

L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal

*II - période 1980-1983 : proposition d'un
nouveau modèle d'intrusion continentale
des eaux océaniques*

Jean-Yves GAC, Michel CARN, Jean-Luc SAOS (1)

RÉSUMÉ

Les divergences entre la réalité et le modèle de propagation utilisé antérieurement sont abordées avec l'appui des mesures récentes de 1980 à 1983. Une nouvelle formulation est proposée pour déterminer, à tout moment de la période des basses eaux du fleuve Sénégal, la position amont du front salé dans sa vallée.

MOTS-CLÉS : Fleuves — Estuaires — Sénégal — Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

THE MARINE INFLUENCE IN THE LOWER SENEGAL RIVER. II. A NEW MODEL FOR SEA-WATER INTRUSION BASED ON THE 1980-1983 OBSERVATIONS

The model insed previously has shown discrepancies between observed and computed salinities in the lower reaches of the river during 1980-83. A new formulation is proposed, which gives the upper limit of salt intrusion at any time during the low-water season and remains valid during periods of drought.

KEY WORDS : Rivers — Estuaries — Senegal — West Africa.

INTRODUCTION

Dans un précédent article (GAC *et al.*, 1986), nous avons présenté les informations permettant de reconstituer l'avancée de l'eau de mer lors des étiages dans la basse vallée du fleuve Sénégal, depuis le début du siècle. Le modèle de Rochette avait alors été utilisé pour évaluer cette remontée saline.

Cette étude se propose, à la suite des conditions particulières introduites par la persistance de la sécheresse depuis 1968 de reprendre sur la base de nouvelles observations, le modèle de ROCHETTE (1964, 1974). Les mesures de salinité réalisées au cours des trois dernières années ont en effet montré que le modèle proposé aboutissait à une très importante sous-estimation de la durée et de l'ampleur de l'intrusion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal.

I. RECONSTITUTION DE L'INTRUSION SALINE AU COURS DU CYCLE HYDROLOGIQUE 1980-1981 PRIS COMME EXEMPLE

Après le passage de la crue 1980-1981 dont le maximum (1565 m³/s) s'est présenté le 20 septembre 1980, le fleuve amorce sa décrue puis entre dans sa phase de tarissement. Le débit à l'embouchure décroît et le seuil de 600 m³/s est franchi le 17 octobre 1980.

A. Progression des isohalines à partir de la relation débit/salinité moyenne de base

A partir des abaques établis par ROCHETTE (1964), on évalue la position respective des différentes isohalines (0,1 ‰; 2,5 ‰; 5 ‰; 10 ‰; 15 ‰; 20 ‰; 25 ‰; 30 ‰ et 35 ‰) au fur et à mesure de la décroissance des débits entre 600 m³/s et 50 m³/s.

(1) Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) B.P. 1386 Dakar (Sénégal).

Le déplacement des isohalines a été évalué jour après jour. Le seuil de 50 m³/s est franchi le 19 janvier 1981; les taux de salinité à l'embouchure sont alors compris entre 25 ‰ et 30 ‰, et le « coin salé » est décelable à 133 km en amont.

B. La détermination de la date de salinité maximale et la progression des isohalines en fonction du temps

A partir du 19 janvier, l'avancée des isohalines est indépendante du débit et, leur progression vers l'amont, est liée au facteur temps. La durée de cette phase nécessite au préalable de connaître la date de l'onde de crue suivante.

Le cycle hydrologique 1981-1982 débute à Bakel le 8 juin 1981, mais les premiers écoulements sont éphémères et réduits. Ils n'ont vraisemblablement pas d'incidence à l'aval. La véritable onde de crue parvient à cette station le 27 juin. D'après les analyses chimiques des eaux du fleuve, la salinité maximale aurait été atteinte à Dagana entre le 1^{er} et le 8 juillet 1981, et la charge en matières en suspension croît brutalement à partir du 8 juillet (GAC et KANE, 1986 a). Nous avons donc admis comme date probable de la salinité maximale, le 5 juillet 1981.

Dans cette hypothèse, la phase de tarissement se prolonge du 20 janvier 1981 au 5 juillet 1981, soit pendant 167 jours. L'application du deuxième abaque de ROCHETTE permet alors de suivre la nouvelle progression des différentes isohalines.

L'abscisse maximale au cours de cette intrusion saline est de 220 km. La ville de Richard-Toll a été « touchée » par des taux de salinité de 10 ‰, et les eaux marines à 35 ‰ (eau de mer pure) sont remontées dans le lit du fleuve sur une distance de 30 km.

C. Le retrait de la salure

La phase de retrait commence le 6 juillet 1981; sa durée va dépendre du flot de la nouvelle onde de crue. L'observation des flux détritiques dissous et particuliers (GAC et KANE, 1986a, b), en particulier la mesure des teneurs en chlorures et en sodium et de la charge solide, permettent d'estimer que le retrait total du sel dans la vallée a eu lieu entre le 7 et le 13 août 1981. Le calcul des volumes totaux écoulés depuis le début des premiers écoulements indique que 894 millions m³ ont franchi l'embouchure le 8 août 1981. On estime que le 9 août 1981, l'eau est de nouveau douce dans toute la vallée du Sénégal.

En résumé, l'intrusion saline en 1980-1981, illustrée par la figure 1, a présenté les caractéristiques suivantes :

- début de l'intrusion le 17/10/80
- intervention du paramètre débit du 19/01/81 au 05/07/81

- salinité maximale le 05/07/81, abscisse : 220 km
- retrait de la salure du 05/07/81 au 08/08/81.

II. ÉTUDE DE LA REMONTÉE SALINE AU COURS DES CYCLES HYDROLOGIQUES 1981-1982 ET 1982-1983

L'étude de la remontée saline entreprise par l'ORSTOM à la suite des deux cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 comprenait :

- le suivi quotidien ou hebdomadaire de la salinité en quatre stations principales : St-Louis (km 22), le poste « Crocodiles » du Parc National du Djoudj (km 102), la station de Dagana (km 192) et celle de Podor (km 292);
- la surveillance mensuelle de la salinité par des campagnes de mesures en 56 sections du fleuve, situées entre l'embouchure et le village de Mbayo au km 322;
- des mesures de salinité réalisées très irrégulièrement sur quelques profils pour préciser les variations en fonction de la profondeur dans la section.

A. Les quatre stations-clés de St-Louis, du Djoudj, de Dagana et de Podor

1. LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA SALINITÉ À SAINT-LOUIS

Toutes les mesures de salinité effectuées à St-Louis et leurs évolutions saisonnières sont illustrées par la figure 2.

Les deux remontées salines étudiées présentent les caractéristiques suivantes :

1981-1982 :

- retrait du sel vers le 6 août 1981,
- eau douce du 7 août au 21 octobre 1981,
- nouvelle intrusion le 23 octobre 1981,
- date estimée du maximum de salinité : 18 juillet 1982,
- phase de retrait du 19 juillet au 23 août 1982,
- durée totale de l'intrusion : 307 jours.

1982-1983 :

- retrait du sel le 24 août 1982,
- eau douce du 24 août au 23 octobre 1982,
- nouvelle intrusion le 23 octobre 1982,
- date estimée du maximum de salinité : 28 juin 1983,
- phase de retrait du 29 juin au 23 août 1983,
- durée totale de l'intrusion : 307 jours.

Il est remarquable de constater que le fonctionnement du Sénégal en estuaire inverse (taux de salinité supérieur à 35 ‰) persiste aussi longtemps que la présence d'eau douce pendant la crue suivante.

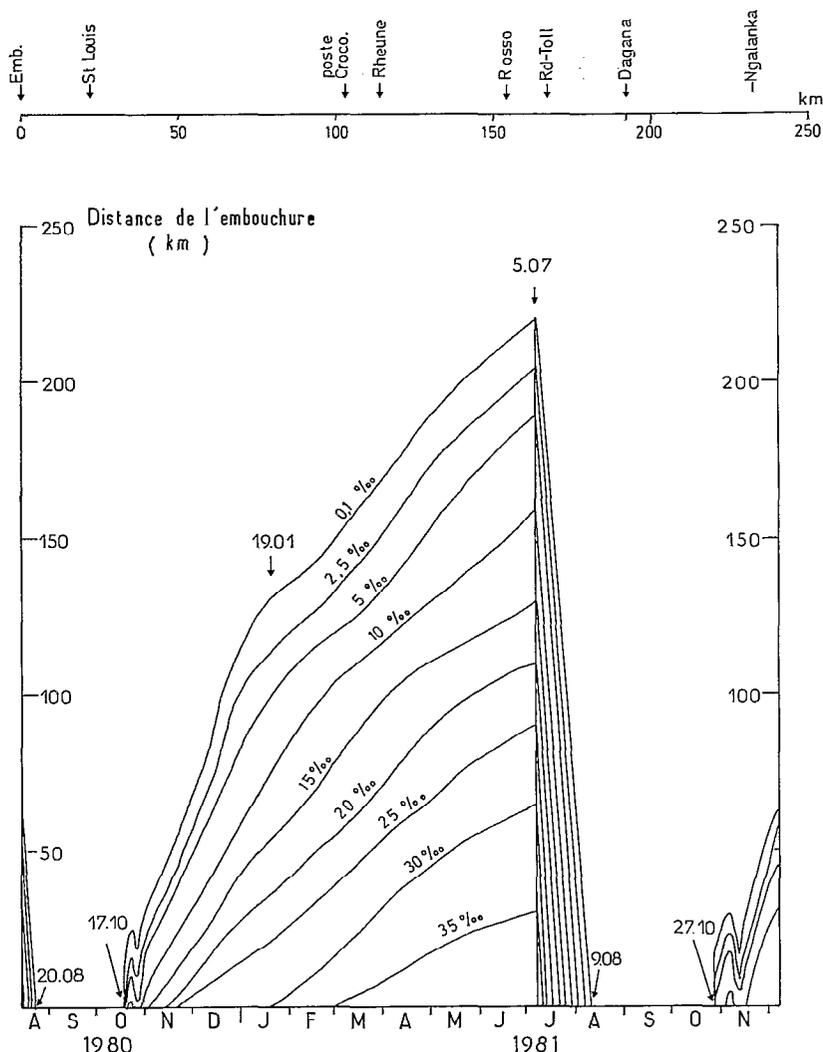


FIG. 1. — L'invasion marine en 1980-1981
Distance of upstream salt intrusions during 1980-81

2. VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA SALINITÉ À LA LIMITE AMONT DU PARC DU DJOUDJ

Les mesures de salinité à la limite amont du parc du Djoudj ont été réalisées au poste « Crocodiles » grâce à l'obligeance de la direction des Parcs nationaux du Sénégal : la station se trouve à quelques kilomètres en aval du barrage provisoire de Rheune.

1982-1983 :

- début de l'intrusion saline, à la hauteur de la station, vers le 10 décembre 1982,
- le maximum de salinité s'est vraisemblablement produit vers le 23 juin 1983; le retrait s'est en effet amorcé après cette date, par suite du caractère tout

à fait exceptionnel des pluies torrentielles (153 mm) tombées dans la région de Matam dans la nuit du 23 au 24 juin 1983,

- phase de retrait du 23 juin à la fin juillet,
- temps de séjour estimé du sel : 234 jours.

La persistance pendant des périodes aussi longues de salinité élevée sur toute la façade fluviale du parc a eu des conséquences incalculables sur la faune de cette zone.

Enfin, la fermeture de la vallée par le barrage de Rheune le 23 novembre, a déterminé vers l'aval, et en particulier au niveau du Djoudj, l'apparition précoce de taux de salinité tout à fait exceptionnels : la salinité au niveau de la station était déjà supérieure à 20 ‰ fin janvier 1984, contre 10 ‰ seulement fin janvier 1983.

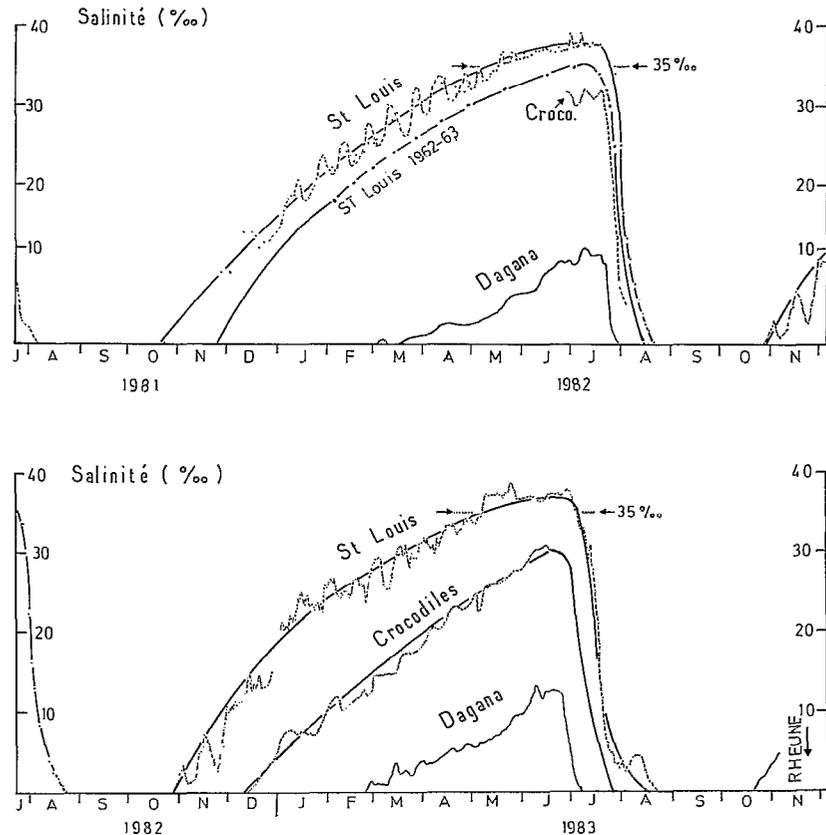


FIG. 2. — Variations saisonnières de la salinité à Saint-Louis, à Dagana et au Djoudj
Seasonal salinity variations in St Louis, Crocodiles and Dagana

3. VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA SALINITÉ À LA HAUTEUR DU LAC DE GUIERS

La Compagnie Sucrière Sénégalaise (C.S.S.), dont les périmètres d'exploitation de la canne à sucre se situent dans la région du lac de Guiers (km 163), assure un suivi bi-quotidien de la salinité en amont et en aval de la ville de Richard-Toll.

4. VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA SALINITÉ À DAGANA

La station de Dagana située à 192 km de l'embouchure du fleuve, constitue la station principale de la basse vallée du Sénégal. Le suivi de la minéralisation des eaux fluviales à la hauteur de cette section a permis de mesurer (GAC et KANE, 1986 b) les flux dissous d'origine continentale. Le tableau I rassemble l'essentiel des informations de 1979 à 1983 et la figure 2 illustre l'évolution de la salinité à Dagana de 1981 à 1983.

En 1979 la langue salée parvient à cette localité entre le 22 mars et le 20 avril. Le retrait du sel a lieu entre le 6 juin et le 21 juillet.

En 1980, la salinité touche vraisemblablement la station dès la première semaine d'avril; le taux maximum de salinité est enregistré vers le 8 juillet et le retrait définitif se produit au cours des derniers jours de juillet.

En 1981, la présence d'eau salée est observée entre le 4 et le 11 mars. Les plus fortes salinités datent du 1^{er} juillet et le retrait total a lieu entre le 5 et le 12 août.

Les caractéristiques des deux intrusions salines 1981-1982 et 1982-1983 sont les suivantes :

1981-1982:

- eau douce à Dagana entre le 12 août 1981 et le 4 mars 1982,
- arrivée de l'eau salée le 4 mars 1982,
- maximum de salinité le 9 juillet 1982,

TABLEAU I

Taux de salinité observés à la station de Dagana de 1979 à 1984

Salinity data at Dagana (1979-84)

Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰
<u>1979</u>		<u>1981</u>		<u>1982</u>		<u>1982</u>		<u>1983</u>	
22/03	<0.1	06/05	4.13	20/04	2.91	02/08	0.13	25/05	9.65
20/04	0.86	13/05	4.94	27/04	2.44	05/08	<0.1	28/05	9.80
06/06	6.16	20/05	5.28	04/05	2.96			04/06	9.88
21/07	<0.1	27/05	7.03	11/05	3.64			03/02	<0.1
		03/06	7.81	18/05	3.93			17/02	0.1
<u>1980</u>		10/06	8.28	25/05	6.36			22/02	0.38
15/04	1.25	17/06	10.18	01/06	6.58			27/02	1.33
15/05	4.49	24/06	10.49	08/06	6.72			06/03	1.22
27/05	3.91	01/07	10.70	15/06	8.80			17/03	2.50
03/06	6.00	08/07	10.43	18/06	9.75			20/03	2.64
11/06	6.53	15/07	0.54	21/06	9.73			23/03	2.30
20/06	8.07	22/07	0.18	24/06	10.77			26/03	2.90
22/06	8.57	29/07	0.12	27/06	10.50			27/03	2.63
08/07	9.40	05/08	0.15	30/06	10.56			29/03	4.10
16/07	6.00	12/08	<0.1	03/07	10.21			30/03	3.30
27/07	0.23			06/07	10.58			01/04	3.80
02/08	<0.1	<u>1982</u>		09/07	12.17			03/04	3.45
		03/03	<0.1	12/07	11.37			04/04	3.60
<u>1981</u>		05/03	0.26	15/07	11.15			10/04	3.43
04/03	<0.1	07/03	0.84	18/07	11.43			17/04	4.97
11/03	0.33	09/03	0.75	21/07	10.22			19/04	5.50
18/03	0.64	15/03	0.29	24/07	6.31			03/05	6.31
25/03	0.24	22/03	0.78	27/07	0.92			07/05	6.11
01/04	0.70	30/03	1.23	29/07	0.30			14/05	6.57
08/04	2.16	13/04	2.63	30/07	0.17			21/05	7.93
22/04	2.88								
29/04	3.25							12/11/84	Rheuns II
								25/11/83	Rheune I
								01/03	<0.1
								15/07	<0.1

- phase de retrait du 10 juillet au 5 août 1982,
- temps de présence du sel : 155 jours.

1982-1983:

- eau douce à Dagana entre le 6 août 1982 et le 16 février 1983,
- arrivée de l'eau salée le 16 février 1983,
- maximum de salinité vraisemblablement autour du 22 juin 1983 (la date est comme dans le cas du Djoudj, difficile à préciser à la suite de pluies torrentielles dans la région de Matam),
- phase de retrait du 23 juin au 16 juillet 1983,
- temps de présence du sel : 151 jours.

5. VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA MINÉRALISATION DES EAUX FLUVIALES À PODOR

La charge dissoute des eaux du Sénégal à la station de Podor (km 292) est mesurée régulièrement depuis 1980 par l'ORSTOM. Cette station n'est citée ici que pour mémoire à la suite des variations singulières observées dans les concentrations de la silice en solution. On observe en effet un phénomène similaire à celui mis en évidence dans toute la partie du fleuve touchée par la remontée des eaux marines : une diminution importante de la teneur en silice en rela-

tion avec une augmentation de la conductivité des eaux. Si les eaux du fleuve se concentraient par évaporation, il serait plus vraisemblable de voir simultanément croître les teneurs en silice et la conductivité. L'évolution inverse observée suggère que la diminution des teneurs en silice dissoute serait due au passage fugace d'eau de mer dans la section de Podor. Dans cette hypothèse, le coin salé aurait été présent entre le 11 et le 25 juillet 1982 (salinité : 0,13 ‰ le 18 juillet) et du 13 juin au 7 juillet 1983 (salinité : 0,12 ‰ le 19 juin).

B. Observations de 1981 à 1983 de l'évolution spatio-temporelle de la salinité dans la basse vallée du fleuve Sénégal

1. LA POSITION GÉOGRAPHIQUE DES STATIONS ET LES DIFFÉRENTES CAMPAGNES DE CONTRÔLE DE LA SALINITÉ

Les stations, au nombre de 56, sont disposées le long de la vallée du fleuve depuis l'embouchure jusqu'au km 322, situé en amont de la ville de Podor. Elles sont en général espacées de 4 à 5 km dans la partie proche de l'océan ; au-delà de Dagana (km 192), le maillage est plus lâche. Deux sites ont été retenus également sur le Doué pour déceler en fin d'étiage

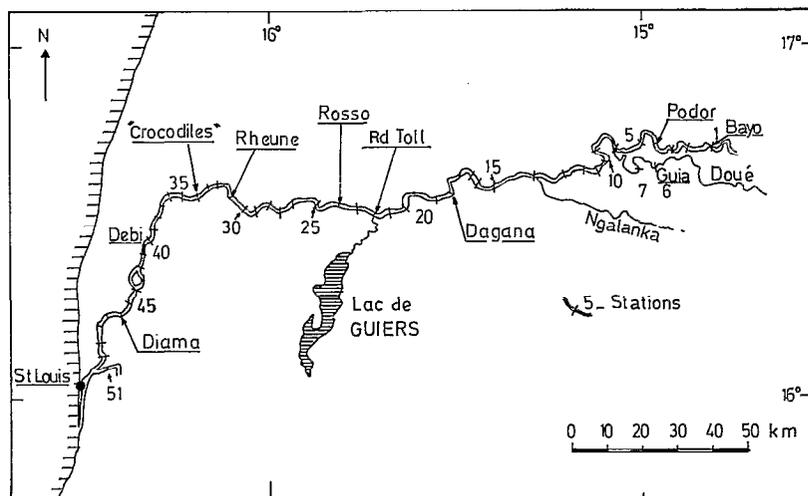


FIG. 3. — Situation géographique des stations de contrôle de salinité
Map showing the sampling stations

les éventuelles arrivées d'eau de mer dans cet effluent du Sénégal. Les positions des différentes stations sont indiquées sur la figure 3.

Les campagnes de contrôle de la salinité ont souvent été incomplètes suivant l'accessibilité des stations aux différentes saisons. L'intervalle d'un mois a en général été respecté entre les différentes campagnes de 1980-1981 et 1981-1982; en 1982-1983, devant la précocité de l'intrusion, 15 séries d'observations ont été réalisées entre octobre 82 et juin 83.

2. PROGRESSIONS SAISONNIÈRES DU FRONT SALÉ DE 1981 À 1983

Les progressions saisonnières du front salé sont représentées pour les trois épisodes étudiés sur les figures 4 et 5, et les résultats des mesures de salinité aux différentes sections sont donnés dans les tableaux II et III.

1980-1981:

On dispose de trois contrôles dont l'un concerne la phase de retrait (tracé du 15/07). Le maximum de salinité s'est présenté entre le 22 juin et le 15 juillet, et l'abscisse maximale atteinte a dû être légèrement supérieure ou égale à 282 km. Des taux de salinité de plus de 35 ‰ semblent avoir été observés jusqu'à

80 km de l'embouchure (entrée du parc du Djoudj). Notons enfin que la progression du front salé n'est pas homogène et présente quelques irrégularités : deux sont particulièrement nettes (vers le km 70, et le km 120) sur la courbe représentative des mesures du 4/05/1981. A l'exception de la zone située la plus à l'amont (au-delà du km 180 environ), les deux courbes de mai et de juin présentent une forme convexe. Nous reviendrons plus loin sur ces deux points : les à-coups et le « changement de rythme » dans la progression du front que semblent indiquer respectivement les irrégularités signalées et les inclinaisons des courbes.

1981-1982:

Lors de la première campagne de mesures (26 octobre 1981), le sel était perceptible à St-Louis, ce qui laisse supposer que le franchissement de la passe à l'embouchure, par les eaux océaniques, a dû se produire vers la mi-octobre 1981.

La progression du front salé vers l'amont se poursuit ensuite jusqu'en juillet 1982. Le maximum de salinité est atteint à la mi-juillet, les eaux marines atteignant les portes de la ville de Podor à près de 300 km de l'embouchure du fleuve. Des taux de salinité supérieurs à celui de l'eau de mer (35 ‰) sont observés jusqu'au km 70. Les mêmes irrégularités

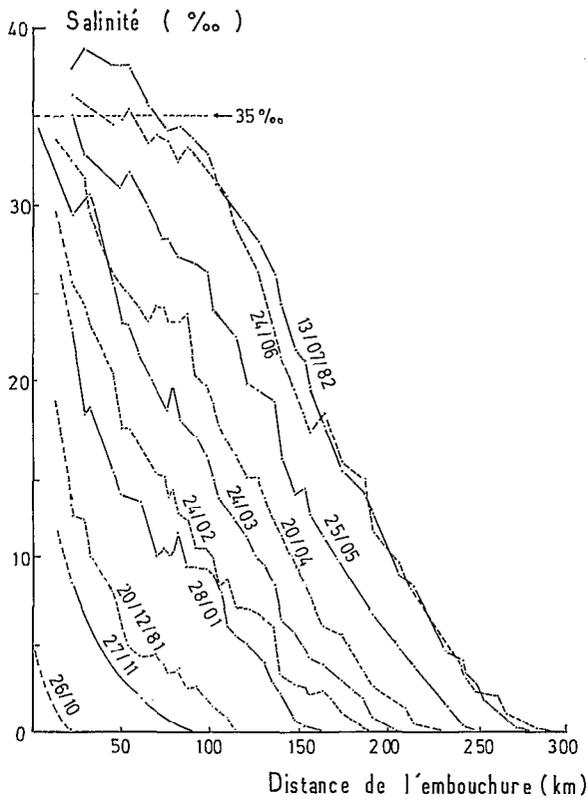


FIG. 4. — Évolution de la salinité dans la vallée d'octobre 1981 à juillet 1982
Salinity variations as a function of time (dates shown) and distance upstream (1981-82)

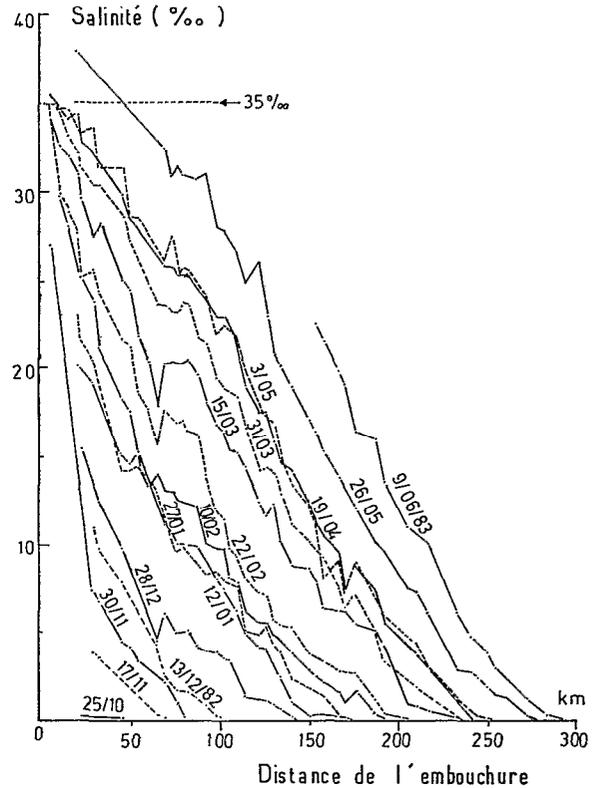


FIG. 5. — Évolution de la salinité dans la vallée d'octobre 1982 à juin 1983
Salinity variations as a function of time and distance upstream (1982-83)

dans la propagation de l'onde salée se manifestent vers les points kilométriques 70 et 120.

La forme des courbes, situant les positions du front salé s'inverse à partir du 24 février 1982 : de concaves elles deviennent convexes. Cette modification suggère intuitivement l'idée de ROCHETTE (1974) d'une substitution vers cette date du paramètre « débit » par le paramètre « temps ». On remarque déjà que cette transition s'effectue pour une valeur du débit à Dagana de l'ordre de 20 m³/s, valeur bien éloignée des 50 m³/s initialement proposés.

1982-1983:

« L'épisode marin » présente une physionomie tout à fait comparable à celle de l'année précédente.

SAOS *et al.* (1984) ont présenté les caractéristiques essentielles de cette nouvelle intrusion saline :

- début de l'intrusion vraisemblablement vers la mi-octobre 82,
- taux maximum de salinité vers le 22 juin 1983, le sel ayant probablement dépassé pendant quelques jours la section de Podor (km 292),
- présence des mêmes irrégularités sensiblement dans les mêmes secteurs de la vallée (vers les km 70 et 120),
- modifications dans l'allure des courbes : le passage d'une forme concave à une forme convexe semblant se situer entre les campagnes du 22 février et du 15 mars 1983, c'est-à-dire pour des débits à Dagana de l'ordre, à nouveau, de 20 m³/s.

TABLEAU II

Évolution saisonnière de la salinité de mai 1981 à juillet 1982 dans la basse vallée du fleuve Sénégal
Field data in the lower reaches of the Senegal River; May 1981 to July 1982

Stations	Point kilométrique et n°		Intrusion 1980-1981 (salinité ‰)			Intrusion 1981-1982 (salinité ‰)							
	Km	N°	4/05/81	22/06/81	15/07/81	20/12/81	28/01/82	23/02/82	24/03/82	20/04/82	25/05/82	24/06/82	14/07/82
Gandiole	5	56	-	-	-	-	-	-	35.0	-	-	35.0	36.8
"	10	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36.9
"	15	54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37.1
"	20	53	-	-	-	-	-	-	-	35.0	37.5	-	37.2
St Louis	22	52	-	-	-	13.0	-	25.6	-	-	35.0	37.9	36.2
Dkr Bango	29	51	-	-	-	12.1	18.1	24.2	26.9	31.5	32.6	38.8	-
"	32	50	-	-	-	10.0	18.5	23.2	30.6	29.5	-	-	-
"	36	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
"	40	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
"	45	47	-	-	-	8.0	14.8	20.4	25.6	26.1	-	38.0	34.5
Maka	49	46	30.10	36.94	-	6.3	13.6	17.3	23.2	27.1	30.8	37.9	34.7
"	54	45	-	-	-	4.8	-	17.3	23.2	25.3	31.8	37.9	35.3
I. Tieng (aval)	60	44	-	-	-	4.3	13.2	-	21.5	24.2	-	-	-
(amont)	65	43	26.41	36.37	-	2.6	9.1	-	20.4	23.4	29.9	35.5	33.4
Diar	69	42	-	-	-	4.40	10.0	14.8	18.8	24.2	28.9	35.1	33.9
"	73	41	-	39.84	-	3.80	10.5	14.7	18.8	24.2	28.0	-	-
Tiguet	76	40	-	34.76	-	3.40	10.0	13.4	18.3	23.4	28.0	34.2	33.6
Djoudj	79	39	26.67	33.21	-	3.50	10.3	13.9	19.8	23.4	-	-	-
"	82	38	26.33	-	-	3.50	11.4	12.5	17.7	23.4	27.0	34.4	32.3
Débi	87	37	25.54	33.09	-	2.50	9.3	12.1	17.3	23.8	-	-	33.2
Dramer	92	36	-	32.08	-	2.60	9.4	10.5	16.8	20.2	26.7	33.7	-
"	98	35	-	31.35	-	1.90	9.3	10.5	15.8	19.7	26.2	32.8	31.9
Crocodiles	102	34	-	30.72	-	1.50	9.0	9.9	14.4	18.7	24.0	32.0	31.3
Diakal	105	33	-	30.03	15.11	1.20	8.5	8.3	13.4	17.4	-	30.8	-
"	109	32	-	28.93	-	0.85	6.0	8.6	-	16.6	-	-	30.4
Rheune	114	31	18.31	27.56	11.81	0.16	5.5	7.1	12.2	15.8	22.5	-	28.7
Diawar	122	30	16.34	25.89	-	-	5.0	7.0	11.2	14.5	19.8	29.1	-
Quassoul	126	29	16.59	25.67	-	-	-	6.8	9.9	14.5	19.5	27.9	26.2
Rong	130	28	14.46	24.71	7.49	-	3.9	6.4	9.5	13.4	-	-	-
Gorom	134	27	13.72	24.19	-	-	2.8	6.0	8.4	12.1	18.8	26.0	23.0
Rhor	140	26	12.78	22.80	-	-	2.2	3.3	6.4	11.2	15.6	24.4	21.3
Ntiagar	150	25	10.71	20.40	8.26	<0.1	0.65	2.7	5.7	9.3	13.6	21.8	19.4
Rosso	154	24	10.36	18.89	-	-	0.40	2.6	4.8	8.4	13.9	21.2	18.2
Mbagam	158	23	8.91	17.59	-	-	0.15	2.2	4.3	7.7	12.4	19.6	17.1
Rd Toll	167	22	8.11	16.33	-	-	<0.01	2.4	3.9	6.0	11.2	17.5	18.1
Rhouma	170	21	-	16.15	-	-	-	1.9	-	5.8	-	-	-
Guidakar	176	20	7.55	14.02	-	-	-	1.2	2.5	5.6	-	14.9	15.4
K. Mour	187	19	5.50	12.83	-	-	-	0.23	2.0	3.5	-	13.6	14.4
Dagana	192	18	4.93	11.04	-	-	-	<0.1	0.9	2.6	6.6	12.4	11.5
Gaé	205	17	2.80	9.64	-	-	-	-	0.1	1.8	-	9.0	9.8
Ndiarème	210	16	2.65	8.54	-	-	-	-	<0.1	1.4	-	8.7	8.7
Bokoul	217	15	1.45	8.01	-	-	-	-	-	0.5	3.8	8.3	8.0
Ngalanka	233	14	0.35	4.55	-	-	-	-	-	<0.1	-	4.7	5.4
Ndiayao	241	13	<0.1	3.84	-	-	-	-	-	-	0.44	4.2	3.80
Dar Salam	245	12	-	2.61	-	<0.1	<0.1	-	-	-	0.35	3.4	3.10
Bakao	249	11	-	1.52	-	-	-	-	-	-	0.10	2.8	2.52
L. Peul	254	10	-	1.39	-	-	-	-	-	-	<0.1	1.95	-
L. Lam Nayo	261	9	-	1.13	-	-	-	<0.1	-	-	-	1.25	2.09
L. Doué	272	8	-	0.34	-	-	-	-	-	-	-	0.31	0.74
Niandane	288	7	-	0.03	-	-	-	-	<0.1	<0.1	-	<0.1	0.1
Guia	304	6	<0.1	<0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1
Niaoulé	283	5	-	0.06	-	-	-	-	-	-	<0.1	-	-
Podor	292	4	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diatat	300	3	-	<0.1	-	-	-	-	-	-	<0.1	<0.1	<0.1
Danaye	309	2	-	<0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mbayo	322	1	-	<0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TABLEAU III

Évolution saisonnière de la salinité d'octobre 1982 à juin 1983 dans la basse vallée du fleuve Sénégal
Field data in the lower reaches of the Senegal River; October 1982 to June 1983

Stations	Point kilométrique et n°		Intrusion saline 1982-1983 (salinité ‰)															
	Km	N°	25/10	17/11	30/11	13/12	28/12	12/01	27/01	10/02	22/02	15/03	31/03	19/04	03/05	26/05	09/06	
			1982	1982	1982	1982	1982	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983
Gandiole	5	56			27.0						35.0	34.1	35.0	35.5	0			
"	10	55								29.6	29.8	32.6	34.7	34.7	34.9			
"	15	54								28.1	29.0	32.0	33.2	34.1	34.5			
"	20	53								26.2	27.7	31.1	32.2	34.5	34.7			
St Louis	22	52					15.4	21.0	21.6	25.3	25.3	29.7	31.4	32.9	33.2	36.1		
Dkr Bango	29	51	0.19	3.8	7.4	11.2	13.1	19.2	20.4	23.9	25.7	27.4	30.4	32.5	33.7	-		
"	32	50	<0.1	3.6	6.8	9.9	12.4	-	18.8	21.2	24.5	28.3	30.4	31.6	31.3	-		
"	36	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
"	40	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
"	45	47	0.19	1.8	4.4	7.8	9.8	14.8	14.2	18.3	21.7	25.1	28.6	29.9	31.4	-		
Maka-Diama	49	46	0.13	1.5	4.2	5.8	8.85	14.6	14.2	17.6	21.3	24.5	27.3	28.5	28.6	-		
"	54	45	<0.1	-	3.4	-	7.7	15.3	14.4	15.2	18.6	21.9	-	28.0	28.6	-		
I. Tieng (aval)	60	44	-	-	-	-	6.1	-	13.7	13.3	17.7	20.4	24.9	-	-	-		
(amont)	65	43	-	0.28	-	4.2	4.4	-	13.0	14.0	15.7	17.8	23.6	26.4	26.7	-		
Diar	69	42	0.1	2.0	2.6	6.1	11.1	11.4	13.1	17.6	20.2	23.6	25.8	25.8	32.4			
"	73	41	<0.1	-	1.95	5.4	10.6	-	13.0	17.1	20.4	23.2	25.8	27.6	30.9			
Tiguet	76	40	-	0.9	1.6	4.95	10.0	9.6	12.5	16.9	20.2	23.2	25.4	25.4	31.4			
Djoudj	79	39	-	0.3	1.65	5.0	10.0	9.9	12.5	17.0	20.3	23.8	25.4	25.8	30.9			
"	82	38	-	<0.1	1.58	5.0	-	9.6	12.3	16.4	20.5	23.7	25.4	25.6	-			
Débi	87	37	-	-	1.25	4.2	9.9	-	12.2	16.2	19.6	21.7	24.6	24.9	30.6			
Diamer	92	36	-	-	0.95	4.0	-	8.3	10.0	14.0	18.0	21.4	23.9	24.1	31.0			
"	98	35	-	-	0.31	3.95	8.0	8.5	9.8	12.0	16.8	19.4	23.0	22.0	27.9			
Crocodiles	102	34	-	-	0.12	3.53	7.4	7.9	9.7	11.5	16.3	18.8	23.0	22.5	27.8			
Diakal	105	33	-	-	<0.1	3.40	-	-	8.1	9.9	15.3	-	-	-	-			
"	109	32	-	-	-	2.62	6.2	7.6	7.8	9.4	15.2	18.4	21.8	21.7	26.7			
Rheune	114	31	-	-	-	1.43	4.9	5.0	6.25	8.2	14.4	16.6	19.0	20.3	24.9			
Diawar	122	30	-	-	-	1.23	4.1	4.8	5.55	7.2	12.4	14.2	17.6	17.5	26.1			
Ouassoul	126	29	-	-	-	1.15	4.05	5.3	5.40	7.0	11.6	14.4	17.4	17.6	22.9			
Rong	130	28	-	-	-	0.87	-	4.2	4.8	5.75	12.3	14.0	15.8	16.7	20.8			
Gorom	134	27	-	-	-	0.65	2.4	3.8	4.55	5.4	10.2	13.0	14.7	14.7	20.1			
Rhor	140	26	-	-	-	0.13	1.08	2.3	3.8	5.3	8.8	11.2	14.2	13.4	18.9			
Ntiagar	150	25	-	-	-	0.1	0.20	1.8	2.8	3.88	8.6	10.2	12.2	12.2	17.0			
Rosso	154	24	-	-	-	<0.1	0.31	1.5	2.55	3.64	7.8	9.9	11.3	11.3	16.4	22.5		
Mbagam	158	23	-	-	-	0.37	1.4	2.12	3.46	6.3	9.3	10.5	8.0	15.2	21.6			
Rd Toll	167	22	-	-	-	0.19	0.55	1.50	2.90	6.3	7.5	9.5	9.2	13.8	19.9			
Rhouma	170	21	-	-	-	0.1	0.33	1.04	2.20	6.2	6.0	7.7	7.1	-	19.0			
Guidakar	176	20	-	-	-	<0.1	0.1	1.7	2.60	5.4	7.2	8.8	9.0	12.1	16.3			
K. Mour	187	19	-	-	-	-	-	<0.1	0.45	1.10	5.0	5.0	7.4	7.0	10.1	16.0		
Dagana	192	18	-	-	-	-	-	-	0.1	0.38	4.2	3.3	5.5	5.7	9.65	13.6		
Gaé	205	17	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.1	0.9	2.3	4.3	4.7	7.5	11.0		
Ndiarème	210	16	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.8	1.9	3.8	4.3	7.3	10.7		
Bokoul	217	15	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	1.3	2.9	2.9	6.1	10.1		
Ngalanka	233	14	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.25	1.1	1.2	2.75	6.1		
Ndiayao	241	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	0.38	2.65	4.7			
Dar Salam	245	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.1	0.12	2.40	4.4		
Bakao	249	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	-	1.92	3.8			
L. Peul	254	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	1.42	3.0			
I. Lam Nayo	261	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	1.20	-			
L. Doué	272	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.28	1.2			
Niandane	288	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.3			
Guia	304	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1			
Niaoulé	283	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	<0.1			
Podor	292	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	<0.1			
Diatal	300	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	<0.1			
Donaye	309	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	<0.1			
Mbayo	322	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	<0.1		

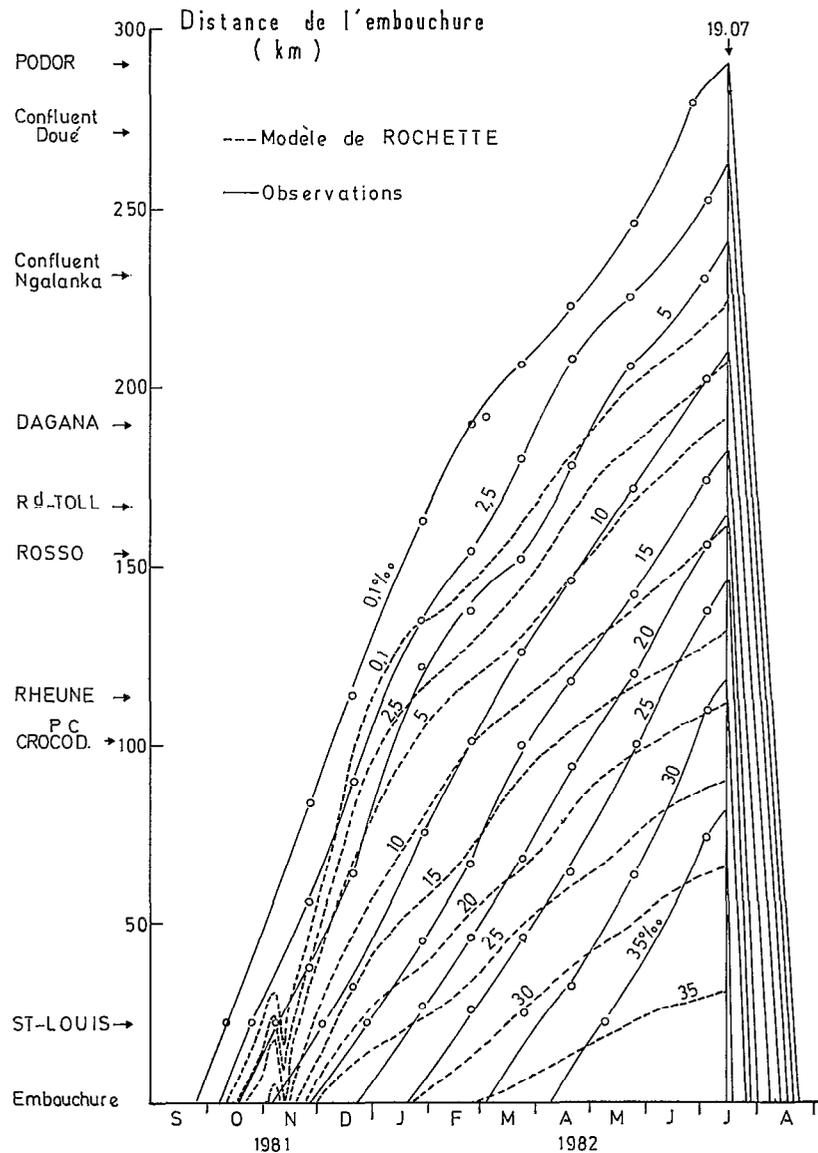


FIG. 6. — Comparaison entre les salinités observées et les estimations, à l'aide des diagrammes de ROCHETTE (1964) en 1981-1982
Measured and computed salinities (from Rochette's model) (1981-82)

De ces différentes campagnes on peut retirer les enseignements suivants :

— l'application des anciens abaques nous conduit à sous-estimer l'ampleur de l'intrusion saline;

— la progression du front salé n'est pas régulière et les à-coups observés sont vraisemblablement imputables à la présence de seuils rocheux dans le lit mineur de la vallée. On remarque en effet que les irrégularités se positionnent approximativement à la hauteur du haut-fond de Faff (km 120) et de la grande dépression topographique signalée peu en amont de

Débi, vers le km 70 dans le profil longitudinal du lit du fleuve;

— les modifications dans l'allure des courbes traduisent, avec certitude un changement de rythme dans la progression du front salé vers l'amont.

Ces différentes conclusions nous ont amené, au terme de cette étude, à reconsidérer les propositions de ROCHETTE (1964) afin de mieux saisir cette « réalité contraignante » qu'est devenue l'invasion marine annuelle dans l'ensemble des estuaires de la Sénégalie.

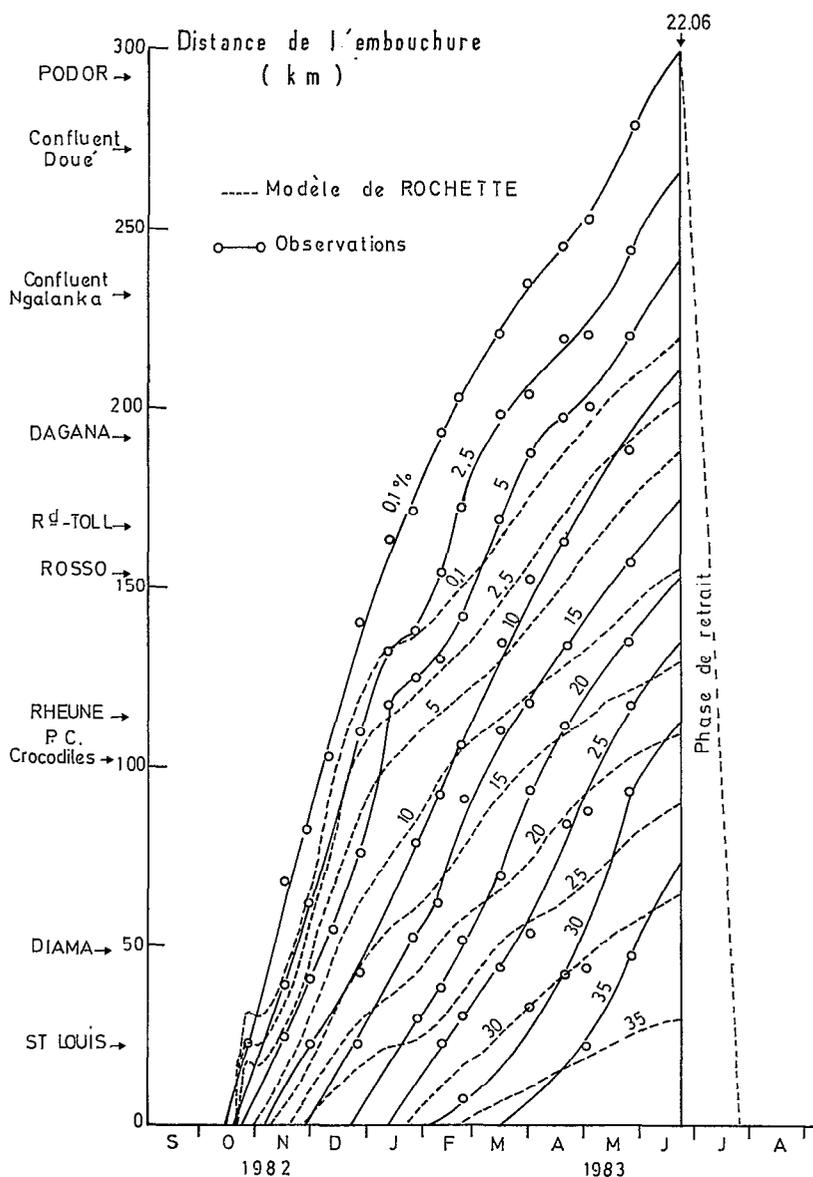


FIG. 7. — Comparaison entre les salinités observées et les estimations à l'aide des diagrammes de ROCHETTE (1964) en 1982-1983
Measured and computed salinities (from Rochette's model) (1982-83)

III. PROPOSITIONS NOUVELLES DE MODÉLISATION DE L'INTRUSION SALINE DANS LA VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL

A. Confrontation entre les estimations à l'aide du modèle de Rochette et la réalité des observations

Les deux figures 6 et 7 montrent les principales divergences dans les positions saisonnières respectives des différentes isohalines :

— le trait le plus marquant réside dans la position géographique de l'abscisse maximale atteinte par le front salé : nos observations la fixent à hauteur de Podor, soit entre 50 et 70 km plus à l'amont que le modèle de ROCHETTE (l'application des abaques de cet auteur ne l'estime en effet qu'au niveau du confluent entre le Sénégal et le marigot de Ngalanka) ;

— la même constatation peut être faite pour l'isohaline à 35 ‰ figurant l'eau de mer « pure ».

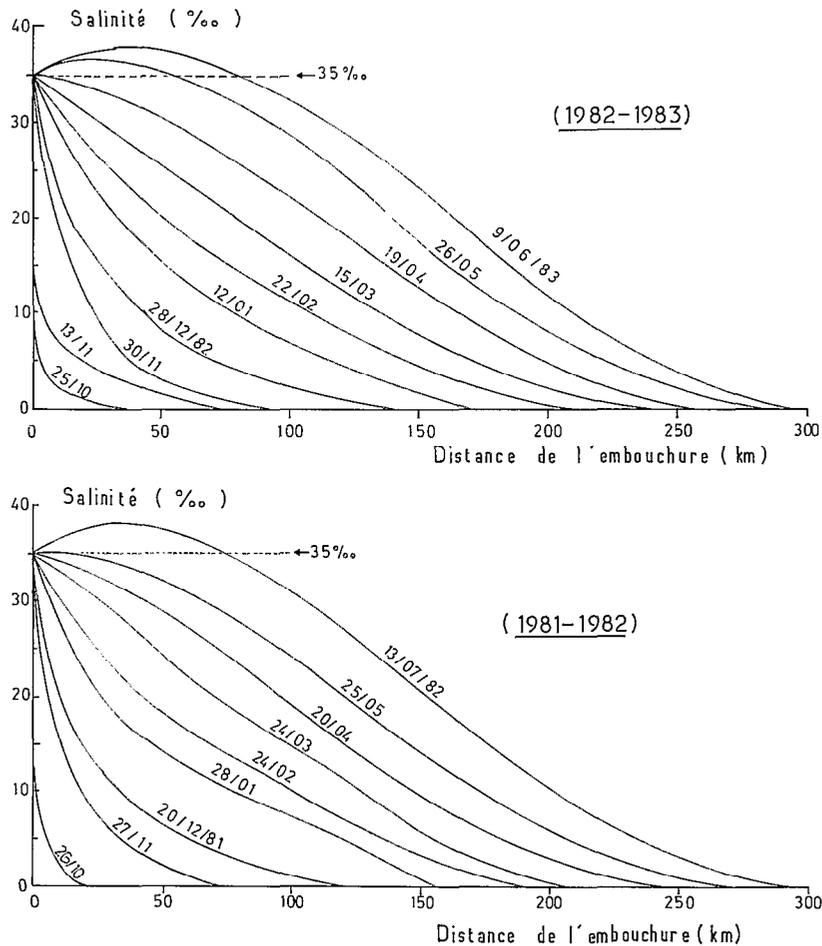


Fig. 8. — Représentation schématique de la progression saisonnière du front salé de 1981 à 1983
Schematic evolution of salinity as function of time and distance upstream

Dans les deux exemples, les abaques la situent lors du maximum de pénétration saline, à quelques kilomètres en amont de la ville de St-Louis, alors que nos observations la positionnent à près de 70 km de l'embouchure (soit plus de 20 km en amont du futur barrage anti-sel de Diama);

— le temps de séjour des différents taux de salinité dans toute la vallée est bien plus élevé que prévu. On relève par exemple à Richard-Toll, la présence de taux supérieurs à 10 ‰ pendant près de 40 jours; à Rheune, la salinité se maintient au-dessus de 25 ‰ durant un mois, et l'eau de mer « pure » réside à Diama pendant plus de 3 semaines.

Ces différences importantes entre les estimations à l'aide du modèle et les valeurs observées sur le terrain nous ont amené à revoir les abaques proposés afin de mieux cerner la réalité de chaque intrusion saline dans la basse vallée du fleuve Sénégal.

B. Les alternatives de modifications des différents seuils

1. LA PRISE EN COMPTE DES MIGRATIONS DE L'EMBOUCHURE ET DE SA SECTION

Les déplacements de l'embouchure et les variations de sa section influencent le phénomène annuel de la remontée saline. Pour sa part, ROCHETTE (1964) attribue un rôle plus important à la largeur de la « passe » qu'à la migration proprement dite de l'embouchure du fleuve : une ouverture plus grande engendrant une augmentation de l'amplitude moyenne de la marée.

2. LE DÉBUT DE L'INTRUSION SALINE : LE SEUIL DES 600 M³/s

D'après les observations journalières de la salinité à St-Louis, l'intrusion saline débuterait avant le

franchissement du seuil de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ lors de la phase de tarissement du fleuve. Le gain de temps reste cependant très faible (au maximum une semaine) et le « débit-clef » pour le début de la remontée saline serait de l'ordre de $750 \text{ m}^3/\text{s}$ (d'après les données de 1981-1982 et 1982-1983).

3. LA SUBSTITUTION DU PARAMÈTRE « TEMPS » AU PARAMÈTRE « DÉBIT » : LES SEUILS DE $50 \text{ m}^3/\text{s}$, $20 \text{ m}^3/\text{s}$, ET $5 \text{ m}^3/\text{s}$

A la réflexion, il s'agit bien là de la difficulté principale. Dans toute tentative de compréhension d'un mécanisme ou d'un phénomène, qui se prolonge, la substitution d'un paramètre explicatif par un autre implique nécessairement la notion de modification profonde dans les caractéristiques du mécanisme ou du phénomène concerné. Dans le cas de l'intrusion saline, une seule hypothèse paraît plausible : un changement de rythme dans la progression du front salé vers l'amont.

Cette hypothèse nous a conduit à envisager plusieurs valeurs de ce débit critique volontairement choisi trop élevé par ROCHETTE (1964).

En se basant sur les campagnes de mesure de salinités menées d'octobre 1981 à juin 1983, le « lissage » des courbes obtenues sur les figures 4 et 5 permet d'aboutir à la représentation graphique de la figure 8 (les irrégularités introduites vraisemblablement par la présence de seuils rocheux ont été négligées). Les deux intrusions salines consécutives de 1981-1982 et 1982-1983 se caractérisent par un changement dans l'allure des courbes : de concaves elles deviennent convexes, et sensiblement aux mêmes dates (entre le 24/02 et le 24/03 en 1982; entre le 22/02 et le 15/03 en 1983). Celles-ci correspondent à des débits respectifs à Dagana de $19,9 \text{ m}^3/\text{s}$ et $6,68 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1982 et à $17,3 \text{ m}^3/\text{s}$ et $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1983.

Le changement de rythme dans la progression du front salé se situerait donc bien plus tardivement, et les valeurs identiques en 1982 et 1983 des débits « critiques » à Dagana amènent à envisager deux possibilités : substitution du paramètre « temps » au paramètre « débit » pour les seuils de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ et de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

La figure 9 montre qu'il n'y a pas de variations significatives dans le déplacement des différentes isohalines en utilisant les débits de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ et de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. En 1981-1982 par exemple, l'abscisse maximale se situe le 19 juillet 1982 vers le km 240 (les observations « in situ » donnent 290 km environ, et le modèle de ROCHETTE en utilisant le seuil de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, le fixe à 226 km). L'isohaline à 35‰ franchit la section de Diama : elle atteint le km 56 avec $20 \text{ m}^3/\text{s}$ et le km 58 avec $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (les mesures de salinité la positionnent au km 80 et le modèle à 30 km de l'embouchure).

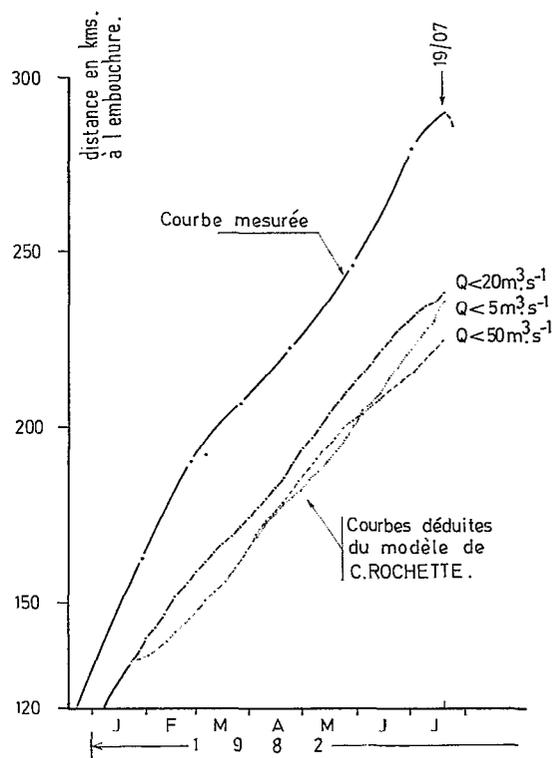


FIG. 9. — Les divergences entre l'observation et l'utilisation des diagrammes de ROCHETTE pour différentes valeurs du débit critique (50 , 20 et $5 \text{ m}^3/\text{s}$). Représentation de l'isohaline $0,1 \text{ ‰}$

Location of the marine upstream influence, determined as the ‰ salinity. Field and computed data from Rochette's model for different values of the "critical flow"

C. Propositions de nouveaux diagrammes fixant la salinité moyenne à une distance donnée de l'embouchure en épisode aride

Les nouveaux diagrammes présentés sur les figures 10 et 11 ont été établis à partir de l'ensemble des mesures de salinités réalisées au cours des deux intrusions marines de 1981-1982 et de 1982-1983 dont les caractéristiques sont très semblables. Le seuil de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ a été adopté pour fixer la transition entre les paramètres temps et débit. Ces deux diagrammes permettent de déterminer à tout moment la salinité moyenne, en un point donné de la vallée, en fonction du débit pour des valeurs supérieures à $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 10), et en fonction du temps (figure 11) pour des débits inférieurs tant que l'étiage du fleuve se poursuit.

Les abaques sont directement exploitables. L'allure des courbes représentatives des différentes isohalines n'est pas en effet sans rappeler la loi expo-

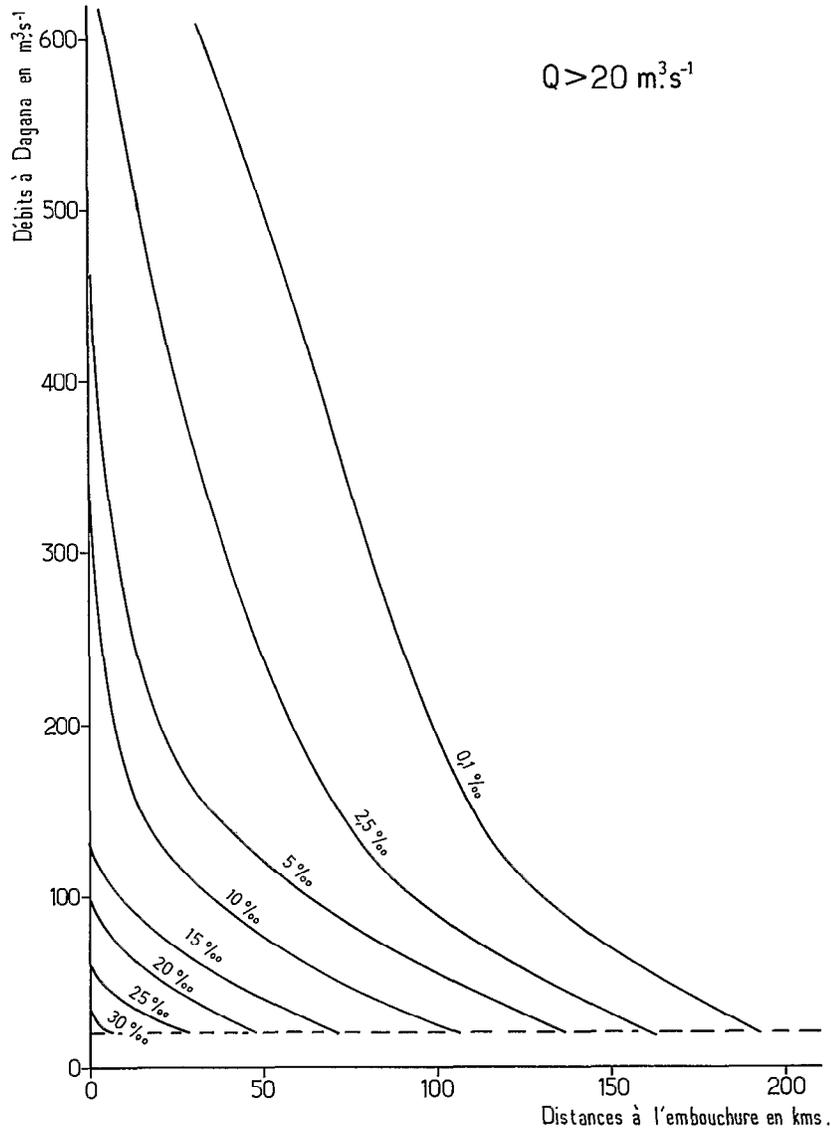


FIG. 10. — Relation débit/salinité moyenne de base ($Q > 20 \text{ m}^3/\text{s}$) en période aride
The proposed relationship between flow and salinity during a drought period (flow $> 20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$)

nentielle qui caractérise la décroissance des écoulements du fleuve pendant les phases de tarissement et d'épuisement. La formulation du phénomène annuel de l'invasion marine s'exprime alors par une série d'équations donnant la position des isohalines en fonction des seuls débits.

En distinguant les deux épisodes (débit supérieur ou inférieur à $20 \text{ m}^3/\text{s}$), on aboutit aux équations suivantes où D indique l'éloignement en kilomètres de l'embouchure et Q le débit fluvial (en m^3/s) à l'embouchure, précisé à partir de la propagation de l'onde de crue à Bakel.

$750 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$

Isohalines	0,1 ‰	: D = - 100,0 log Q + 325
—	2,5 ‰	: D = - 104,4 log Q + 301
—	5,0 ‰	: D = - 109,0 log Q + 282
—	10,0 ‰	: D = - 107,3 log Q + 252
—	15,0 ‰	: D = - 95,9 log Q + 203
—	20,0 ‰	: D = - 77,9 log Q + 153
—	25,0 ‰	: D = - 68,2 log Q + 117

$Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$

Isohalines	0,1 ‰	: D = - 46,1 log Q + 255
—	2,5 ‰	: D = - 46,9 log Q + 226

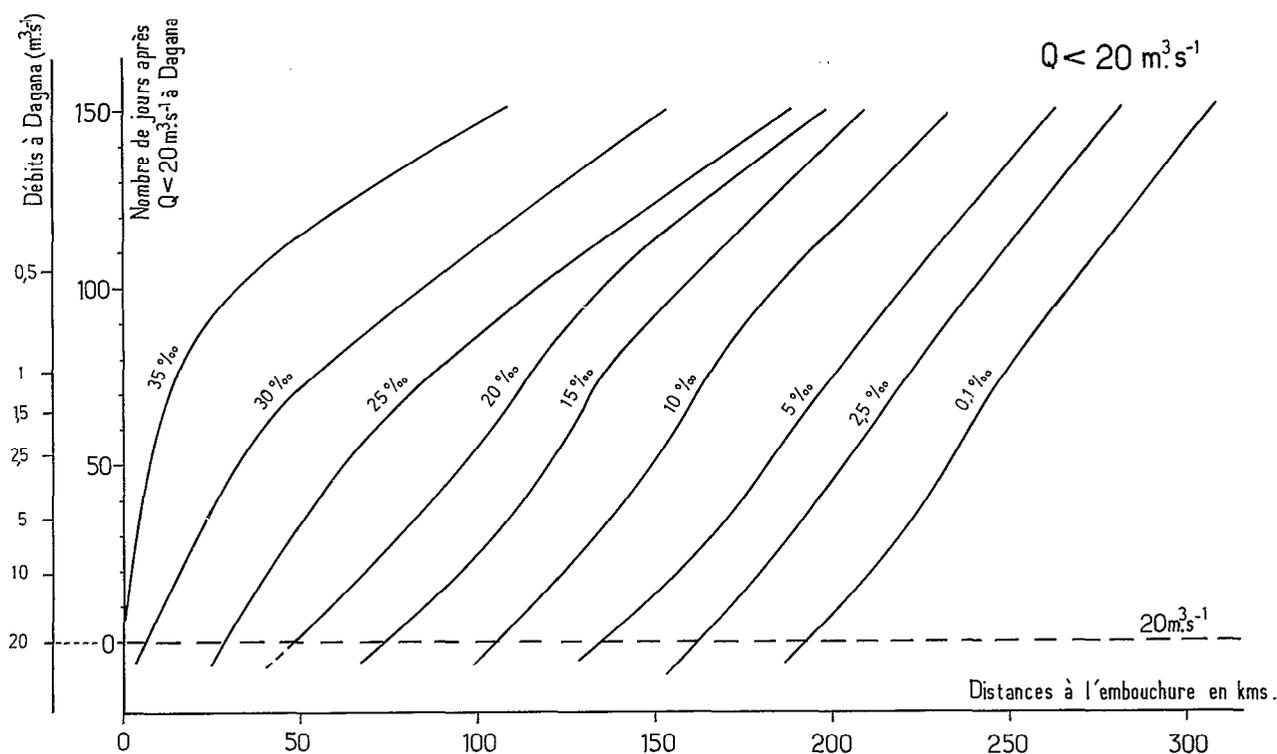


FIG. 11. — Relation temps/salinité moyenne de base ($Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$) en période aride
 The proposed relationship between time and salinity, based on the flow at Dagana $< 20 \text{ m}^3/\text{s}$

—	5,0 %	: D = -	49,2	log Q +	204
—	10,0 %	: D = -	43,8	log Q +	169
—	15,0 %	: D = -	48,4	log Q +	141
—	20,0 %	: D = -	52,5	log Q +	120
—	25,0 %	: D = -	43,6	log Q +	85
—	30,0 %	: D = -	41,0	log Q +	53
—	35,0 %	: D = -	14,0	log Q +	15

Selon nos estimations, le débit maximum au cours du cycle hydrologique 1983-1984 n'a pas atteint à l'embouchure la valeur de $900 \text{ m}^3/\text{s}$. De plus, l'hydrogramme de crue présente une éphémère remontée des débits vers la mi-août avant une première phase de décrue en septembre : entre le 13 et le 23 septembre, les écoulements ont à peine été supérieurs à $600 \text{ m}^3/\text{s}$ et le sel a pu entamer sa remontée vers l'amont du fleuve. La décrue générale a eu lieu dès le début octobre, et l'invasion a dû s'amorcer vers le 15 octobre. Cette date précoce a, on le sait, été à l'origine de l'édification du barrage en terre de Rheune I.

Ce barrage provisoire situé à 114 km de l'embouchure, fut achevé en toute hâte le 25 novembre 1983, le sel ayant atteint la hauteur du village de Rheune quelques jours auparavant. Ces précisions nous ont permis de tester les abaques proposés. Le 25 novem-

bre 1983, pour un débit de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ environ, abaques et équations positionnent le front salé au niveau du km 108, soit seulement à 6 km en aval de Rheune!

Le barrage de Rheune a été emporté comme prévu par la crue 1984-1985 : le « bouchon » aurait « sauté » le 23 juillet 1984 sous la poussée des eaux douces. Même en admettant que la première onde de crue se soit présentée vers le 1^{er} juillet, nos abaques permettent d'affirmer qu'en l'absence du barrage, l'invasion saline 1984-1985 aurait été ressentie bien en amont de Podor sur le Sénégal et de Guia sur le Doué, soit à plus de 300 km de l'embouchure. Il se serait agi de la plus importante pénétration marine depuis le début du xx^e siècle.

CONCLUSION

Les observations minutieuses de la remontée saline dans la vallée du fleuve Sénégal à la suite des cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-83 (caractérisés par des écoulements extrêmement faibles) et leur confrontation avec les estimations à l'aide du modèle proposé ont permis de mettre en évidence des diver-

gences importantes dans l'évaluation de l'évolution spatio-temporelle de la salinité. Les propositions anciennes de ROCHETTE (1964, 1974) ont été reconsidérées et une nouvelle formulation du phénomène annuel de l'invasion marine établie. Elle précise à tout instant par une série d'équations, et en fonction des seuls débits, les positions respectives des différentes isohalines dans la basse vallée du fleuve. Ces

équations de la forme ($D = a \log Q + b$) seront utilisées dans un prochain article pour réévaluer au cours des trois épisodes arides du xx^e siècle, l'importance réelle de la remontée saline dans le fleuve Sénégal.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 20 octobre 1986

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GAC (J. Y.), CARN (M.) et SAOS (J. L.), 1986. — L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal I. Période 1903-1980. *Rev. Hydrobiol. trop.* 19, 1 : 3-17.
- GAC (J. Y.), KANE (A.), 1986 a. — Le fleuve Sénégal : I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. *Sciences Géol. Bull.*, vol. 39, n° 1 : 78-110.
- GAC (J. Y.), KANE (A.), 1986 b. — Le fleuve Sénégal : II. Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. *Sciences Géol. Bull.*, vol. 39, n° 1 : 203-227.
- ROCHETTE (C.), 1964. — Remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal. Rapport ORSTOM, Dakar, 81 p.
- SAOS (J. L.), KANE (A.), CARN (M.), GAC (J. Y.), 1984. — Persistance de la sécheresse au Sahel : invasion marine exceptionnelle dans la vallée du fleuve Sénégal. C. R., X^e Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, I.G.B.A. (éd.), Bordeaux, p. 499.