

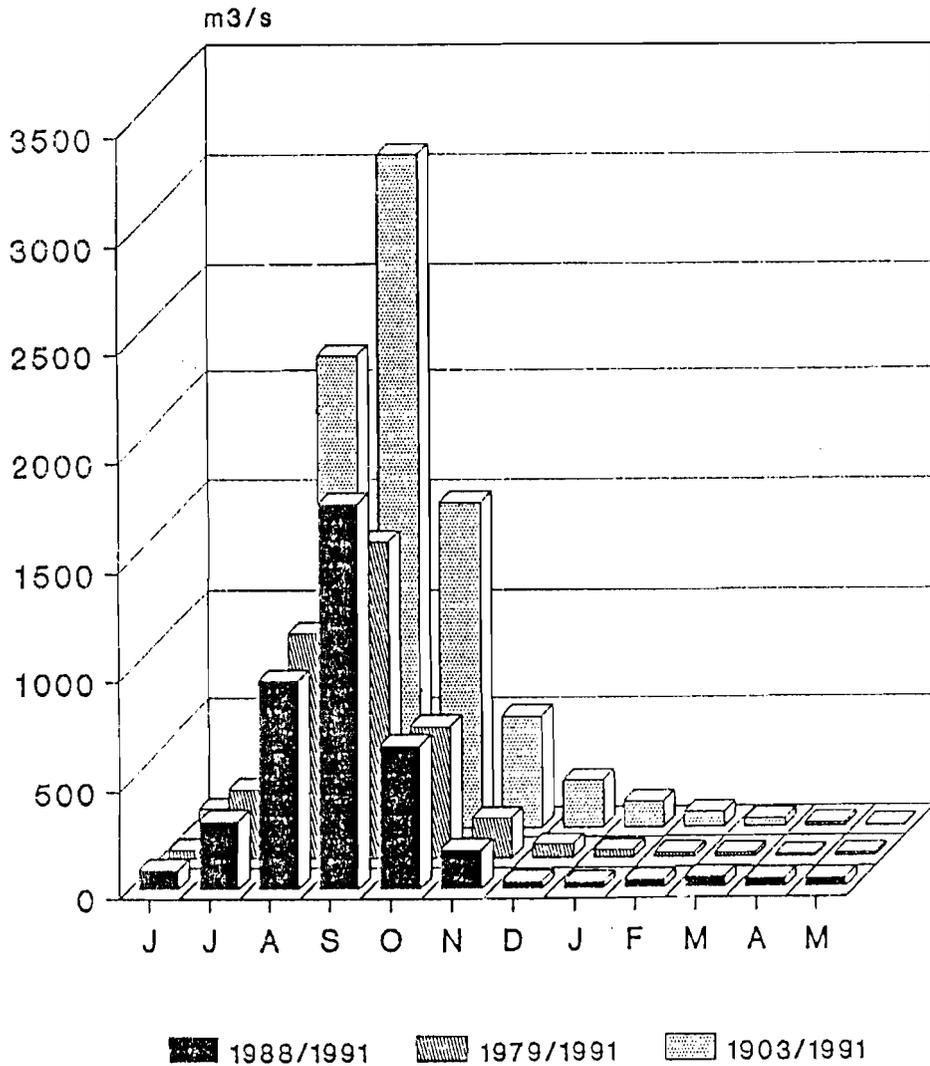
0 174

GAC Jean Yves (1), CARN Michel (1), ORANGE Didier (2)

Projet CEE (EQUESEN) TS 2 0198 F EDB

OK HOS

L'IMPACT DE LA SECHERESSE ACTUELLE SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE DU FLEUVE SENEGAL A BAKEL



octobre 1991

(1) ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération, B.P. 1386, Dakar (Sénégal))
 (2) ORSTOM, B.P. 893, Bangui (République Centrafricaine)

GAC

000000

07 00 15 819

L'IMPACT DE LA SECHERESSE ACTUELLE
SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE DU FLEUVE SENEGAL A BAKEL

Jean Yves GAC, Michel CARN, Didier ORANGE

Projet CEE (EQUESEN) TS 2 O198 F EDB

Illustration de la couverture

Débits moyens mensuels du fleuve Sénégal à Bakel (m³/s)

- 1.- De 1903 à 1991 : ensemble des observations
(module interannuel $Q_{mi} \approx 700$ m³/s)
- 2.- De 1979 à 1991 : 12 derniers cycles hydrologiques
($Q_{mi} \approx 320$ m³/s : déficit moyen de 54 %)
- 3.- De 1988 à 1991 : 3 années de crues artificielles
($Q_{mi} \approx 350$ m³/s : déficit moyen de 50 %)

Il est remarquable de noter les très importants déficits des écoulements du fleuve Sénégal au cours des dernières années et la particularité (étiages soutenus) des crues artificielles engendrées par le barrage de Manantali.

Avant - propos

20 années déjà de sécheresse au Sahel !.

Depuis 1972, année qui fût en son temps considérée comme située au coeur de la troisième séquence aride du XX^{ème} siècle (après celles centrées sur 1913/1914 et 1940/1942), les crues des grands fleuves de la zone inter-tropicale de l'Ouest africain n'ont cessé de s'atténuer. Par exemple, depuis 20 ans, à l'exception de 1974, aucun cycle hydrologique du fleuve Sénégal n' a donné lieu à des écoulements moyens annuels excédant le module interannuel de 700 m³/s.

Ce document reprend, pour l'essentiel, les données acquises par les hydrologues de l'ORSTOM qui ont su avec l'aide de leurs techniciens et de leurs observateurs sur le terrain, mesurer, quantifier et mémoriser inlassablement les crues du Sénégal depuis près de 50 ans. Un hommage particulier doit être rendu à MM. ROCHETTE, BRUNET MORET, OLIVRY, LAMAGAT et ALBERGEL. C'est à leur ténacité et à leur constant souci de maintenir un réseau hydrométrique fiable sur le fleuve Sénégal que l'on doit de pouvoir disposer aujourd'hui de la plus longue série d'observations (après celle du Nil) sur un cours d'eau d'importance régionale du continent africain.

Notre intérêt, dans le cadre du projet EQUÉSEN sur l'environnement et la qualité des eaux du fleuve Sénégal, c'est naturellement de pouvoir établir, à partir du volume des écoulements, des bilans quantitatifs sur l'érosion mécanique et l'altération chimique au niveau du haut bassin du fleuve Sénégal. De ces deux processus concurrentiels dépend toute la dynamique des paysages dans cette région de la zone intertropicale.

INTRODUCTION

Les données présentées dans cette étude proviennent en majeure partie du Département d'Hydrologie de l'ORSTOM à l'exception des informations acquises au cours des 12 campagnes successives (de juin à octobre) de mesures quotidiennes des transports solides (de 1979 à 1991) sur le fleuve Sénégal à Bakel. ROCHETTE (1974), BRUNET-MORET & *al.* (1986), LAMAGAT & *al.* (1989), GAC & *al.* (1990) et ORANGE (1990) ont tour à tour synthétisé toutes les recherches entreprises dans différents domaines (climat, géologie, géomorphologie, hydrologie, pédologie, géochimie...) sur le haut bassin du fleuve.

On admet communément qu'un cycle hydrologique se déroule entre deux périodes de basses eaux. Sa durée est cependant variable puisqu'elle est liée au régime annuel des précipitations. Lorsque la saison des pluies commence tardivement et que les pluies sont peu abondantes, le cycle hydrologique peut, par suite d'un tarissement précoce s'achever en 11 voire 10 mois. Inversement l'arrivée précoce des pluies et une importante réalimentation des réserves souterraines peuvent se traduire par un cycle hydrologique plus long qu'une année civile. Dans cette étude, l'extension du cycle hydrologique a été fixée pour plus de commodité à la période allant du 1er juin au 31 mai de l'année suivante.

I - LES REGIMES DU FLEUVE SENEGAL

Dans le bassin versant supérieur du Sénégal, limité à la station de Bakel, trois régimes hydrologiques du fleuve se succèdent : le régime tropical de transition, le régime tropical pur et le régime sahélien (FRECAUT & PAGNEY, 1982).

Le régime tropical de transition concerne une superficie de 28 000 km² (soit 13 % de la surface du bassin) où la pluviosité annuelle est supérieure à 1200 mm. Il affecte les trois branches mères du fleuve (Fig. 1) : les 2/3 du cours du Bafing, les 2/5 de la Falémé et le cours supérieur du Bakoye. C'est un régime caractérisé par des variations brutales et une très grande irrégularité dans la date d'apparition des maxima et des minima mensuels.

Le régime tropical pur se différencie du précédent par une saison des hautes eaux moins longue. Il concerne une superficie de 108 000 km² (soit 50 % du bassin versant) et s'étend sur le bassin inférieur du Bafing, les 3/5 de la Falémé, le Bakoye et l'intégralité de son affluent le Baoulé.

Le régime sahélien caractérise toute la zone du bassin où la pluviosité est inférieure à 700 mm. Il concerne la totalité des bassins de la Kolimbiné et du Karakoro. Les écoulements deviennent de plus en plus sporadiques au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le Nord. Notons que l'augmentation très importante de la superficie théorique du bassin versant qui en résulte, réduit singulièrement les débits spécifiques.

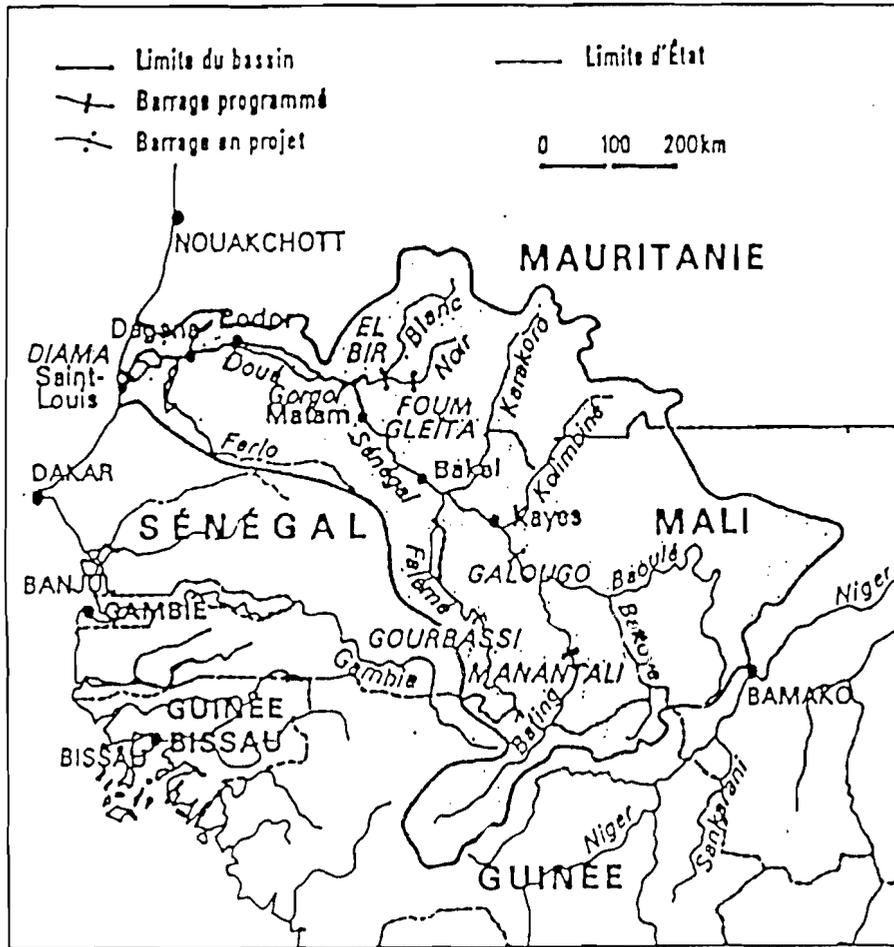


Fig. 1.- Le bassin versant du fleuve Sénégal

En fait l'influence de la zone sahélienne est négligeable. Elle a simplement pour effet de freiner très légèrement l'amortissement de la crue entre Galougo/Gouina et Bakel et d'augmenter probablement l'irrégularité interannuelle en apportant un volume notable en année de très forte hydraulicité sur la zone sahélienne et pratiquement des écoulements nuls en année sèche (RODIER, 1964). L'influence de la zone tropicale de transition est également de peu d'importance : les apports précoces de cette zone arrivent en juin et juillet à Bakel en même temps que l'écoulement provenant des premières crues de la zone tropicale qui les estompent. Ils ne conduisent qu'à un léger renforcement du débit d'étiage, surtout en année moyenne ou abondante. Le régime à Bakel correspond donc au régime tropical pur à condition de rapporter les débits à une superficie de 135 000 km², partie réellement active du bassin (RODIER 1964).

II - HISTORIQUE DES OBSERVATIONS SUR L'IMPORTANCE DES ECOULEMENTS DU FLEUVE SENEGAL

1 - Avant le XX^{ème} siècle

Avant 1901, aucune station d'observation des hauteurs d'eau n'était implantée sur le fleuve Sénégal. De nombreux documents historiques et d'anciennes cartes géographiques permettent cependant d'esquisser dans ses grandes lignes le régime des écoulements du fleuve avant le XX^{ème} siècle.

Les récits des voyageurs confirment au XVII^{ème} siècle l'importance des hautes eaux, des crues et des débordements du fleuve Sénégal.

Dès 1638, date de l'installation des Français dans l'île de Baba Gueye située à proximité de l'embouchure du fleuve, ROCHEFORT signalait que "*les débordements du fleuve étaient si grands que leurs habitations étaient pleines d'eau jusqu'au premier étage...*".

De nombreux hauteurs contemporains tels HENRY (1918), TROCHAIN (1940), et PAPY (1951) en dépouillant les archives sur l'importance de l'intrusion de la mer dans la basse vallée du Sénégal (voir GAC et *al.* 1982, 1990) ont pu établir qu'il n'était pas nécessaire de remonter très à l'amont du fleuve pour trouver de l'eau douce pendant la saison sèche. On en conclût que les crues ~~devaient~~ devaient être suffisamment importantes pour achever leur cycle annuel sur des étiages conséquents qui annihilèrent la remontée des eaux marines en domaine continental.

Les témoignages sont concordants : les bateaux-citernes, chargés du réapprovisionnement en eau douce de la ville de Saint-Louis, ne remontaient pas au-delà du village de Richard Toll situé à 170 km de l'embouchure du fleuve. Les travaux d'aménagements entrepris en 1859 par Faidherbe sur le Kassack (défluent de la basse vallée) pour constituer une réserve d'eau douce furent emportés par la crue. Vers 1860, le lieutenant de vaisseau BRAOUZEC, navigua à bord d'une canonnière sur les terres inondées du Fouta Ferlo; à la suite de ce voyage, on conçût même le projet de "*gagner la Gambie par le lac de Guiers et la vallée du Ferlo*".

Les débordements étaient parfois tellement importants que les eaux du fleuve se répandaient fort loin en Mauritanie.

DURAND (1875) rapporte "*qu'entre le cap Mirick et la petite île de Tider, à 18 lieues environ d'Arguin, on voyait l'embouchure de la rivière St Jean grossie par les eaux du Sénégal*".

GALLIENI, en 1879, notait l'importance de l'inondation dans le Walo. La crue de 1890 fût tellement forte que le Sénégal gonflé par des précipitations abondantes déborda dans toutes les directions. Le colonel FREY signale que cette année-là, "*la ville de Saint Louis se trouva en partie submergée et que dans cette nouvelle Venise, la circulation n'était possible qu'à l'aide de bacs ou de pirogues*". Selon DUCHEMIN (1951), "*l'eau de cette année (1890) aurait atteint les salines de Nouaremach situées à 100 km de Nouakchott*". Selon une autre version, l'eau du Sénégal serait

remontée jusqu'à Tirvourvour et aurait rejoint par la vallée de l'Oued Targa les eaux qui descendaient de l'Adrar.

En 1906, le capitaine VALLIER après plusieurs séjours dans le Ferlo commentait les événements de 1890 en ces termes "*Tout en un mot... donne l'impression qu'à une époque récente, la Sénégambie devait être un vaste delta où un volumineux fleuve épandait ses eaux que charriaient des artères secondaires et dont nos vallées d'érosion actuelle seraient le tracé persistant*".

La période allant du XVII^{ème} au XX^{ème} siècle a donc été caractérisée par des précipitations abondantes et des écoulements importants. Au XIX^{ème}, par exemple les grandes crues répertoriées sont celles de 1827, 1841, 1843, 1858, 1866, 1871, (1875 ?) et 1890. Cette dernière est particulièrement connue par les travaux de DUCHEMIN (1951) et l'enquête administrative dont le rapport figure aux J.O. du Sénégal (année 1890, n° des 9 et 30 octobre) où il fait mention d'une crue supérieure à celle de 1906. Il y a cependant eu quelques séquences sèches mais elles avaient vraisemblablement un caractère d'aridité moins prononcé que celles de notre époque.

Tout semble concorder pour affirmer qu'un profond bouleversement climatique est intervenu à la fin du siècle dernier. Selon HURST (1954) *in* PARIS-TEYNAC (1962), les écoulements du Nil se sont réduits de 30 % passant de 110 milliards de m³ (débit moyen annuel de 1870 à 1898) à 83 milliards de m³ (de 1899 à 1952). Le lac Tchad a vu sa superficie se réduire considérablement (THILO, 1910). L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal a pris des proportions inquiétantes. On peut s'interroger avec GIRAUD (1951), COGELS et GAC (1982) sur les raisons profondes de ce bouleversement et sur le caractère irréversible ou transitoire de cet événement.

Les causes éventuelles du changement de régime au début du XX^{ème} siècle ont été évoquées par KANE (1985) : diminution récente des précipitations, accélération de la vitesse des crues, déboisement, défoncement du seuil de Faff (Bancal, 1924 *in* GAC et al. 1990).

Pour le fleuve Sénégal, elles se sont traduites par des modifications de l'importance des crues et des modalités de leur écoulement.

En conclusion de ses travaux sur les débits du Nil, du Niger et du Sénégal, PARIS-TEYNAC (1962) affirmait "*Il peut être présumé que la fin du XX^{ème} siècle connaîtra à nouveau une époque de forte hydraulité, époque comparable peut-être à celle enregistrée en Afrique à la fin du siècle dernier. Pour les années proches à venir, le graphique du fleuve Sénégal nous indique, comme celui du fleuve Niger d'ailleurs (Fig. 2), une série probable de faible hydraulité (après 1965)*".

Pour l'instant, la seconde affirmation de PARIS-TEYNAC sur un futur épisode aride à venir après 1965 s'est vérifiée, même si l'expression employée "*d'années proches*" ne s'applique pas tout à fait aux deux décennies passées de sécheresse. Quant à un retour à des conditions plus humides avant la fin du siècle, il ne reste qu'à le souhaiter pour toutes les populations sahéliennes et à...espérer !.

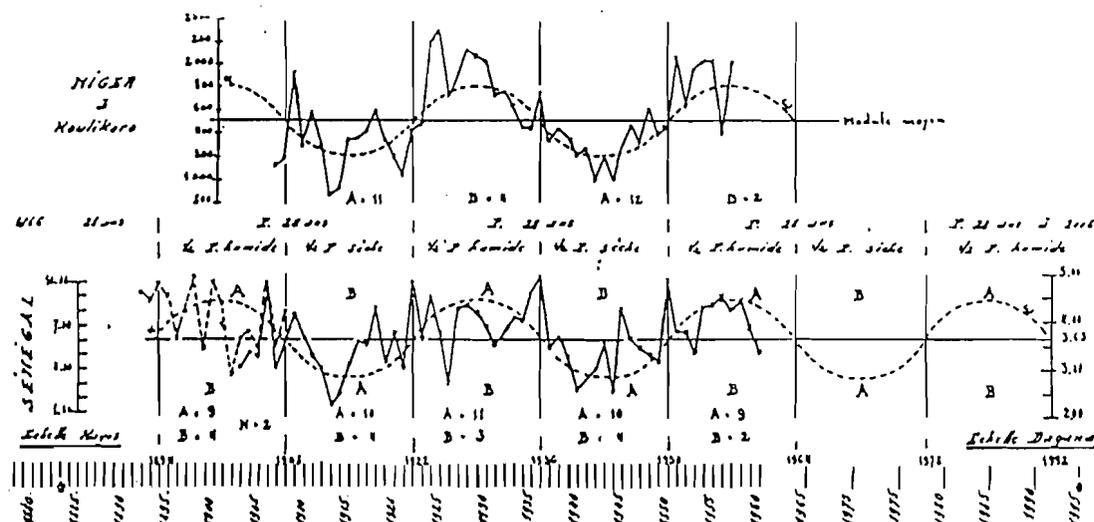
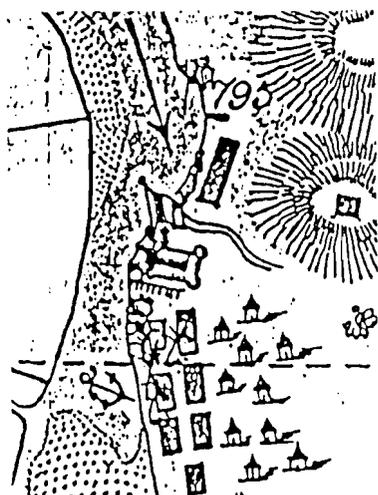


Fig. 2 - Variations annuelles du Niger et du Sénégal
(selon PARIS-TEYNAC, 1962)

2 - Au cours du XX^{ème} siècle

Selon ROCHETTE (1974) " Commencées au début du siècle pour les besoins de la navigation, les observations limnimétriques du bassin du Sénégal se sont progressivement développées pour des besoins plus diversifiés (projets hydro-électriques, irrigation, prévisions de crues ...). Elles ont connu d'assez nombreuses vicissitudes, du fait notamment de la détérioration des échelles limnimétriques et de leurs remplacements successifs avec des calages mal connus. Une abondante documentation hydrologique s'est ainsi accumulée pendant un demi-siècle, mais des lacunes et imprécisions multiples la rendaient difficilement exploitable pour les projets d'aménagement hydraulique".



Il aura fallu près de trois ans aux hydrologues de l'ORSTOM pour classer, vérifier, valoriser au maximum toute la documentation hydrologique contenue dans des archives disparates et aboutir à la Monographie hydrologique du bassin du fleuve Sénégal. L'édition définitive de cet ouvrage de référence publiée, en 1974, par ROCHETTE fait toujours autorité.

L'installation d'une échelle limnimétrique à Bakel remonte à 1901. Elle était située en rive gauche au pied du poste fortifié bâti sur un éperon rocheux (Fig. 3 a,b).

Fig. 3 a - Carte schématique de balisage établie pour le fleuve Sénégal par FROMAGET (1908). Agrandissement de la planche XLVII correspondant au secteur de Bakel et à la portion du cours d'eau située entre les km 785 et 795 (de Tuabo à Bakel).

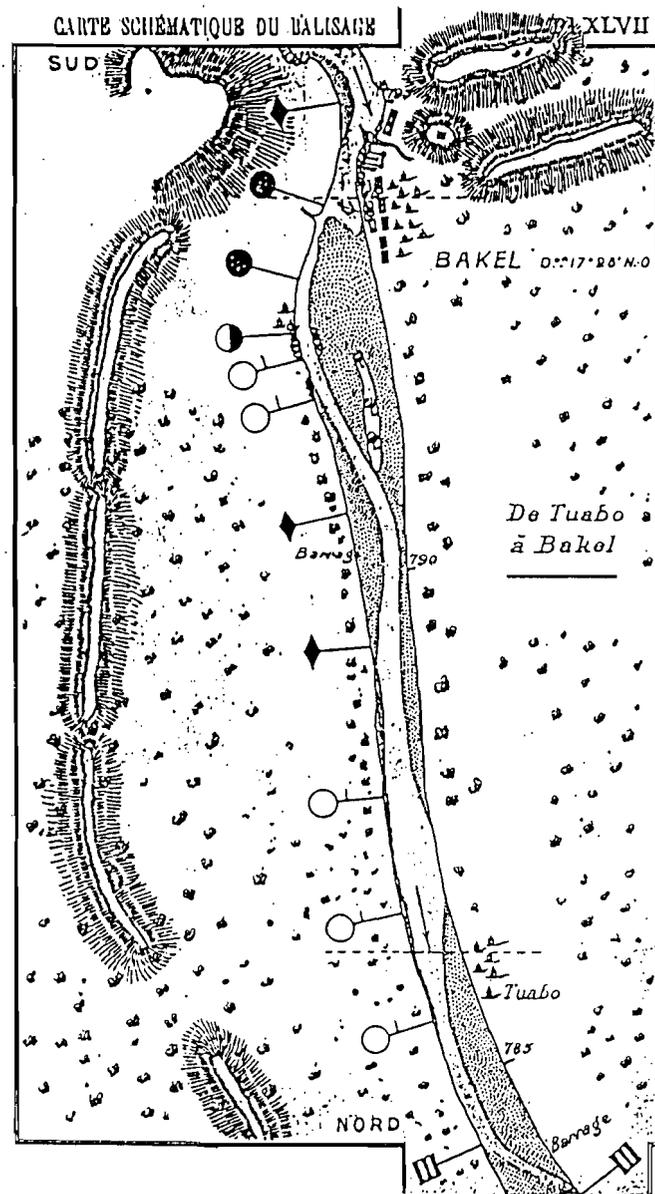


Fig. 3 b - Planche XLVII de la carte schématique du balisage du fleuve Sénégal établie par FROMAGET (1908). L'échelle de crue indiquée par (IIIIIIII) se situe au pied et en aval du fort. On remarquera, essentiellement en rive droite les signaux et amers du balisage du chenal : disque blanc (passer à 100 mètres), disque noir et blanc (passer à 75 mètres), disque noir (passer à 50 mètres) et losange noir (se tenir au milieu du fleuve).

Cette échelle a été observée jusqu'en 1951. Dans son étude critique des informations recueillies, ROCHETTE (1974) abouti à la conclusion " que pendant près de 50 ans l'échelle n'a pas subi de modifications ". La seconde échelle installée 50 m en aval de l'ancienne est encore en parfait état et lue deux fois par jour. Les relevés sont sûrs et complets. Depuis 4 ans les observations de terrain sont couplées, à l'aide d'enregistrements par balise argos et transmises par satellite.

III - L'ABONDANCE FLUVIALE A BAKEL

De tous les fleuves sahéliens, le Sénégal est celui qui dispose de la plus longue série d'observations. A Bakel l'information est complète depuis 1903 (ROCHETTE, 1974; SOW, 1984; ORANGE, 1986; GAC et KANE 1986; ORANGE 1990). Cette station a une situation géographique très favorable, se situant en aval de la confluence de tous les affluents du haut bassin avec le bras principal

1 - Bilan annuel des écoulements et variabilités interannuelle, mensuelle et journalière

Depuis le début du siècle (1903/1904 à 1990/1991), le module moyen annuel à Bakel est de 700 m³/s, représentant un écoulement moyen annuel de 22. 10⁹ m³; 94 % de cet écoulement transite de juillet à novembre (Tableau I).

Tableau I

Débits moyens mensuels et interannuels du Sénégal à Bakel (en m³/s)
Périodes 1903/1991 - 1972-1991 et 1979-1991

Périodes	1903-1991	1972-1991	1979-1991
Juin	92	36	25
Juillet	546	370	325
Aout	2165	1297	103
Septembre	3076	1673	145
Octobre	1494	751	607
Novembre	511	267	191
Décembre	221	93	65
Janvier	122	48	36
Février	71	26	23
Mars	38	16	20
Avril	16	8	12
Mai	9	11	16
Module	700	384	319

L'irrégularité des écoulements constitue la caractéristique principale des fleuves tropicaux. Depuis 1903, les débits moyens à Bakel ont varié dans un rapport de 1 à 6 (Tableau II). Les valeurs maximales ont été observées au cours des cycles hydrologiques 1967/1968 (1325 m³/s) et 1924/1925 (1275 m³/s). Les écoulements les plus faibles ont été enregistrés au cours des cycles 1984/1985 (216 m³/s) et 1983/1984 (218 m³/s).

Tableau II

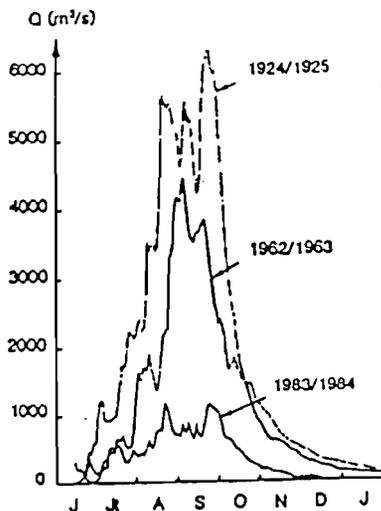
Débits moyens mensuels et annuels à Bakel de 1903 à 1991 (m³/s)
(mm3, mm5, mm7 : moyennes mobiles sur 3, 5 et 7 ans)

ANNEE	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	Q An.	mm 3	mm 5	mm 7
1903-04	120	746	1937	2535	1060	476	202	124	74	40	15	10	614			
1904-05	30	719	2655	3166	1127	586	274	142	85	50	22	10	742	744		
1905-06	236	977	2735	2303	2342	1072	375	193	111	64	30	15	877	951	802	
1906-07	143	1174	5751	4218	1618	838	467	250	140	80	40	10	1235	885	835	816
1907-08	120	590	960	2177	1311	619	340	185	110	62	28	10	544	852	871	824
1908-09	81	822	2276	3720	1390	500	235	130	75	42	18	10	777	747	830	796
1909-10	286	992	3083	4201	1308	591	255	140	83	46	20	10	921	791	692	752
1910-11	120	590	2233	2942	1231	472	215	120	70	38	16	10	674	713	697	615
1911-12	120	590	1538	2401	939	432	220	125	72	38	16	10	543	595	596	601
1912-13	120	590	1471	2352	1298	436	230	135	78	43	18	10	567	462	502	575
1913-14	120	336	724	936	687	251	121	64	30	10	4	10	276	431	486	543
1914-15	120	590	1323	1477	1036	360	200	115	70	40	16	10	449	440	517	540
1915-16	90	653	1956	2418	1225	350	190	105	62	34	12	5	595	580	534	630
1916-17	4	726	1826	3301	1603	400	210	120	70	38	16	10	696	648	713	624
1917-18	20	294	2173	3458	1145	330	185	100	58	32	11	10	653	840	729	706
1918-19	200	883	3633	5322	2556	647	335	202	122	65	30	10	1171	784	780	704
1919-20	140	404	1704	2221	1029	356	210	115	70	38	15	10	528	850	727	793
1920-21	120	540	2690	4315	1287	604	290	160	95	52	23	10	850	603	840	801
1921-22	120	396	1201	2100	740	270	150	90	50	26	10	10	431	833	757	891
1922-23	40	411	3415	6569	2724	777	316	158	95	53	23	10	1218	802	907	844
1923-24	90	646	1808	3764	1437	741	272	138	80	44	19	10	755	1085	906	844
1924-25	144	1440	4147	5530	2403	804	384	210	125	70	32	14	1281	960	925	878
1925-26	103	408	2332	3293	2458	768	325	185	110	65	30	10	844	884	900	949
1926-27	140	507	1607	1785	973	728	270	137	76	43	18	10	526	821	935	907
1927-28	120	772	2967	4745	2743	885	380	205	120	70	32	10	1091	849	862	919
1928-29	50	356	1146	4693	1683	699	241	130	77	39	15	10	930	981	862	843
1929-30	300	885	3074	4512	1327	434	217	123	71	38	15	10	920	897	906	833
1930-31	170	649	2621	3412	1929	608	290	167	97	58	25	10	840	836	842	879
1931-32	170	976	1771	2777	2080	552	270	155	90	50	22	10	747	787	827	825
1932-33	130	780	2859	3138	1371	445	227	130	75	43	19	10	773	791	786	859
1933-34	153	1149	3423	3564	1076	386	200	115	68	35	12	10	854	780	851	905
1934-35	20	270	2501	3503	1311	440	220	130	75	43	19	10	714	911	950	878
1935-36	120	896	4269	4971	2450	630	265	152	88	50	20	10	1166	1041	925	888
1936-37	85	620	4714	5825	2210	708	335	172	103	61	25	10	1244	1019	918	858
1937-38	120	408	1795	3084	1348	504	230	130	75	41	17	10	648	903	888	799
1938-39	120	494	1901	4065	1850	794	270	150	88	48	21	2	818	677	743	757
1939-40	28	368	1992	2071	1362	435	220	125	72	40	16	10	565	608	578	653
1940-41	50	212	1342	1381	1288	525	200	120	68	38	15	10	440	474	536	571
1941-42	120	339	1158	2115	740	247	130	75	44	19	6	10	418	432	506	525
1942-43	120	385	1896	1715	539	266	140	80	45	25	8	10	438	508	459	547
1943-44	120	366	1867	2951	1801	443	195	110	65	35	14	10	667	479	565	574
1944-45	120	225	814	1444	663	339	160	95	55	28	10	10	331	656	632	607
1945-46	120	396	3450	4886	1854	463	195	110	65	35	14	10	969	685	679	630
1946-47	120	379	2600	2989	1819	580	240	130	75	41	17	10	754	799	661	635
1947-48	120	343	1877	3418	1516	396	180	105	60	32	12	5	674	667	689	701
1948-49	31	607	1863	2630	967	398	167	105	60	32	12	5	575	574	721	776
1949-50	9	335	2111	1905	794	216	123	73	42	20	10	5	473	726	741	742
1950-51	3	65	3092	5963	3041	778	305	152	85	42	14	4	1131	820	753	726
1951-52	57	395	1473	2332	3643	1437	423	215	125	64	27	5	854	905	766	785
1952-53	23	539	1428	2519	3098	597	246	134	71	36	17	4	731	742	889	856
1953-54	103	818	1607	2924	1250	464	219	139	80	40	14	13	641	820	878	928
1954-55	253	1012	4166	4394	1624	689	397	197	114	66	41	31	1087	934	902	915
1955-56	209	648	3672	4149	2596	777	347	204	118	68	33	14	1075	1046	964	942
1956-57	41	506	2305	5421	2159	636	287	167	98	58	23	8	977	1030	1044	953
1957-58	218	623	2725	4339	2900	943	251	197	116	66	31	18	1039	1020	989	951
1958-59	176	579	4098	3969	1887	796	446	239	138	82	39	19	1044	964	899	932
1959-60	165	597	2596	4087	1242	489	224	125	76	41	17	7	807	826	894	890
1960-61	82	812	1830	2481	1309	504	214	118	74	40	17	5	627	796	843	847
1961-62	105	821	3000	5249	1328	458	207	120	73	39	13	4	953	788	769	840
1962-63	86	536	2326	3657	1626	598	263	137	85	42	18	10	784	803	805	844
1963-64	9	508	1674	2741	1973	635	231	127	71	36	14	3	671	815	894	880
1964-65	173	633	2066	5841	1934	581	286	166	103	56	25	11	990	911	916	980
1965-66	87	522	3467	5453	1993	652	290	205	112	49	16	4	1073	1041	1024	913
1966-67	81	441	1739	3534	5029	1033	381	208	115	54	15	4	1059	1153	988	936
1967-68	99	695	3068	6763	3426	919	409	254	157	76	24	6	1327	959	978	933
1968-69	78	515	1257	2238	1038	358	201	98	45	15	3	1	489	919	894	896
1969-70	49	847	2100	3881	2549	1131	365	186	97	40	12	3	942	695	828	788
1970-71	21	358	2775	3052	951	337	168	86	42	15	4	2	654	774	626	700
1971-72	2	584	3266	3272	973	310	151	72	35	11	3	1	727	566	617	626
1972-73	57	349	978	1315	590	259	131	61	28	8	3	3	317	496	591	643
1973-74	125	394	2109	1711	588	216	88	42	19	6	2	1	444	525	581	575
1974-75	4	745	3518	3394	1381	367	155	73	37	15	4	2	813	621	529	527
1975-76	0	558	1553	3267	1201	380	162	77	38	14	3	1	606	627	529	495

Tableau II (suite)

Débits moyens mensuels et annuels à Bakel (m^3/s)
(mm3, mm5, mm7 : moyennes mobiles sur 3, 5 et 7 ans)

ANNEE	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCTO	NOVE	DÉCE	JANV	FÉVR	MARS	AVRI	MAI	Q An.	mm 3	mm 5	mm 7
1976-77	4	490	1456	1147	1145	875	226	109	51	21	6	2	464	463	541	494
1977-78	2	240	829	1640	759	214	74	36	13	3	1	1	319	429	440	466
1978-79	8	359	1764	1858	1314	462	153	73	32	9	2	1	506	376	396	431
1979-80	45	311	983	1276	569	282	104	45	17	4	1	0	304	400	389	388
1980-81	22	317	1545	1941	484	194	89	38	15	4	1	0	389	373	386	353
1981-82	29	454	1858	1710	658	224	90	43	19	4	1	0	427	374	329	339
1982-83	0	235	1132	1376	559	222	81	37	14	3	1	0	306	318	312	317
1983-84	78	380	682	817	434	139	54	24	8	2	1	0	220	248	305	323
1984-85	38	470	758	571	540	137	50	17	5	2	1	0	218	265	289	299
1985-86	0	391	1414	1651	562	155	56	19	9	3	1	0	357	306	272	299
1986-87	0	267	705	1874	850	264	90	38	16	7	3	1	343	307	313	311
1987-88	0	124	496	938	642	130	61	80	54	51	4	60	221	331	349	314
1988-89	104	328	929	2835	701	90	22	8	10	34	35	39	428	348	324	
1989-90	103	275	1297	1797	773	246	40	27	47	49	30	33	394	352		
1990-91	60	348	647	678	514	211	44	56	60	72	62	58	235			
1991-92	46	306	1149	1428												
Moy.	92	546	2165	3076	1494	511	221	122	71	38	16	9	700			



L'hydrogramme annuel est toujours monomodal, avec en général, un seul épaulement en août et septembre et une longue courbe de tarissement d'octobre à mai, quelque soit l'hydraulicité de l'année considérée. La figure 4 représente trois hydrogrammes de crue types du fleuve Sénégal à Bakel : 1924/25 (crue forte), 1962/63 (crue moyenne) et 1983/84 (crue la plus faible du siècle).

Fig. 4 - Hydrogrammes de crue types du fleuve Sénégal à Bakel.

A l'irrégularité interannuelle s'ajoute celle des débits moyens mensuels. Les plus importants débits moyens mensuels ont été observés en septembre 1967 ($6763 m^3/s$) et septembre 1922 ($6569 m^3/s$); les plus faibles lors des étiages prononcés des dernières années ($0,05 m^3/s$ en mai 1984 et $0,16 m^3/s$ en mai 1985). La plus forte cote ($13,28 m$) a été enregistrée le 24 août 1906; elle correspond à un débit journalier extrême de $8114 m^3/s$ (LAMAGAT, 1986).

2 - le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle

De nombreux auteurs ont étudié les variations du débit moyen annuel du fleuve Sénégal à Bakel (SIRCOULON, 1976 et 1985; FAURE et GAC, 1981; PALUTIKOF et al. 1981; OLIVRY 1983; GAC et FAURE 1987; PROBST et TARDY, 1987; ORANGE 1990).

Depuis 1968, à l'exception de trois années (1969, 1971 et 1974), toutes les années sont largement déficitaires par rapport à la moyenne quasi-séculaire (Fig. 5 et 6).

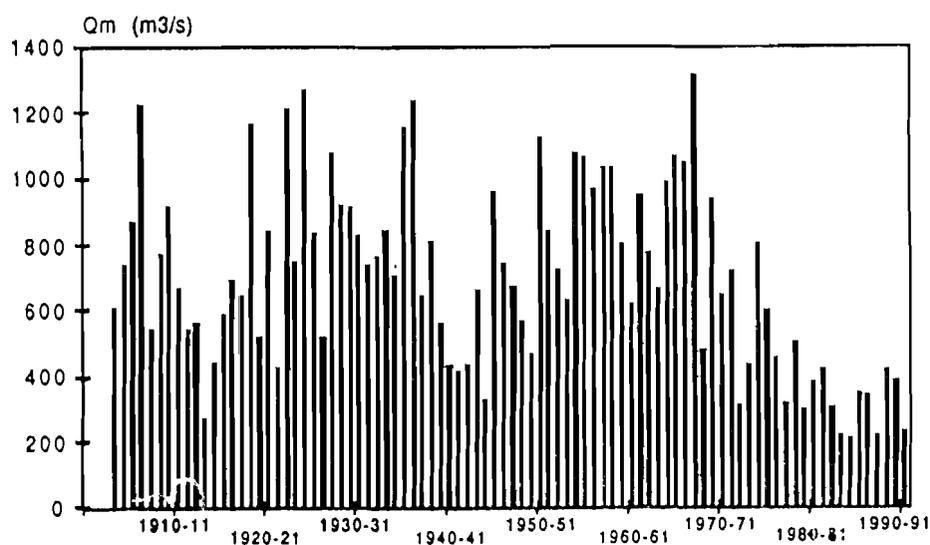


Fig. 5 - Evolution des modules du Sénégal (en m³/s) de 1903/04 à 1990/91.

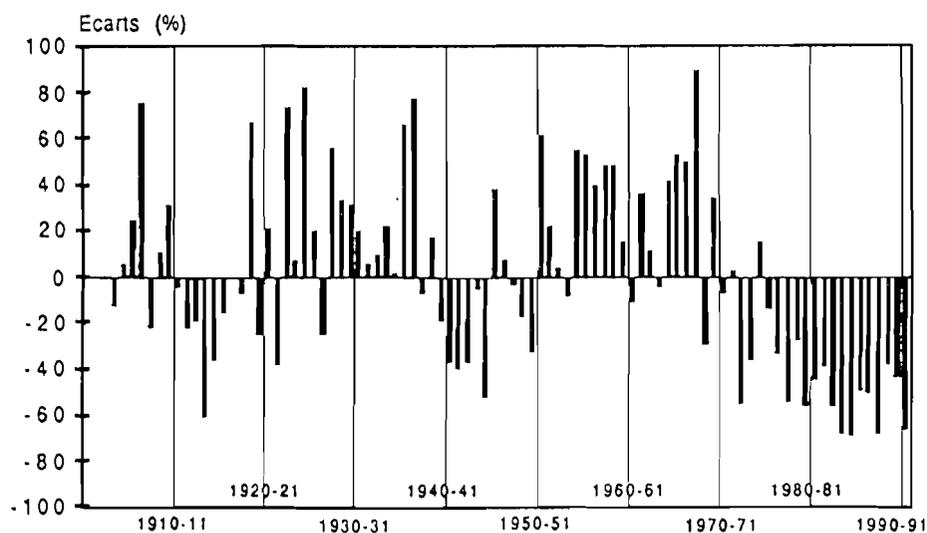


Fig. 6 - Excédent et déficit d'écoulement annuel par rapport au module moyen interannuel ($Q_m = 700 \text{ m}^3/\text{s}$). Evolution en % du rapport $Q_i - Q_m / Q_m$ (Q_i débit moyen de l'année i).

Le déficit a atteint son maximum lors des cycles hydrologiques 1983/84 et 1984/85 (70 % de déficit). Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle illustrée par la figure 6 apparaît aussi en dressant la liste des dix modules moyens annuels (en m^3/s) les plus faibles depuis le début des observations : 1984, 1983, 1987, 1990 (crue artificielle), 1913, 1979, 1982, 1972, 1977, 1986, 1985. Parmi les dix années les plus déficitaires figurent six années consécutives de la dernière décennie.

3 - Les cycles hydrologiques de 1979 à 1991

Ces 12 cycles hydrologiques ont été étudiés en détail. Ils correspondent aux 12 années successives de mesure en continu des processus d'érosion mécanique et d'altération chimique sur le haut bassin du fleuve Sénégal. Deux périodes sont distinguées : 1979-1986 (écoulements naturels) et 1986-1991 (crues artificielles après la mise en fonction du barrage de Manantali en novembre 1987).

a) de 1979/80 à 1986/87

Tous les ans, un premier écoulement fugace (fortement turbide) annonce l'arrivée réelle de la crue qui survient une quinzaine de jours plus tard. Ensuite la montée des eaux, lente en juillet, s'accélère brutalement en août: elle coïncide avec les premières grandes pluies; le lit mineur se remplit et les bras secondaires sont submergées. C'est la période de crue. Le retrait des eaux s'amorce en octobre et, dans tous les cas, il est très rapide. Le véritable tarissement commence début novembre et se prolonge jusqu'en mai.

En 1983/84, 1984/85, la montée des eaux est pratiquement inexistante, les hydrogrammes sont tronqués: il n'y a pas de crue véritable. D'autre part, la sévérité des étiages traduit le très grand épuisement des nappes phréatiques. L'étiage absolu a été atteint à Bakel en 1980, 1981, 1982, 1984 et 1985; le fleuve Sénégal ne s'était précédemment tari qu'en 1902, 1913, 1950 et 1974. On peut également souligner la rapidité de la décrue quelque soit l'hydraulicité de l'année et la faiblesse des débits de pointe de crue (de $3141 m^3/s$ en 1980 à $882 m^3/s$ en 1984 qui ne représentent respectivement que 65 % et 20 % du débit de pointe d'une année moyenne). Sur l'ensemble de la période d'observation, le maximum de la crue de 1984 constitue l'unique débit de pointe de crue à avoir été inférieur à $1000 m^3/s$.

Le module moyen de 1979/80 à 1986/87 s'élève à $319 m^3/s$, soit seulement 45 % du module interannuel observé pendant près d'un siècle. La répartition des débits au cours de l'année hydrologique reste cependant sensiblement la même : les mois de juillet, août, septembre, octobre et novembre voient encore transiter 95 % de l'écoulement annuel. Dans ce contexte d'aridité on distingue : deux cycles secs (1983/84 et 1984/85), quatre cycles moyens (1979/80, 1982/83, 1985/86 et 1986/87), deux cycles pseudo humides (1980/81 et 1981/82).

Cette période allant de 1979 à 1986 constitue un remarquable épisode dans la chronique des événements hydrologiques depuis le début du siècle.

Elle a vu se succéder, en un laps de temps très court, les quatre modes climatiques majeurs et leurs possibles variantes définies par CITEAU et *al.* (1984), CITEAU et CARN (1986), CITEAU et *al.* (1989), ORANGE (1990) : les climats chauds ou froids, secs ou humides. Ils sont caractérisés à partir de quatre paramètres hydroclimatiques : le débit du fleuve, la température de l'air et de l'eau du fleuve, la pluviosité. Si le débit d'un cours d'eau à son exutoire est une mesure qui intègre toute la "respiration hydrologique" de l'épiderme du bassin versant, en revanche les paramètres (températures et pluies) sont des données ponctuelles qui expriment l'état climatique à l'exutoire.

L'évolution interannuelle des paramètres hydroclimatiques du bassin versant du Sénégal est illustrée par la figure 7 et les données chiffrées correspondantes sont données dans le tableau III.

Tableau III

Moyennes annuelles des quatre paramètres hydroclimatiques
(Q en m³/s, P en mm, T_A et T_E températures de l'air et de l'eau en °C)

	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Q	309	409	426	307	221	218	356	341
P	409	411	533	574	402	251	533	469
T _A	30.2	30.0	29.8	29.1	31.4	31.1	30.7	30.5
T _E	28.7	28.3	27.1	26.4	26.9	27.8	26.1	26.7

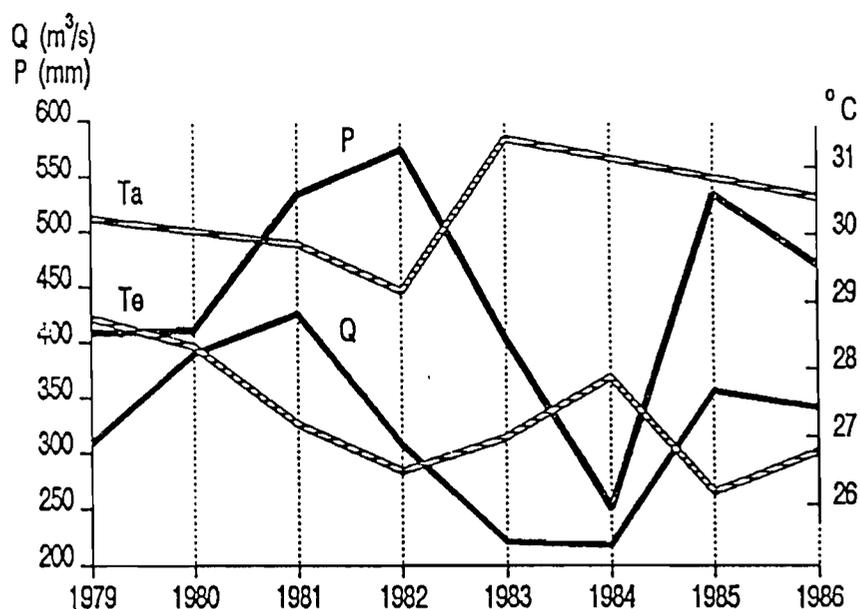


Fig. 7 - Evolution interannuelle des paramètres hydroclimatiques

Année 1979: année moyenne normale (sèche froide)

L'hydrogramme annuel montre deux pointes de crue (Fig. 8). La première a lieu début août et la seconde est centrée sur la première quinzaine de septembre, la pointe de crue étant atteinte le 2/9/79 avec un débit de 1792 m³/s. La montée des eaux est rapide et par à-coups alors que la descente est plus lente et plus régulière. Le module annuel s'établit à 303 m³/s.

La température de l'eau du fleuve est stable autour de 30°C de juin à octobre puis elle décroît en même temps que la température de l'air: le minimum est atteint en décembre. Sur la période de 8 ans, le cycle est considéré comme moyen normal (année sèche froide).

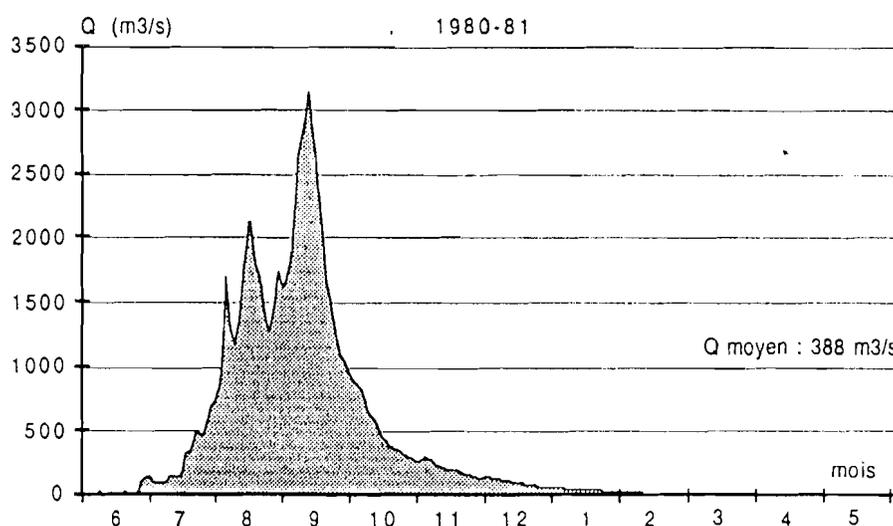
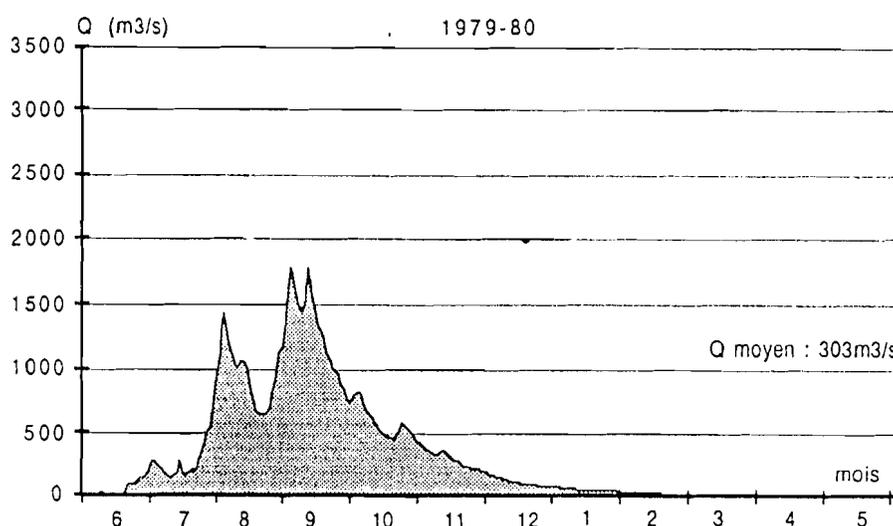


Fig. 8 - Hydrogrammes des crues 1979/80 et 1980/81

Année 1980 : année anormalement humide et froide

L'écoulement est inférieur à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ de janvier à juin et en décembre (Fig. 8) : l'étiage dure 3 mois de mars à mai. L'hydrogramme annuel se caractérise par trois pointes de crues successives, la dernière étant la plus importante : $3141 \text{ m}^3/\text{s}$ le 10/9/80. Le module est de $388 \text{ m}^3/\text{s}$.

La température de l'eau du fleuve et la température de l'air ont des évolutions analogues à celles de l'année précédente. L'écart en fin de saison sèche entre ces deux paramètres est plus important.

Année 1981 : année anormale (humide froide)

L'écoulement est inférieur à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ de janvier à juin et en décembre; l'étiage dure trois mois de mars à mai. L'hydrogramme annuel (Fig. 9) montre trois pointes de crue mal individualisées, la première étant la plus importante et situant le maximum à $2578 \text{ m}^3/\text{s}$ le 10/8/81. Le module est de $424 \text{ m}^3/\text{s}$.

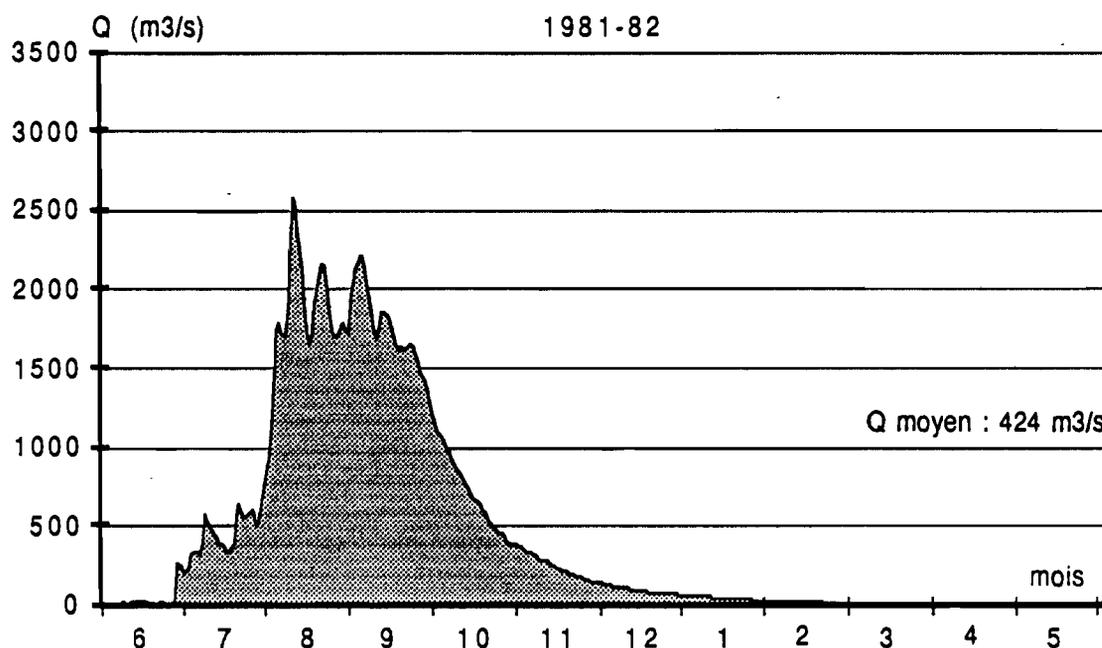


Fig. 9 - Hydrogramme de crue en 1981/82

En 1981, la température de l'eau du fleuve mime l'évolution de la température de l'air avec des amplitudes moins importantes.

Année 1982 : année anormale (sèche froide)

L'écoulement est inférieur à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ de janvier à juin et en décembre (Fig. 9 et 10). L'étiage dure quatre mois de mars à juin.

L'hydrogramme annuel montre une seule véritable pointe de crue : 2183 m³/s le 31/8/82. Le module est de 305 m³/s.

L'évolution de la température de l'eau du fleuve est de nouveau monomodale avec une période stable à 30° C d'avril à octobre. La température de l'air est moins élevée et le caractère bimodal de sa courbe d'évolution annuelle est moins marqué.

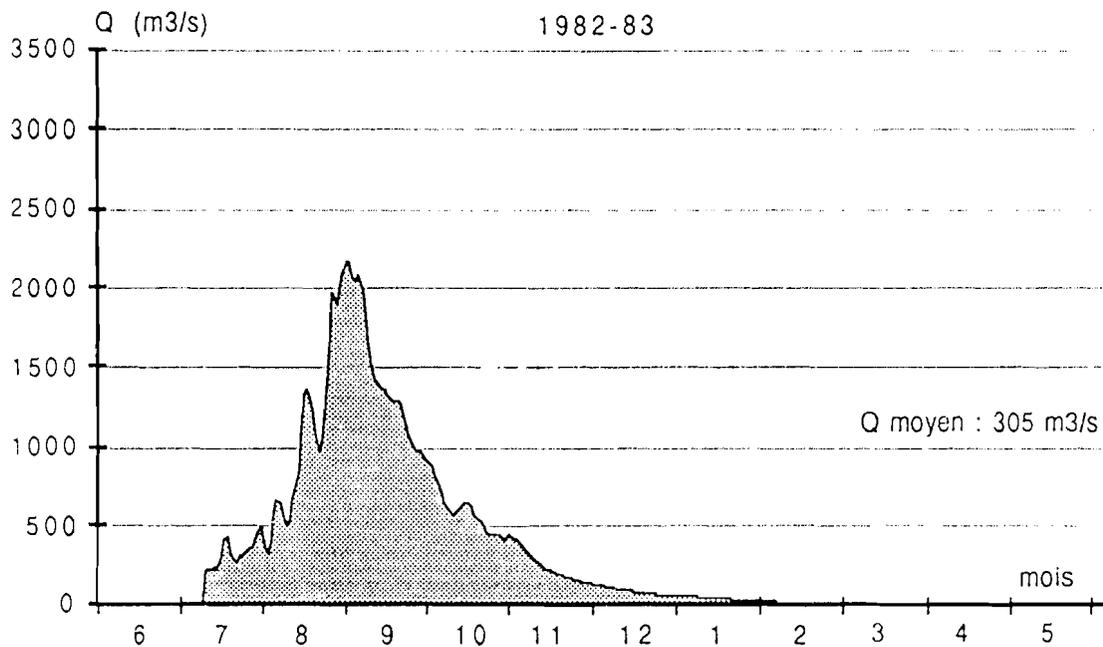


Fig. 10 - Hydrogramme de crue 1982/83

Année 1983 : année anormalement sèche et chaude

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à mai et en décembre (Fig. 10 et 11). L'étiage dure trois mois de mars à mai. Une première crue est exceptionnellement enregistrée en juin : elle est due à un événement pluvieux important localisé près de Bakel (64,4 mm le 16/6/83). Après cette montée atypique des eaux, le fleuve retrouve son niveau d'étiage fin juin. La crue proprement dite commence début juillet, l'hydrogramme a une forme extrêmement aplatie. Le mois de juillet est normal mais les pointes de crue d'août et de septembre sont nettement écrêtées. Le maximum de crue (1153 m³/s) est atteint le 22/8/83. Le module est de 218 m³/s.

La température de l'eau atteint son palier plus tardivement que l'année précédente. Les températures de l'air sont élevées.

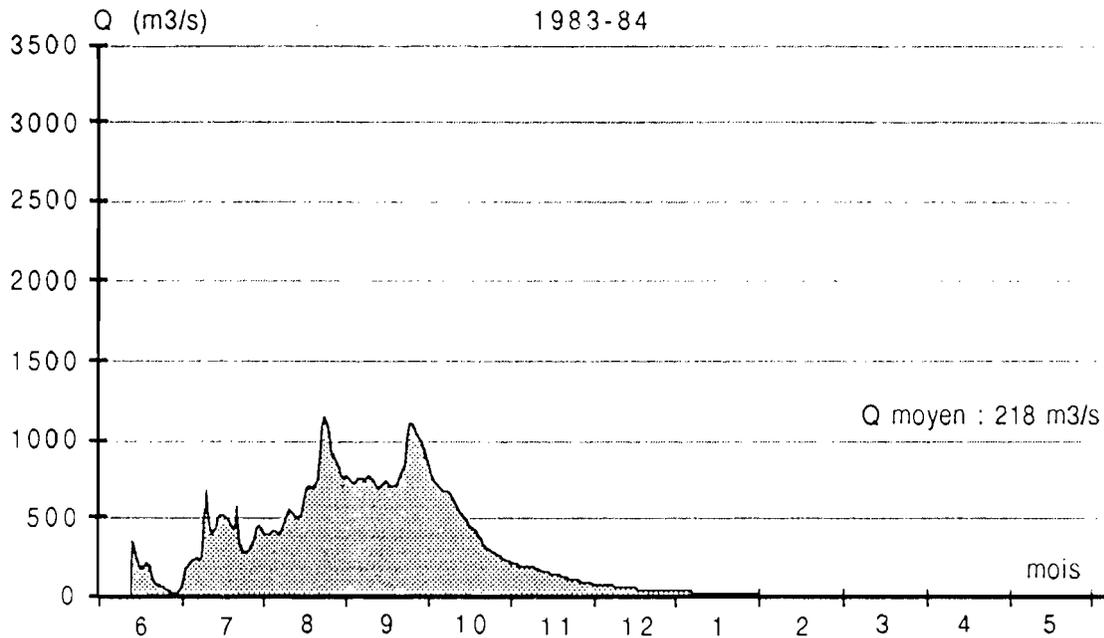


Fig. 11 - Hydrogramme de crue 1983/84

Année 1984 : année anormalement sèche chaude

L'écoulement est inférieur à 100 m^3/s de janvier à juin et en décembre (Fig. 11 et 12); suite au déficit de l'année précédente l'étiage dure cinq mois de février à juin. A l'exception de la crue tardive enregistrée en octobre et sensiblement égale à la pointe de crue annuelle atteinte le 24/8/84 avec 882 m^3/s , aucun pics de crue n'apparaît. Cet hydrogramme est encore plus aplati que l'année précédente et le module de 216 m^3/s est le plus faible du siècle.

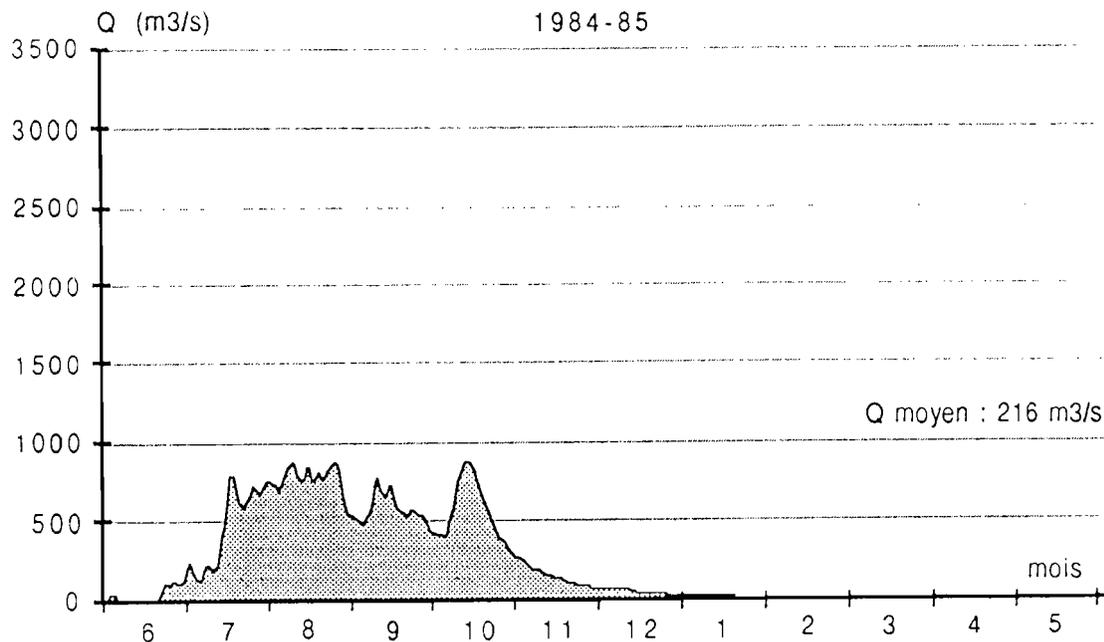


Fig. 12 - Hydrogramme de crue 1984/85

Les températures de l'eau sont supérieures à 30°C dès le mois de mai. La température de l'air présente une évolution bimodale.

Année 1985 : année normale (humide chaude)

Suite à la faiblesse des deux crues précédentes, la période d'étiage s'étale de janvier à juin et malgré une pointe de crue relativement importante (2370 m³/s le 10/9/85), le niveau d'étiage est déjà atteint fin décembre (Fig. 12 et 13). Le corps de l'hydrogramme est unimodal et le module s'élève à 355 m³/s.

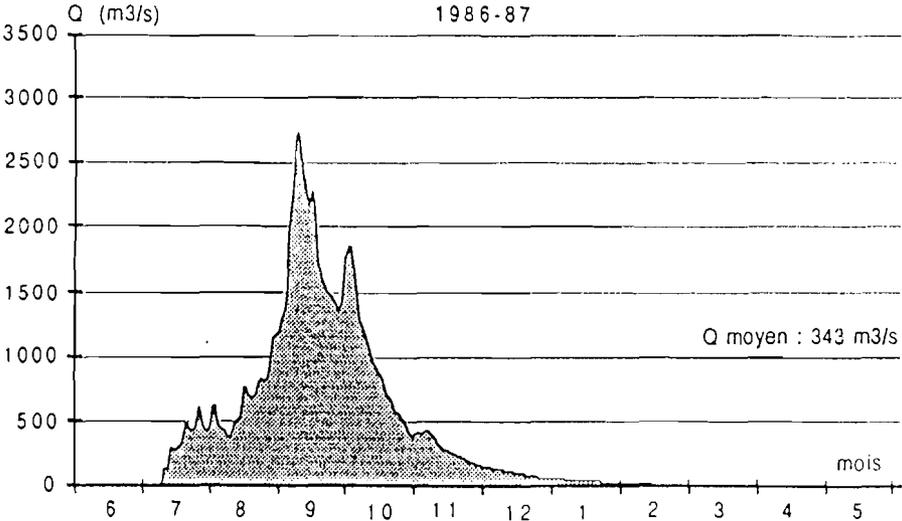
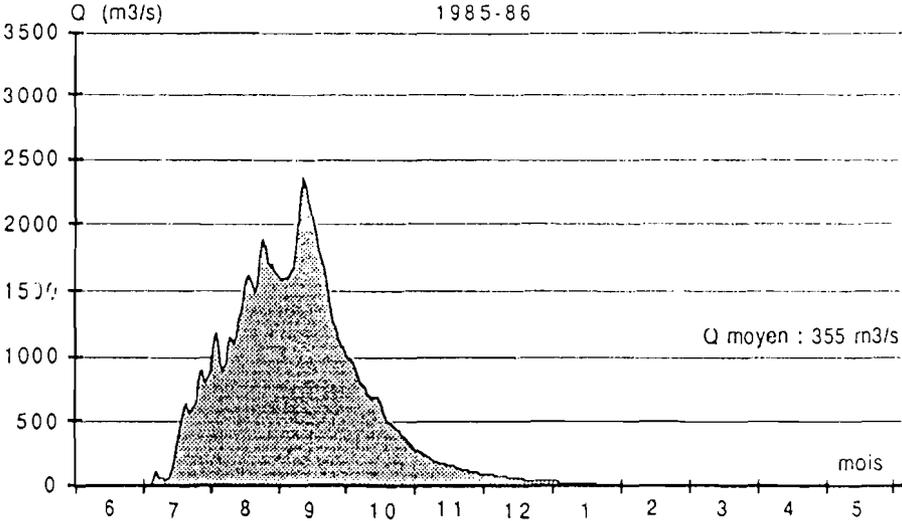


Fig. 13 - Hydrogrammes de crue 1985/86 et 1986/87

La température de l'eau du fleuve n'atteint son palier que vers juin-juillet. Le caractère bimodal de la courbe annuelle d'évolution de la température de l'air est bien marqué.

Année 1986 : année normale (humide chaude)

Comme l'année précédente, la période d'étiage est très longue et s'étend de janvier à juin (Fig. 13). La période des hautes eaux est réduite dans le temps. En effet, après une première impulsion en juillet, le débit se stabilise autour de 500 m³/s jusqu'à la mi-août. La montée des eaux est ensuite très rapide et la pointe de crue est atteinte le 8/9/86 avec un débit maximum de 2732 m³/s. La décrue est plus lente, elle est momentanément interrompue fin septembre-début octobre puis dans les premiers jours de novembre par deux crues secondaires.

La température de l'eau du fleuve évolue de manière classique avec un palier à 30° C dès avril et jusqu'à fin octobre. La température de l'air est pratiquement toujours supérieure à la température de l'eau.

b) Les crues artificielles du fleuve depuis 1987

Les cycles hydrologiques 1987/88, 1988/89, 1989/90 et 1990/91 se sont déroulés après la mise en service du barrage de Manantali en novembre 1987. Ce barrage est situé sur le Bafing à 350 km en amont de Bakel (Fig. 1).

Sa fonction est de régulariser partiellement (de 65 à 70 %) la crue annuelle pour étaler dans le temps la période des hautes eaux. En effet, d'après les estimations d'ORANGE (1990) sur la période 1979/86, les contributions respectives des différents affluents aux apports du bassin amont à l'exutoire de Bakel se répartissent de la manière suivante : 67 % (Bafing), 19 % (Falémé), 11 % (Bakoye-Baoulé) et 3 % pour les autres cours d'eau (Kolimbiné, Karakoro ...).

La gestion artificielle des écoulements du Bafing et du réservoir amont de retenue a une incidence sur les valeurs mensuelles des débits à Bakel (Tableau II). Ces "anomalies" sont particulièrement visibles à la décrue et à l'étiage où apparaissent de petites pointes de crue dues aux lâchures du barrage : elles sont tributaires de la gestion du barrage puisqu'à cette époque il n'y a pratiquement pas d'écoulements dans les autres collecteurs.

Les figures 14, 15, 16 et 17 représentent les hydrogrammes particuliers de crue des quatre cycles hydrologiques 1987/88, 1988/89, 1989/90 et 1990/91. Ces cycles ont successivement donné lieu à des modules annuels de 220, 428, 394 et 235 m³/s.

La gestion de Manantali n'est pas seulement fonction du remplissage du réservoir amont. Elle doit aussi prendre en compte l'élévation du plan d'eau dans la vallée en partie contrôlée par le barrage anti-sel de Diama situé à 50 km de l'embouchure du fleuve.

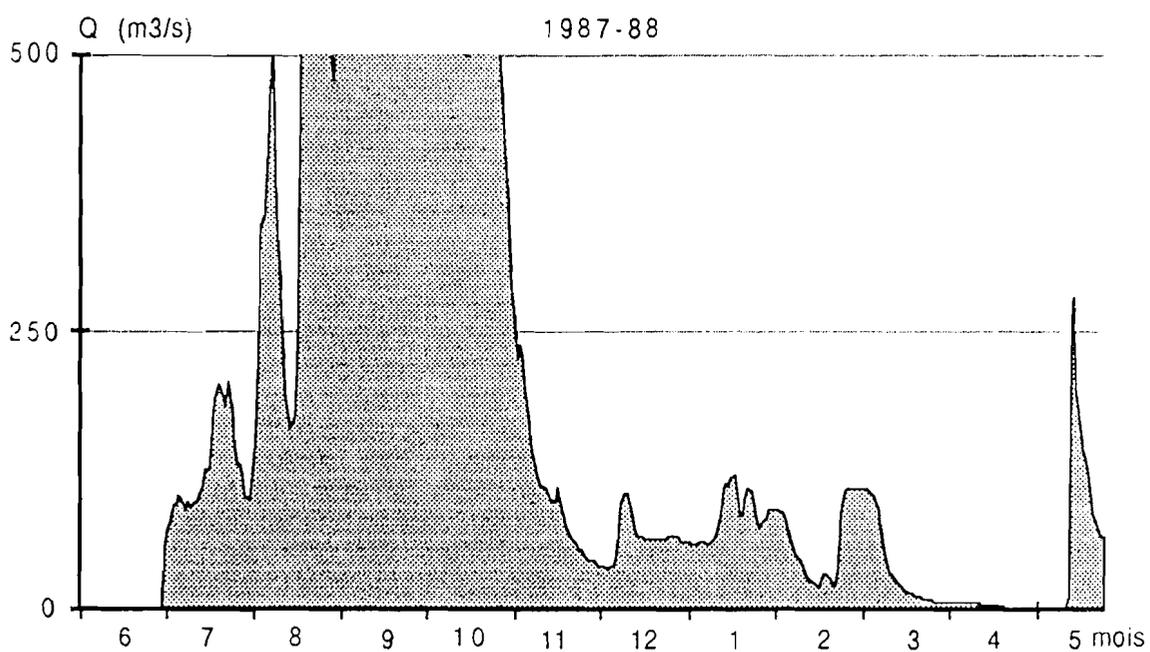
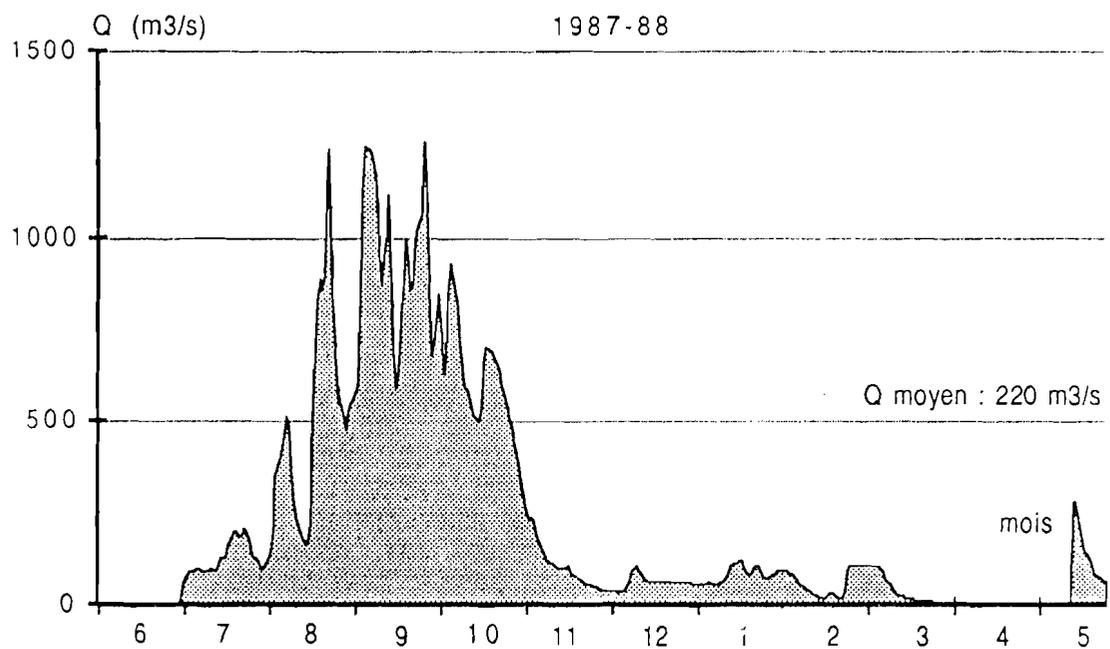


Fig. 14 - Hydrogramme de crue en 1987/88

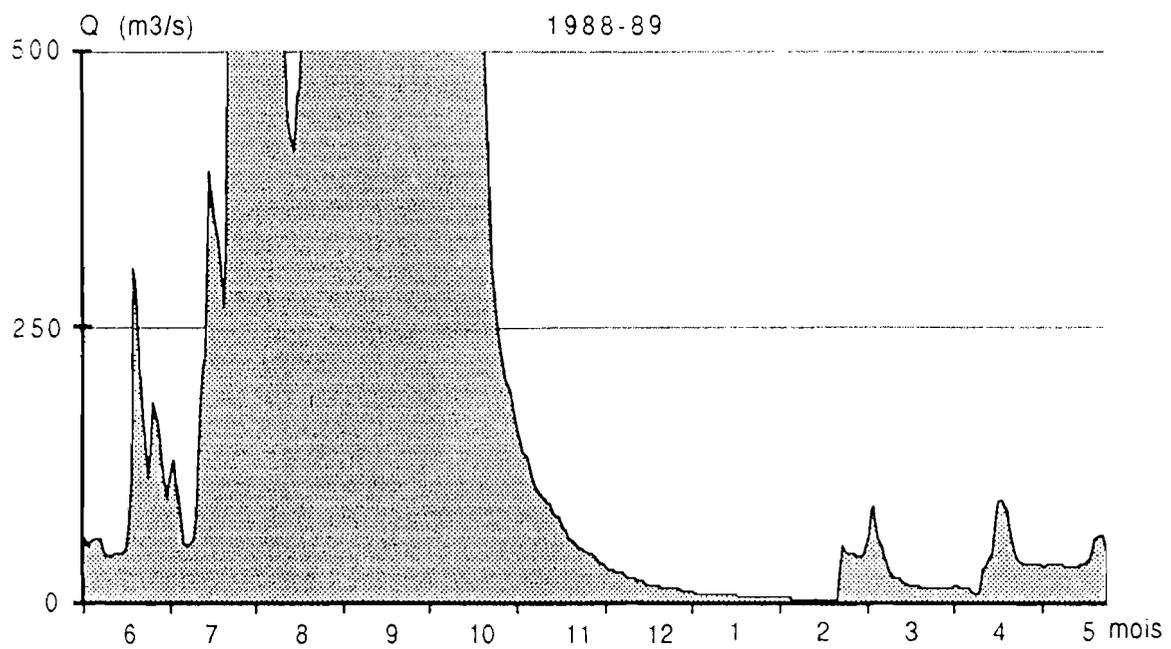
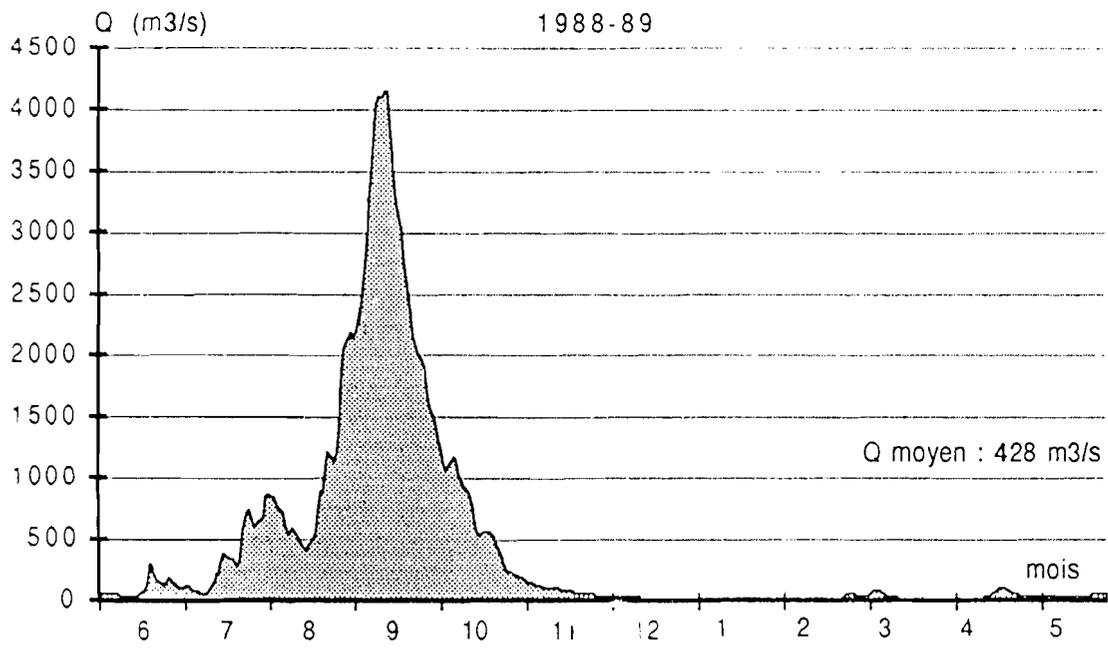


Fig. 15 - Hydrogramme de crue en 1988/89

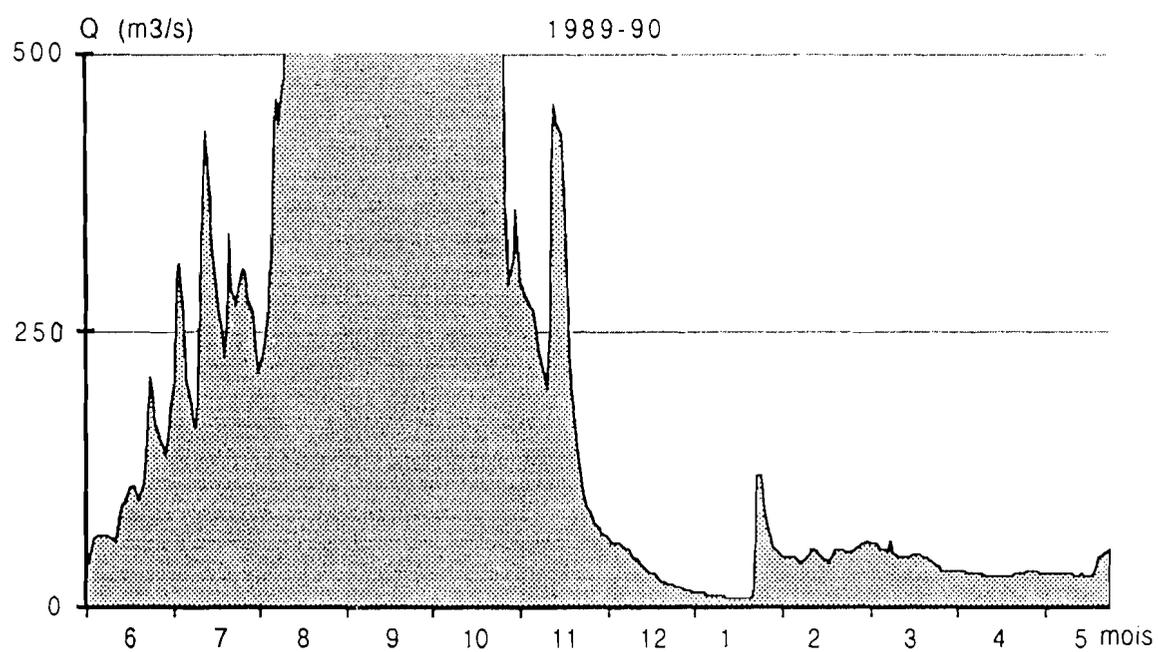
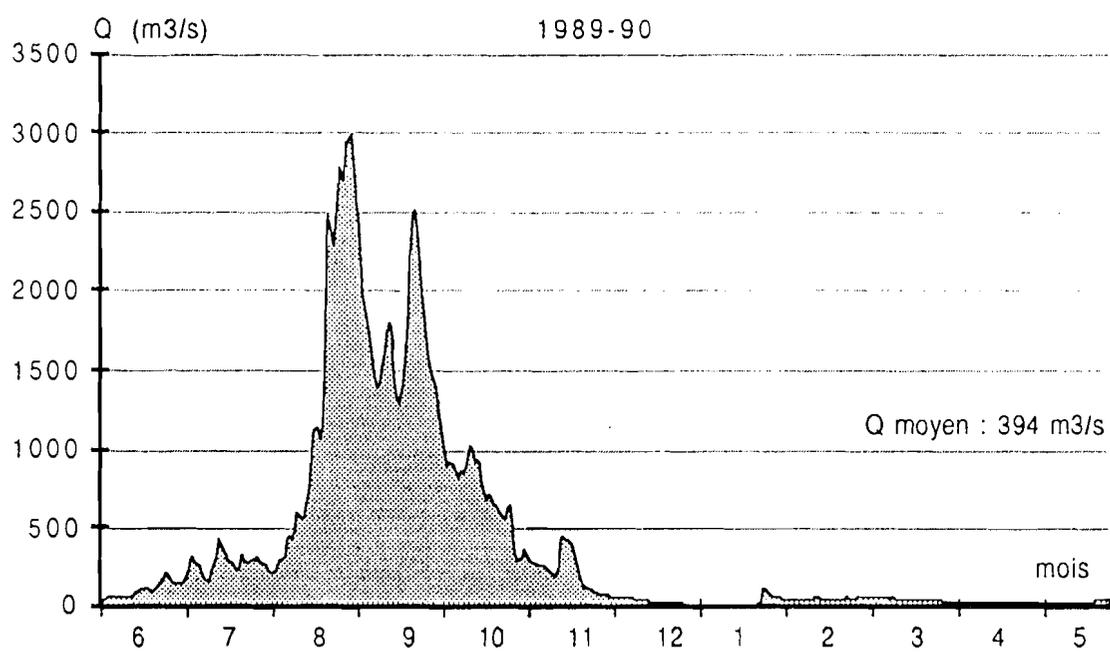


Fig. 16 - Hydrogramme de crue en 1989/90

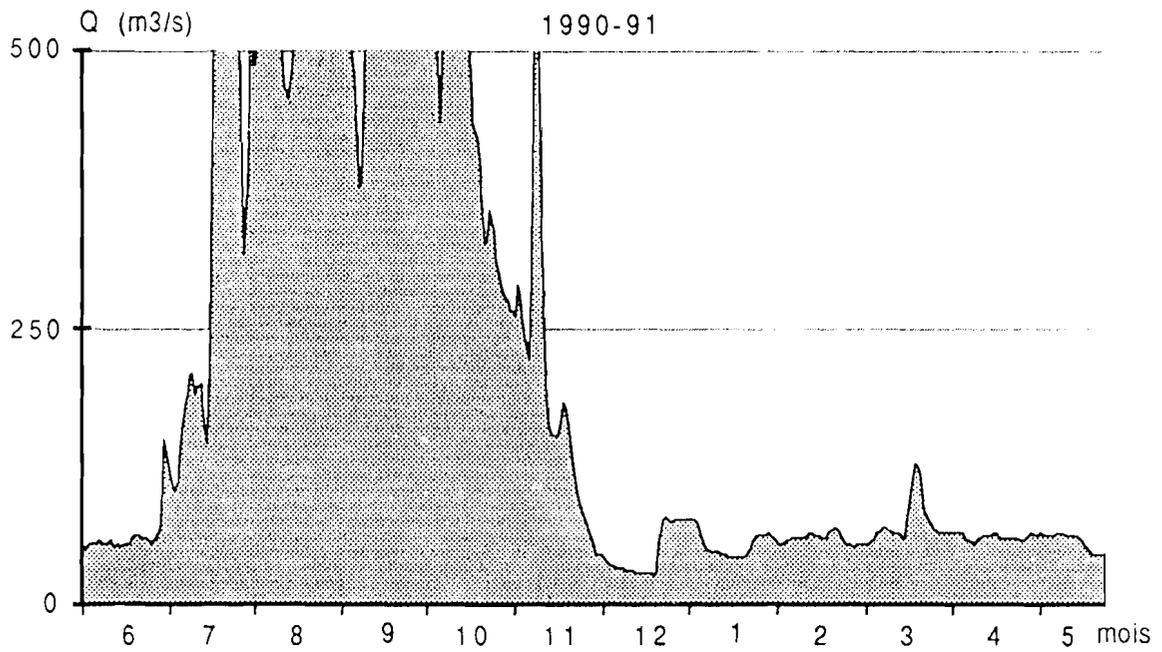
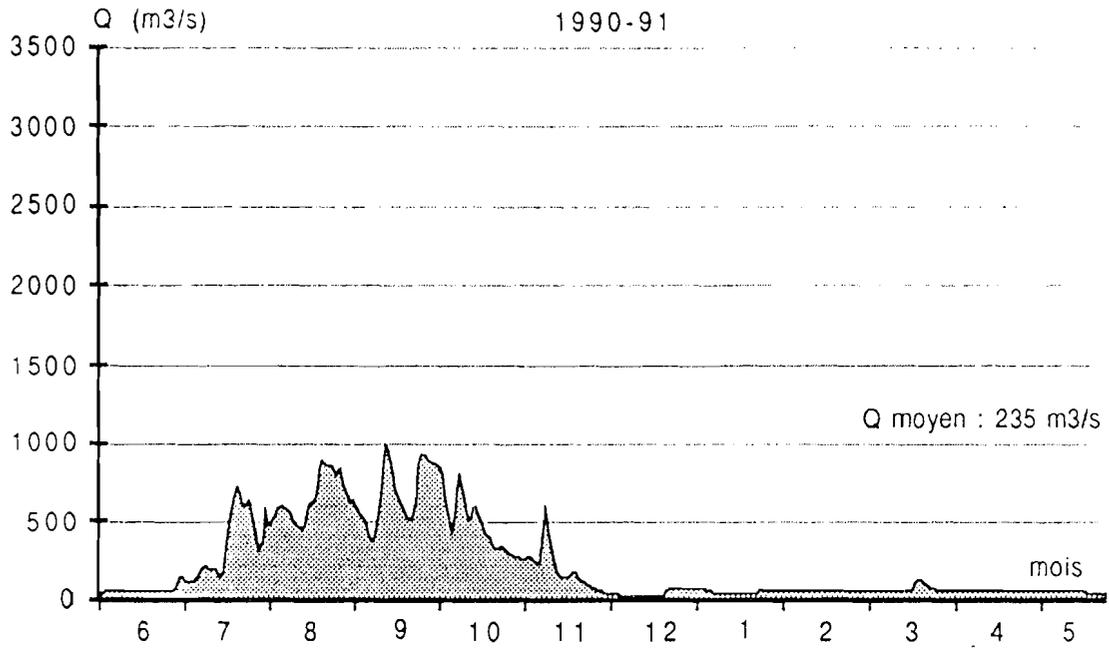


Fig. 17 - Hydrogramme de crue en 1990/91

IV - CARACTERE TRANSITOIRE OU IRREVERSIBLE DE LA SECHERESSE ACTUELLE : LES EXEMPLES DES FLEUVES SENEGAL ET NIGER

Le débat à propos du caractère irréversible ou transitoire de la sécheresse au Sahel vient d'être récemment relancé par des chercheurs américains qui ont visualisé et analysé plus de 4500 images satellitaires de la dernière décennie. Le journal *Herald Tribune*, du 25/7/91 s'est fait l'écho de leurs résultats surprenants "une réduction considérable de l'extension du Sahara depuis 1984".

FAURE et GAC (1981), dans leur article paru dans la revue *Nature*, "Will the sahelian drought to end in 1985 ?" s'étaient interrogés sur une éventuelle fin de la sécheresse au Sahel en 1985. Ces deux auteurs avaient ensuite nuancé leur analyse fondée sur les écoulements séculaires du fleuve Sénégal en envisageant la possibilité "Le vrai retour à l'humide au Sahel est-il pour demain ?" (GAC et FAURE, 1987). Dix ans se sont écoulés depuis les premières investigations sur la pérennité ou non de la sécheresse.

L'étude des écoulements récents des deux grands fleuves (Sénégal et Niger) issus du château d'eau de l'Afrique de l'Ouest, le Fouta Djallon, rend compte de la chronique des événements hydrologiques depuis une décennie.

1 - Le fleuve Sénégal à Bakel

La figure 18 illustre sous forme de moyennes mobiles (3, 5 et 7 ans) l'évolution des écoulements du fleuve Sénégal depuis le début du siècle.

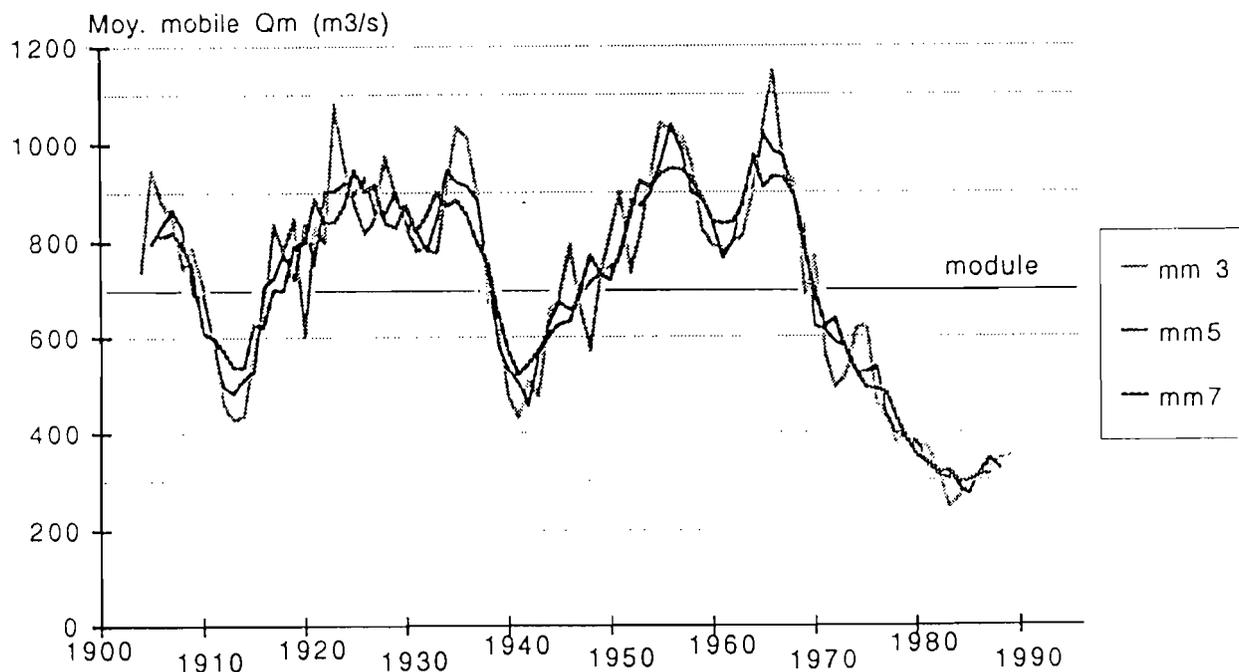


Fig. 18 - Evolution des débits du Sénégal de 1903 à 1991 (moyennes mobiles : 3, 5 et 7 ans) .

Plusieurs remarques méritent d'être formulées :

- le choix de la moyenne mobile sur 3, 5 ou 7 ans n'introduit pas de divergences notables dans l'allure de la courbe globale d'évolution,
- les séquences humides et sèches se différencient nettement avec trois périodes humides (avant 1910, de 1918 à 1938 et de 1948 à 1970) et trois épisodes secs (de 1911 à 1917, de 1939 à 1947 et depuis 1971),
- les deux séquences humides complètes apparaissent dédoublées,
- les séquences sèches sont centrées sur les années 1913/14, 1941/42 et semble t'il 1984/85 ?,
- et fait le plus important, le retour vers des conditions climatiques plus clémentes semble être amorcé. A cet égard il faut aussi souligner la non prise en compte des volumes d'eau stockés en amont du barrage de Manantali, qui libérés, viendraient amplifiés les débits enregistrés à Bakel depuis 1987.

2 - Le fleuve Niger à Koulikoro

La station de Koulikoro sur le Niger se situe à 820 km des sources du fleuve et contrôle un bassin versant de 120.000 km². C'est l'homologue de la station de Bakel sur le Sénégal. Les débits (Tableau IV) y sont enregistrés depuis 1907 (BRUNET-MORET et *al.*, 1986; OLIVRY *comm.personnelle*). Les écoulements du Niger sont deux fois supérieurs à ceux du Sénégal (module de 1421 m³/s de 1907 à 1990).

La figure 19 illustre sous forme de moyennes mobiles l'évolution des écoulements entre 1907 et 1990.

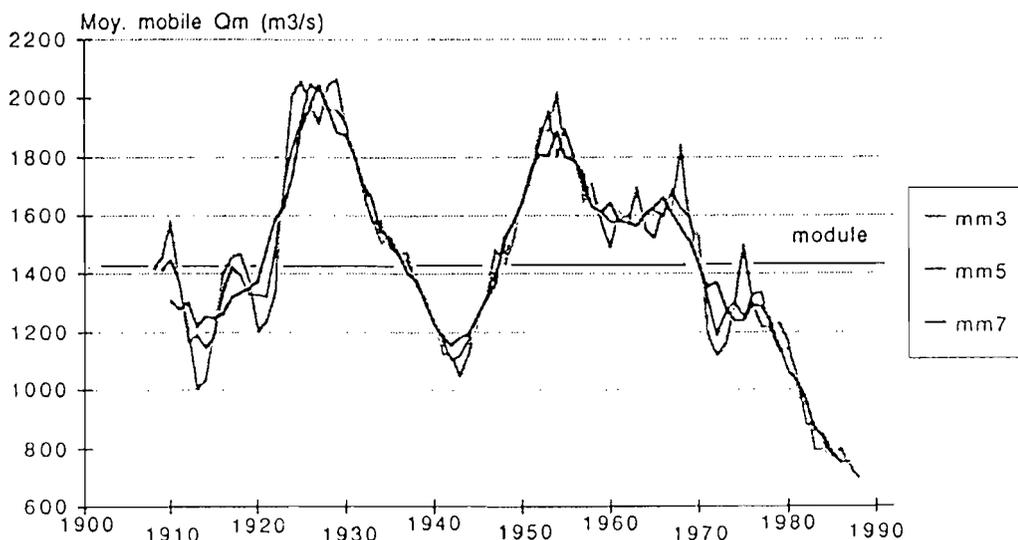


Fig. 19 - Evolution des écoulements du Niger de 1907 à 1990

Tableau IV

Débits moyens mensuels et annuels à Koulikoro de 1907 à 1990 (m³/s)
(mm3, mm5, mm7 : moyennes mobiles sur 3, 5 et 7 ans)

ANNEE	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	Q An.	mm3	mm5	mm7
1907-08	254	823	1889	3744	3074	1984	920	318	152	70	37	35	1113			
1908-09	188	643	2290	4080	4030	1670	774	295	154	87	59	170	1209	1416		
1909-10	884	1910	4850	6240	4480	2660	1130	502	182	82	54	49	1927	1454	1412	
1910-11	184	848	3022	4477	3659	1439	562	228	85	48	33	53	1226	1580	1446	1308
1911-12	279	1190	4050	6220	4070	1750	764	329	156	80	40	29	1586	1365	1367	1279
1912-13	80	925	2280	4520	4620	1680	649	331	145	50	26	29	1284	1227	1164	1301
1913-14	124	639	1290	3050	2300	1390	480	189	58	43	46	85	810	1002	1191	1220
1914-15	262	569	1210	3600	3140	1170	556	185	64	32	30	100	913	1029	1145	1255
1915-16	589	1600	2860	4790	3710	1490	628	311	158	66	39	46	1363	1211	1183	1249
1916-17	139	1420	3320	5040	4110	1240	448	217	113	72	23	44	1356	1398	1330	1263
1917-18	226	765	3550	5870	3710	1510	953	427	214	115	117	165	1474	1458	1423	1321
1918-19	895	1690	3740	4540	4100	1840	844	383	183	114	49	59	1544	1466	1394	1337
1919-20	589	1617	3218	4684	3738	1444	627	266	118	63	47	69	1380	1381	1327	1352
1920-21	366	1520	2610	4350	3120	1470	598	242	113	71	44	43	1217	1206	1327	1375
1921-22	101	689	2360	3980	2810	1240	554	205	100	47	33	91	1021	1237	1321	1476
1922-23	203	592	2260	4450	5660	2380	1120	433	177	84	129	93	1472	1337	1481	1587
1923-24	302	1370	2970	4980	4210	2420	1010	433	236	110	44	37	1516	1722	1703	1628
1924-25	217	1860	5020	7250	6970	2580	1070	511	247	128	68	84	2179	2007	1831	1732
1925-26	446	1600	4060	6770	8420	3860	1360	608	324	145	74	59	2325	2055	1926	1891
1926-27	546	2170	3730	5870	3990	1800	933	108	182	79	43	91	1662	1979	2049	1972
1927-28	273	1570	3160	5000	6190	4030	1330	585	260	115	60	125	1949	1914	2022	2044
1928-29	373	1290	5030	7580	5970	2910	1130	576	243	155	101	116	2132	2040	1961	1968
1929-30	773	2330	4180	6190	6290	2510	1020	487	265	147	81	85	2040	2065	1958	1884
1930-31	922	1810	4600	6080	5820	2620	1010	521	247	122	110	303	2024	1903	1916	1876
1931-32	927	1700	3090	5530	4670	1680	879	515	247	132	113	158	1644	1802	1810	1804
1932-33	535	1760	3190	6500	4710	2170	966	446	211	137	83	89	1739	1662	1691	1707
1933-34	488	2010	3900	6140	3450	1490	884	395	189	97	61	52	1603	1596	1578	1658
1934-35	136	950	3580	4990	4100	2040	791	345	184	76	55	41	1447	1502	1587	1548
1935-36	95	1130	3960	5160	4090	1480	605	256	124	75	45	350	1456	1531	1491	1522
1936-37	691	1390	2960	5450	5720	2090	1010	405	193	108	89	94	1691	1469	1463	1466
1937-38	200	859	2280	4700	3950	1820	652	277	127	82	58	55	1259	1471	1443	1402
1938-39	179	752	3060	5260	4730	2150	720	298	136	67	41	73	1461	1355	1382	1372
1939-40	250	666	2240	4530	4850	2010	843	353	157	82	46	48	1345	1320	1291	1304
1940-41	175	911	2630	3430	3560	1860	653	283	140	59	33	42	1154	1245	1235	1229
1941-42	211	953	2390	5320	3050	1490	708	308	148	65	47	119	1237	1123	1176	1189
1942-43	276	750	2220	4020	2140	1220	589	226	105	49	45	72	979	1128	1104	1156
1943-44	164	668	2130	4680	3920	1400	525	237	102	45	30	50	1167	1043	1118	1180
1944-45	108	458	1830	4360	2780	1340	516	195	90	41	23	35	983	1125	1174	1194
1945-46	115	430	2720	4500	4180	1630	585	218	98	43	44	78	1225	1242	1229	1256
1946-47	288	971	2979	4750	5197	2440	872	352	152	63	26	32	1517	1332	1330	1312
1947-48	160	903	2570	4940	4280	1240	467	179	83	49	33	52	1252	1480	1407	1361
1948-49	322	1650	3820	6060	4460	2070	760	346	187	104	94	80	1670	1430	1464	1522
1949-50	119	610	3290	6240	3430	1440	651	274	143	74	45	66	1369	1517	1532	1578
1950-51	126	736	2480	5130	5500	2360	771	354	199	135	84	202	1513	1663	1655	1644
1951-52	530	1580	3680	5300	5370	5380	1810	754	399	203	113	96	2107	1746	1717	1750
1952-53	182	1210	3160	5070	5470	2290	914	492	231	142	80	93	1619	1901	1856	1809
1953-54	564	2160	4370	6520	5100	2350	1080	600	307	187	179	200	1977	1887	1957	1805
1954-55	640	1940	4190	6090	5080	3210	1670	765	412	272	198	211	2065	2019	1802	1886
1955-56	669	2030	4000	6020	5880	2720	1250	638	356	227	167	121	2016	1805	1896	1803
1956-57	187	988	2240	4740	4500	1730	776	376	183	104	57	71	1335	1812	1805	1789
1957-58	321	1340	3770	6370	6800	3520	1260	622	357	161	138	261	2085	1648	1696	1747
1958-59	823	1490	2200	4440	4370	2230	1390	603	315	168	83	99	1523	1710	1629	1631
1959-60	309	1400	2980	5680	4440	1860	769	352	179	88	61	85	1523	1575	1613	1615
1960-61	293	1430	3750	5910	4870	2220	858	356	171	91	37	73	1679	1485	1577	1644
1961-62	97	969	2960	5380	3310	1310	479	204	94	44	35	113	1254	1614	1579	1581
1962-63	205	1120	3310	7050	6020	2790	1200	486	258	171	69	131	1907	1565	1604	1573
1963-64	135	650	2460	4830	5910	2780	881	350	167	74	45	45	1534	1695	1562	1563
1964-65	413	1220	3690	5400	5070	1830	957	498	241	139	95	87	1645	1550	1602	1607
1965-66	327	1830	2740	4770	4570	1930	686	281	169	100	81	76	1470	1523	1617	1632
1966-67	187	596	2780	4590	5060	2440	881	375	186	111	57	106	1454	1636	1596	1662
1967-68	140	940	3320	5980	8000	3020	1090	518	273	162	105	117	1982	1622	1690	1605
1968-69	725	1160	3310	4450	3860	1820	908	402	190	115	85	61	1430	1843	1624	1559
1969-70	288	1840	3720	6910	5770	4360	1260	583	264	140	96	81	2116	1561	1598	1508
1970-71	178	519	2470	5240	2920	1200	611	232	111	59	37	53	1138	1525	1423	1432
1971-72	109	723	3440	5500	3590	1150	646	253	117	53	43	168	1322	1190	1322	1354
1972-73	665	1320	2420	3670	2740	1380	628	257	116	44	20	18	1111	1119	1187	1372
1973-74	143	341	2740	3630	2220	1230	396	177	71	33	27	26	923	1158	1269	1283
1974-75	71	1000	3330	5620	4610	1550	525	216	100	41	34	94	1439	1305	1303	1240
1975-76	223	1190	3190	5600	5230	1790	715	313	139	53	30	64	1552	1495	1250	1240

Tableau IV (suite)

Débits moyens mensuels et annuels du Niger à Koulikoro (m³/s)

ANNEE	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	Q An.	mm3	mm5	mm7	
1976-77	251	794	2520	3400	4640	3940	1260	575	259	109	43	38	1492	1296	1329	1293	
1977-78	166	589	1560	3280	2630	1040	367	160	79	40	46	114	842	1218	1338	1288	
1978-79	437	1150	2510	4210	4230	1890	705	329	157	60	40	60	1321	1215	1205	1242	
1979-80	349	1520	4250	5210	3420	1690	685	299	154	61	23	25	1481	1230	1130	1151	
1980-81	118	331	1990	3820	2050	1260	583	215	85	31	21	131	888	1163	1145	1058	
1981-82	241	926	2930	4340	2880	1100	394	168	94	70	82	148	1119	974	1049	1028	
1982-83	464	879	1966	3440	2040	1116	392	198	126	104	94	119	914	959	879	970	
1983-84	336	927	1850	2920	2270	756	347	184	111	107	112	155	843	796	885	868	
1984-85	275	594	1690	1650	1800	632	291	151	100	100	106	116	629	797	814	844	
1985-86	163	482	2030	3920	2720	747	292	138	109	105	119	143	917	770	775	788	
1986-87	192	388	1200	3120	2250	899	319	174	137	132	147	191	764	801	751	749	
1987-88	263	440	1490	2130	2390	971	346	174	130	95	87	111	722	737	753		
1988-89	140	529	1660	3100	1660	628	248	148	124	103	143	187	724	695			
1989-90	141	329	1140	2300	2030	735	355	157	98	92	120	152	640				
1990-91	273	642	1530	2470	2030	814	367										
1991-92																	
Moy.	322	1110	2921	4878	4176	1914	780	350	173	95	68	97	1421				

L'évolution des écoulements du Niger à Koulikoro présente de grande similitude avec celle du Sénégal à Bakel : séquences humides et sèches sont chronologiquement identiques. Deux faits sont cependant divergents : la première séquence humide (de 1920 à 1938) n'est pas dédoublée et la longue série sèche actuelle ne semble pas devoir s'interrompre.

La comparaison entre les débits des deux fleuves est assez remarquable (Fig. 20). Le coefficient de corrélation entre les écoulements est de 0,90.

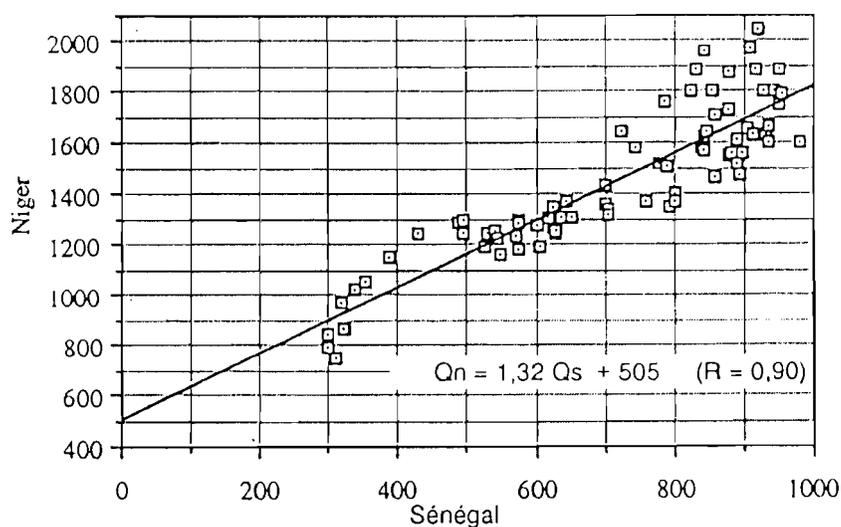


Fig. 20 - Relation entre les débits du Niger (Qn) et du Sénégal (Qs)

Pour des débits du Sénégal inférieurs à 700 m³/s, autrement dit pour des écoulements inférieurs au module interannuel, les deux fleuves répondent d'une manière homogène aux précipitations sur leur bassin versant respectif situé sur les flancs Nord et Est du massif du Fouta Djallon. On peut y trouver les raisons d'un comportement analogue lors des séquences sèches.

En revanche, lorsque les précipitations sont plus abondantes, les deux bassins versants réagissent de manière différente et la relation entre les écoulements des deux fleuves est aléatoire.

CONCLUSION

Cette étude reprend "in extenso" les observations hydrologiques sur les fleuves Sénégal et Niger. Les écoulements mensuels, annuels et interannuels sur les deux bassins amont des deux fleuves sont données de manière exhaustive aux deux stations clefs de Bakel (Sénégal) et de Koulikoro (Niger).

A Bakel, le module interannuel du Sénégal pour la période 1903/1991 s'élève à 700 m³/s. A Koulikoro, pour la période 1907-1910, les écoulements moyens annuels du Niger sont de 1420 m³/s, soit approximativement le double de ceux du Sénégal. L'irrégularité des écoulements est de règle sur ces deux bassins versants situés en zone intertropicale. Les débits du Sénégal ont varié dans un rapport de 6 (1325 m³/s en 1967/68 et 216 m³/s en 1984/1985) et ceux du Niger dans un rapport de 4 (2325 m³/s en 1925/26 et 629 m³/s en 1984/85).

Depuis le début du siècle, les deux fleuves issus du même massif montagneux du Fouta Djallon, ont connu de manière synchrone 3 séquences humides et 3 séquences sèches. Ces dernières ont été centré sur les années "1913", "1940" et "1984".

Lorsque la pluviosité est faible, le comportement des deux fleuves est similaire et leurs écoulements respectifs sont corrélés de manière hautement significative. Lorsque la pluviosité est abondante, la réponse des deux bassins aux exutoires divergent.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BANCAL P. (1924) - Le problème de l'eau au Sénégal. Document inédit non publié, Rapport multigr., Bordeaux, 107 p.

BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M. (1986) - Monographie hydrologique du fleuve Niger. I. Niger supérieur, II. Cuvette lacustre et Niger moyen. Collection Monographies hydrologiques n°8 (Ed. ORSTOM, Paris), 2 tomes, 394 et 503 p.

CITEAU J., GOURIOU Y., GUILLOT B. (1984) - Position de la zone inter-tropicale de convergence à 28° ouest et température de surface dans le golfe de Guinée. Bull. Veille Climatique satellitaire, n°4, pp. 2-5.

CITEAU J. et CARN M. (1986) - Positions de la ZITC à 28° ouest et température de surface de la mer. Bull. Veille Climatique Satellitaire, n° 12, pp. 2-5.

CITEAU J., FINAUD L., CAMMAS J.P. et DEMARCQ H. (1989) - Questions relative to ITCZ migrations over the tropical Atlantic ocean, sea surface temperature and Senegal river runoff. Meteorol. Atmos. Phys., 41, p. 181-190.

COGELS F.X. et GAC J.Y. (1982) - Le lac de Guiers. Bilans hydriques et évaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne (Sénégal). Cah. ORSTOM, série Géologie, XII, 1, pp. 21-43.

DUCHEMIN G. (1951) - L'inondation de l'Aftout es-Sahel et du poste de Nouakchott (Mauritanie : Trarza occidental). Bull. IFAN, 1951, pp. 1303-1305.

DURAND J.B.L. (1875) - Atlas pour servir au voyage du Sénégal. Ed. Agasse, Paris, 67 p.

FAURE H. et GAC J.Y. (1981) - Will the sahelian drought end in 1985 ?. Nature, 291, pp. 475-478.

FRECAUT R. et PAGNEY P. (1982) - Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial. Ed. Masson, Paris, 240 p.

FROMAGET E. (1908) - Instructions nautiques du fleuve Sénégal. Ed. Gouv. Gen. de l'AOF, Bordeaux (Impr. Gounouilhou), 121 p.

GAC J.Y., MONTEILLET J., FAURE H. (1982) - Marine shorelines in estuaries as a palaeoprecipitation indicators. Symposium on "Variation in the global water budget", Oxford, Ed. A. Street Perrot et al. (1983), Reidel Publishing Company, pp. 361-370.

GAC J.Y. et KANE A. (1986) - Le fleuve Sénégal : bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. Bull. Sciences Géologiques, Strasbourg, 39, pp. 99-130.

GAC J.Y. et FAURE H. (1987) - Le "vrai" retour à l'humide au Sahel est-il pour demain ?. C.R. Acad. Sciences, Paris, 305, série II, pp. 777-781.

- GAC J.Y., APPAY J.L., CARN M., ORANGE D. (1990) - Le haut bassin du fleuve Sénégal. Rapport ORSTOM, Dakar, multigr., rapp. CEE, projet EQUÉSEN, TS 2 0198 F EDB, 108 p.
- GAC J.Y., APPAY J.L., LABROUSSE B. (1990) - L'intrusion des eaux océaniques dans la basse vallée du Sénégal au cours du XX^{ème} siècle. Rapport ORSTOM, Dakar multigr. et rapp. CEE, projet EQUÉSEN, TS 2 0198 F EDB, 52 p.
- GIRAUD M. (1951) - Rapport sur le régime du fleuve Sénégal pendant la grande crue de 1950. Rapp. de la M.A.S. (Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal), St Louis (Sénégal), multigr., 19 p.
- HENRY H. (1918). Irrigations et cultures irriguées en Afrique tropicale. Ed. Larose, Paris 8^e, 296 p.
- HURST H.E. (1954) - Le Nil (trad. A. GUIEU). Ed Payot, Paris, 302 p.- The Nile basin, vol I-VII, the future conservation of the Nile (en coll. avec Black R.P. et Simaika Y.M., 1946), Physical Department Paper, 51, Eastern Press, Cairo.
- KANE A. (1985) - Le bassin du Sénégal à l'embouchure : flux continentaux dissous et particulaires. Invasion marine dans la vallée du fleuve. Thèse Doctorat 3^{ème} cycle, Université Nancy II, 205 p.
- LAMAGAT J.P. (1986) - Le fleuve Sénégal à Bakel : une révision des débits. Rapport ORSTOM, Dakar, multigr., 86 p.
- LAMAGAT J.P., ALBERGEL J., BOUCHEZ J.M., DESCROIX L. (1989) - Monographie hydrologique du fleuve Gambie. Rapport ORSTOM-OMVG, 247 p.
- OLIVRY J.C. (1983) - Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux îles du Cap Vert, examen de séries de longue durée (débits et précipitations). Cah. ORSTOM, série Hydrologie, XX, pp. 47-69.
- ORANGE D. (1986) - Bilan de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur le haut-bassin du fleuve Sénégal. Mém. de D.E.A., Université d'Orléans, 111 p.
- ORANGE (1990) - Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 241 p.
- PALUTIKOF J.P., LOUGH J.M., FARMER G. (1981) - Senegal river runoff. Nature, 293, p. 414.
- PAPY L. (1951) - La vallée du Sénégal. Agriculture traditionnelle et riziculture mécanisée. Cahiers d'Outre Mer, Etudes Sénégalaises, 2, pp. 227-234.
- PARIS TEYNAC E.J. (1962) - Contribution à la connaissance du fleuve Sénégal. Bull. IFAN, T XXIV, série A,1, pp.54-68.

PROBST J.L., TARDY Y. (1987) - Long range streamflow and word continental runoff fluctuations since the beginning of this century. Journ. of Hydrology, 94, pp. 289-311.

ROCHETTE C. (1974) - Le bassin du fleuve Sénégal. Monographie Hydrologique, ORSTOM, Paris, n° 1, 391 p.

RODIER J. (1964) - Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'Ouest du Congo. Mémoire ORSTOM, Paris, n° 6, 137 p.

SIRCOULON J. (1976) - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale; comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". Cah. ORSTOM, série Hydrologique, XIII, pp. 75-174.

SIRCOULON J. (1985) - La sécheresse en Afrique de l'Ouest, comparaison des années 1982-1984 et 1972-1973. Cah. ORSTOM, série Hydrologique, XXIII, pp. 75-86

SOW A. (1984) - Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. Thèse de 3ème cycle, Université de Nancy II, 435 p.

THILO J. (1910) - Documents scientifiques de la mission Thilo 1906-1909. Imp. Nat., Paris II, pp. 553-600

TROCHAIN J. (1940) - Contribution à l'étude de la végétation au Sénégal. Ed. Larose, Paris, 434 p.