. (1933) Fleuves et rivières. 5ème édition. *Lib. A. COLIN.* 241 p. PARIS

SIRCOULON J. (1987) Variation de débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle. (*Proc. Vancouver Symp. Août 1987) 13 - 25, IAHS Publ. no168.*

SIRCOULON J. (1989) Bilan hydropluviométriques de la sécheresse 1968 - 84 au Sahel et comparaison avec les sécheresses des années 1910 à 1916 et 1940 à 1949. in "Les hommes face aux sécheresses". Nordeste brésilien. Sahel africain. Coll. Travaux et Mémoires de l'IHEAL numéro 42, pp. 107 - 114.