

DONNEES SUR LES FLUX
CONTINENTAUX PARTICULAIRES
AU BIEF DE BAKEL

PAR ORANGE DIDIER

Section IG2

Maître de Recherche : J.Y. GAC

Collaborateur V.S.N : J.- VILLENEUVE

Laboratoire de Géochimie

B.P. 1386

DAKAR-HANN

Août 1985.

INTRODUCTION

Le Sénégal, septième artère fluviale de l'Afrique par l'importance de ses écoulements, est resté en marge des grands courants de recherche sur les altérations continentales et la dynamique des paysages sur les grands bassins versants. Aussi, en 1979, l'ORSTOM mit sur pied un vaste programme de recherches multidisciplinaires sur les fleuves Sénégal et Gambie, dont l'un des objectifs essentiels consiste à quantifier les flux de matières, en suspension et dissous, tout le long de ces deux axes hydrographiques.

Lors de mon court séjour d'un mois au laboratoire de Géochimie de Dakar-Hann (Sénégal), il m'a été proposé de présenter les données acquises sur les flux continentaux particuliers au bief de Bakel lors de la crue 84-85 et celles, éventuellement, de la crue 85-86.

Le mois d'août correspond à l'apogée de la crue, c'est donc un mois important pour la récolte des mesures sur le terrain. Aussi, ai-je été amené à faire une tournée de récupération d'échantillons aux différents points de contrôle répartis dans toute la vallée du fleuve. Les divers résultats d'analyse de ces échantillons me seront communiqués en cours d'année afin de comparer les cycles 84-85 et 85-86, aussi bien au niveau des matières en suspension que des apports dissous.

1. LE FLEUVE SENEGAL

Parmi tous les fleuves sahéliens, le Sénégal est celui qui dispose de la plus longue série d'observations limnimétriques. Grâce, en effet, à l'effort de valorisation des données anciennes entrepris par ROCHETTE (1974), l'information est complète sur l'importance des écoulements depuis 1903 aux deux stations-clefs de Bakel à l'amont et de Dagana à l'aval (fig. 1). La station de Bakel à l'exutoire du haut-bassin est exploitée sans interruption depuis 1901 ; le zéro de l'échelle d'observation actuelle est à la cote 11,16 m IGN.

1.1 LE REGIME DU FLEUVE SENEGAL

FRECAUT (1981) a classé le Sénégal dans les "régimes pluviaux tropicaux humides" qui suivent le rythme pluviométrique saisonnier en mimant avec un faible décalage de la répartition des précipitations sur les zones amont d'alimentation. Le régime du Sénégal se caractérise par deux saisons bien différenciées :

- une période de hautes-eaux de juin-juillet à octobre-novembre, avec une pointe de crue se situant généralement dans la seconde quinzaine de septembre ou dans les tous premiers jours d'octobre ;
- une période de basses-eaux, de novembre-décembre à mai-juin, pendant la saison sèche avec une décroissance régulière des débits.

Du Fouta-Djalon, où le Sénégal prend sa source, à l'embouchure du fleuve, on distingue trois sous-régimes caractéristiques : tropical humide de "transition", tropical "pur" et sahélien.

Le régime tropical humide de "transition" affecte une superficie de 28 000 km² où les pluies annuelles sont supérieures à 1 250 mm. Il concerne les hauts-bassins des trois branches-mères du Sénégal : le Bafing, le Bakoye et la Falémé. Les écoulements y sont soumis à des variations très brutales ; les maximum et les minimum mensuels se présentent à des dates très irrégulières. Les réserves en eau du sol et du sous-sol sont réduites ; les étiages sont très prononcés.

Le régime tropical humide "pur" règne sur une surface de 108 000 km² (45 % du bassin). Les pluies annuelles sont comprises entre 1 250 mm et 750 mm et très souvent inférieures à 1 000 mm. Il s'étend sur les cours inférieurs des trois affluents et sur la totalité du bassin de la Baoulé. Les hautes-eaux, qui durent de trois à quatre mois (maximum en septembre-octobre), se poursuivent par une très longue saison des basses-eaux où persiste un faible écoulement.

Le régime sahélien englobe toute la zone où la pluviométrie est inférieure à 750 mm (134 000 km², 40 % de la superficie totale du bassin) : il s'étend à la totalité du bassin de la Kolombine, du Karakoro, du Gorgol et à la vallée du Serpent pour le Baoulé. Les apports de ces régions sont négligeables, les écoulements devenant de plus en plus sporadiques au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le nord. En aval de Bakel, le régime reflète

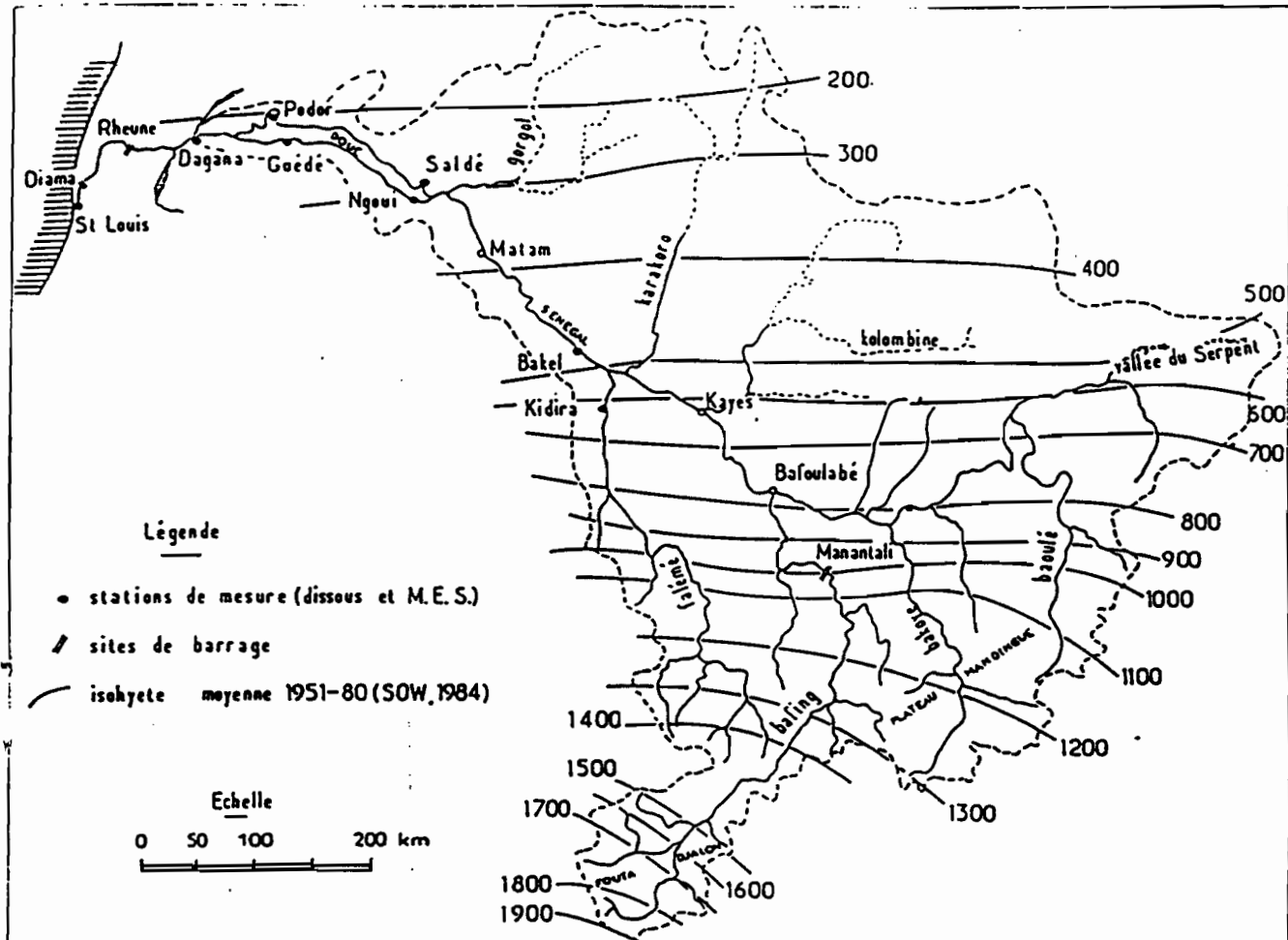


Figure 1 : Le bassin versant du fleuve Sénégal.

les conditions hydrologiques de l'amont avec des modifications mineures introduites par la présence de vastes plaines d'inondation, de nombreux défluent, l'absence d'affluents à écoulements importants et par les processus d'évapotranspiration. Dans toute la basse vallée, le Sénégal se comporte comme "un élément étranger en domaine sahélien où son régime diffère fondamentalement de celui des cours d'eau indigènes" (FRECAUT, 1981).

1.2 L'ABONDANCE FLUVIALE A BAKEL

1.2:1 Bilan moyen annuel des écoulements

C'est à ROCHETTE (1974) que l'on doit la valorisation des anciens relevés et la meilleure estimation possible des écoulements du Sénégal aux deux stations principales de Bakel et de Dagana depuis l'origine des obser-

vations communes en 1903 jusqu'en 1965. Les travaux plus récents des hydrologues de l'ORSTOM (GUIGUEN et LERIQUE, 1977, et surtout OLIVRY : 1982, 1983) ont conduit à affiner considérablement l'étalonnage de la station de Bakel en précisant la non-univocité de la courbe de tarage (c'est-à-dire les relations différentes entre hauteurs d'eau et débits en crue et en décrue).

On dispose ainsi d'une série de valeurs complètes de 1903-04 à 1983-1984, période d'observation de 81 années la plus longue sur un fleuve de la frange sahélienne (tableau I). A Bakel, le module moyen interannuel s'élève à $709 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un écoulement moyen de $22,4.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ alors qu'à Dagana, le module moyen interannuel est de $641 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à un écoulement moyen de $20,2.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$.

1.2.2 Variabilités interannuelle, mensuelle et journalière

L'irrégularité dans les écoulements constitue la caractéristique principale des fleuves sahéliens, et le Sénégal n'échappe pas à cette règle : depuis 1903, les débits à Bakel ont varié dans le rapport de 1 à 5,7 et de 1 à 4,3 dans le bief aval de Dagana.

A Bakel, comme à Dagana, les valeurs extrêmes ont été observées au cours des mêmes cycles hydrologiques. Les écoulements maximum ont eu lieu en 1924-1925 ($39,3.10^9 \text{ m}^3$ à Bakel et $30,6.10^9 \text{ m}^3$ à Dagana) et les minimum en 1983-1984 ($6,9.10^9 \text{ m}^3$ à Bakel et $7,1.10^9 \text{ m}^3$ à Dagana). Il faut noter que la crue 1984-1985 est aussi faible que celle de 1983-1984 ($6,98.10^9 \text{ m}^3$ à Bakel).

A l'irrégularité interannuelle s'ajoute celle des débits moyens mensuels. A Bakel, le plus important débit moyen mensuel a été observé en septembre 1922 avec $6\,746 \text{ m}^3/\text{s}$; le plus faible au cours du même mois est celui de 1984 avec $583 \text{ m}^3/\text{s}$.

Signalons enfin que sur la période de 81 ans, le plus fort débit journalier a été de $9\,340 \text{ m}^3/\text{s}$ en septembre 1936 à Bakel et de $3\,570 \text{ m}^3/\text{s}$ en octobre de la même année à Dagana (la différence importante constatée entre les deux stations met en relief le rôle régulateur joué par les plaines d'inondation).

Les figures 2 et 3 illustrent les variations observées dans les écoulements du Sénégal depuis le début du siècle ; elles mettent en évidence, à l'amont comme à l'aval du bassin versant, la succession de périodes humides (avant 1910, de 1919 à 1939 et de 1950 à 1967) et d'épisodes arides (de 1911 à 1918, de 1940 à 1949 et depuis 1968).

Depuis 1968, le module moyen interannuel du fleuve Sénégal n'a pas cessé de diminuer : de $771 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1968, il est successivement passé à $765 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1971, à $747 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1975, à $736 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1977, à $733 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1979 (FAURE et GAC, 1981), pour s'établir à $709 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1984. Cette valeur confirme les prévisions de GAC et KANE exposées dans leur rapport sur "les flux continentaux particuliers et dissous à l'embouchure du fleuve Sénégal" (mai 1985).

1.2.3 Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle

Les médias, comme l'a récemment souligné OLIVRY (1982), "ont peut-être indiqué un peu trop vite l'année 1972 comme le coeur de la sécheresse actuelle." Cette affirmation a été démentie par les derniers enregistrements sur les biennales 1983-1984 et 1984-1985 qui constituent, pour l'instant, les années les plus déficitaires sur toute la période d'observation.

Selon état original

Tableau I : Evolution des débits moyens mensuels à Bakel de 1903 à 1984 (m³/s)

Cycle Hydrologique	A	J	J1	A	S	O	N	D	J	J	A	S	Module
1903 - 1904	(10)	(120)	766	1937	2535	1060	676	(207)	(124)	(74)	(40)	(15)	(631)
1904 - 1905	(10)	(79)	627	2678	3187	1113	583	772	(164)	86	(50)	(27)	(737)
1905 - 1906	(10)	(235)	(717)	2760	2284	2341	1077	(375)	(197)	(113)	(64)	(30)	(874)
1906 - 1907	(15)	(143)	1171	5831	6166	1607	675	(465)	(750)	(140)	(80)	(40)	(1733)
1907 - 1908	(10)	(120)	(403)	905	2194	1282	613	(340)	(185)	(110)	(62)	(28)	(521)
1908 - 1909	(10)	81	759	2195	3691	1375	(500)	(235)	(130)	(75)	(47)	(18)	(767)
1909 - 1910	(10)	(284)	949	2967	6144	1296	570	(255)	(140)	(83)	(46)	(20)	(907)
1910 - 1911	(10)	(120)	(570)	2134	3004	1271	677	(215)	(170)	(70)	(38)	(16)	(870)
1911 - 1912	(10)	(170)	(590)	1455	2433	930	431	(220)	(175)	(77)	(38)	(16)	(537)
1912 - 1913	(10)	(120)	(590)	1425	2346	1365	(436)	(230)	(135)	(78)	(43)	(18)	(564)
1913 - 1914	(10)	(170)	(333)	704	918	680	(251)	(121)	(64)	(30)	(10)	(4)	(712)
1914 - 1915	(10)	(170)	(530)	(1373)	1473	1035	(365)	(2007)	(115)	(70)	(40)	(16)	(444)
1915 - 1916	(10)	(50)	836	1896	2642	1261	(350)	(190)	(105)	(62)	(34)	(12)	(592)
1916 - 1917	(5)	(4)	726	1782	3223	1864	(400)	(210)	(170)	(70)	(38)	(16)	(691)
1917 - 1918	(10)	(70)	(293)	(2130)	3393	1185	(330)	(145)	(100)	(58)	(37)	(11)	(647)
1918 - 1919	(10)	(200)	836	3147	5216	2573	(645)	(335)	(202)	(122)	(65)	(30)	(1144)
1919 - 1920	(10)	(140)	(404)	(1704)	2261	1026	(356)	(210)	(115)	(70)	(38)	(15)	(530)
1920 - 1921	(10)	(170)	(550)	2535	4252	1311	596	(290)	(180)	(95)	(52)	(23)	(834)
1921 - 1922	(10)	(120)	(326)	(1201)	(2100)	736	(270)	(150)	(90)	(50)	(26)	(10)	(431)
1922 - 1923	(10)	(49)	402	3213	6746	2778	778	316	158	(95)	(53)	(23)	(1219)
1923 - 1924	(10)	(99)	628	(1808)	3764	1463	761	272	138	(80)	(44)	(19)	(754)
1924 - 1925	(10)	(144)	1385	(3973)	5300	2463	796	384	(210)	(125)	(70)	(32)	(1267)
1925 - 1926	(14)	101	397	2280	3275	2506	765	(325)	(185)	(110)	(65)	(30)	(841)
1926 - 1927	(10)	(140)	(507)	(1607)	1741	(973)	715	270	(130)	(76)	(42)	(18)	(521)
1927 - 1928	(10)	(120)	(777)	2800	4745	(2743)	878	(380)	(205)	(120)	(70)	(32)	(1075)
1928 - 1929	(10)	(50)	351	2973	4568	1679	695	(240)	(130)	(77)	(39)	(15)	(904)
1929 - 1930	(10)	(300)	864	2948	4399	1340	434	(217)	(173)	(71)	(38)	(15)	(899)
1930 - 1931	(10)	(170)	(649)	(2621)	(3412)	(1929)	605	(290)	(167)	(97)	(58)	(25)	(839)
1931 - 1932	(10)	(170)	940	1755	2715	2119	550	(270)	(159)	(90)	(50)	(22)	(739)
1932 - 1933	(10)	(130)	(780)	2780	3181	1369	(445)	(277)	(130)	(75)	(43)	(19)	(770)
1933 - 1934	(10)	(153)	1087	3302	3571	1066	(356)	(200)	(115)	(68)	(35)	(12)	(838)
1934 - 1935	(10)	(70)	270	2339	3496	1315	(440)	(220)	(130)	(75)	(43)	(19)	(700)
1935 - 1936	(10)	(120)	(896)	(4269)	(4971)	2487	(630)	(265)	(152)	(88)	(50)	(20)	(1186)
1936 - 1937	(10)	(35)	599	4593	(5825)	2261	707	334	172	105	62	(25)	(1236)
1937 - 1938	(10)	(120)	397	1748	3108	1339	504	(230)	(130)	(75)	(41)	(17)	(645)
1938 - 1939	(10)	(120)	479	1826	3925	1870	800	(270)	(150)	(88)	(48)	(21)	(808)
1939 - 1940	(2,3)	(78)	367	1935	2089	1377	(435)	(220)	(125)	(72)	(40)	(16)	(560)
1940 - 1941	(10)	(50)	210	1316	1343	1254	(529)	(200)	(170)	(68)	(38)	(15)	(432)
1941 - 1942	(10)	(120)	339	1158	2115	740	(247)	(130)	(75)	(44)	(19)	(6,5)	(418)
1942 - 1943	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1943 - 1944	(10)	(70)	366	1867	2951	1801	443	(195)	(110)	(65)	(35)	14	(666)
1944 - 1945	(10)	(120)	225	814	1444	663	(339)	(180)	(95)	(55)	(28)	10	(331)
1945 - 1946	(10)	(120)	396	3260	4738	1909	(464)	(195)	(110)	(65)	(35)	14	(966)
1946 - 1947	(10)	(120)	362	2505	3024	1819	580	(238)	(130)	(75)	(41)	17	(747)
1947 - 1948	(10)	(120)	343	1860	3363	1509	(397)	(180)	(105)	(60)	(32)	(12)	(666)
1948 - 1949	(5)	(31)	(591)	1836	2656	961	298	(168)	(105)	(60)	(32)	(12)	(573)
1949 - 1950	(5)	(9)	325	2052	1912	(809)	(216)	(123)	(73)	(42)	(20)	(10)	(469)
1950 - 1951	(5)	(3)	545	2914	5891	3071	778	304	153	86	43	13	1154
1951 - 1952	(4)	57	387	1418	2331	3581	1455	473	214	125	(64)	(27)	843
1952 - 1953	(5)	22	524	1395	2421	3126	(597)	(246)	(134)	(71)	37	17	721
1953 - 1954	3	101	788	1547	2926	1236	464	219	140	81	41	13	632
1954 - 1955	12	253	963	3987	4419	1655	681	396	197	116	68	42	1070
1955 - 1956	32	207	612	3563	4004	2615	770	347	203	119	69	34	1051
1956 - 1957	13	40	495	2210	5237	2159	634	285	163	99	60	24	953
1957 - 1958	8	215	608	2668	4227	2704	935	351	197	118	67	32	1031
1958 - 1959	18	175	568	3985	4028	1916	785	444	237	139	84	40	1040
1959 - 1960	(19)	164	583	2434	4047	1247	489	273	176	76	42	17	788
1960 - 1961	5	82	789	1790	2508	1301	504	213	120	75	41	16	623
1961 - 1962	3,5	102	781	2954	5701	1360	458	207	171	74	40	17	945
1962 - 1963	2,7	85	511	2220	3632	1670	574	267	138	86	43	18	770
1963 - 1964	8	7	473	1620	2772	1988	636	230	129	77	36	13,6	667
1964 - 1965	(3,7)	171	402	1973	5620	1987	580	785	166	105	58	26	970
1965 - 1966	9,3	84	509	3272	5367	2053	648	289	170	102	57	28	1049
1966 - 1967	10,9	76	366	1379	2817	3902	852	319	173	105	61	27	841
1967 - 1968	11,3	89	560	2420	5035	2776	764	344	211	133	77	36	1040
1968 - 1969	16,6	76,7	421	1010	1800	853	301	169	93,3	54,6	27,1	8,01	404
1969 - 1970	2,64	71,4	683	1650	3150	2040	947	308	157	97,9	50,5	24,5	767
1970 - 1971	5,47	29,6	297	2250	2500	791	284	144	85	52,6	27,7	10,2	547
1971 - 1972	3,95	2,89	481	2530	2740	810	781	131	75,6	46,4	20,8	3,18	598
1972 - 1973	0,97	43	291	795	1060	497	718	106	54,7	27,0	9,24	1,83	264
1973 - 1974	0,34	126	327	1670	1340	497	180	72,6	39,6	18,6	7,04	1,11	360
1974 - 1975	0,40	3	739	3736	3138	1371	371	143	59,7	34,1	14,4	4,7	760
1975 - 1976	1,7	0,3	552	1586	3281	1158	387	149	60,7	34,4	14,1	7,5	607
1976 - 1977	0,72	4,5	480	1578	1155	1167	870	726	88,5	44,9	19,8	5,84	470
1977 - 1978	1,40	1,7	730	841	1728	757	711	61	32,7	12,8	3,7	0,9	374
1978 - 1979	0,71	7,4	359	1764	1897	1314	467	153	67,9	31,5	9,7	7,85	573
1979 - 1980	1,7	42,3	308	991	1783	573	273	98	43,7	12,3	4,7	1,43	303
1980 - 1981	0,56	21,6	317	1620	2030	476	191	81,3	38,1	15,4	4,5	1,28	407
1981 - 1982	0,35	34,8	441	1889	1880	439	277	84,4	42,9	16,6	5,1	1,43	473
1982 - 1983	0,57	0,34	750	1165	1322	540	717	65,7	34,0	14,3	3,97	1,31	303
1983 - 1984	0,56	27,3	170	697	817	425	116	52,4	25,9	10,4	3,52	1,58	719,6
1984 - 1985	0,06	36,7	475	757	553	567	136	56,0	15,0	8,0	2,13	4,32	221,3
Moyenne	8,14	95,4	551,2	2151	3116	1525	525	230	126	73,4	39,8	16,7	709,1

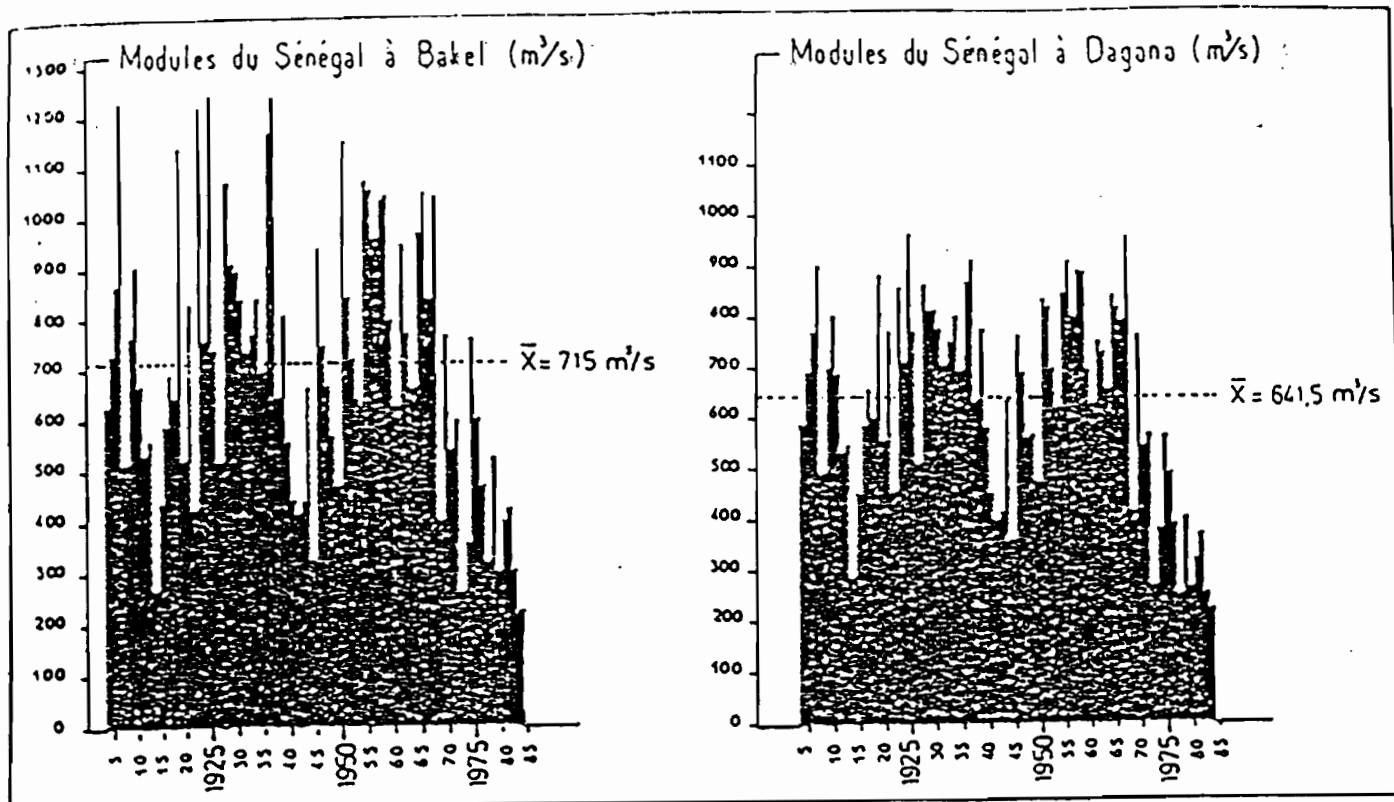


Figure 2 : Evolution des écoulements du Sénégal (m^3/s) depuis 1903 à Bakel et à Dagana.

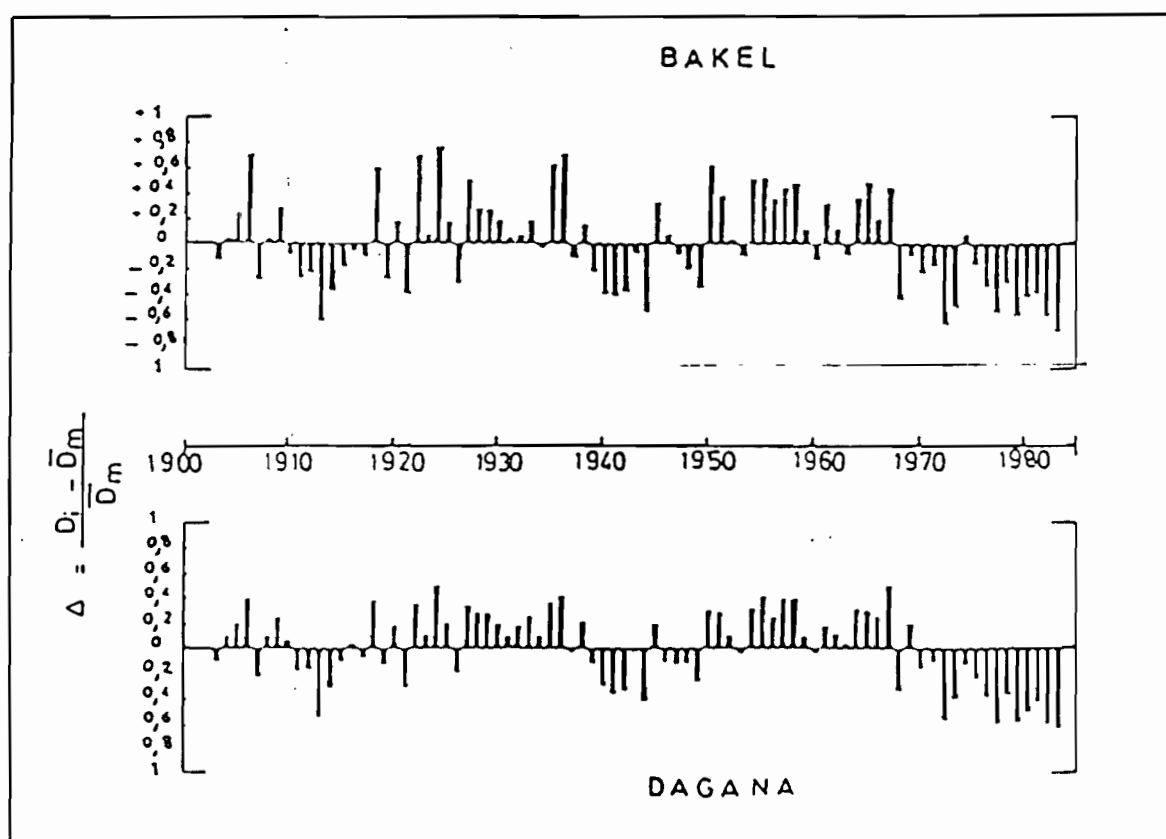


Figure 3 : Variations des écarts à la normale depuis 1903 à Bakel et à Dagana.

Les modules du Sénégal à Bakel au cours des 17 derniers cycles hydrologiques et les écarts à la normale sont reportés dans le tableau III. A deux exceptions près, toutes les années sont largement déficitaires depuis 1968. Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle apparaît encore plus nettement en comparant les mesures récentes à l'échantillon des observations sur 81 ans. Le classement des modules dans l'ordre croissant donne la succession suivante :

Bakel : 1984, 1985, 1983, 1972, 1913, 1979, 1982, 1977, 1944, 1973, (soit 8 années récentes sur 10).

Tableau III : Modules annuels (m^3/s) à Bakel - Ecart (en %) à la normale

Année	M (m^3/s)	Ecart (%)	Année	M (m^3/s)	Ecart (%)
1968-69	404	- 43.0	1976-77	470	- 33.7
1969-70	767	+ 8.2	1977-78	324	- 54.3
1970-71	542	- 23.6	1978-79	505	- 28.8
1971-72	598	- 15.7	1979-80	303	- 57.3
1972-73	264	- 62.8	1980-81	402	- 43.3
1973-74	360	- 49.2	1981-82	423	- 40.3
1974-75	760	+ 7.18	1982-83	303	- 57.3
1975-76	602	- 15.1	1983-84	220	- 69.0
			1984-85	221	- 68.8

Depuis 1979, le déficit à l'amont comme à l'aval du bassin est supérieur à 40 % . L'effet de cumul, de cette succession sans répit d'années à faible écoulement, se traduit par une baisse importante du niveau des nappes souterraines et en corollaire par une phase "d'épuisement du fleuve" de plus en plus précoce dans l'ensemble de la vallée puis par une intrusion saline d'une ampleur et d'une durée exceptionnelle dans le delta.

La comparaison des modules aux exutoires amont et aval du bassin versant du Sénégal (fig. 4) permet de tirer les enseignements suivants :

- à quelques exceptions près, les écoulements à l'aval sont inférieurs ou égaux à ceux de l'amont ;
- il existe une très bonne corrélation entre les modules aux deux stations pour des débits compris entre 400 et 850 m^3/s ;
- en années très humides (module supérieur à 900 - 1 000 m^3/s à l'amont), les écoulements à l'aval du bassin tendent vers une valeur limite de l'ordre de 900-950 m^3/s ;
- en années sèches, les volumes d'eau qui transitent au bief aval peuvent être supérieurs à ceux du bief amont ;
- la dernière décade écoulée présente une tendance particulière et se singularise par une réduction considérable des écoulements à Dagana. On peut remarquer en effet que, depuis 1974, il existe une relation nouvelle entre les modules aux deux stations et que pour des débits identiques à l'amont, la période actuelle se traduit par des écoulements moins importants à l'aval que dans le passé.

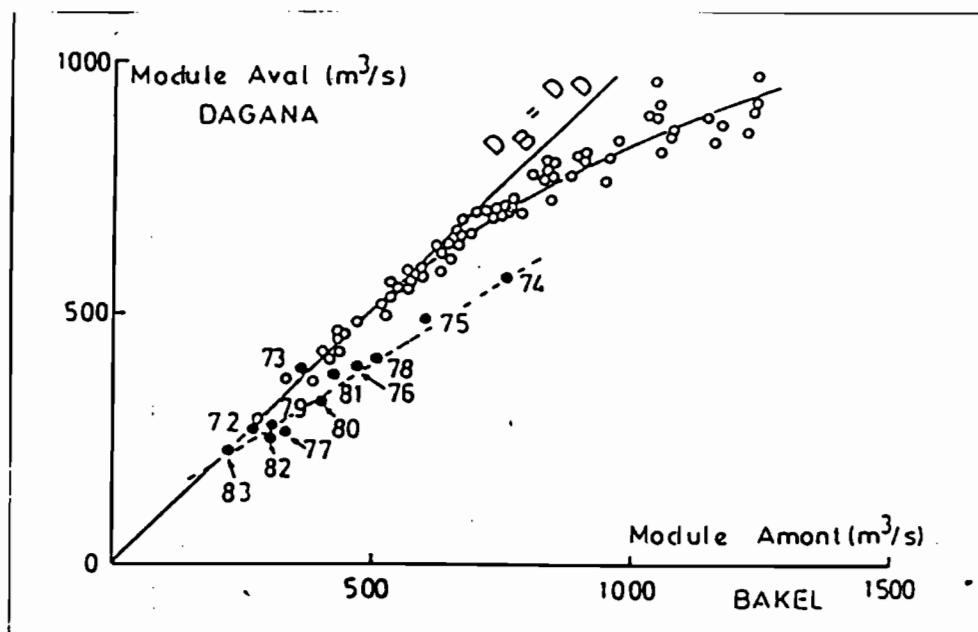


Figure 4 : Comparaison des écoulements du Sénégal à Bakel et Dagana.

Cette situation nouvelle met en évidence le rôle fondamental joué par les plaines d'inondation situées en bordure du réseau hydrographique. On perçoit l'effet de cumul d'une succession d'années déficitaires qui ont provoqué l'assèchement de nombreux points d'eau et l'abaissement du niveau des nappes souterraines. Il est vraisemblable aujourd'hui que les réductions de volumes, constatées lors du cheminement des eaux dans la vallée, soient la conséquence directe des transferts à sens unique du fleuve vers les nappes souterraines, impuissantes ensuite, à soutenir les débits d'étiage. Leur faible réalimentation annuelle traduit, bien plus que le réseau de surface, "l'insidieuse progression en profondeur" de la désertification vers les zones tropicales.

1.2.4 Les maximums de la crue annuelle

a) Irrégularité et variabilité interannuelles des maximums

Les débits et les hauteurs maximums enregistrés depuis 1903 à la station de Bakel ont été reportés dans le tableau IV. Les cotes sont données par rapport au zéro de l'échelle limnimétrique située à +11,16 m IGN.

Pour l'été 1985, les débits au bief de Bakel ne sont pas encore déterminés et nous ne possédons les relevés limnimétriques que jusqu'au 18 août, ce qui nous permet seulement de donner une valeur minimale de la hauteur maximum du fleuve à Bakel lors de la crue 85-86.

Les valeurs extrêmes correspondent aux années 1906 et 1984 (Q_{max} : 9 340 m³/s ; Q_{min} : 995 m³/s ; H_{max} : 13,28 m et H_{min} : 4,38 m) : les débits maximum ont varié dans un rapport de 9,4 et les hauteurs maximum dans un rapport de 3.

Tableau IV : Débits et hauteurs maximums du fleuve à Bakel

Année	Q (m ³ /s)	H (m)	Année	Q (m ³ /s)	H (m)	Année	Q (m ³ /s)	H (m)
1903	3560	9.49	1930	4610	11.00	1957	5660	11.82
1904	4790	11.15	1931	4300	10.70	1958	8170	12.89
1905	3840	10.19	1932	4850	11.20	1959	5460	11.68
1906	9340	13.28	1933	5490	11.70	1960	3550	9.84
1907	2850	8.90	1934	5340	11.60	1961	7030	12.51
1908	4200	10.60	1935	6680	12.35	1962	4410	10.80
1909	5490	11.70	1936	7600	12.70	1963	3760	10.11
1910	3840	10.20	1937	3590	9.90	1964	7180	12.56
1911	3330	9.55	1938	5630	11.80	1965	7000	12.48
1912	3290	9.50	1939	3400	9.65	1966	5450	11.70
1913	1040	5.20	1940	2760	8.75	1967	5820	11.94
1914	1885	7.25	1941	2890	8.95	1968	2880	8.94
1915	3140	9.30	1942	3590	9.90	1969	3770	10.11
1916	4200	10.60	1943	3480	9.75	1970	3440	9.70
1917	4960	11.30	1944	1740	6.95	1971	4320	10.72
1918	7300	12.60	1945	6480	12.26	1972	1430	6.24
1919	3560	9.85	1946	4460	10.85	1973	2550	8.38
1920	5630	11.80	1947	4360	10.75	1974	5780	11.91
1921	2850	8.90	1948	3590	9.90	1975	5000	10.14
1922	9070	13.19	1949	3760	10.10	1976	2500	6.96
1923	4670	11.05	1950	7630	12.71	1977	2700	7.06
1924	6350	12.20	1951	5340	11.60	1978	3250	7.87
1925	4610	11.00	1952	5060	11.38	1979	1760	6.20
1926	2290	8.00	1953	4180	10.58	1980	3640	8.66
1927	6460	12.25	1954	6610	12.32	1981	2840	7.74
1928	5490	11.70	1955	5260	11.54	1982	2280	6.95
1929	5490	11.70	1956	6050	12.06	1983	1200	4.92
						1984	995	4.34
						1985	n.d.	(5.88)

La sévérité de la sécheresse actuelle est également nettement perceptible au niveau des débits maximum des pointes de crue. A Bakel, la moyenne des maximum annuels des 16 dernières années s'élève à 2 970 m³/s pour une valeur de 4 370 m³/s sur 82 ans. La réduction dans les écoulements est de l'ordre de 32 % .

b) Formes des hydrogrammes

L'étude hydrologique montre que la période des hautes-eaux annuelles présente toujours la même configuration avec simplement des variations d'amplitude en fonction des années humides (1924-1925), des années moyennes (1962-1963) ou des années sèches (1983-1984) (fig. 5).

L'hydrogramme de crue aux deux stations de Bakel et Dagana est monomodal avec en général un seul épaulement en août/septembre et une longue courbe de tarissement d'octobre à mai. Après Bakel, la pente devient faible, la vitesse

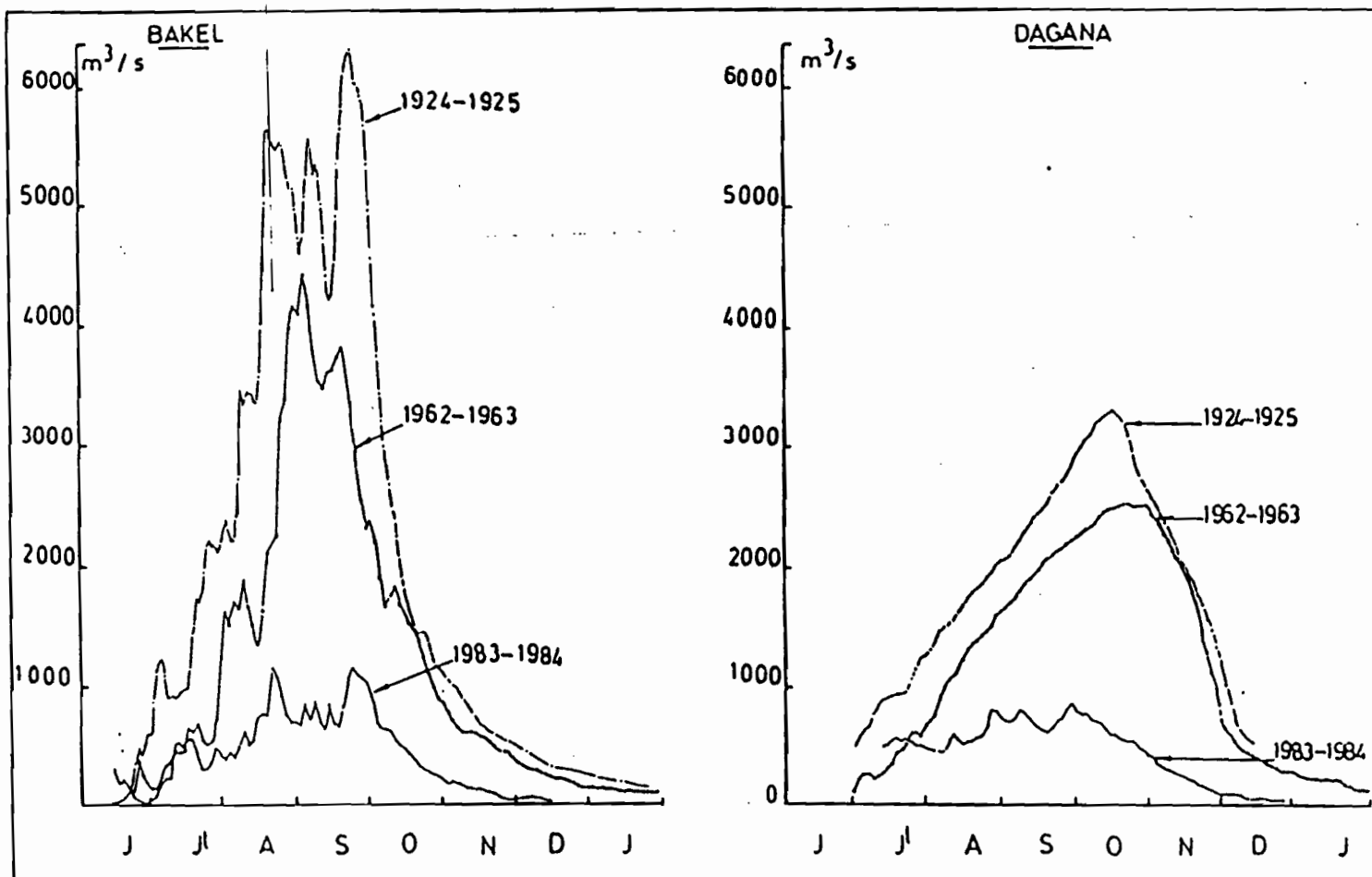


Figure 5 : Allure des hydrogrammes de crue aux deux stations au cours d'une année humide (1924-1925), moyenne (1962-1963) et sèche (1983-1984).

de propagation ralentit, les pulsations brutales du bassin supérieur s'atténuent, l'hydrogramme s'aplatit, et ce "laminage" s'explique par l'absence d'affluents importants le long de la vallée pour déterminer des pointes secondaires.

1.3 DONNEES HYDROLOGIQUES A LA STATION DE BAKEL POUR LES CYCLES 83-84, 84-85 et 85-86

L'évolution quotidienne de la position du plan d'eau et celle des écoulements sont données dans les tableaux V, VI, VII, et VIII, IX.

Nous avons représenté respectivement en figures 6 et 7 les hydrogrammes de crue et les variations journalières des hauteurs d'eau.

La forme des hydrogrammes est caractéristique d'années sèches. A chaque fois, un premier écoulement fugace annonce l'arrivée réelle de la crue une quinzaine de jours plus tard. Il apparaît aussi que le cycle 84/85 est moins tardif, plus long et plus homogène que le précédent.

Cependant, il faut souligner :

- la faiblesse des débits de pointe ($1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ en août 83 et $1\,004\text{ m}^3/\text{s}$ en août 84), ne représentant que 25 % d'un débit de pointe en année moyenne ;
- la rapidité de la décrue.

Ces cycles ne permettent pas le réapprovisionnement des nappes phréatiques, ce qui se traduit d'année en année par un niveau limnimétrique de plus en plus bas au cours de la saison sèche. Ainsi, la figure 7 montre clairement les conséquences néfastes de ces deux années sèches consécutives. En effet, les hauteurs d'eau avant l'arrivée de la crue 85/86 étaient inférieures à celles des deux années précédentes, bien que celles-ci résultaient déjà d'une dizaine d'années de sécheresse. La situation était donc bien alarmante à la fin du cycle 84/85 et il faut espérer que le cycle 85/86 sera meilleure que les précédents et permettra une amorce de réalimentation partielle des nappes. Les premières valeurs enregistrées ce mois d'août laissent bon espoir... Mais il faut attendre début octobre pour savoir exactement ce qu'il en est.

débits
journaliers
(m³/s)

Fig. 6: CYCLE 83/84
à BAKEL

89/08
débit maximum
1200 m³/s

décroissance

14/06 premier écoulement

6/07 arrivée de la crue

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180
JUN JULIET AOÛT SEPTEMBRE OCTOBRE NOVEMBRE

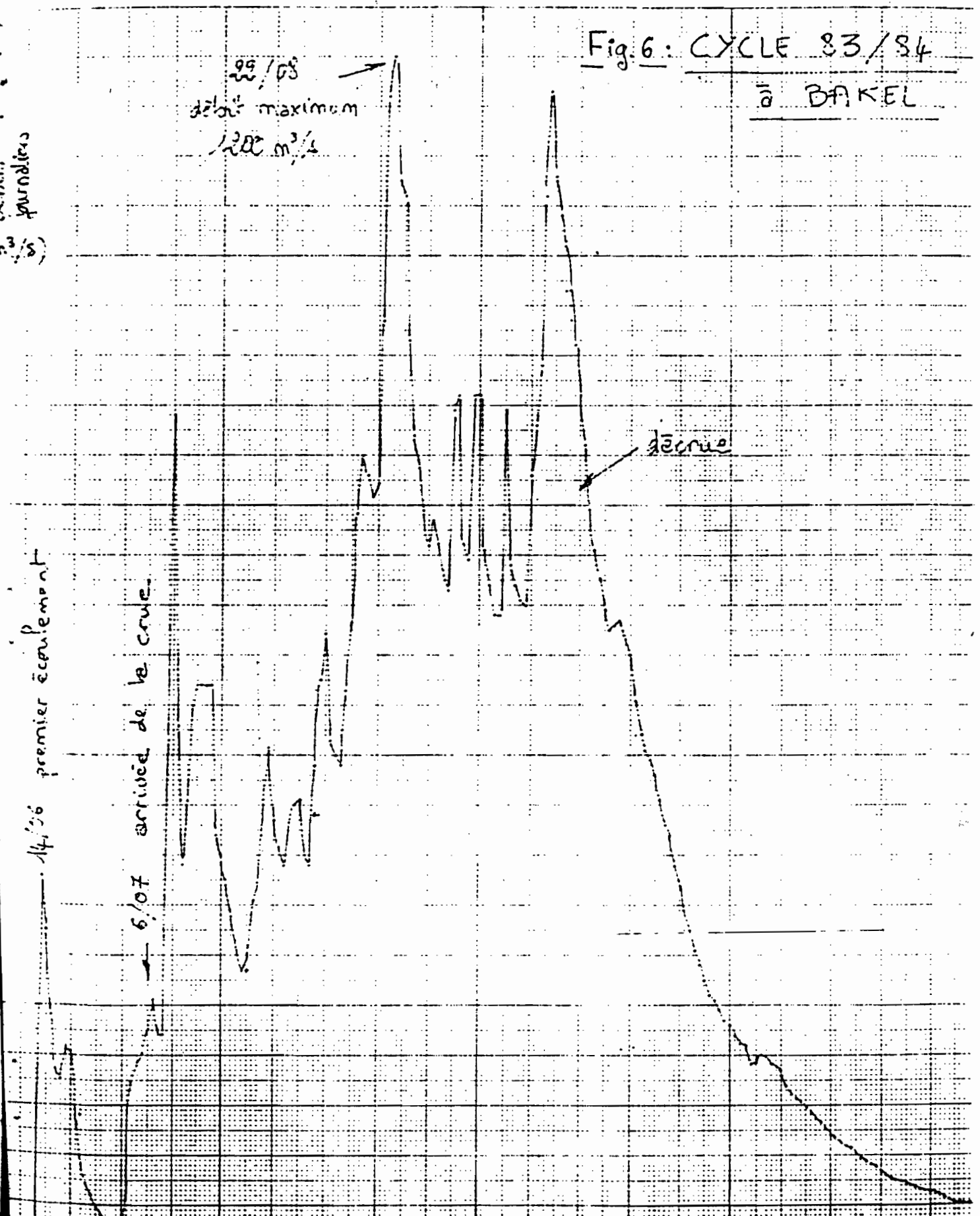


Fig. 6 bis : CYCLE 84/85 à BAKEL

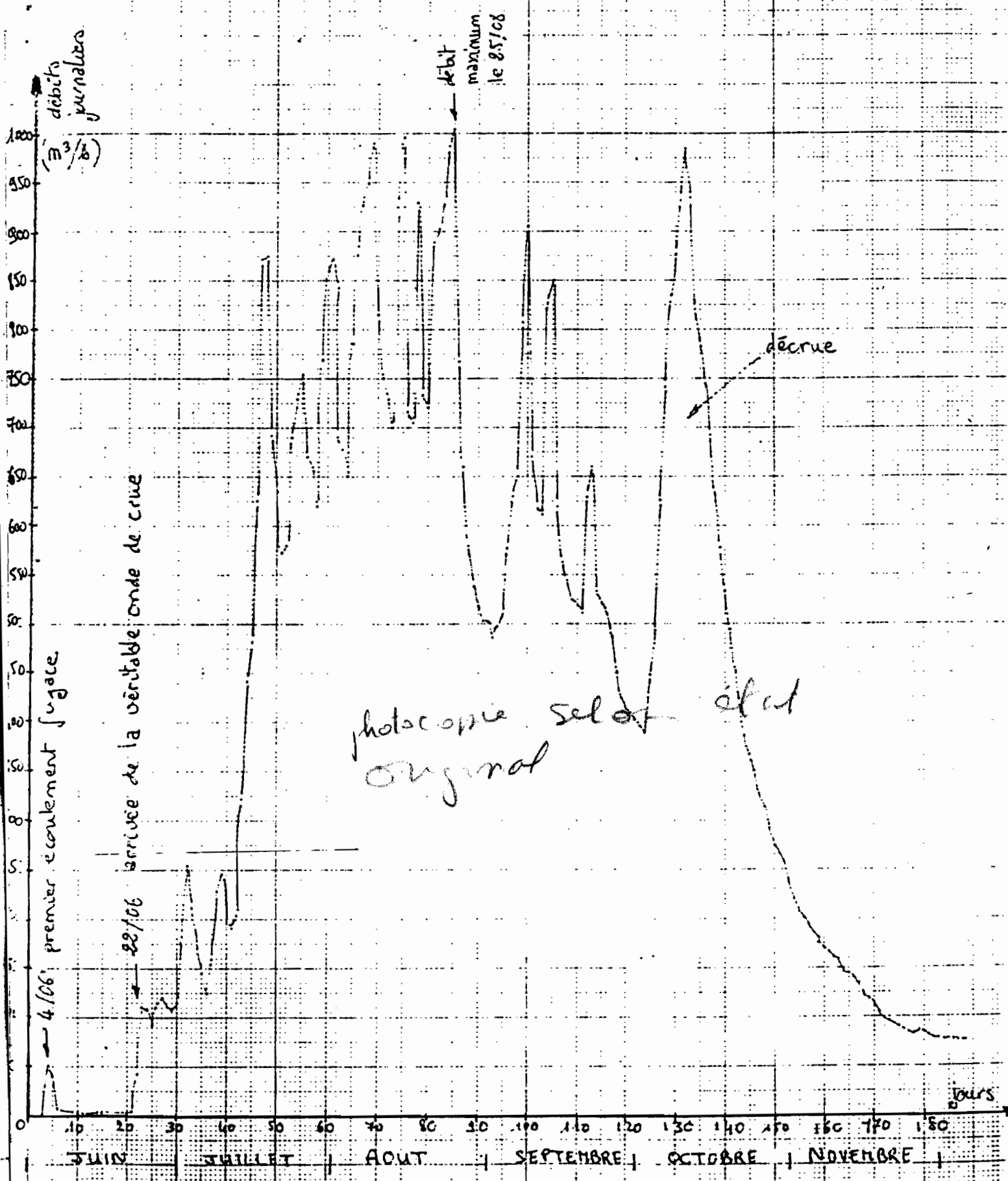


Fig. 7 : VARIATION DES HAUTEURS D'EAU AU BIEF DE BAKEL

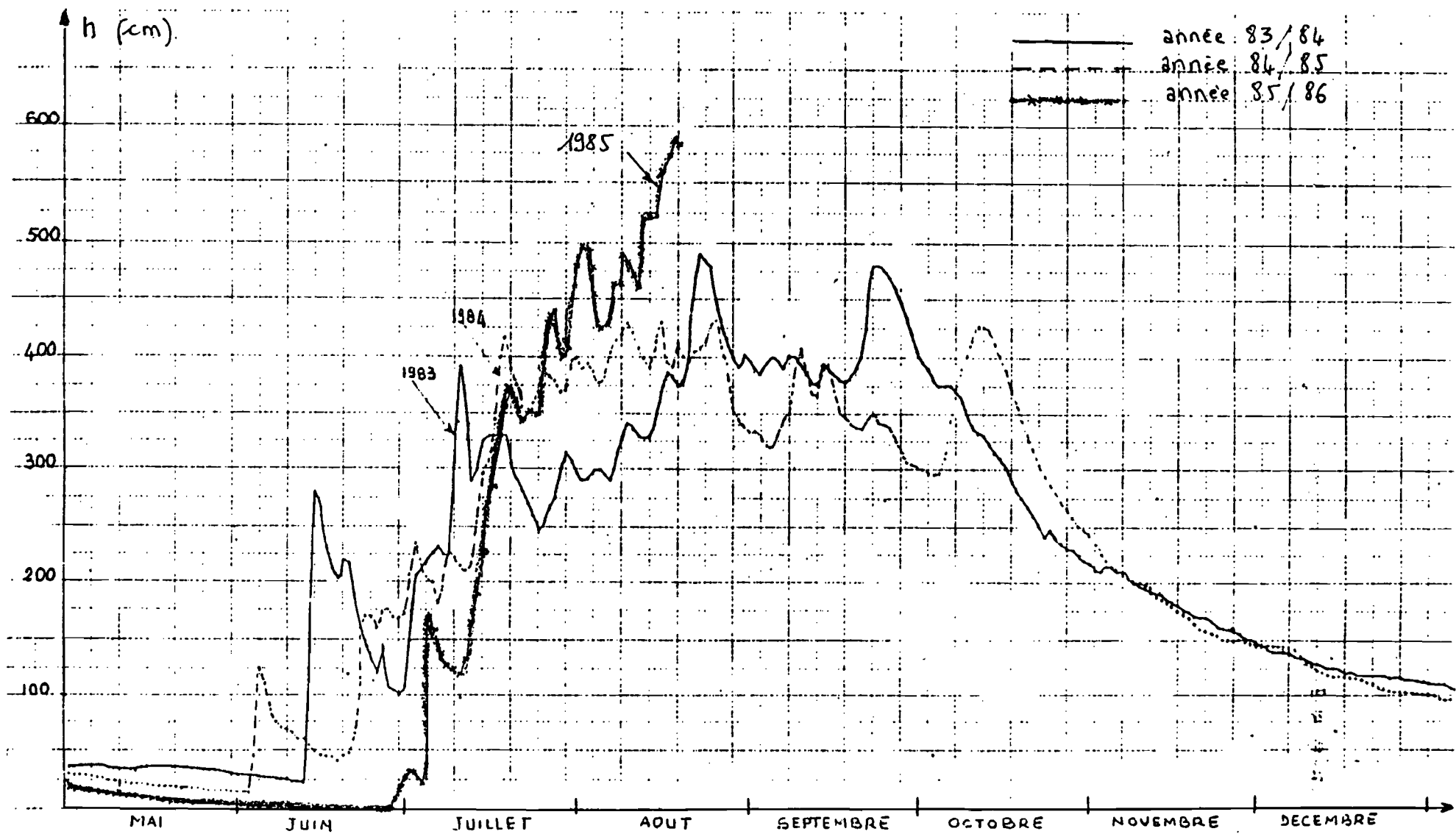


Tableau V : Relevés limnimétriques moyens journaliers (en cm) de mai 83 à avril 84 à Bakel.

	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A
1	36	30	149	891	355	337	211	146	111	86	63	41
2	37	30	205	293	354	358	212	143	110	85	63	46
3	38	28	211	358	335	379	216	147	105	84	62	46
4	38	27	217	155	400	373	215	140	106	84	61	46
5	38	26	225	255	397	375	212	139	104	82	60	46
6	37	26	237	291	352	376	210	138	103	81	60	46
7	36	26	225	307	358	371	201	130	102	79	59	46
8	35	26	223	331	355	384	201	135	101	77	57	46
9	35	25	316	343	354	349	194	133	100	77	55	46
10	35	24	393	335	386	355	195	131	99	76	56	46
11	35	24	340	331	378	333	193	129	99	76	54	46
12	34	23	291	227	378	330	191	127	98	75	52	45
13	35	102	299	227	395	323	189	126	95	74	51	45
14	36	279	305	346	391	315	185	125	97	73	51	45
15	37	267	330	342	386	306	183	124	96	72	51	45
16	38	233	330	356	392	302	180	123	95	71	51	45
17	37	209	331	353	380	292	176	123	94	71	50	44
18	37	206	330	376	386	283	174	122	93	70	50	44
19	37	218	304	380	393	274	172	122	93	69	50	44
20	37	217	293	411	405	267	170	121	93	69	49	44
21	36	183	283	468	445	259	168	120	93	67	48	43
22	36	158	272	482	480	253	165	119	92	67	48	43
23	35	145	260	485	480	248	162	118	92	66	48	41
24	35	134	248	480	476	242	160	118	91	65	48	40
25	34	122	253	447	469	240	158	117	91	64	48	39
26	34	114	269	425	459	235	154	117	90	64	48	37
27	34	107	276	415	447	231	151	116	89	64	47	38
28	33	105	300	405	433	228	151	115	88	63	47	37
29	32	103	314	395	422	224	148	114	87	63	47	37
30	31	108	307	402	400	221	147	113	87	62	47	37
31	30		297	397		219		112	86			

Hmax : 4,92 m.

Selon Etat Siguinal.

Tableau VI : Relevés limnimétriques moyens journaliers (en cm) de mai 84 à avril 85 à Bakel..

Jour	Mois	Jour	8'	9'	5'	6'	10'	11'	5'	7'	11'	11'
1	31	15	2.07	3.85	3.34	3.00	2.34	1.40	95	77	53	47
2	30	15	2.36	3.94	3.25	2.94	2.26	1.46	100	76	52	46
3	30	14	2.21	3.50	3.21	2.94	2.15	1.46	95	76	51	45
4	29	125	2.05	3.75	3.20	2.96	2.16	1.45	96	76	52	45
5	28	112	1.55	3.52	3.32	3.10	2.13	1.44	94	75	51	44
6	27	96	1.79	4.04	3.45	3.44	2.09	1.43	94	75	50	44
7	26	75	1.96	4.14	3.50	3.72	2.04	1.42	97	74	50	43
8	25	69	2.24	4.19	3.56	3.50	2.01	1.40	96	74	50	43
9	24	65	2.33	4.34	4.05	4.02	2.00	1.36	95	74	50	43
10	23	65	2.14	4.21	3.56	4.15	1.97	1.31	93	73	50	43
11	22	62	2.11	4.04	3.69	4.27	1.95	1.27	92	72	50	43
12	22	60	2.17	3.93	3.67	4.26	1.88	1.25	92	71	49	43
13	21	54	2.61	3.82	3.80	4.22	1.86	1.20	91	71	49	43
14	21	49	2.96	4.13	3.94	4.13	1.84	1.20	91	69	48	43
15	21	48	3.04	4.23	3.70	4.03	1.81	1.18	91	67	48	43
16	21	46	3.44	3.36	3.55	3.90	1.75	1.20	90	65	48	42
17	21	44	4.01	3.53	3.47	3.74	1.72	1.14	89	64	50	42
18	21	42	4.14	4.13	3.41	3.57	1.65	1.15	86	64	50	42
19	21	46	3.90	4.01	3.38	3.64	1.64	1.17	84	64	51	42
20	21	64	3.76	3.34	3.37	3.31	1.64	1.16	82	64	51	41
21	21	66	3.86	4.05	3.45	3.18	1.58	1.14	81	63	51	41
22	20	117	3.43	4.08	3.50	3.05	1.56	1.12	81	62	51	41
23	19	171	3.66	4.14	3.43	2.84	1.54	1.09	81	61	51	40
24	19	165	3.69	4.25	3.40	2.84	1.52	1.07	80	61	50	40
25	18	159	3.90	4.31	3.34	2.81	1.50	1.05	79	59	49	40
26	18	173	3.84	4.09	3.29	2.72	1.49	1.04	79	58	49	39
27	17	170	3.80	3.81	3.18	2.64	1.51	1.04	79	56	48	38
28	17	171	3.70	3.58	3.08	2.55	1.51	1.04	79	55	48	38
29	17	160	3.71	3.45	3.05	2.51	1.51	1.03	78		48	37
30	17	173	3.84	3.38	3.01	2.48	1.50	1.01	78		48	37
31	16		4.00	3.34		2.43		1.00	77		48	

Hmax : 4,34 m.

Tableau VII : Relevés limnimétriques moyens journaliers (en cm) de mai 85 à août 85 à Bakel.

Jours	Hauteur	Hauteur	Hauteur	Hauteur
1	36	14	00	480
2	35	13	03	477
3	34	13	04	490
4	34	12	05	486
5	33	12	07	475
6	32	12	10	477
7	31	12	15	466
8	31	11	13	451
9	30	10	12	438
10	30	10	12	473
11	29	9	13	465
12	29	9	13	472
13	28	8	16	472
14	27	7	19	473
15	26	7	22	458
16	25	6	27	472
17	24	6	29	488
18	23	6	33	481
19	22	5	35	
20	21	4	37	
21	20	3	36	
22	19	3	34	
23	18	2	35	
24	18	2	38	
25	18	2	40	
26	18	4	42	
27	18	6	43	
28	17	25	41	
29	16	40	40	
30	15	34	42	
31	14		41	

Hmax : 5,88 m.

Tableau VIII : Débits moyens journaliers (m^3/s) de mai 83 à avril 84 à Bakel

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr
1	0.57	0.20	77.8	390	680	705	191	74.2	38.1	17.3	6.07	2.01
2	0.66	0.20	180	432	665	677	193	70.6	37.2	17.3	6.07	2.01
3	0.76	0.15	193	450	845	645	201	69.4	35.4	16.5	5.78	2.01
4	0.76	0.12	204	455	860	625	199	67.0	33.7	15.9	5.49	2.01
5	0.76	0.10	226	400	712	630	193	65.9	31.9	15.2	5.20	2.01
6	0.66	0.10	256	390	695	635	189	64.8	31.0	13.9	5.20	2.01
7	0.57	0.10	224	490	860	620	180	62.6	30.2	12.8	4.95	2.01
8	0.47	0.10	221	575	860	600	169	61.5	29.3	12.3	4.95	2.01
9	0.47	0.07	515	622	705	555	161	59.3	28.4	11.7	4.69	2.01
10	0.47	0.06	840	515	670	520	157	57.1	28.4	11.7	4.18	2.01
11	0.47	0.06	528	500	640	505	153	55.0	27.6	11.2	3.71	2.01
12	0.42	0.05	390	490	640	495	149	53.0	27.6	11.2	3.28	2.01
13	0.47	30.2	455	565	845	480	143	52.0	26.8	10.7	3.07	2.01
14	0.57	379	550	634	690	455	137	51.0	26.8	10.3	3.07	2.01
15	0.66	325	570	742	670	430	133	50.0	26.0	9.82	3.07	1.80
16	0.76	240	570	800	655	420	127	49.0	25.2	9.38	3.07	1.63
17	0.76	186	570	780	650	390	120	49.0	24.5	8.94	2.85	1.63
18	0.66	176	570	759	780	370	117	48.0	23.7	8.50	2.85	1.63
19	0.66	208	420	772	830	345	113	48.0	22.9	8.13	2.85	1.63
20	0.66	204	393	935	890	325	110	47.0	22.9	7.76	2.64	1.63
21	0.57	133	370	1160	1060	305	107	46.0	22.9	7.76	2.64	1.46
22	0.57	92.5	338	1200	1165	290	102	45.1	22.1	7.39	2.64	1.29
23	0.47	73.0	308	1075	1080	275	97.2	45.1	22.1	7.02	2.43	1.12
24	0.47	60.4	285	1060	1040	260	94.0	44.2	22.1	6.65	2.43	0.95
25	0.42	48.0	302	915	1010	255	92.5	43.4	21.3	6.36	2.43	0.76
26	0.42	40.7	348	820	965	245	89.5	43.4	20.5	6.36	2.43	0.66
27	0.42	34.6	373	786	920	235	83.5	42.5	19.7	6.36	2.22	0.57
28	0.36	32.8	456	745	860	230	80.5	41.6	18.9	6.07	2.22	0.42
29	0.31	31.0	508	710	810	220	77.8	40.7	18.1	6.07	2.22	0.31
30	0.25	35.4	435	735	745	213	75.4	39.8	18.1		2.22	0.31
31	0.20		408	712		208		39.0	18.1		2.22	
Moyenne	0.54	77.7	389.8	697.2	816.6	424.6	134.5	52.4	25.9	10.4	3.52	1.53

Q max : 1 200 m^3/s , le 22/08/1983.

Module : 219,6 m^3/s .

Tableau IX : Débits moyens journaliers (m^3/s) de mai 84 à avril 85 à Bakel

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr
1	0.25	0	182	690	503	404	238	79	26.8	11.7	3.58	2.22
2	0.20	0	253	843	486	396	220	79	25.2	11.2	3.28	2.01
3	0.20	2.22	213	677	498	388	208	79	24.5	11.2	3.28	1.80
4	0.17	51.0	178	650	510	449	201	77	25.2	11.2	3.28	1.80
5	0.15	39.0	145	786	578	493	195	76	26.0	10.7	3.07	1.63
6	0.12	17.3	125	885	630	626	186	75	26.0	10.7	2.85	1.63
7	0.10	10.7	159	927	650	742	176	73	26.0	10.3	2.85	1.46
8	0.07	8.13	229	949	807	827	171	72	85.2	10.3	2.85	1.46
9	0.06	7.76	245	990	905	876	167	65	24.5	10.3	2.85	1.46
10	0.05	6.65	197	815	670	932	161	59	22.9	9.82	2.85	1.46
11	0.04	5.78	191	755	618	985	159	55	22.1	9.38	2.85	1.46
12	0.04	5.20	204	728	613	834	146	50	22.1	9.38	2.64	1.63
13	0.03	3.71	323	700	827	820	144	48	21.3	8.94	2.43	1.46
14	0.03	2.43	441	925	850	782	140	46	21.3	8.13	2.43	1.46
15	0.03	2.01	482	995	620	744	135	45	21.3	7.39	2.64	1.46
16	0.03	2.01	626	716	562	692	123	45	20.5	6.65	2.64	1.29
17	0.03	1.63	872	705	544	634	119	45	18.9	6.36	2.85	1.29
18	0.03	1.29	875	930	525	578	112	44	17.3	6.36	2.85	1.29
19	0.03	2.01	692	738	520	534	105	43	15.9	6.36	3.07	1.29
20	0.03	2.22	635	720	512	495	99	42	14.9	6.36	3.07	1.12
21	0.03	7.02	572	889	630	456	96	40	13.9	6.07	3.07	1.12
22	0.02	43.4	580	902	660	418	93	38	13.9	5.78	3.07	1.12
23	0	112	690	927	532	387	90	35	13.9	5.49	3.07	0.95
24	0	107	729	987	522	368	87	33	13.4	5.49	2.85	0.95
25	0	92.5	754	1004	512	350	84	31	12.8	4.69	2.64	0.95
26	0	115	670	768	490	328	83	30	12.8	4.69	2.64	0.86
27	0	120	660	660	456	314	87	30	12.8	4.18	2.43	0.76
28	0	112	620	580	428	292	85	30	12.8	3.88	2.43	0.76
29	0	107	769	538	418	275	82	29	12.3		2.43	0.66
30	0	115	860	519	410	268	79	27	12.3		2.43	0.66
31	0		872	503		257		26	11.7		2.43	
Moyenne	0.06	36.7	485.3	787.1	582.9	546.6	135.7	49.9	19.05	7.96	2.829	1.316

Q max : 1 004 m^3/s , le 25/08/1984.

Module : 221,3 m^3/s .

II. LE LABORATOIRE DE GÉOCHIMIE ET L'ÉTUDE DES M.E.S.

2.1 LE MATERIEL DU LABORATOIRE

On se sert d'une eau distillée que nous préparons nous-mêmes à l'aide d'une colonne de charbon actif et d'une colonne d'échangeur d'ions.

Pour effectuer les centrifugations, on dispose de deux centrifugeuses de type JOUAN G82 et JOUAN G81. Elles peuvent tourner jusqu'à 10 000 tours/minute. Elles sont, chacune, équipées de quatre godets, ce qui nous permet de passer 8 échantillons en même temps.

Nous disposons de trois étuves, d'une balance calibrée au millième de gramme, d'une colonne complète de tamis de série AFNOR pour procéder aux granulométries, d'un diffractomètre à rayons X, et d'un homogénéisateur pour les argiles. Les tamis sont nettoyés dans le bac à ultra-sons. Si l'on veut procéder à des séparations d'argiles, on dispose de colonnes de décantation où nous faisons des prélèvements à l'aide de la pipette d'Andreasen à des intervalles de temps déterminés par la loi de Stokes, mais aussi d'une centrifugeuse à pipette dont le principe est d'accélérer le phénomène de la loi de Stokes en créant une force centrifuge.

On s'intéressera plus particulièrement au fonctionnement des appareils servant directement à l'étude des M.E.S., à savoir :

- la pipette d'Andreasen,
- la centrifugeuse à pipette,
- le diffractomètre aux RX.

2.2 LE PROTOCOLE DE PRELEVEMENTS DES M.E.S.

Avant que la crue ne s'amorce, deux aides techniques du laboratoire vont sur place pour commencer les prélèvements au moment voulu, et ceci pendant toute la période d'hivernage. Ils sont respectivement à la station de Bakel et de Richard-Toll.

Chaque échantillonnage consiste en une prise d'eau de 64 l à l'aide d'une bouteille à renversement d'un litre munie d'un messenger. Successivement, les prélèvements se font sur cinq profils transversaux et à des profondeurs différentes.

Le traitement "in situ" de l'échantillon prélevé consiste à déverser les 64 l dans un fût plastique et de ramener rapidement à 1 litre le volume à acheminer vers le laboratoire en procédant par décantation accélérée ou floculation. Pour cela, on additionne 5 cm³ d'acide chlorhydrique dans le fût ; au bout de 24 heures, on procède à l'aide d'un tube recourbé au siphonnage de l'eau claire surnageante. Le volume restant, un peu moins de 10 litres, est alors transvasé dans une dame-jeanne, récipient en verre qui permet de visualiser 24 heures plus tard la dernière opération de siphonnage. En fin

d'opération, le litre recueilli est transféré au laboratoire d'Hydrogéochimie de Dakar. Les échantillons sont lavés à l'eau distillée, centrifugés (4 lavages successifs), puis séchés à l'étuve à 80° C et pesés.

Le régime du fleuve guide la répartition et la densité des prélèvements au cours de la période des hautes-eaux. Ainsi, pouvons-nous déterminer les principales caractéristiques du transport solide en suspension et évaluer les flux particuliers annuels.

Bakel, Richard-Toll, Dagana et Podor sont les stations clefs du contrôle hydrogéochimique du fleuve Sénégal.

2.3 LA PIPETTE D'ANDREASEN

L'analyse microgranulométrique à la pipette consiste à prélever à un instant donné et à une profondeur donnée un certain volume du système en cours de sédimentation et d'y doser la quantité de particules. On admet que dans chaque prélèvement se trouvent, à leur concentration primitive, toutes les particules dont la vitesse de chute est plus petite que $\frac{h}{t}$, h et t étant, respectivement, la hauteur de prélèvement au-dessous de la surface du liquide, et le temps de chute. Ce rapport est directement lié à la loi de Stokes ; r étant le rayon des particules et C la constante de Stokes, on a :

$$r^2 = \frac{h}{Ct}$$

La pipette d'Andreasen se compose essentiellement d'une tubulure plongeant dans la suspension à étudier et d'un réservoir jaugé de 10 à 20 cm³ avec deux traits de jauge. Un robinet à deux voies permet d'établir successivement la communication entre ce réservoir et la tubulure plongeant dans la suspension, puis entre le réservoir et l'ajutage de vidange (fig. 8).

L'échantillon, préparé comme il a été exposé ci-dessous, est traité à l'eau oxygénée pour détruire la matière organique puis à nouveau séché à l'étuve et pesé. Il est ensuite remis en suspension dans de l'eau distillée, passé à l'homogénéisateur (broyeur à grande vitesse), et le pH de la solution est ramené à 9. La suspension est alors versée dans l'éprouvette, et on complète avec de l'eau distillée jusqu'à la hauteur désirée. On amène l'ensemble à la température de 20° C dans la cuve thermostatique. Lorsque cette température est atteinte, la suspension est agitée jusqu'à une parfaite homogénéisation. La fin de l'agitation fixe le temps zéro.

La pipette est fixée dans un bouchon qui est traversé par un tube capillaire dont l'enfoncement est réglé en fonction de la hauteur " h " choisie pour l'expérience. Le bouchon est également traversé par un thermomètre qui contrôlera la température de la suspension pendant la durée de l'expérience.

Au bout des temps t_1 , t_2 , t_3 , etc. précédemment déterminés, la suspension est aspirée jusqu'au trait supérieur du réservoir de la pipette. En tournant ensuite le robinet à 2 voies, les 10 cm³ prélevés s'écoulent dans un bécher préalablement taré.

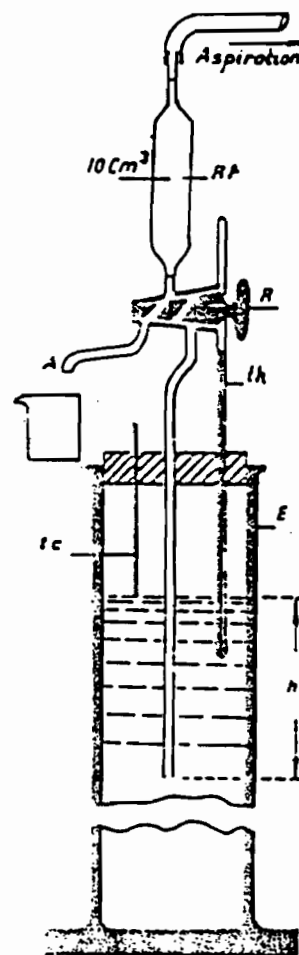


fig. 8

Pipette d'ANDREASEN sur son éprouvette -

R.P. = Réservoir de la pipette.

R = Robinet à 2 voies.

E = Éprouvette contenant la suspension.

A = Ajetage de vidange.

th. = Thermomètre.

tc = Tube capillaire.

On évapore à l'étuve et on pèse.

Cette méthode est utilisée pour les particules comprises entre 63μ et 5μ . Pour les particules supérieures à la limite maximum, leur granulométrie est déterminée par tamisage ; mais elles ne présentent qu'une très infime partie des M.E.S. Par contre, pour les particules inférieures à la limite minimum, c'est-à-dire pour les limons très fins et les argiles, on utilise la centrifugation à pipette.

2.4 LA CENTRIFUGEUSE A PIPETTE (fig. 9)

Le principe de mesure de la pipette d'Andreasen est utilisé dans la centrifugeuse à pipette en lui associant en plus la force centrifuge.

Lors de la sédimentation, la concentration en matière solide dans la suspension augmente à partir de la surface du liquide jusqu'au niveau de mesure, et aucune perturbation due à des convections de densité ne peut alors se produire. A des temps déterminés par la loi de Stokes en fonction de la taille des grains désirés, des échantillons de même volume sont prélevés au niveau de mesure. Le rayon intérieur de la surface du liquide augmente proportionnellement et la distance entre la surface du liquide et le niveau de mesure diminue. Le chemin restant à parcourir par les petites particules diminue, ce qui implique des durées de mesure plus courtes.

L'appareil est composé d'un moteur (2 vitesses de rotation) qui entraîne le tambour de mesure. 6 sondes capillaires d'égale longueur sont réunies au centre du tambour où la suspension est introduite. Une pipette de 10 ml sert au prélèvement des échantillons.

La quantité de matière solide de tous les échantillons est obtenue par gravimétrie, titrimétrie ou colorimétrie. Pour pouvoir déterminer le temps du premier prélèvement d'échantillon, il faut au préalable calculer la dimension des particules d'après la loi de Stokes et les caractéristiques du produit. Si les échantillons ont été prélevés dans un rapport de temps de 2/1 (par exemple 1, 2, 4, 8, 16... minutes), les dimensions des particules sont obtenues grâce à des facteurs connus et leurs masses en pourcentage, à l'aide d'équations linéaires.

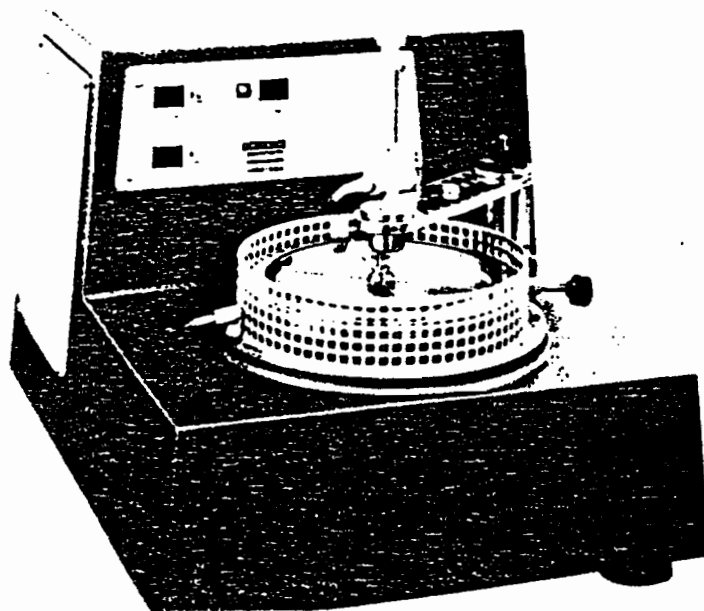


Figure 9 : Centrifugeuse à pipette.

2.5 LE DIFFRACTOMETRE AUX RAYONS X ET L'ANALYSE MINÉRALOGIQUE DES ARGILES

L'analyse aux Rayons X est essentiellement basée sur l'hypothèse de la réalité physique des plans réticulaires, ce qui permet de comparer le cristal à un empilement régulier de glaces semi-transparentes. Chaque plan ne réfléchit qu'une faible partie de la lumière et en laisse passer la plus grande partie : il y aura un maximum de lumière réfléchi chaque fois qu'il y aura accord de phase entre les rayons réfléchis et les plans successifs (R. GAY, 1959).

Mais cette réflexion est soumise à la loi de Bragg qui est la suivante :

Lorsqu'un cristal donne un rayon diffracté, tout se passe comme si les plans (h k l) du réseau de Bravais jouaient le rôle de plans réflecteurs, mais il n'y a réflexion que si la condition de Bragg est réalisée, soit :

$$2 d(h \ k \ l) \sin \theta = n\lambda$$

n : nombre entier désignant l'ordre de la réflexion

λ : longueur d'onde du rayonnement X

d_{hkl} : distance entre les plans réticulaires d'une même famille

θ : angle de diffraction.

Le diffractomètre se compose de :

- d'un générateur de haute tension,
- d'une anticathode (cuivre ou cobalt suivant l'échantillon analysé) pour l'émission des rayons X,
- de fentes de Soller,
- de fenêtres limitant le faisceau de rayons X,
- d'un porte-échantillon placé au centre de focalisation entraîné par un mouvement de rotation,
- d'un compteur Geiger Muller qui se déplace d'un angle double de celui de l'échantillon pour suivre le faisceau réfléchi,
- et d'un amplificateur de signaux du compteur pour les tracés de courbes caractéristiques de chaque minéral.

Quand l'échantillon arrive au laboratoire, il présente un surageant que l'on vide et un culot qui représente la matière en suspension qui va subir plusieurs lavages et un traitement à l'eau oxygénée, comme nous l'avons vu plus haut. On rappelle que les lavages successifs (4) se font à l'aide des centrifugeuses à 3 000 tr/mn pendant 30 minutes. C'est dans des coupelles, préalablement pesées, que la matière (sous forme de pâte) est séchée à l'étuve à 50° C pendant plusieurs jours. Une seconde phase consiste à la préparation de l'échantillon pour qu'il puisse subir des analyses par diffractométrie X. A l'aide d'un mortier en agathe, on prépare la poudre de telle manière que l'on ne ressente plus la "texture granuleuse" entre les doigts. Puis elle est étalée dans la fenêtre d'une lame en aluminium, formant ainsi un lit de très petits cristaux orientés au hasard. Cette lame est fixée sur le porte-échantillon de l'appareil qui lui imprime un mouvement de rotation autour d'un axe perpendiculaire au cercle porteur (fig. 10).

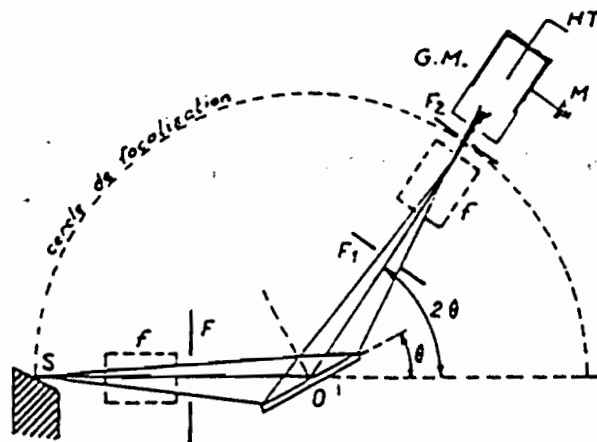


fig. 10

Schéma d'un diffractomètre (vue de plan) -

S : Source des rayons X - anticathode.

f : fentes de Soller.

F_1, F_2 : fenêtres limitant le faisceau X.

O : échantillon placé au centre du cercle de focalisation et entraîné dans un mouvement de rotation. GM : Compteur Geiger Muller, qui se déplace d'un angle double de celui de l'échantillon, pour suivre le faisceau réfléchi. En pointillé : cercle de focalisation.

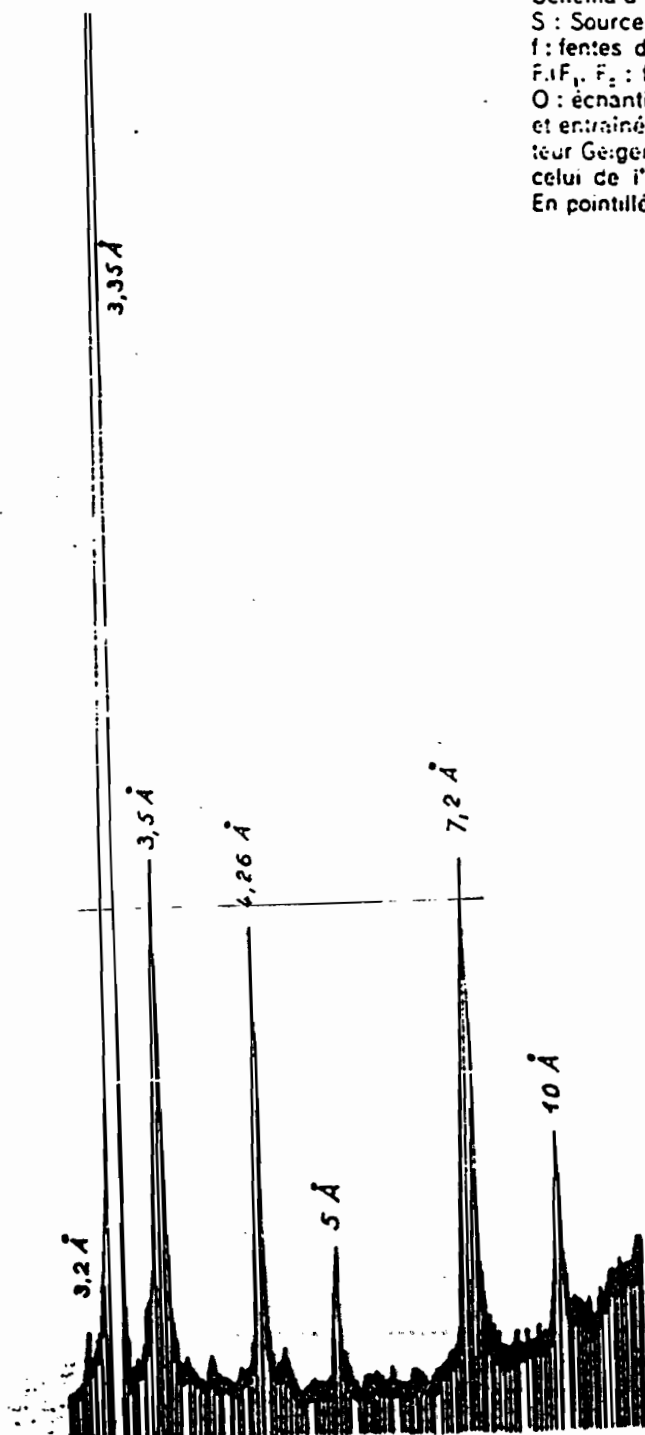


fig. 11

Les rayons réfléchis sont reçus par un compteur Geiger Muller qui transmet les impulsions à un potentiomètre qui enregistre les angles et trace un pic lorsqu'il y a réflexion suivant la loi de Bragg.

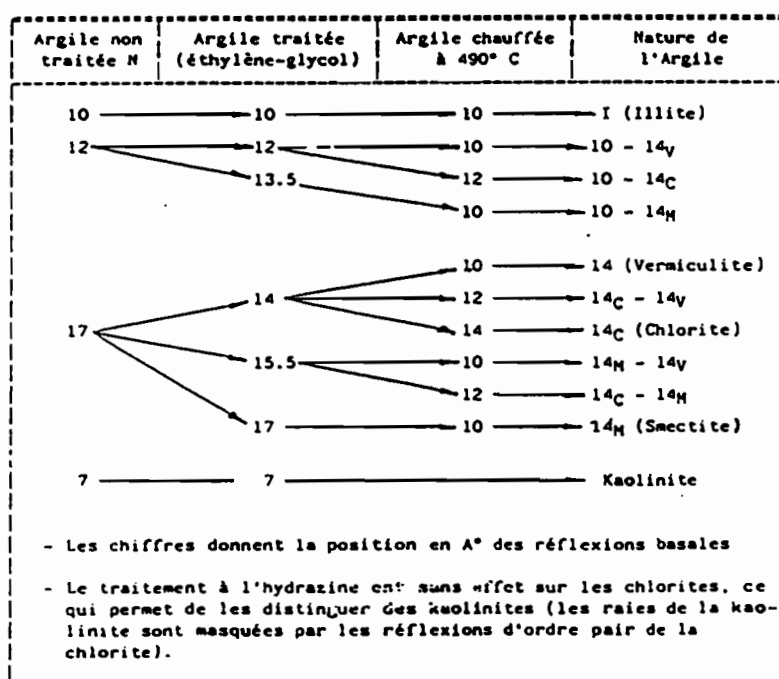
On obtient alors un diffractogramme du type de celui représenté sur la figure 11.

On choisit l'anticathode la plus favorable pour l'étude entreprise et on isole par réglage une raie de longueur d'onde bien définie. En général, dans l'étude des argiles on utilise une anticathode de cobalt et on isole la raie $K\alpha$ du cobalt ($\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$). Connaissant l'angle θ sous lequel s'est faite la réflexion et la longueur d'onde λ on peut calculer "d". En pratique, on n'a pas à faire ce calcul, le résultat est donné dans des tables.

Les analyses diffractométriques aux rayons X sur la fraction inférieure à 2 microns et sur l'échantillon brut se font à partir des tests classiques :

- un enregistrement sur pâte non traitée : agrégat orienté (N),
- une saturation de l'agrégat orienté à l'aide d'un polyalcool qui agrandit l'écart interfoliaire des smectites (GL),
- un traitement à l'hydrazine monohydratée qui affecte les minéraux de type kaolinite et permet de les distinguer des chlorites (HYD),
- un traitement au chauffage (490° C) pendant 4 heures de l'agrégat orienté qui détruit la kaolinite et déshydrate de façon irréversible les smectites et les chlorites.

La reconnaissance des espèces minérales argileuses se fait par comparaison des 5 diffractogrammes ainsi obtenus, à partir des critères définis par HOFFERT (1973), dont voici son schéma classique de détermination basé sur la position et le déplacement des réflexions (001) au cours des différents traitements (N, Ch, Gly, Hdr.)



III. LES APPORTS FLUVIAUX DE MATIÈRES EN SUSPENSION AU BIEF DE BAKEL

3.1 DONNEES ANTERIEURES

Il existe peu de données sur les débits solides du Sénégal. Les quelques mesures connues ne concernent que quelques stations (Kayes, Bakel, Dagana...) et ont le plus souvent été limitées dans le temps (RIOU, 1936 ; SEGUY, 1955 ; MANDIN, 1957 ; MICHEL, 1973 ; SENEGAL-CONSULT, 1970 ; SURVEYER-NENNIGER-CHENEVERT, 1972).

RIOU (1936) signale des mesures faites en différents points du fleuve, en particulier à Bakel et à St Louis au cours des années 1908, 1934-1935 pour évaluer les débits solides du Sénégal. Cet auteur souligne qu'à partir d'un écoulement total de 39 millions de m³, la quantité de limons transportés par le Sénégal serait de l'ordre de 4 millions de m³ (30 % se déposeraient dans les plaines d'inondation et 70 % seraient jetés à la mer).

SEGUY (1955) et MANDIN (1957) ont effectué des mesures de matières en suspension à Dagana - Bakel et Fadougou au cours de la décrue en 1953 et lors des crues fortes en 1955 et 1956. La charge moyenne des matières en suspension en début de crue a été évaluée à 250 mg/l à Dagana et à 170 mg/l à Bakel. A la pointe de crue, les deux stations ont donné des résultats sensiblement identiques, les concentrations oscillant entre 80 et 90 mg/l. La turbidité ne présentait aucune tendance systématique d'augmentation ou de diminution en fonction de la profondeur, phénomène caractéristique d'un transport de particules très fines.

Ces premières mesures sur la charge solide des eaux du Sénégal et l'observation minutieuse du recul des berges ont conduit MICHEL (1967, 1968), SALL (1982), MICHEL et SALL (1984) à souligner l'importance du façonnement continu de la vallée, par la crue annuelle, dans l'apport de matériel fin à l'embouchure du fleuve. En effet, l'érosion latérale par le sapement des berges des rives concaves dans les méandres les plus importants serait de l'ordre de 1 à 1,50 m/an : les fractions grossières restant temporairement piégées aux pieds des rives convexes, les limons et les particules argileuses poursuivant avec le flot leur course vers l'aval. En reprenant les mesures de la M.A.S.⁽¹⁾, à la station de Bakel, MICHEL (1970) a estimé l'apport détritique annuel à 2 800 000 tonnes (crue très forte), à 1 900 000 tonnes (crue moyenne) et à 1 000 000 tonnes (crue très faible).

3.2 EVOLUTION SAISONNIERE DE LA TURBIDITE AU COURS DES CYCLES HYDROLOGIQUES 83-84 et 84-85

Les cycles hydrologiques 83-84 et 84-85 commencent respectivement le 6/07/83 et le 22/06/84, dates correspondant à l'arrivée de l'onde de crue à Bakel (voir les hydrogrammes figures 6 et 6 bis).

Cependant, pour l'évaluation des transports solides, on part classiquement du mois de mai.

(1) : M.A.S. (Mission d'Aménagement du Sénégal).

3.2.1 L'ensemble des mesures sur la charge solide du fleuve Sénégal à Bakel

Nous avons reporté dans les tableaux X et XI l'ensemble des mesures sur la charge solide du fleuve Sénégal à Bakel. Les plus fortes concentrations journalières observées au cours des deux cycles successifs ont été de 1 851,6 mg/l (10/07/83) et de 2 727,7 mg/l (22/06/84). Ces valeurs sont bien plus élevées que celles connues antérieurement (voir tableau XII) et sont vraisemblablement liées au fait qu'en période de sécheresse, l'écoulement du fleuve canalisé dans le lit mineur pendant le passage de la première onde de crue provoque des sapements latéraux plus importants des rives.

Tableau XII : Valeurs maximales des concentrations moyennes journalières des M.E.S. à Bakel au cours des 5 dernières années.

Année	C _{max} (mg/l)	Date
1980/1981	574.2	14/07
1981/1982	840.3	10/07
1982/1983	724.4	17/07
1983/1984	1 851.6	10/07
1984/1985	2 727.7 ✓	22/06

3.2.2 Variation des concentrations journalières moyennes des M.E.S. en fonction des débits

Les variations des concentrations journalières moyennes des M.E.S en fonction des débits à Bakel lors des cycles 83-84 et 84-85 sont représentées en figures 12 et 13.

Comme ceci a déjà été souligné pour le Chari (CARRE, 1972 ; CHOURET, 1977), pour la Sanaga (NOUVELOT, 1972 (NOUVELOT, 1972)), pour le Bandama (LENOIR, 1972 ; MONNET, 1972), pour la Gambie (LO, 1984) et pour le Sénégal à son embouchure (GAC et KANE, 1985), les turbidités maximales précèdent toujours la pointe de crue.

Les figures 12 et 13 mettent en évidence des variations saisonnières que l'on retrouve sur les 2 cycles étudiés. On a de fortes concentrations en début de crue, puis ensuite des pulsations d'amplitudes de moins en moins importantes, puis finalement une diminution rapide des concentrations dès l'amorce de la décrue. En effet, dès novembre, avec l'achèvement de la saison des pluies, le développement de la végétation atténue le transport des matériaux en suspension ; la dégradation des sols est moindre et les eaux n'assurent plus que l'évacuation des fines particules déjà libérées. La période des basses-eaux est marquée par la restitution progressive au fleuve des eaux d'inondation du lit majeur, des eaux d'infiltration et la vidange des nappes. Les eaux deviennent limpides, acquièrent une charge dissoute plus importante ; les concentrations de matières en suspension diminuent fréquemment en dessous de 10 mg/l.

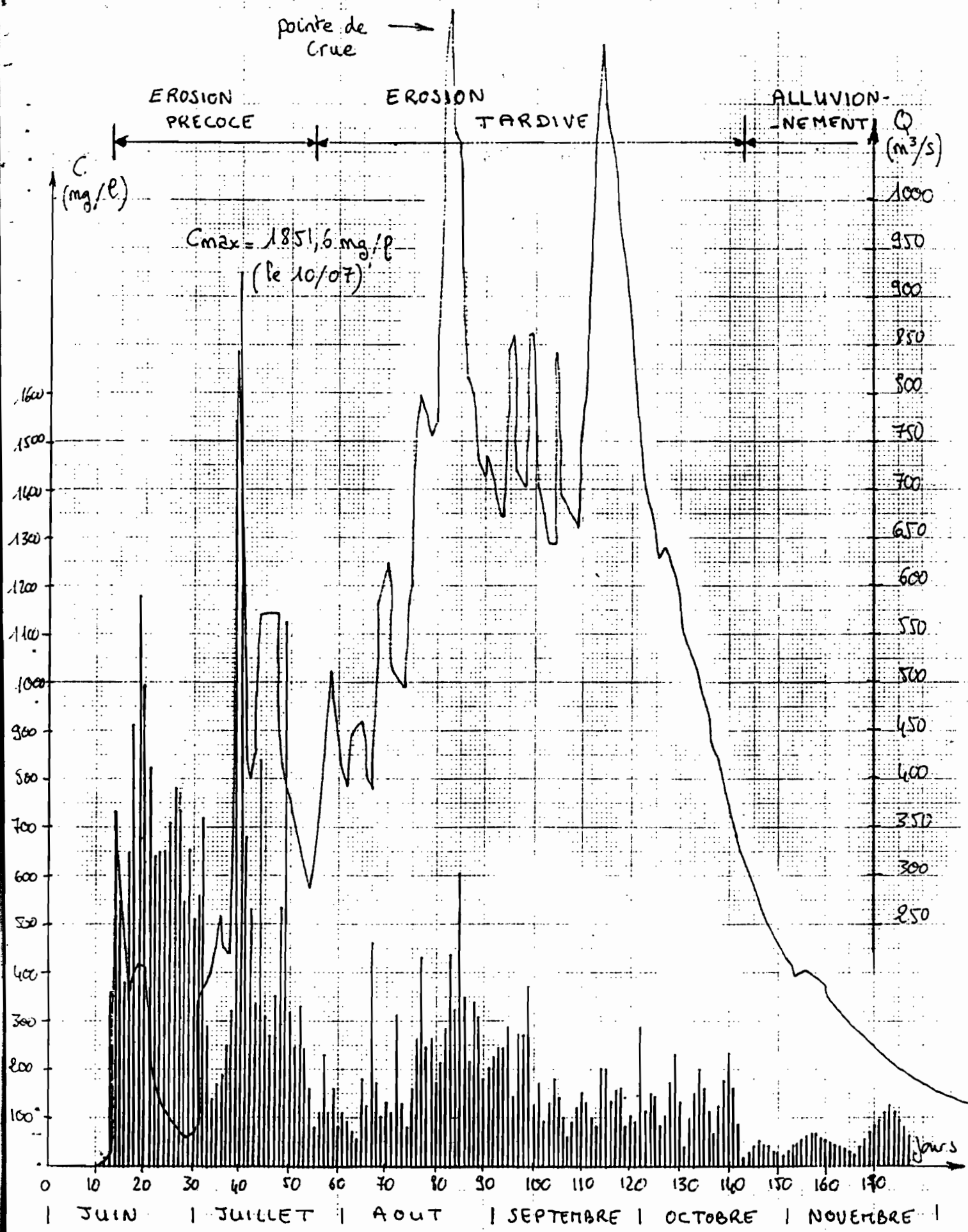


Fig 12 : Variation des concentrations journalières moyennes des matières en suspension avec les débits à Bakel en 1953 (Cycle 53/54)

$$C_{max} = 2 \frac{Q_{max}}{Q_1} = m_2 \cdot Q$$

(le 22/06)

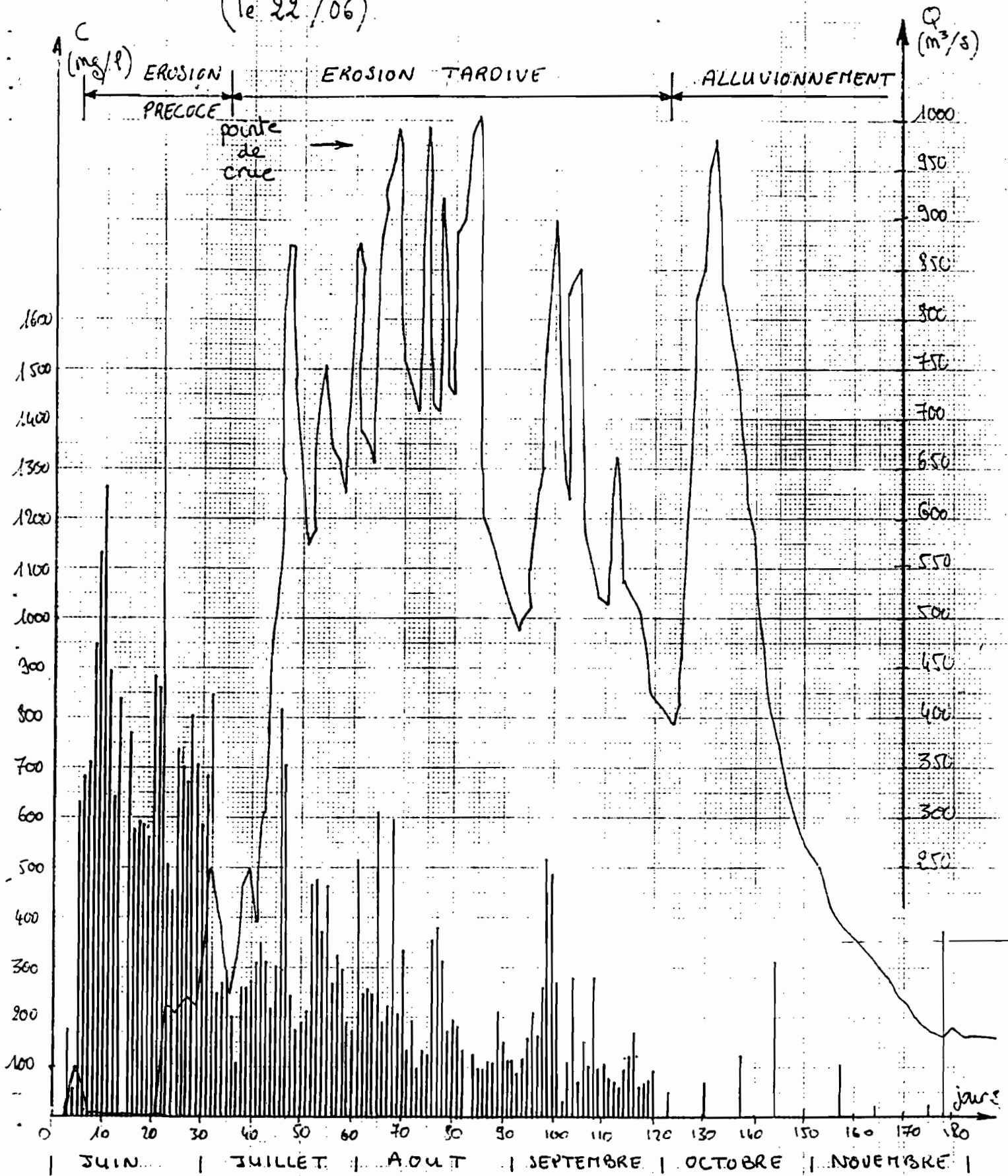


Fig. 13. Variation des concentrations moyennes journalières
des matières en suspension avec les débits à Bakel en 1984
(Cycle 84/85)

Tableau X : Concentrations moyennes journalières des M.E.S. et volumes moyens journaliers au cours de la crue 83/84 à Bakel

Date	JUIN		JUILLET		AOÛT		SEPTEMBRE		OCTOBRE		NOVEMBRE	
	C (mg/P)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/P)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/P)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/P)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/P)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/P)	V (10 ⁶ m ³)
1		0	557.0	6.72	90.3	33.70	243.3	58.75	143.0	60.91	37.97	16.50
2		0	717.1	15.55	72.2	37.32	242.2	57.46	147.6	58.49	45.75	16.67
3		0	258.1	16.68	57.4	38.98	284.9	73.01	145.1	55.73	53.53	18.81
4		0	137.9	17.63	179.8	39.31	130.6	74.30	82.3	54.0	61.32	17.19
5		0	161.5	19.53	123.9	34.55	273.3	61.52	102.8	54.43	69.10	16.67
6		0	187.2	22.12	460.6	33.70	270.1	66.05	171.2	54.86	64.26	16.33
7		0	249.4	19.35	167.1	42.34	374.2	74.30	226.0	53.57	59.41	15.55
8		0	322.9	19.09	101.3	49.68	123.8	60.91	132.2	51.84	54.57	14.66
9		0	1542.1	44.50	129.4	53.74	169.0	57.89	38.5	47.95	49.72	13.91
10		0	1851.6	72.58	114.3	44.50	90.0	55.30	93.9	44.93	44.88	13.56
11		0	680.7	45.62	511.7	43.20	131.7	55.30	149.3	43.63	40.03	13.22
12	19.1	0	531.6	33.60	127.3	42.34	180.1	73.01	204.7	42.77	35.19	12.87
13	364.8	2.61	334.5	39.31	80.8	48.82	139.5	59.62	159.2	41.47	30.34	12.36
14	710.5	32.75	836.2	47.53	162.5	54.78	98.9	57.89	113.7	39.31	25.50	11.84
15	545.6	25.08	304.8	49.25	262.6	64.11	58.2	56.59	68.2	37.15	39.88	11.49
16	380.8	20.74	268.7	49.25	429.4	69.12	89.0	56.16	123.2	36.29	54.27	10.97
17	646.6	16.07	349.2	49.25	248.5	67.39	119.8	67.39	178.3	33.70	68.66	10.37
18	912.3	15.21	534.9	49.25	264.7	65.58	150.6	71.71	233.3	31.97	83.04	10.11
19	1178.1	17.97	1123.7	36.29	171.7	66.71	127.7	76.90	161.1	29.81	97.43	9.76
20	999.6	17.63	319.2	33.96	213.2	80.78	104.9	91.58	88.8	28.08	111.91	9.50
21	821.1	11.49	245.0	31.97	285.4	100.22	89.0	100.66	16.6	26.35	126.20	9.24
22	647.6	7.95	335.1	29.20	436.6	103.68	200.3	93.31	28.3	25.06	111.44	8.81
23	646.0	6.31	243.0	26.61	321.0	97.88	200.9	89.6	40.0	23.76	96.69	8.40
24	649.4	5.22	160.8	24.62	603.4	91.58	132.1	87.26	51.7	22.46	81.93	8.12
25	710.3	4.15	81.0	26.09	345.5	79.06	154.6	83.38	45.6	22.03	67.17	7.99
26	780.0	3.52	105.1	30.07	217.2	70.55	161.3	79.49	39.4	21.17	52.41	7.73
27	727.3	2.99	230.9	32.23	338.0	67.91	89.9	74.30	33.3	20.30	37.66	7.21
28	546.0	2.83	110.8	39.40	302.1	64.37	100.4	69.98	29.7	19.57	22.90	6.95
29	654.4	2.68	153.6	43.89	183.3	61.34	91.7	64.37	26.0	19.01	8.14	6.72
30	507.7	3.06	83.4	37.58	202.3	63.50	288.4		27.4	18.40	8.00	6.51
31			104.9	35.25	222.7	61.52			30.2	17.97		

Tableau XI : Concentrations moyennes journalières des M.E.S et volumes moyens journaliers lors de la crue 84/85 à Bakel.

JOUR	JUIN		JUILLET		AOÛT		SEPTEMBRE		OCTOBRE		NOVEMBRE	
	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)
1		0	624.1	15.73	268.8	59.63	91.6	43.47	49.0	34.92		20.57
2		0	811.6	21.87	256.2	72.86	78.1	42.		34.22		19.01
3	175.7	0.19	299.5	18.41	228.5	58.51	154.3	43.04		33.53		17.98
4	51.4	4.41	236.4	15.39	408.7	56.18	211.3	44.08		39.80		17.37
5	630.9	3.37	239.8	12.53	178.5	67.93	163.4	49.95		42.61	105.1	16.85
6	681.9	1.50	194.6	10.80	198.3	76.49	186.5	54.45		54.10		16.07
7	710.9	0.92	115.9	13.74	378.1	91.	513.6	56.18		64.13		15.21
8	947.2	0.70	171.1	19.79	175.7	89.02	482.3	69.74	72.1	71.47		14.78
9	1130.3	0.67	174.0	21.17	230.7	85.56	267.5	78.21		75.71		14.43
10	1264.6	0.57	172.8	17.03	146.9	70.44	33.6	57.90		80.55		13.91
11	893.0	0.50	223.1	16.51	187.6	65.25	144.4	53.41		85.13		13.74
12	642.9	0.45	308.4	17.63	118.5	62.92	212.3	52.98		72.08	18.9	12.62
13	838.0	0.32	282.6	27.91	138.4	60.50	161.1	71.47		70.87		12.45
14	n.d.	0.21	297.4	38.41	223.2	79.94	182.5	73.46		67.58		12.10
15	765.0	0.17	280.5	41.66	400.3	85.99	194.1	53.58	125.5	64.30		11.67
16	574.0	0.17	546.3	54.10	488.7	61.88	204.1	48.57		59.91		10.63
17	580.8	0.14	529.3	75.36	315.7	60.93	111.5	47.01		54.79		10.28
18	577.0	0.11	301.0	75.62	289.7	80.37	97.5	45.37		49.95		9.68
19	559.6	0.17	219.0	59.51	247.2	63.78	81.7	44.94		46.15	23.0	9.07
20	883.4	0.19	174.8	54.88	206.7	62.73	66.1	44.25		42.78		8.56
21	861.5	0.61	174.0	49.43	164.5	76.93	57.2	54.45		39.41		8.30
22	2727.7	3.75	312.5	50.13	249.9	77.95	83.2	57.04	308.5	36.13		8.04
23	501.6	9.68	344.7	59.63	164.2	80.41	111.7	45.98		33.45		7.78
24	452.0	9.25	291.2	63.00	101.2	85.30	130.4	45.11		31.30		7.57
25	735.4	7.99	549.6	65.16	124.1	86.77	63.9	44.25		30.25		7.26
26	701.0	9.94	278.3	57.90	125.1	66.37	66.8	42.35		29.35	372.8	7.17
27	717.3	10.37	261.3	57.04	116.8	57.04	73.6	39.41		27.14		7.52
28	690.9	9.68	278.9	53.58	157.6	50.13	97.3	36.99		25.24		7.35
29	707.5	9.25	168.5	66.46	114.5	46.50	n.d	36.13	6.0	23.77		7.09
30	623.4	9.94	167.8	74.32	107.1	44.85	n.d	35.43		23.16		6.83
31			485.5	75.36	99.1	43.47				22.21		

3.2.3 Interprétation qualitative

Les variations saisonnières de la turbidité des eaux du Sénégal sont très visibles et il est aisé d'en esquisser le schéma général. Pendant la saison des hautes-eaux, les eaux sont extrêmement turbides en raison de leur importante charge en limons, leur couleur est alors "jaune sale". Elles s'éclaircissent à partir d'octobre et deviennent "bleu sombre" dès le mois de décembre, à cause, comme nous l'avons dit ci-dessus, du phénomène classique engendré par la présence de plaines d'inondation qui jouent le rôle de filtres et ne restituent au collecteur que des eaux limpides délestées de leur charge solide (GAC, 1979 ; GAC et TARDY, 1980).

Cependant, l'acquisition de la charge solide et les mécanismes, qui de l'amont vers l'aval des bassins versants président, règlent et contrôlent les variations brutales des concentrations, restent mal connus. Les nombreuses études menées dans ce domaine ont montré que la charge en suspension est plus dépendante de la période de l'année que du débit. On a coutume de distinguer trois phases dans l'hydrogramme de crue :

- une période d'érosion précoce qui se traduit par une augmentation rapide de la turbidité et du débit. Cette phase correspond à l'arrivée des matières en suspension apportées par le ruissellement superficiel dues aux premières averses sur les versants et aussi à la reprise des "laissés" de crue déposés par le clapotis sur une succession de petites banquettes dans la partie inférieure des berges : rappelons ici l'hypothèse émise par GAC (1979) sur la charge solide constante (1 gr/l pour le Chari et 1,3 gr/l pour le Sénégal du ruissellement superficiel) ;
- une période d'érosion tardive où la charge en suspension diminue dans le cours d'eau alors que les débits augmentent. Cette phase de transition correspond à la fin de l'érosion des versants et surtout à l'érosion des berges et du lit mineur de la rivière. La charge solide initiale est diluée par une forte augmentation des débits liquides ;
- enfin une période d'alluvionnement, qui se traduit par une diminution simultanée de la turbidité et des écoulements. Au cours de cette phase, la rivière perd rapidement de sa compétence et les matériaux décantent en partie dans le lit mineur.

La phase 1 est en général de courte durée (de 20 à 30 jours) ; la seconde, de transition, se prolonge environ durant 2 mois, la phase terminale s'étendant jusqu'à la crue suivante. Schématiquement, l'extension de chacune des périodes serait de 1/12, 2/12 et 9/12 de l'année. Nous les avons représentées sur les hydrogrammes des crues étudiées.

3.2.4 Les pulsations journalières des concentrations

En réalité, ces trois grandes pulsations saisonnières correspondent à des à-coups journaliers dans les concentrations semblant être dus (d'après GAC et KANE, 1985) à des sortes de pulsations en patte d'oie intimement liées aux fluctuations relatives des débits et du laps de temps écoulé depuis le début de la crue. Aussi, afin de mieux saisir l'intérêt de cette hypothèse de travail, GAC propose de reporter les valeurs moyennes des concentrations en fonction des débits moyens correspondants en adoptant un pas de temps de 5 jours. Ce pas de temps est un juste compromis entre une échelle mensuelle,

qui masque par sa durée les événements majeurs qui se situent à l'échelle hebdomadaire, voire journalière, et une échelle journalière qui paraît difficile à manipuler étant donné les nombreuses causes d'erreur aussi bien sur les débits que sur les concentrations. Nous avons choisi d'étudier le cycle 84-85, et donc les calculs ont été effectués pour les écoulements enregistrés entre le 3/06/84 et le 30/04/85. Ces calculs sont reportés tableau XIII.

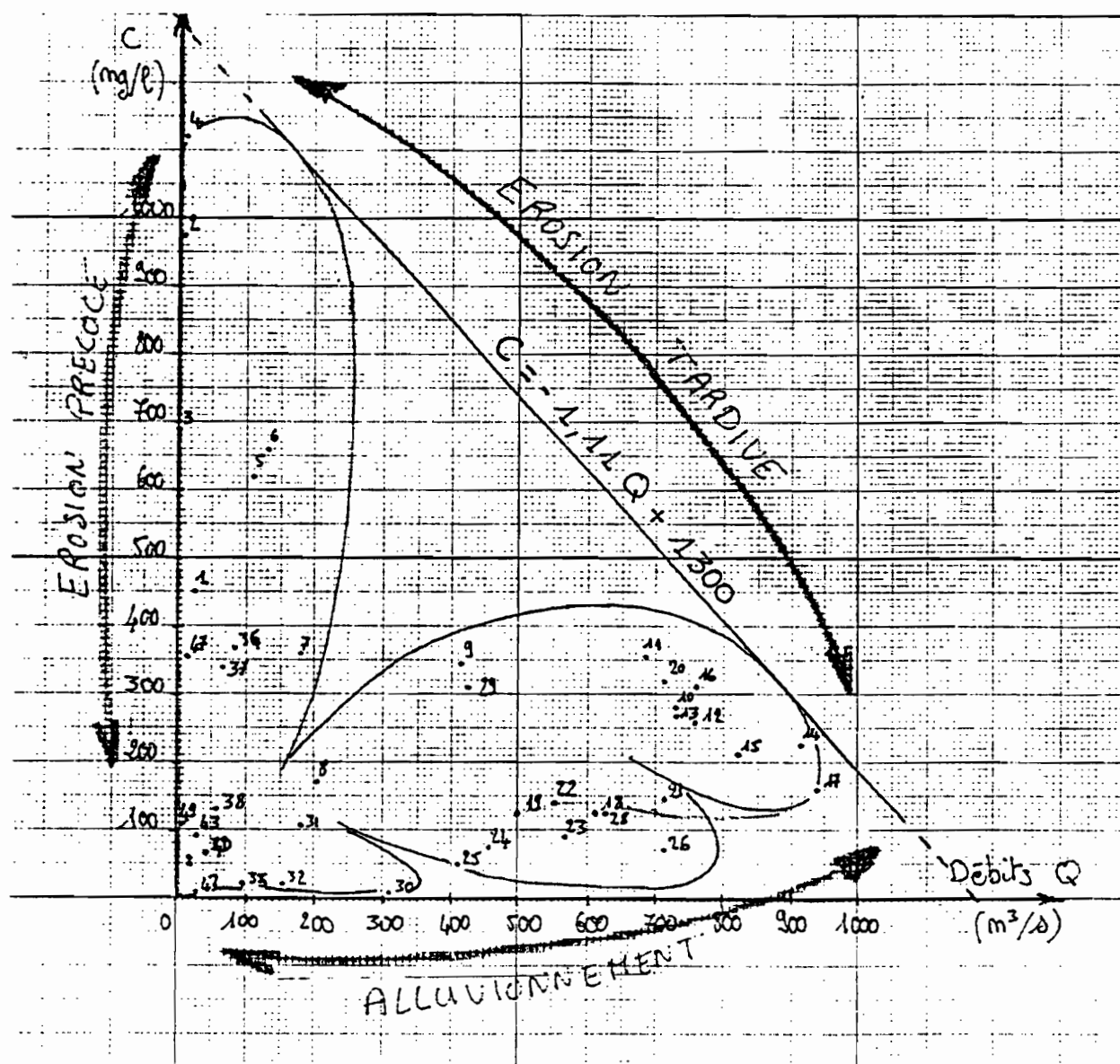


Figure 14 : Valeurs moyennes des concentrations en fonction des débits moyens correspondants.

Tableau XIII : Valeurs moyennes des concentrations en fonction des débits moyens à Bakel du 3/06/84 au 30/04/85 (pas de temps choisi : 5 jours).

n°	Date	C (mg/l)	Q (m³/s)	n°	Date	C (mg/l)	Q (m³/s)	n°	Date	C (mg/l)	Q (m³/s)
1	3-7/06	450.2	24	25	30-4/10	(49)	409.4	49	27-	(110.1)	12.4
2	5-	975.6	6.7	26	5-	(72.1)	712.8	50	1-5/02	(39.4)	11.2
3	13-	689.4	2.4	27	10-	n.d.	870.6	51	6-	n.d.	10.3
4	18-	1121.8	11.7	28	15-	(125.5)	636.4	52	11-	(157.5)	8.6
5	23-	621.5	103.3	29	20-	(308.5)	424.8	53	16-	(570.5)	6.4
6	28-1/07	661.5	120.9	30	25-	(61)	311.8	54	21-	(45.5)	5.5
7	2-	356.4	182.8	31	30-3/11	n.d.	238.2	55	26-2/03	n.d.	3.9
8	7-	171.4	204.2	32	4	(105.1)	185.8	56	3-	(61.2)	3.1
9	12-	343.	415.2	33	9	(18.9)	155.4	57	8-	(185.6)	2.8
10	17-	279.6	729.2	34	14	n.d.	125.8	58	13-	n.d.	2.6
11	22-	355.3	684.6	35	19	(23)	96.6	59	18-	(63.6)	3.
12	27-	272.4	756.2	36	24	(342.8)	85.2	60	23-	(80.5)	2.7
13	1-5/08	269.1	729.2	37	29-2/12	(327.2)	49.6	61	28-1/04	(90.7)	2.4
14	6-	275.9	913.2	38	3-	n.d.	76.	62	2-	n.d.	1.8
15	11-	217.6	820.6	39	8-	(128.8)	62.	63	7-	(144.7)	1.5
16	16-	309.6	761.8	40	13-	(56)	45.8	64	12-	(106.5)	1.5
17	21-	160.8	341.8	41	18-	(41)	41.4	65	17-	(78.6)	1.2
18	26-	124.2	613.	42	23-	n.d.	31.8	66	22-	n.d.	1.
19	31-4/09	126.9	500.	43	28-1/01	(2)	27.8	67	27-1/05	(3.)	0.7
20	5-	372.7	714.	44	2-	(92.5)	25.4	68	2-	(43.)	
21	10-	147.2	715.6	45	7-	nd.	24.1	69	7-	nd	
22	15-	137.8	554.2	46	12-	(57.5)	21.3	70	12-	(199.3)	
23	20-	59.3	571.2	47	17-	(52.9)	16.2	71	17-	(14.8)	
24	25-	75.4	460.8	48	22-	(455.3)	13.4	72	22-	n.d.	

() : Valeur des concentrations mesurée tous les 7 jours.

C'est à l'aide de l'hydrogramme de crue (fig. 13) que nous avons pu préciser les pourtours des boucles desssinées figure 14. On en dénombre 4 qui sont assimilables à des "courbes-enveloppes", évidemment très approximatives. Ces résultats confirment ceux obtenus à l'embouchure du fleuve. D'après GAC et KANE (1985), ces courbes schématiseraient assez bien les fluctuations de la charge solide avec les pulsations enregistrées dans les écoulements. En effet, la première courbe-enveloppe correspondrait à l'érosion précoce, la seconde à l'érosion tardive, la troisième et la quatrième à la phase d'alluvionnement.

Enfin, GAC et KANE proposent de tracer la tangente aux courbes-enveloppes caractéristiques, semble-t-il, de l'érosion et de déterminer son équation pour établir la relation entre concentrations et débits. On trouve :

$$C = - 1,11 Q + 1\ 300$$

avec C : turbidité en mg/l
Q : débit en m³/s.

Ainsi, pour un débit initial quasiment nul (ce qui revient à considérer les toutes premières étapes du ruissellement superficiel qui enclanchent l'érosion des versants), la valeur de la charge en suspension serait de 1 300 mg/l ou 1,3 gr/m³, ce qui correspond à la valeur de la charge solide constante du ruissellement superficiel du Sénégal, proposée par GAC (1979).

Cependant, il serait intéressant d'étudier par le même principe les variations des concentrations en fonction des hauteurs d'eau, de même que de faire des diagrammes à trois entrées : C, Q, H (Concentration, Débit, Hauteur). Ces trois paramètres doivent être intimement liés.

qui a
vrai de
travailler

3.3 BILAN DE L'EROSION MECANIQUE

Les flux détritiques particuliers d'origine continentale à Bakel ont été calculés à partir des bilans journaliers lorsque les mesures de turbidité se faisaient quotidiennement (en général en crue) ou des bilans hebdomadaires lorsque les contrôles de la charge solide ont été réalisés à intervalles plus espacés (cas habituel en basses-eaux). La masse de sédiment est obtenue de manière classique par la formule :

$$M : C \times V$$

avec M : la masse de sédiment en tonne
C : la turbidité en mg/l
V : le volume moyen journalier en m³.

Le tableau XIV donne le bilan des flux détritiques en suspension au bief de Bakel pour les cycles 83-84 et 84-85. Ces deux cycles donnent des résultats semblables avec, cependant, une turbidité plus importante pour le cycle 83-84.

Ces chiffres sont à rapprocher de ceux obtenus aux cycles précédents (tableau XV).

Tableau XIV : Bilan des flux de matières en suspension au bief de Bakel.

MOIS	1983 - 1984			1984 - 1985		
	C (mg/l)	V (10^6 m ³)	Masse (en tonne)	C (mg/l)	V (10^6 m ³)	Masse (en tonne)
Mai	9.3	0.51	4.7	(9)	0.15	1
Juin	721.58	201.30	145 254	763.89	95.22	72 738
Juillet	505.10	1044.07	527 360	306.92	1300.05	399 011
Août	258.02	1867.46	481 842	213.08	2 108.84	449 352
Septembre	162.22	2 116.55	343 347	156.63	1511.20	236 699
Octobre	114.18	1 137.87	129 853	112.22	1464.39	164 334
Novembre	57.30	349.97	20 053	129.97	351.84	45 729
Décembre	n. d.	140.46	-	121.30	133.61	16 207
Janvier	n. d.	67.54	-	168.95	48.44	8 184
Février	n. d.	25.98	-	203.23	18.46	3 752
Mars	n. d.	9.03	-	97.73	7.55	738
Avril	n. d.	3.88	-	84.70	3.24	274
Totaux de Mai à Novembre	245.30	6 717.13	1 647 714	200.22	6 831.69	1 367 864
Année hydrologique (extrapolée à partir des années précédentes)	x 1,0312			x 1,0312		
	239.07	6 926.70	1 655 953	195.14	7 044.84	1 374 703
Année hydrologique 84-85				198.35	7 042.99	1 397 019

N.B. : Les résultats obtenus pour le cycle hydrologique 84-85 mettent en évidence le bien-fondé de l'extrapolation utilisée.

Tableau XV : Bilan des flux de matières en suspension au bief de Bakel durant ces 5 dernières années (BV : 218 000 km²).

Année	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)	Masse (en tonne)	Erosion (g/m ²)
79/80	156,6	1 222	1 484 796	6.81
80/81	202,8	12 672	2 635 650	12.09
81/82	155	12 320	2 341 819	10.74
82/83	148.89	9 553	1 422 400	6.52
83/84	239.07	6 926.70	1 655 953	7.60
84/85	198.35	7 042.99	1 397 019	6.41
25/86				

On s'aperçoit que l'afflux de matières en suspension a été deux fois plus important en 80-81 qu'en 84-85. Ces faibles masses de sédiments des trois derniers cycles s'expliquent par les faibles volumes d'eau enregistrés et non par une baisse de la turbidité. Au contraire, on s'aperçoit, par exemple, que la concentration des matières en suspension est plus importante en 83-84 qu'en 82-83 et 84-85, cycles où les volumes étaient pourtant plus importants. Ainsi, l'érosion a été plus importante durant le cycle 83-84 que durant le cycle 84-85.

A l'échelle mensuelle, les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre rassemblent la quasi-totalité (respectivement 98 % et 96 %) de la charge solide. On enregistre le même phénomène à l'embouchure avec un décalage de 2 mois (de août à novembre). Plus de la moitié des flux annuels sont enregistrés en juillet-août pour les deux cycles (respectivement 61 % et 62 %). La turbidité moyenne annuelle s'est élevée à 239 mg/l en 1983-84 et à 198 mg/l en 1984-85, ce qui classe le Sénégal, selon la terminologie de PARDE, parmi les organismes fluviaux à fortes turbidités. La turbidité du Sénégal est bien plus importante que celle de son homologue gambien : à la station de Goulombou, située à la limite du bassin amont de la Gambie, les turbidités moyennes en 1974-1975 ont été de 78 g/m³ (LERIQUE, 1975) et de 46 g/m³ en 1983-1984 (LO, 1984). Cet auteur souligne cependant le caractère exceptionnellement sec de ce dernier cycle hydrologique qui "n'est représentatif ni de l'écoulement, ni des transports réels de matières en suspension du fleuve Gambie."

En admettant que l'ensemble du bassin versant du Sénégal au bief de Bakel réponde de façon homogène aux sollicitations des agents de l'érosion mécanique, la dégradation spécifique a été de l'ordre de 7,6 t/km²/an en 1983-84 et de 6,4 t/km²/an en 1984-85.

En définitive, le transport solide du fleuve Sénégal est relativement faible (en moyenne de l'ordre de 2 Millions de tonnes/an). Il s'agit de matériaux fins qui, comme le souligne FRECAUT (1981), ont une double origine : "ils proviennent soit directement des plaines alluviales et des lits fluviaux (charge endogène), soit des versants sous l'action de l'érosion pluviale et du ruissellement usperficiel (charge exogène) : la distinction entre les apports propres aux versants et à la plaine alluviale est cependant

difficile." GAC (1980), dans son étude sur les fleuves Chari et Logone, a proposé trois méthodes d'estimation de la contribution des plaines alluviales en s'appuyant d'une part sur les variations de la composition minéralogiques des suspensions et, d'autre part, sur le temps de propagation de la charge solide entre l'amont et l'aval des bassins versants. Ces résultats conduisent à préciser les caractères granulométriques, minéralogiques et chimiques des sédiments recueillis à Bakel pendant les cycles hydrologiques étudiés.

3.4 CARACTERES GRANULOMETRIQUES, MINERALOGIQUES ET CHIMIQUES DES MATIERES EN SUSPENSION.

Au moment de la rédaction de ce rapport, nous ne possédons pas encore les résultats des analyses granulométriques, minéralogiques et chimiques des matières en suspension du bief de Bakel.

L'analyse granulométrique est réalisée à l'aide d'un sédigraphe, qui mesure automatiquement la vitesse de chute des sédiments (application de la loi de Stokes) grâce à un faisceau de rayons X et donne les résultats sous la forme de courbe de distribution en pourcentages cumulés en fonction des diamètres équivalents. Les analyses diffractométriques aux rayons X sur la fraction inférieure à 2 microns et sur l'échantillon brut, de même que les analyses chimiques au spectromètre d'arc (majeurs et traces) et au spectromètre d'absorption atomique (dosage des alcalins) sont réalisées au Centre de Sédimentologie et de la Géochimie de la Surface de Strasbourg.

Cependant, la faible variabilité de la nature des matières en suspension observée dans la plupart des cours d'eau de la zone sahélienne nous permet de pouvoir donner, à titre indicatif, les résultats obtenus sur les flux particuliers à l'embouchure du fleuve Sénégal lors des cycles 81-82 et 82-83 (GAC et KANE, 1985).

Le taux de M.O. dans les matières en suspension du Sénégal est faible (de 1,2 à 1,4 % sur l'ensemble des deux cycles) et bien inférieur, en tout cas, aux pourcentages relevés sur la Gambie : LO (1984) y fait état de plus de 10 % de matière organique dans les matières en suspension de ce fleuve à la station amont de Goulombou. Au cours des cycles 81-82 et 82-83, on évalue à environ 45 000 tonnes et 23 000 tonnes "l'expulsion" annuelle de matière organique à l'embouchure du Sénégal, ce qui représente 1,56 % et 1,93 % des quantités de matières en suspension. Les tonnages respectifs de matière inorganique s'établissent alors à 2 820 565 tonnes (en 81-82) et à 1 163 067 tonnes (en 82-83).

La distribution granulométrique moyenne des flux particuliers solides à l'embouchure du Sénégal montre la prépondérance des minéraux argileux (76 %) devant la fraction limoneuse (23,5 %) et surtout sableuse présente en quantité négligeable (0,5 %). La composition minéralogique de la fraction fine des matières en suspension révèle la présence dominante, en toutes saisons, de la kaolinite (de 50 à 75 %) et l'abondance des smectites (de 15 à 30 %), des interstratifiés (de 10 à 20 %) et de l'illite (de 5 à 15 %). Les matières en suspension sont essentiellement constituées de silice (50 %), d'alumine

(24 %) et de fer (10 %) ; le potassium (1,7 %) et le magnésium (1,2 %) sont relativement abondants en comparaison des quantités négligeables de calcium (0,3 %) et du sodium (0,2 %). Parmi les éléments à l'état de traces, Mn, Ba, Cr, Zr, V et Ni ont des teneurs supérieures à 100 ppm. L'importance de l'eau de constitution (12 %) est liée à l'abondance des argiles.

Finalement, à l'heure actuelle, l'érosion mécanique dans le bassin versant du Sénégal, considéré dans son ensemble, draine essentiellement vers l'embouchure du fleuve des particules très fines ($< 2 \mu$) constituées de kaolinite, de smectite et d'illite. En termes de bilan chiffré, les flux particulaires soutirés au domaine continental et déversés dans l'Océan sont surtout formés de silicium, d'aluminium et de fer, à un degré moindre de matière organique, de potassium, de magnésium et de titane. Le calcium et le sodium sont peu abondants dans les matières en suspension, ces deux éléments empruntant de préférence la voie soluble pour rejoindre le domaine marin.

CONCLUSION

Le régime hydrologique du fleuve Sénégal avant 1903, comme l'attestent les témoignages des documents anciens, était caractérisé par des écoulements importants liés à des précipitations abondantes. Les causes de changement de régime au XXème siècle (diminution récente des précipitations, accélération de la vitesse des crues, déboisement, défoncement du seuil de Faff, accentuation progressive de l'aridité) ont entraîné des modifications profondes dans le mode d'écoulement du fleuve.

Les conditions climatiques sur l'ensemble du bassin sont sévères ; le bilan de l'eau est partout négatif. La dégradation hydrologique est très marquée sur le fleuve, dont le régime reflète étroitement le déficit pluviométrique de l'amont. En effet, la sévérité de la sécheresse actuelle (sans interruption depuis 1968) se traduit à l'amont comme à l'aval du bassin par un déficit de près de 40 % dans les écoulements du bassin et par l'absence de phénomène d'inondation vers les dépressions situées en bordure du réseau hydrographique. L'effet de cumul de cette succession d'années à faible écoulement se marque par un tarissement et une phase d'épuisement précoce, une recharge insuffisante des nappes phréatiques et des étiages très prononcés au cours de la saison des basses-eaux (des valeurs nulles, notamment à Bakel, ont été observées en 1982 et en 1984). Aussi, il apparaît primordial durant ces années difficiles d'avoir une connaissance précise des écoulements et des précipitations sur le bassin versant étudié afin de pouvoir appréhender la gravité réelle de la situation du système hydrologique complet et d'en prévoir son évolution.

La sévérité de la sécheresse actuelle a amené de nombreux chercheurs à s'interroger sur le caractère répétitif des sécheresses. Etudiant les modules du fleuve Sénégal sur une période de 80 ans, FAURE et GAC (1981) ont relevé un cycle de 31 ans, ce qui suggérerait la fin de la sécheresse vers 1985 (+ 2 ans) et un retour à l'humidité qui se maintiendrait jusqu'aux environs de 2005, date à laquelle une nouvelle période d'aridité s'installerait. On s'aperçoit donc de l'intérêt de la comparaison du cycle 85-86 au cycle 84-85.

L'analyse de FAURE et GAC (1981), bien que présentée avec toutes les nuances et les réserves nécessaires, a eu le mérite d'ouvrir à nouveau le débat sur le caractère irréversible ou transitoire du phénomène de la désertification. Comme le souligne OLIVRY (1982), "la probabilité d'un renversement de tendance augmente au fil des années et il n'est pas exclu alors que l'on retrouve très rapidement un régime de précipitations favorable aux régions du Sahel." Cet espoir semble confirmé par les récentes études de GUILLOT et CITEAU (1984), chercheurs de l'ORSTOM, qui utilisent les mesures réalisées par le satellite METEOSAT. D'autre part, les données enregistrées en ce début de crue 85-86 sont bonnes : le volume des précipitations dépasse celui des années passées à la même époque et les niveaux limnimétriques sont, comme nous l'avons déjà indiqué, nettement supérieurs à ceux des années précédentes. Cependant, on se doit d'être prudent : la monstrueuse sécheresse au Sahel serait-elle bel et bien sur le point de prendre fin ?

Nous attendons avec impatience les résultats de la crue 85-86...

TABLE DES MATIÈRES

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION.....	1
I. <u>LE FLEUVE SENEGAL</u>	2
1.1 Le régime du fleuve Sénégal.....	2
1.2 L'abondance fluviale à Bakel.....	3
1.3 Données hydrologiques à la station de Bakel pour les cycles 83-84, 84-85 et 85-86.....	8
II. <u>LE LABORATOIRE DE GEOCHIMIE ET L'ETUDE DES M.E.S.</u>	14
2.1 Le matériel du laboratoire.....	14
2.2 Le protocole de prélèvements des M.E.S.....	14
2.3 La pipette d'Andreasen.....	15
2.4 La centrifugeuse à pipette.....	16
2.5 Le diffractomètre aux rayons X et l'analyse minéralogique des argiles.....	18
III. <u>LES APPORTS FLUVIAUX DE MATIERES EN SUSPENSION AU BIEF DE BAKEL...</u>	20
3.1 Données antérieures.....	20
3.2 Evolution saisonnière de la turbidité au cours des cycles hydrologiques 83-84 et 84-85.....	20
3.3 Bilan de l'érosion mécanique.....	27
3.4 Caractères granulométriques, minéralogiques et chimiques des M.E.S.....	30
CONCLUSION.....	32
TABLE DES MATIERES.....	33