

Hydrodynamique et évaluation du risque de pollution dans un estuaire à marées

Michel-Alain ROCHE,
Maître de Recherches, ORSTOM, B.P. 165, Cayenne

RÉSUMÉ

Les mesures effectuées aux moulinets, complétées par un traçage aux flotteurs et par un traçage naturel salin, permettent de déterminer les principaux paramètres nécessaires à l'étude des risques de pollution des eaux que l'implantation d'une usine en bordure d'estuaire pourrait créer par rejets industriels.

Dans cette étude, réalisée sur l'estuaire du Kourou, en Guyane française, deux processus hydrodynamiques de pollution sont définis et examinés. L'un s'exerce sur une distance limitée avec des dilutions faibles au cours de la rapide dérive de flot ou de jusant, l'autre accompagne loin en amont, avec des dilutions fortes, la lente remontée de la marée saline qui se produit durant l'étiage.

Une partie des eaux salées et des matières en suspension progresse vers l'amont alors que, tant au fond qu'en surface, la résultante des dérives liquides est orientée vers l'aval. Une hypothèse est alors avancée sur les processus de l'extension de la marée saline telle qu'elle se produit au cours de l'étiage dans un estuaire bien mélangé. En raison du retard pris par rapport aux dérives liquides, sous l'influence de phénomènes de freinage et de stockage au fond et sur les rives, les sels et les suspensions ne reviennent pas en totalité à leur point de départ initial. Ces éléments solides progressent ainsi vers l'amont par oscillations et dilutions successives tant que le débit fluvial demeure insuffisant pour balayer les « résidus » de la dérive de jusant.

SUMMARY

This paper deals with a study of parameters necessary to evaluate the risk of water pollution which sewage disposals could create if a pulper mill would be set up on the tidal estuary side.

In this work, carried out on the estuary of the Kourou river, in French Guyane, two hydrodynamic mechanisms of pollution are defined and investigated. The first one exerts on a short distance, with weak dilutions, during the rapid excursion on flood or ebb. The second one follows the slow intrusion of salinity which occurs far landward, with high dilutions, during the dry season.

A part of brackish waters and suspended solids goes upstream although the resultant of the water excursion, as well as the bed as near the surface, is directed downstream. Hence, a hypothesis about the mechanisms of the salinity advance is put forward. Because of the lag versus the water excursion, under the influence of braking and storage phenomena on the bed and on the banks, the salts and suspended solids do not come back in totality to their point of departure. Thus the dissolved and suspended constituents go on landward by successive oscillations and dilutions as long as the river discharge continues to be insufficient for scouring « residues » of the downstream excursion.

1. INTRODUCTION

Les régions estuariennes présentent des sites propices à un développement économique, et se trouvent de ce fait particulièrement exposées aux nuisances provoquées par des rejets industriels ou urbains. Ces nuisances sont fréquemment constatées avec acuité dans les estuaires à marées où les temps de séjour des eaux et des matières solides sont considérablement augmentés par le jeu des mouvements oscillants. Aussi, s'avère-t-il souhaitable que les projets dont la réalisation pourrait entraîner des rejets importants dans les eaux d'un estuaire s'accompagnent d'une évaluation des risques de pollution, concernant aussi bien l'écosystème en général, que des points qui pour-

raient être favorables à l'implantation de prises d'eau. L'évaluation, qui repose sur la connaissance des phénomènes hydrodynamiques dont dépendent tant les mouvements et la dilution des matières naturelles en solution ou en suspension que ceux d'éventuels polluants, peut être réalisée par des mesures hydrométriques et physico-chimiques exploitées conjointement.

Une étude de ce type a été menée en Guyane française, dans le cadre d'un projet d'installation d'une usine de pâte de bois en bordure de l'estuaire du Kourou (M. A. ROCHE, 1977 b). Il convenait d'évaluer le risque de pollution que les rejets de la future usine pourraient produire dans l'estuaire, en particulier à l'emplacement de la prise d'eau prévue pour son alimentation (Gourdonville), et à celle desservant déjà Kourou, la ville voisine (Saramaca). Le projet prévoyait qu'après lagunage dans un marécage (la savane Ouayabo), les déchets seraient rejetés dans une petite rivière (la crique des Pères) dont le confluent avec l'estuaire se situe à 20 km et 40 km en aval des prises d'eau en cause et à 16 km en amont de l'embouchure (fig. 1 à 3).

La même étude, en définissant les possibilités d'alimentation en eau de l'usine, sur les plans quantitatif et qualitatif, permet également de conseiller l'emplacement de la station de pompage à Gourdonville.

Deux processus hydrodynamiques de pollution dans un estuaire ont été examinés. L'un concerne les mouvements oscillants qui au gré des marées entraînent les eaux et les matières sur des distances variables appelées dérives ou excursions, l'autre est lié à la remontée saline.

Les phénomènes ont été étudiés pendant l'étiage, durant la période des marées d'équinoxe. Car c'est en effet lors de la conjugaison de l'étiage du fleuve avec les marées de vives-eaux que les conditions hydrologiques les plus favorables à la progression amont des matières de toutes natures se trouvent réunies dans l'estuaire. A l'inverse, par marées à faibles coefficients, les eaux marquent un séjour prolongé dans l'estuaire. Ainsi, en choisissant une gamme étendue de coefficients de marée, est-il possible, dans ces conditions, de cerner la variation des phénomènes jusqu'à leurs limites.

Les recherches qui ont été ainsi réalisées ont mis en évidence des phénomènes généraux pour lesquels a été adaptée une méthodologie spécifique de mesures dont les principes ci-après exposés pourraient être utilisés dans des cas similaires.

2. MÉTHODOLOGIE

Les paramètres hydrodynamiques dans l'estuaire ont été déterminés en six sections transversales choisies entre la mer et la partie amont non influencée par la marée dynamique (fig. 1 à 3). Des mesures de vitesses, de hauteurs d'eau, ainsi que des prélèvements d'eau ayant donné lieu à des analyses physico-chimiques y ont été effectués. Trois des stations (Guatémala, Pères, Gourdonville) ont été équipées d'un limnigraphe.

L'opération a compté huit campagnes de mesures et de prélèvements. En outre, tout au long de l'estuaire, ont été prélevées des eaux pour l'étude de la remontée saline au moment de la renverse de haute-mer, et observées les dérives de flotteurs à partir de différents points pendant le jusant ou le flot.

2.1. MÉTHODES HYDROMÉTRIQUES

2.1.1. Mesures hydrométriques

Hors de toute influence maritime, une station hydrométrique (n° VI) équipée d'un limnigraphe longue durée a été implantée à Léodate, quelques dizaines de kilomètres en amont de l'embouchure. La relation hauteur-débit a été établie par un étalonnage classique réalisé au moulinet.

Dans la zone soumise à la marée dynamique, c'est-à-dire dans l'estuaire, les vitesses des eaux ont été mesurées selon deux méthodes :

— La première, revient à mesurer en fonction du temps, la dérive parcourue par des flotteurs lestés. Trois bouteilles en plastique, de 30 cm de hauteur, sont lestées de sable et d'eau afin que seul émerge le goulot marqué d'une couleur vive. Lâchées au milieu d'une section déterminée de l'estuaire, au moment de l'inversion de courant, elles sont alors suivies en pirogue pendant la durée du jusant ou du flot (fig. 4).

A l'issue d'une dérive plus ou moins longue, ces flotteurs tendent à se rapprocher d'une rive où ils finissent par être bloqués. Aussi pour assurer la continuité de la dérive, lorsque l'un d'entre eux est entraîné à proximité de la rive, est-il remplacé par un autre, lâché au droit de celui-là, au milieu de l'estuaire.

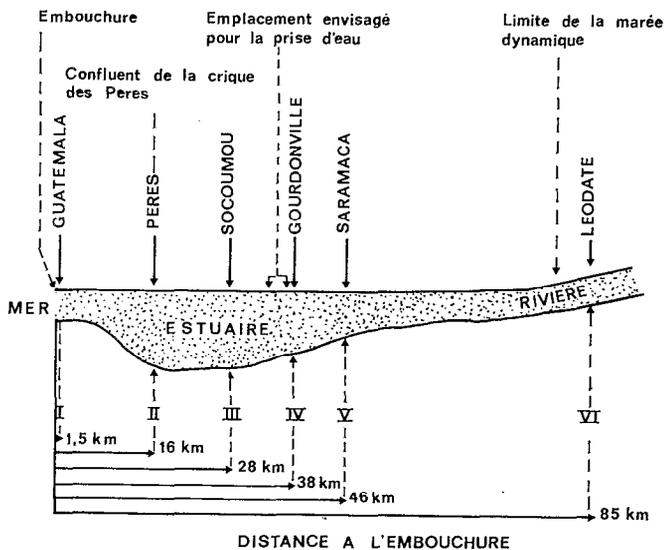


Fig. 1. — Situation des stations d'observations sur l'estuaire et la rivière du Kourou

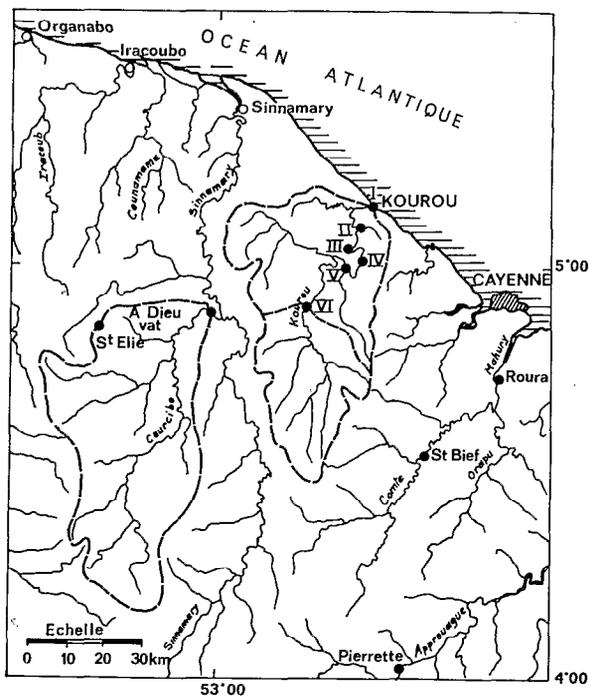


Fig. 2. — Les bassins versants de la rivière et de l'estuaire du Kourou, ainsi que celui de la rivière du Courcibo

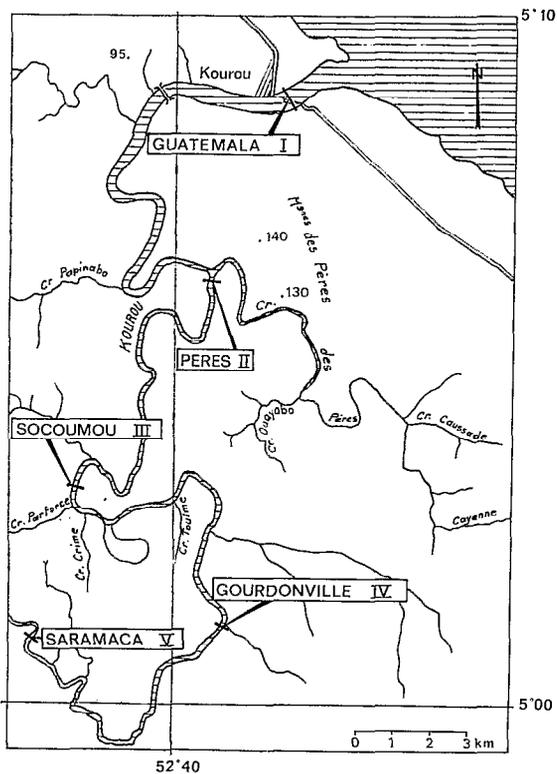


Fig. 3. — Situation des stations d'observation sur l'estuaire du Kourou

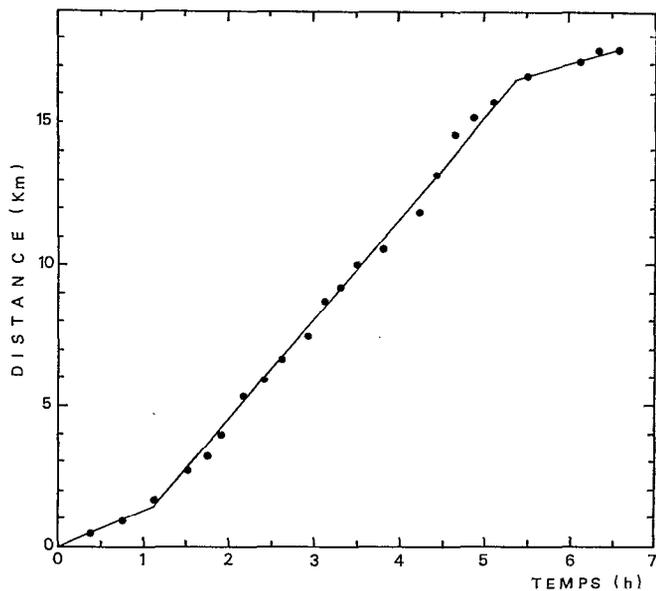


Fig. 4. — Exemple de la mesure de la vitesse de dérive d'un flotteur, depuis la confluence de la crique Ouayabo, dans la crique des Pères et l'estuaire du Kourou

Les différences des vitesses en bordure des rives et au milieu de la section, tantôt positives, tantôt négatives, demeurant faibles autorisent ces permutations.

De même, des bouteilles flottantes reliées par un câble de 2 m à des bouteilles lestées, plus denses que l'eau, ne montrent pas de cheminements significativement différents de ceux qui sont empruntés par les simples flotteurs de surface.

— La seconde méthode consiste à mesurer à chaque station, la vitesse des eaux avec un moulinet, sur cinq verticales comprenant en général chacune quatre points étagés depuis le fond jusqu'à la surface.

La marée, à cycle semi-diurne sur les côtes guyanaises, entraîne une variation rapide des paramètres hydro-métriques (hauteurs, vitesses, débits...). La relation hauteur-débit n'étant pas univoque, il serait vain alors de déduire des hauteurs les débits instantanés par un étalonnage classique des stations. Pour connaître la variation des débits au cours d'une période de marée, il convient dans ce cas de procéder au plus grand nombre possible de jaugeages en une douzaine d'heures.

Le dépouillement des mesures requiert l'emploi d'une méthode particulière, essentiellement graphique (M. A. ROCHE, 1976), ci-après exposée.

2.1.2. Exploitation graphique des mesures réalisées au moulinet dans l'estuaire

La planimétrie de l'aire définie par une « parabole de vitesse », $u = f(z)$, permet d'évaluer le débit unitaire sur une verticale

$$q = \int_0^h u \, dz$$

avec $u =$ vitesse et $z =$ profondeur, depuis la surface 0 jusqu'au fond h , pendant un temps relativement court (5 à 10 mn) en regard de la période de marée (fig. 5).

La courbe de variation temporelle du débit unitaire $q = f(t)$ est tracée pour chaque verticale à partir des résultats des six jaugeages.

A partir de ces courbes, il est possible d'estimer par interpolation les débits unitaires à chaque verticale à des heures données t_1, t_2, \dots pour tracer les courbes $q = f(y)$, l'abscisse dans la section étant désignée par y . Les aires délimitées par ces courbes équivalent aux débits totaux à travers la section de largeur l aux temps correspondants :

$$Q = \int_0^l q \, dy$$

La planimétrie des courbes précédentes permet de tracer la courbe $Q = f(t)$. Une dernière planimétrie de l'aire définie par cette courbe revient à estimer le volume écoulé au cours de la période de marée T .

$$V = \int_0^T Q \, dt$$

Ces trois intégrations successives peuvent alors se résumer à

$$V = \iiint u \, dz \, dy \, dt$$

En première approximation, la dérive moyenne $\Delta \bar{x}$ à partir d'une section peut s'estimer par

$$\Delta \bar{x} = V / \bar{A}$$

\bar{A} étant la section mouillée moyenne au cours de la marée. La dérive résultante, à l'issue d'une période de marée, représente la différence entre les deux valeurs de flot et de jusant.

En intégrant la variation des vitesses u en fonction du temps t , en un point de la section, on peut aussi évaluer la dérive parcourue pendant un temps déterminé :

$$\Delta x = \int_0^t u \, dt$$

telle par exemple, la dérive maximale Δx_3 , généralement située au milieu de la section.

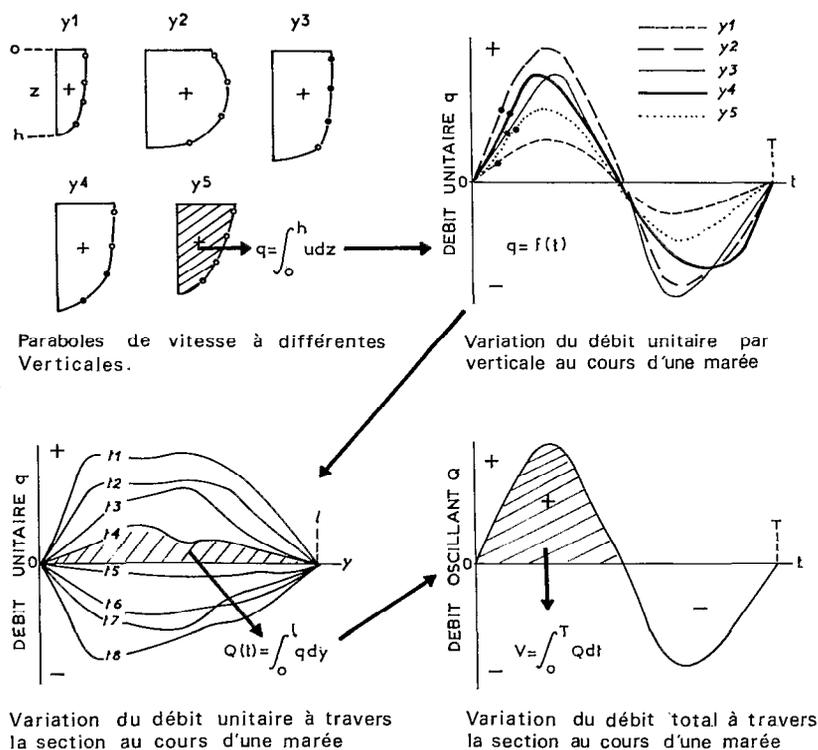


Fig. 5. — Détermination graphique de la variation des vitesses, des débits unitaires par verticale et à travers la section, des débits et des volumes oscillant à une station estuarienne, au cours d'une période de marée

Par définition, le signe — caractérise les paramètres relatifs au jusant (écoulement vers l'aval) et le signe + ceux qui se rapportent au flot (écoulement vers l'amont).

2.2. MÉTHODES DE MESURES ET D'ANALYSES DE LA QUALITÉ PHYSICO-CHEMIQUE DES EAUX

2.2.1. Mesures et échantillonnage *in situ*

La température des eaux a été mesurée *in situ*.

Des échantillons d'eau de 2 l ont été prélevés, immédiatement après la mesure des vitesses, à chaque verticale à 0,35 m du fond, au milieu et en surface, représentant 15 prélèvements par jaugeage. Ils étaient destinés à la mesure en laboratoire de la conductivité et de la teneur en suspension. Un échantillon supplémentaire de 2 l, prélevé à chaque jaugeage, en surface au milieu de la section, était réservé aux analyses physico-chimiques.

Le système de prise d'eau, monté entre le saumon et le moulinet, était relié à l'embarcation par un tuyau en plastique branché sur une pompe Japy.

D'autre part, à marée haute, un échantillonnage destiné à la mesure de la conductivité des eaux a été réalisé tous les kilomètres depuis l'embouchure jusqu'au-delà de l'influence de la marée saline.

2.2.2. Analyses en laboratoire

Salures ioniques globales S. Pour les océanographes, la notion de salinité englobe l'ensemble des éléments dissous dans l'eau de mer, dans laquelle la silice dissoute représente moins de 0,2%. Les teneurs relatives en silice des eaux continentales atteignant par contre des valeurs élevées, de l'ordre de 40%, comme en Guyane par exemple, il apparaît alors indispensable de distinguer la silice des ions. De plus, le comportement de la silice et des ions dissous

sont généralement très différents. Aussi au terme de « salinité » est-il substitué pour les eaux continentales celui de « salure ionique globale », ou simplement de « salure », pour exprimer la somme des teneurs en ions Cl^- , CO_3H^- , CO_3^{--} , SO_4^{--} , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{+++} .

Les ions majeurs en solution assurent aux eaux l'essentiel de leur conductivité électrique C , dont la mesure permet par corrélation de connaître les teneurs ioniques globales S . La corrélation $S \text{ mg/l} = f(C)$ ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$ à 25°) établie pour les eaux du Kourou, sur la base de 165 valeurs étalées de 13 à 34 500 mg/l , s'écrit :

$$\begin{aligned} S &= 0,586 C^{0,9819} && \text{pour } C < 1\,000 \\ S &= 0,286 C^{1,086} && \text{pour } C > 1\,000 \end{aligned}$$

La salure ionique globale prise en compte correspond à la somme des teneurs en ions majeurs dosées en laboratoire (M. A. ROCHE, 1977b).

La relation ci-dessus a permis de contrôler cette salure globale, en la comparant à celle qui a été mesurée in situ par un salinomètre Beckman, la conductivité des eaux en cause ayant été mesurée dans les mêmes conditions. Il a été ainsi constaté qu'une valeur de salure obtenue par la relation $S = f(C)$, c'est-à-dire par analyses en laboratoire, différait de 0 à 4% relatif de la salure mesurée au salinomètre pour une première série de 23 échantillons (4 000 à 23 000 mg/l) et était identique pour une deuxième série de 19 échantillons (900 à 11 000 mg/l).

Ces comparaisons confirment la qualité des résultats obtenus en laboratoire.

Charge en suspension P. Elle a été recueillie sous vide sur filtre « Millipore » à pores de $0,8 \mu$ de diamètre, après floculation par addition de 5 ml d'acide chlorhydrique 12 N et siphonnage de l'eau limpide surnageante.

3. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DE L'ESTUAIRE A MARÉES

Etant la partie d'un cours d'eau située sous l'influence de la mer, un estuaire est l'objet de trois types de phénomènes. Par ordre de propagation décroissante vers l'amont, on peut ainsi observer dans le Kourou, comme dans tout estuaire à marée semi-diurne :

- la marée dynamique, qui se traduit par une oscillation des hauteurs d'eau, avec deux minimums et deux maximums journaliers. Dans le Kourou, elle remonte sur environ 70 km au-delà de l'embouchure ;
- l'inversion des courants, quatre fois par jour ;
- la pénétration des eaux marines dans l'estuaire, selon une oscillation en phase avec celle du courant.

Le bassin versant de la rivière et de l'estuaire du Kourou, sur schistes antécambriens et roches éruptives, couvre 845 km^2 à Léodate, 1 590 km^2 à Gourdonville et 1 900 km^2 à l'embouchure. Les superficies des bassins versants à toutes les stations prises en considération dans cette étude sont indiquées dans le tableau II.

La largeur de l'estuaire, à marée haute, varie de 600 m à l'embouchure à 90 m dès la station II. Elle diminue ensuite très lentement vers l'amont, avec 70 m à la station V, n'atteignant que 40 m à la station VI. Lorsque les sections présentent une forme en U assez régulière, la profondeur moyenne à une station peut être définie comme

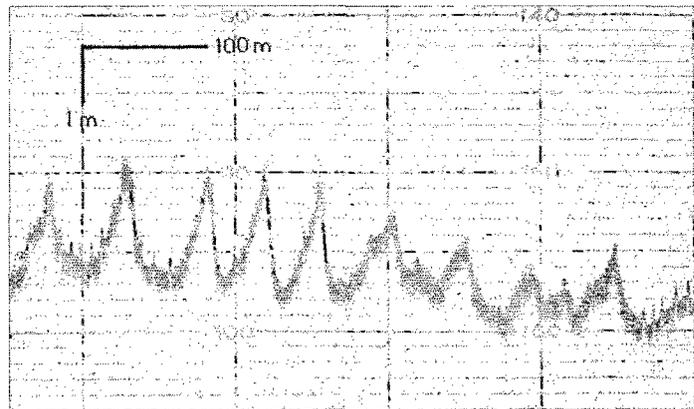


Fig. 6. — Exemple de profil bathymétrique longitudinal de l'estuaire du Kourou montrant les bancs de sédiments disposés en « dunes » successives.

le rapport de la section mouillée à niveau moyen avec celle de la largeur moyenne. Cette profondeur, de 3,4 m à Guatémala, est de 8,5 m à la station des Pères puis décroît ensuite variant de 7,7 m à Socoumou, 6,1 m à Gourdonville, à 5,3 m à Saramaca. Il en est de même des profondeurs maximales mesurées par rapport au niveau moyen qui atteignent, aux cinq stations respectives, les valeurs de 5 m, 11 m, 10 m, 8 m et 7 m. Les profondeurs dans l'estuaire du Kourou, comme dans tous les estuaires guyanais, tendent donc à augmenter depuis l'embouchure vers l'amont sur plusieurs kilomètres pour diminuer ensuite progressivement. C'est en mer, au large de l'estuaire, que se rencontrent les profondeurs minimales.

Afin de caractériser plus précisément la morphologie de l'estuaire, un relevé du profil bathymétrique a été réalisé par écho-sondage. A partir de la mer, il est ainsi observé que le lit, relativement plat et de profondeur assez régulière, devient accidenté 8 km en amont de l'embouchure, tandis que la profondeur s'accroît. Des séries de rides qui apparaissent sur les diagrammes semblent correspondre à des bancs de sédiments disposés en « dunes » successives dans le sens longitudinal du lit. Une telle morphologie, enregistrée selon l'axe médian de l'estuaire, est présentée pour exemple sur la figure 6.

4. LES APPORTS FLUVIAUX A L'ESTUAIRE

En diminuant l'apport d'eau douce à l'estuaire, le pompage au site de la prise d'eau, prévu à Gourdonville, aura pour conséquence de restreindre la force qui s'oppose aux dérives de flot, et augmente celles de jusant. Ainsi se trouvent favorisées, dans une certaine mesure, aussi bien la remontée de la marée saline que celle des polluants rejetés en aval, tandis que leur évacuation en direction de la mer sera freinée. Il est donc important d'évaluer l'incidence de ce pompage sur les apports fluviaux à l'estuaire, corrélativement d'ailleurs aux possibilités d'alimentation de l'usine.

4.1. RELATIONS ENTRE LES STATIONS DE L'ESTUAIRE ET UNE STATION DE RÉFÉRENCE

Le volume des apports fluviaux d'eau douce à l'estuaire peut être estimé par la mesure des débits effectuée à Léodate (n° VI) en amont de la limite de la marée dynamique, en admettant, entre cette première station et les autres, un temps de propagation moyen des eaux égal à un jour, et en appliquant au débit de référence un coefficient de majoration égal au rapport des superficies des bassins considérés. Une telle méthode d'estimation est en accord avec l'évolution des débits des cours d'eau guyanais de l'amont vers l'aval.

Les valeurs de l'apport fluvial, estimées à chaque station les jours d'observation dans l'estuaire, sont portées dans les tableaux III, IV, V.

Cependant, les débits de fréquences variées, dont l'évaluation nécessite les résultats de plusieurs années d'observation, ne peuvent être estimés des quelques mois d'étude consacrés à la rivière Kourou. Aussi est-il procédé à leur détermination par la relation établie entre les stations de l'estuaire et une station d'un autre cours d'eau où de telles valeurs sont connues. Cette dernière station, qui servira de référence, doit présenter une situation et une superficie de bassin voisines de celles du bassin du Kourou. La station d'Adieu Vat sur le Courcibo a été alors retenue (fig. 2). Les principales valeurs hydrologiques, observées par l'O.R.S.T.O.M. de 1953 à 1957 et de 1969 à 1976, ont pu y être rétablies sur une période de 25 ans (1952-1976).

TABLEAU I
SUPERFICIES ET RAPPORTS DES SUPERFICIES DES BASSINS DU KOUROU ET DU COURCIBO

Cours d'eau	Station	Superficie (km ²)	Rapport/n° VI	Rapport/Adieu Vat
Kourou	I	1 870	2,213	0,770
	II	1 660	1,964	0,683
	III	1 640	1,941	0,675
	IV	1 590	1,882	0,654
	V	1 390	1,645	0,572
	VI	845	1	0,348
Courcibo	Adieu Vat	2 430	2,876	1

Aussi, pour évaluer un débit fluvial de fréquence donnée dans l'estuaire du Kourou, deux possibilités peuvent être retenues :

- 1) Appliquer à un débit du Courcibo le coefficient égal au rapport des superficies des bassins.
- 2) Calculer le débit de fréquence donnée à Léodate, dans le Kourou, en appliquant au débit correspondant du Courcibo un coefficient égal au rapport des débits observés en 1976 aux deux stations en cause. Le débit recherché à une station estuarienne est ensuite estimé en multipliant le débit à Léodate par le rapport des superficies des bassins concernés.

La superficie de chaque bassin versant, ainsi que le rapport des superficies avec celle du bassin n° VI et celle du Courcibo à Adieu Vat, sont indiqués dans le tableau I, tandis que les résultats fournis par les méthodes 1 et 2 précitées sont mentionnés dans le tableau II.

TABLEAU II

DÉBITS D'ÉTIAGE DE FRÉQUENCES VARIÉES, OBSERVÉS OU ESTIMÉS POUR LE COURCIBO A ADIEU VAT, LA RIVIÈRE DU KOUROU A LÉODATE ET L'ESTUAIRE DU KOUROU A GOURDONVILLE
(Les valeurs estimées sont présentées entre parenthèses)

<i>Débit moyen mensuel minimum</i>							
<i>Fréquence</i>	<i>1976</i>	<i>Moyenne</i>		<i>Décennal</i>		<i>Minimum observé</i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
<i>Mode d'estimation</i>							
Adieu Vat	29,7 (F = 0,25)	35,3	—	24,4	—	18,5	—
Léodate	10,0	(12,3)	(11,9)	(8,5)	(8,2)	(6,4)	(6,2)
Gourdonville	(18,8)	(23,1)	(22,4)	(16,0)	(15,5)	(12,1)	(11,7)

<i>DCE</i>							
<i>Fréquence</i>	<i>1976</i>	<i>Moyenne</i>		<i>Décennal</i>		<i>Minimum observé</i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
<i>Mode d'estimation</i>							
Adieu Vat	22,8 (F = 0,32)	25,7	—	17,2	—	16	—
Léodate	6,0	(8,9)	(6,2)	(5,8)	(4,5)	5,4	(4,2)
Gourdonville	(11,3)	(16,8)	(12,7)	(11,2)	(8,5)	(10,5)	(7,9)

<i>Débit journalier minimum</i>							
<i>Fréquence</i>	<i>1976</i>	<i>Moyenne</i>		<i>Décennal</i>		<i>Minimum observé</i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
<i>Mode d'estimation</i>							
Adieu Vat	22,1 (F = 0,57)	20,9	—	12,3	—	10	—
Léodate	5,3	(7,3)	(5,0)	(4,3)	(3,0)	(3,5)	(2,4)
Gourdonville	(10,0)	(13,7)	(9,4)	(8,2)	(5,6)	(6,5)	(4,5)

4.2. LE RÉGIME HYDROLOGIQUE

La similitude des régimes hydrologiques en Guyane française (G. HIEZ et P. DUBREUIL, 1964) permet de définir celui de la rivière Kourou par référence aux régimes des autres cours d'eau étudiés depuis vingt-cinq ans.

Le régime hydrologique est du type équatorial de transition australe. Ainsi sont généralement observées deux saisons de hautes eaux, séparées vers mars par une petite saison sèche, auxquelles succède la grande saison de tarissement. L'irrégularité d'apparition du « petit été de mars » est telle que celui-ci se déplace de la mi-février à la mi-avril et peut manquer certaines années. Au cours de cette saison, la diminution des débits, qui restent en général supérieurs à ceux de l'étiage annuel, est parfois peu marquée. Le régime présente des caractères de transition prononcés, avec quatre à cinq mois de hautes eaux, d'avril à juillet, les mois de mai, puis de juin, étant toujours les plus abondants. Le tarissement, troublé par des crues secondaires de faible importance, commence en août et conduit à un étiage qui survient généralement d'octobre à la mi-décembre.

Il faut signaler qu'au cours de la présente étude, l'étiage a débuté fin septembre pour se terminer à la mi-novembre.

4.3. QUANTITÉS ET FRÉQUENCES DES APPORTS FLUVIAUX A L'ESTUAIRE

4.3.1. Les modules

Le débit moyen pluriannuel à Adieu Vat étant de $95 \text{ m}^3/\text{s}$, ce même débit serait alors, compte tenu du rapport des superficies des bassins, de $33 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station n° VI de la rivière Kourou. Le module ainsi évalué, aux cinq stations de l'estuaire du Kourou, varie d'amont en aval de 54 à $73 \text{ m}^3/\text{s}$, avec notamment une valeur proche de $62 \text{ m}^3/\text{s}$ à Gourdonville.

4.3.2. Les débits moyens mensuels

Il se confirme que le rapport des débits moyens observés pendant l'étiage 1976 entre le Kourou, à Léodate, et le Courcibo, à Adieu Vat, avec $0,34$, est peu différent de la valeur $0,35$ correspondant au rapport des superficies des bassins.

Durant l'étude, le débit moyen mensuel minimum, à Adieu Vat, a une fréquence de $0,25$. Une fréquence analogue peut être retenue pour le débit moyen mensuel minimum mesuré au même moment dans le Kourou.

En 1976, d'après les observations réalisées à Léodate, le débit moyen mensuel à Gourdonville est estimé à $35 \text{ m}^3/\text{s}$ en septembre, $19 \text{ m}^3/\text{s}$ en octobre, $23 \text{ m}^3/\text{s}$ en novembre et $103 \text{ m}^3/\text{s}$ en décembre.

Les débits moyens mensuels minimums à Gourdonville, évalués par les méthodes 1 et 2 précédemment exposées, sont sensiblement identiques. La valeur moyenne pluriannuelle est de $23 \text{ m}^3/\text{s}$, celle de fréquence décennale de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ et le minimum absolu, sur 13 ans, de $12 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le débit moyen pluriannuel des mois d'étiage peut être évalué à Gourdonville à $25 \text{ m}^3/\text{s}$ en octobre et à $27 \text{ m}^3/\text{s}$ en novembre.

Il faut également signaler que la fréquence d'apparition du débit moyen mensuel minimum est de $0,5$ en octobre, $0,4$ en novembre et de $0,1$ en mars.

4.3.3. Débits caractéristiques d'étiage et débits journaliers minimums

L'estimation des débits d'étiage de fréquences déterminées dans l'estuaire du Kourou est basée sur les 24 années de résultats obtenus à Adieu Vat, de 1953 à 1976. A cette station de référence, la distribution des débits journaliers minimums et des débits caractéristiques d'étiage (DCE) a été ajustée à la loi de Gauss (fig. 7), permettant ainsi d'attribuer des fréquences de $0,32$ au DCE et de $0,57$ au débit journalier minimum du Courcibo en 1976.

Le débit caractéristique d'étiage, de $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$, et le débit journalier minimum, de $5,3 \text{ m}^3/\text{s}$, tels qu'ils ont été mesurés dans la rivière Kourou à Léodate durant l'étude, correspondent dans l'estuaire, à Gourdonville, à des valeurs de $11,3$ et $10,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le débit caractéristique d'étiage, à la station de Gourdonville, selon les deux méthodes d'évaluation utilisées (cf. § 4.2.) serait en moyenne de 13 à $17 \text{ m}^3/\text{s}$. Le DCE de fréquence décennale et le DCE minimum absolu (sur 13 ans) seraient respectivement compris entre $8,5$ et $11 \text{ m}^3/\text{s}$, et 8 et $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le débit journalier minimum, à Gourdonville, est de même estimé entre $9,4$ et $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la moyenne, entre $5,6$ et $8,2 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la fréquence décennale, et entre $4,5$ et $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le minimum absolu.

En conclusion, avec une fréquence comprise entre $0,57$ pour le débit journalier minimum et $0,25$ pour le débit moyen mensuel, la sévérité de l'étiage 1976 ne semble pas avoir été en rapport avec la rigueur de la saison sèche.

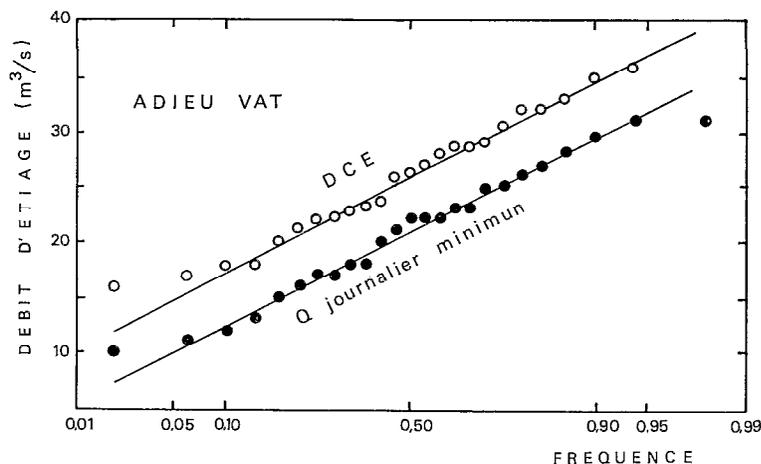


Fig. 7. — Le Courcibo à Adieu Vat.
Ajustement des débits caractéristiques d'étiage (DCE)
et des débits journaliers minimums à une loi de Gauss

Cette distorsion s'explique probablement par l'exceptionnelle saison des pluies qui, durant les mois précédents, avait assuré une recharge maximale des nappes souterraines.

4.4. INCIDENCE DU POMPAGE SUR LES APPORTS FLUVIAUX

Pour une usine produisant 800 t de pâte de bois par jour, les besoins en eau s'élèvent à 62 m³/t pour le traitement du bois et à 75 m³/t pour les circuits de refroidissement. La consommation totale d'eau atteint ainsi 1,3 m³/s.

Comparés aux possibilités offertes par l'apport fluvial à l'estuaire du Kourou à Gourdonville, le pompage consommerait 6% du débit moyen mensuel minimum évalué sur plusieurs années (23 m³/s), 8% du débit moyen mensuel minimum de fréquence décennale (16 m³/s), 8 à 10% du DCE moyen pluriannuel (13 à 17 m³/s), et 12 à 15% du DCE de fréquence décennale (8,5 à 11 m³/s).

Ces valeurs, tout en démontrant sur le seul plan quantitatif les possibilités d'alimentation en eau d'une usine par pompage des eaux douces dans la zone supérieure de l'estuaire, permettront d'estimer l'écart induit sur les dérives de flot et de jusant dont l'étude est développée dans les paragraphes suivants.

5. RISQUE DE POLLUTION LIÉ AUX MOUVEMENTS OSCILLANTS

5.1. MODE D'ÉCOULEMENT ET INCIDENCE SUR LE RISQUE DE POLLUTION

Les mesures effectuées à l'aide de moulinets aux stations d'observation confirment que les eaux du fond se déplacent moins rapidement que celles de surface ; la répartition des vitesses longitudinales sur une verticale est généralement de forme parabolique (fig. 5). Cependant, fréquemment, ces vitesses peuvent demeurer quasi constantes sur une grande profondeur en dessous de la surface. Un exemple de la variation des vitesses mesurées à différentes profondeurs, au milieu de la section, pendant une période de marée, est illustré sur la figure 8.

Cette variation verticale des vitesses longitudinales se réalise sous l'influence :

- du frottement sur le fond ;
- de la morphologie du fond à proximité de la verticale de mesure ;
- de la densité des eaux essentiellement fonction des salinités, des teneurs en matières en suspension et de la température qui sont elles-mêmes stratifiées ;
- du frottement des vents à la surface des eaux. De secteur N.E. à S.E., les vents doivent freiner le jusant

et accélérer le flot. L'intensité de cette force est probablement supérieure au cours du jusant en raison du plus grand impact sur la houle que créent les vents de sens opposé au courant.

Les mesures au moulinet aussi bien que les observations de flotteurs dérivants montrent que les vitesses de surface, en bordure des rives, sont généralement peu différentes de celles qui sont observées au milieu de l'estuaire. Elles peuvent être aussi bien légèrement inférieures que supérieures mais, sur un long parcours, ces écarts tendent à se compenser.

Il est observé par ailleurs que des flotteurs dont une partie est immergée à 2 m de profondeur n'empruntent pas des trajets significativement différents des flotteurs de surface.

Il existe, en surface, une traînée longitudinale, de un à plusieurs mètres de largeur, qui, non seulement présente un reflet différent des eaux environnantes, mais aussi rassemble une grande diversité de produits flottés allant de l'écume, aux feuilles mortes jusqu'aux troncs d'arbres. Cette traînée dessine un tracé assez sinueux, si bien qu'après avoir occupé sur quelques centaines de mètres ou kilomètres le milieu de l'estuaire, elle peut se rapprocher d'une rive, et même y disparaître totalement dans la végétation pour réapparaître plus loin.

Or, des flotteurs, lâchés simultanément des deux bords de la section, tendent à converger pour rejoindre la traînée longitudinale où ils poursuivent leur dérive. Ces observations mettent en évidence l'existence d'une composante transversale de la vitesse qui, en surface, est dirigée vers la traînée laquelle marque ainsi le front de convergence des courants où ceux-ci portent au fond. D'où la déduction de l'existence d'une composante transversale, dirigée en sens inverse de celle de surface, et effective à une profondeur qui ne peut être précisée.

Le système de circulation serait ainsi fréquemment constitué de deux cellules de convection de dimensions relatives variables. Toutefois, lorsque l'estuaire s'élargit, les fronts de convergence de plusieurs cellules peuvent être identifiés.

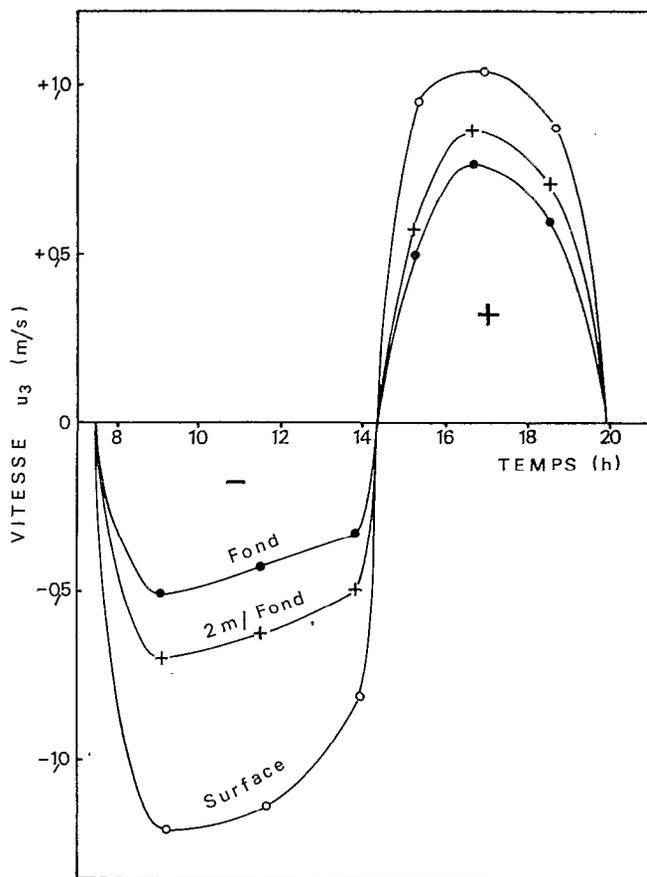


Fig. 8. — Exemple de la variation des vitesses au milieu de la section au cours d'une période de marée dans l'estuaire du Kourou à la station des Pères

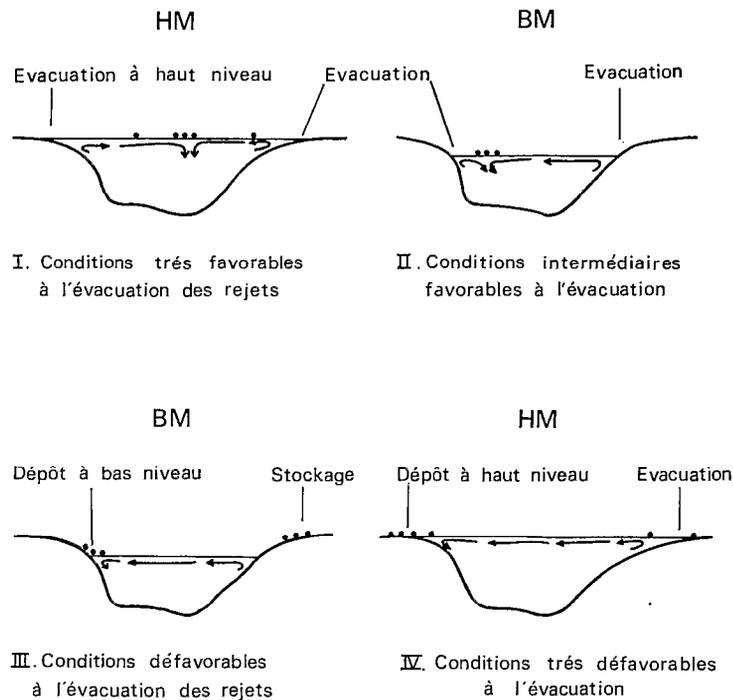


Fig. 9. — Schéma de différentes conditions d'établissement des composantes transversales de vitesses dans une section de l'estuaire, pouvant entraîner le dépôt sur les rives ou le maintien des déchets flottés au milieu de la section où ils sont évacués vers l'aval ou l'amont par la composante longitudinale

De tels mouvements, qui doivent grandement favoriser les mélanges entre les eaux de surface et celles de profondeur, augmenteraient, dans l'hypothèse de rejets abondants de déchets légers, le risque de pollution des rives. En effet, de nombreux débris flottés peuvent demeurer rassemblés en surface au sein du front de convergence car la force composante verticale du courant y est insuffisante pour les entraîner en profondeur.

Souvent, après ou dans un méandre, une cellule de convection disparaît au profit d'une autre ; la traînée longe alors la rive et sa largeur diminue considérablement. Les débris se déposent alors sur la rive, ou sur la végétation ripicole. Par ailleurs, la localisation du front de convergence en un site varie avec la vitesse et le sens d'écoulement des eaux ainsi qu'avec la force et la direction des vents. Au cours d'une marée, le front peut balayer l'ensemble de la section et les courants transversaux peuvent reprendre alors une partie des débris antérieurement abandonnés sur les rives à un niveau inférieur.

Il est donc important de prendre en considération ces systèmes de circulation transversale car ils détermineraient en grande partie le devenir des déchets flottés provenant d'éventuels rejets industriels.

Dans l'estuaire, de tels déchets seraient déportés sur les rives où ils se déposeraient, piégés plus ou moins efficacement par la végétation, jusqu'à ce que la composante du courant, souvent à l'occasion d'une inversion du courant longitudinal, vire dans la direction susceptible de les libérer. La figure 9 illustre schématiquement différents cas de dépôt et d'évacuation de corps flottés sur les rives. Il est à souligner que le stockage sur les rives au cours des jusants, avec reprises successives pendant les flots, pourrait entraîner une dérive importante des débris vers l'amont. Ainsi, des bouteilles lâchées à la confluence de la crique des Pères ont été aperçues une dizaine de jours plus tard, 25 km en amont, alors que d'une part la dérive maximale de flot au cours d'une période de forte marée ne dépassait pas 17 km, et que de plus, la résultante des dérives de flot et de jusant était orientée vers l'aval (voir § 5.4.).

5.2. VITESSES D'ÉCOULEMENT

5.2.1. Vitesses maximales et moyennes mesurées aux moulinets

Les mesures réalisées aux moulinets à travers les sections d'observation permettent de prendre en considération différents types de vitesses de déplacement d'éventuels polluants dont les résultats sont résumés dans le tableau III :

$u_3 \text{ max}$: vitesse maximale du flot (+) et du jusant (—) au milieu de la section (verticale 3), 10 cm en dessous de la surface (s) et 35 cm au-dessus du fond (f), estimée sur la courbe $u_3 = f(t)$ tracée d'après les mesures effectuées au cours des périodes de marée (fig. 8).

\bar{u}_3 : vitesse moyenne au cours du flot et du jusant au milieu de la section (verticale 3), 10 cm en dessous de la surface (s) et 35 cm au-dessus du fond (f), estimée après planimétrage de l'aire délimitée par la courbe $u_3 = f(t)$ telle que

$$\bar{u}_3^{\pm} = \frac{1}{t^{\pm}} \int_0^{t^{\pm}} u_3^{\pm} dt$$

\bar{u} : vitesse moyenne au cours du flot et du jusant à travers toute la section d'après l'ensemble des vitesses mesurées, tel que

$$\bar{u}^{\pm} = V^{\pm} / \bar{A}t^{\pm} = \bar{Q}^{\pm} / \bar{A}^{\pm}$$

Selon les coefficients de marée, les vitesses maximales de surface ($u_3 \text{ max}$) ont varié entre 0,35 et 1,25 m/s et les vitesses moyennes (\bar{u}) entre 0,30 et 0,80 m/s.

L'accroissement des vitesses maximales et moyennes, de flot et de jusant, est lié à celui du coefficient de marée.

Tant en surface qu'en profondeur, les vitesses maximales sont généralement plus fortes au jusant car les eaux fluviales, bloquées pendant le flot, s'écoulent alors vers l'aval. Toutefois, cette caractéristique n'apparaît pas aussi systématique pour les vitesses moyennes.

Les vitesses maximales croissent vers l'aval. Par contre, l'évolution longitudinale des vitesses moyennes apparaît moins nette.

Les vitesses maximales sont atteintes 1 à 3 heures après l'inversion du courant, souvent plus tôt pour le jusant que pour le flot.

5.2.2. Vitesses maximales et moyennes des dérives de flotteurs

Afin de connaître les vitesses de déplacement de polluants tout au long de l'estuaire, tant en direction de la mer que vers les prises d'eau amont, les dérives de flotteurs ont été mesurées depuis le point de rejet. Trois cas ont été ainsi observés :

- Dérives de flot dans le Kourou depuis le confluent de la crique des Pères ;
- Dérives de jusant dans la crique des Pères et dans le Kourou depuis le confluent de la crique Ouayabo ;
- Dérives de jusant dans le Kourou depuis le confluent de la crique des Pères.

Les lâchés ont eu lieu pour le flot, dès l'inversion du courant à marée basse, et pour le jusant, dès l'inversion du courant à marée haute.

La courbe de dérive en fonction du temps (fig. 10 à 12) permet d'estimer la vitesse du courant sur un parcours déterminé. La courbe présente un tracé en S. En moyenne 1 h à 1 h 30 après l'inversion, la vitesse, alors maximale, devient constante puis diminue une à plusieurs heures avant l'inversion suivante.

Le tableau III présente les valeurs des vitesses moyennes et maximales de ces dérives, mesurées sur les parcours précédents pour différents coefficients de marée et débits fluviaux amont (Q_f).

Au cours de la dérive aval depuis le confluent de la crique des Pères, les vitesses maximales sont comprises entre 1,05 et 1,20 m/s pour des coefficients de marée variant de 82 à 107. Ces vitesses maximales mesurées aux mêmes points 2 à 3 h plus tard, après dérive dans la crique des Pères, sont échelonnées entre 0,65 et 1,00 m/s. Elles apparaissent donc inférieures aux premières.

Les vitesses maximales vers l'amont, à partir du confluent de la crique des Pères, varient entre 0,60 et 1,07 m/s pour des coefficients de 46 à 113. A coefficient égal, la dérive amont est plus lente que la dérive aval.

Les vitesses moyennes tendent également à augmenter avec le coefficient de marée (tableau III).

TABLEAU III

VITESSES D'ÉCOULEMENT (m/s) MAXIMALES ET MOYENNES DU FLOT (+) ET DU JUSANT (—)
MESURÉES DANS L'ESTUAIRE DU KOUROU (s : surface, f : fond)

GUATEMALA I

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	u ₃ maximum		\bar{u}_3		\bar{u}	
		+	—			+	—	+	—	+	—
A	24-9	111	109	33,8	s	1,08	1,10	0,76	0,87	0,64	0,60
					f	0,66	0,66	0,43	0,43		
B	30-9	57	54	40,7	s	0,55	0,81	0,38	0,50	0,42	0,38
					f	0,48	0,17	0,28	0,11		
C	7-10	86	83	26,7	s	1,18	1,25	0,74	0,93	0,49	0,62
					f	0,33	0,59	0,22	0,35		
D	23-10	112	109	17,5	s	1,24	1,24	1,04	0,98	0,63	0,73
					f	0,69	0,69	0,41	0,51		
E	29-10	58	53	15,6	s	0,68	0,87	0,50	0,47	0,37	0,33
					f	0,25	0,31	0,14	0,21		
F	6-11	82	80	12,8	s	1,14	1,20	0,74	0,82	0,46	0,47
					f	0,57	0,71	0,34	0,41		

PÈRES II

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	u ₃ maximum		\bar{u}_3		\bar{u}		\bar{u} flotteur		u maximum flotteur	
		+	—			+	—	+	—	+	—	+	—	+	—
A	25-9	114	114	27,6	s	0,87	1,12	0,76	0,92	0,73	0,63				
					f	0,83	0,37	0,54	0,29						
B	1-10	47	45	55,7	s	0,47	0,83	0,26	0,62	0,43	0,46				
					f	0,51	0,47	0,31	0,34						
C	8-10	88	87	22,3	s	0,89	1,13	0,71	0,80	0,63	0,56	0,60			0,60
	9-10		88	21,5	f	0,72	0,33	0,52	0,26				0,82	1,05	
D	24-10	113	113	15,3	s	1,04	1,21	0,85	1,02	0,77	0,62	0,70			0,81
	25-10		107	14,7	f	0,77	0,51	0,54	0,40				1,07	1,08	
E	30-10	48	46	13,9	s	0,71	1,00	0,48	0,66	0,44	0,41	0,42			0,68
					f	0,62	0,38	0,40	0,27						
F	7-11	83	83	11,3	s	0,85	1,08	0,66	0,84	0,58	0,53	0,60			0,98
	8-11		82	f	0,64	0,64	0,54	0,32	0,72				1,15		
G	15-11	47	—	11,4							0,42			1,07	
H	22-11	—	107	21,0							—	1,05	—	1,21	
	23-11	104	—	25,2							0,64			0,66	

TABLEAU III (suite)

VITESSES D'ÉCOULEMENT (m/s) MAXIMALES ET MOYENNES DU FLOT (+) ET DU JUSANT (—)
MESURÉES DANS L'ESTUAIRE DU KOUROU (s : surface, f : fond)

SOCOUMOU III

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	u ₃ maximum		\bar{u}_3	
		+	—			+	—	+	—
A	25-9	114	114	27,3	s	0,86	0,72	0,67	0,61
					f	0,33	0,45	0,21	0,36
B	1-10	47	45	55,0	s	0,58	0,61	0,45	0,41
					f	0,19	0,43	0,14	0,31
C	8-10	88	87	22,0	s	0,79	0,73	0,59	0,60
					f	0,31	0,46	0,23	0,38
D	24-10	113	113	15,1	s	0,87	0,87	0,68	0,69
					f	0,39	0,40	0,27	0,30
E	30-10	48	46	13,8	s	0,67	0,64	0,40	0,52
					f	0,23	0,38	0,15	0,29
F	7-11	83	83	11,2	s	0,76	0,79	0,58	0,53
					f	0,31	0,43	0,21	0,25

GOURDONVILLE IV

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	u ₃ maximum		\bar{u}_3		\bar{u}	
		+	—			+	—	+	—	+	—
A	26-9	112	109	25,2	s	0,79	0,68	0,60	0,61	0,49	0,47
					f	0,38	0,54	0,23	0,42		
B	2-10	46	45	31,5	s	0,55	0,62	0,41	0,43	0,31	0,38
					f	0,20	0,42	0,16	0,28		
C	9-10	88	88	20,6	s	0,74	0,61	0,60	0,54	0,45	0,45
					f	0,28	0,41	0,25	0,34		
D	25-10	111	107	14,1	s	0,79	0,66	0,65	0,59	0,51	0,47
					f	0,38	0,47	0,31	0,40		
E	31-10	46	46	12,8	s	0,64	0,57	0,42	0,44	0,35	0,36
					f	0,32	0,46	0,22	0,30		
F	8-11	83	82	11,0	s	0,79	0,62	0,56	0,51	0,44	0,42
					f	0,36	0,39	0,26	0,30		

TABLEAU III (suite)

VITESSES D'ÉCOULEMENT (m/s) MAXIMALES ET MOYENNES DU FLOT (+) ET DU JUSANT (-)
MESURÉES DANS L'ESTUAIRE DU KOUROU (s : surface, f : fond)

SARAMAGA V

N ^o	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	u ₃ maximum		\bar{u}_3	
		+	-			+	-	+	-
A	26-9	112	109	22,1	s	0,48	0,52	0,36	0,47
					f	0,36	0,45	0,25	0,38
B	2-10	46	45	27,5	s	0,35	0,49	0,25	0,36
					f	0,25	0,43	0,18	0,31
C	9-10	88	88	18,0	s	0,49	0,54	0,41	0,44
					f	0,39	0,44	0,27	0,36
D	26-10	111	107	12,1	s	0,56	0,55	0,41	0,44
					f	0,43	0,44	0,28	0,34
E	31-10	46	46	11,2	s	0,42	0,47	0,31	0,38
					f	0,33	0,36	0,23	0,28
F	8-11	83	82	9,6	s	0,54	0,49	0,37	0,37
					f	0,42	0,43	0,29	0,33

CRIQUE OUAYABO

N ₀	Date	Coefficient	Qf m ³ /s	s f	\bar{u} flotteur	u maximum flotteur crique des Pères	u maximum flotteur E. Kourou
D	23-10	112	17,5	s	0,76	0,97	0,84
F	6-11	82	12,8	s	0,56	0,64	0,64
G	14-11	47	12,6	s	0,28	0,34	—
H	21-11	105	21,0	s	0,76	0,99	0,99

La vitesse moyenne la plus élevée, de 1,07 m/s, a été mesurée entre le confluent de la crique des Pères et la mer pour un débit fluvial estimé à 14,7 m³/s, et un coefficient de marée de 107. Par contre, la vitesse moyenne minimale n'a atteint que 0,28 m/s dans la crique des Pères, pour un coefficient de 47. Il faut toutefois remarquer que les temps de dérive varient selon les marées et les parcours pris en considération.

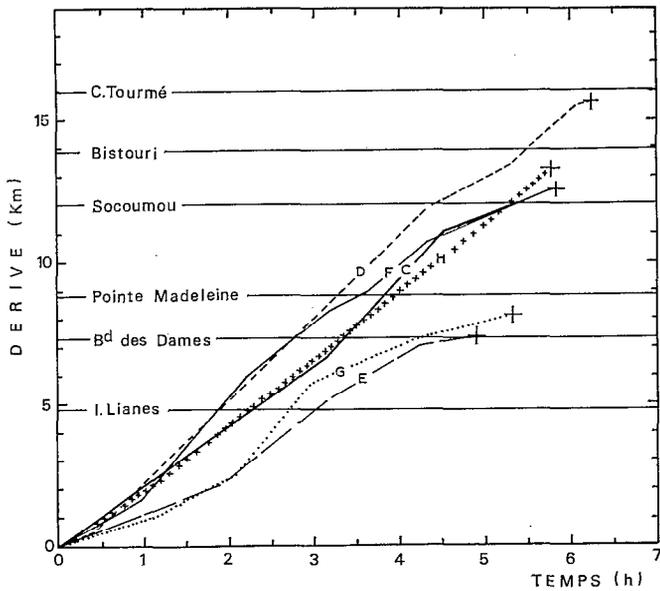


Fig. 10. — Dériver amont de flotteurs dans l'estuaire du Kourou depuis la confluence de la crique Ouayabo, au cours de différentes marées (cf. tableaux IV et V)

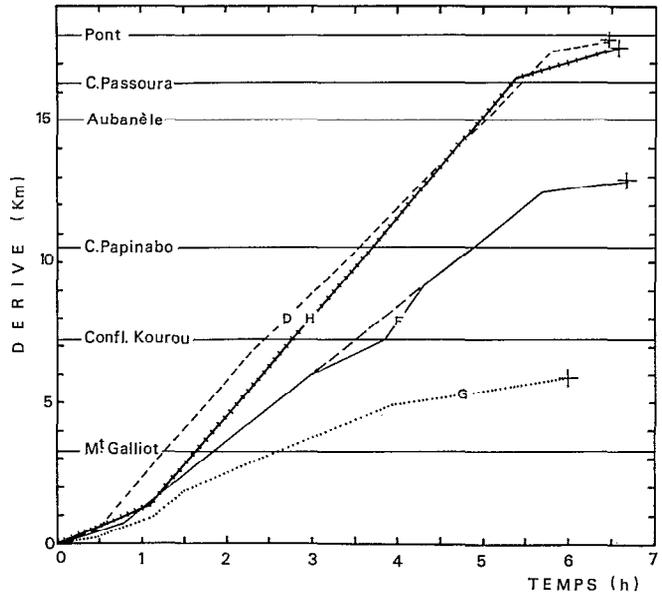


Fig. 11. — Dériver aval de flotteurs dans la crique des Pères puis l'estuaire du Kourou depuis la confluence de la crique Ouayabo (cf. tableaux IV et V)

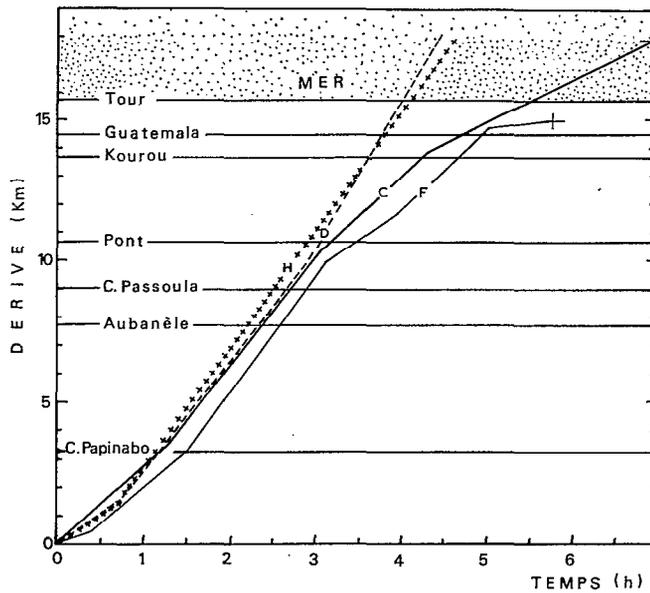


Fig. 12. — Dériver aval de flotteurs dans l'estuaire du Kourou depuis la confluence de la crique des Pères en direction de la mer, au cours de différentes marées (cf. tableaux IV et V)

5.3. VOLUMES ET DÉBITS OSCILLANTS

Les volumes d'eau oscillants au cours du flot et du jusant aux stations Guatémala, Pères et Gourdonville, ainsi que les débits maximums et moyens correspondants sont présentés dans le tableau IV.

A chaque station, la relation entre le volume oscillant de flot ou de jusant et le coefficient de marée peut être ajustée à une droite (fig. 13 et 14).

Dans certains cas, il est tenu compte d'une correction de l'écart à la courbe en fonction du débit fluvial. Les deux droites représentatives du jusant et du flot tendent à être parallèles, le volume de jusant étant le plus élevé, à coefficients égaux. L'écart entre les deux droites équivaut théoriquement au volume de l'apport fluvial amont pendant une période de marée. Les relations étant ajustées pour des débits fluviaux de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la station des Pères et 11 à $31 \text{ m}^3/\text{s}$ pour Gourdonville les écarts théoriques devraient être respectivement de $0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et de $0,5$ à $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Les écarts constatés sont en moyenne de $0,5$ et $0,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, donc peu éloignés des valeurs théoriques.

Pendant l'étiage, pour un débit de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ à $13 \text{ m}^3/\text{s}$, les coefficients de marée, en variant de 35 à 118, déterminent les valeurs de volume oscillant minimales et maximales suivantes, en regard desquelles est mentionnée pour le jusant la part relative de l'apport fluvial.

Stations	Volumes oscillants (10^6 m^3)				Participation relative de l'apport fluvial (%) au cours du jusant	
	Maximum (coefficient : 118)		Minimum (coefficient : 35)		Maximum (coefficient : 118)	Minimum (coefficient : 35)
	+	-	+	-	-	-
Guatémala I	25,3	25,8	8,4	10,6	2%	5%
Pères II	11,4	11,9	5,8	6,3	4%	8%
Gourdonville IV	5,5	5,7	3,6	4,0	9%	12%

Des relations volume oscillant - coefficient de marée, établies pour différentes stations de l'estuaire (fig. 13 et 14), il est possible de tracer les relations volume oscillant - distance à l'embouchure, pour des coefficients de marée déterminés. Ainsi, en n'importe quelle section de l'estuaire, le volume oscillant peut être évalué en fonction de l'importance de la marée (fig. 15).

TABLEAU IV

DÉBITS MAXIMUMS (m^3/s), DÉBITS MOYENS (m^3/s) ET VOLUMES (10^6 m^3) OSCILLANTS DANS L'ESTUAIRE DU KOUROU

GUATÉMALA I

N°	Date	Coefficient		Qf m^3/s	Q maximum		\bar{Q}		V	
		+	-		+	-	+	-	+	-
A	24-9	111	109	33,8	1 830	1 360	1 080	1 000	23,3	25,2
B	30-9	57	54	40,7	990	950	648	598	12,2	14,9
C	7-10	86	83	26,7	1 435	1 265	800	1 010	19,2	20,7
D	23-10	112	109	17,5	2 000	1 360	1 100	1 180	24,4	22,3
E	29-10	58	53	15,6	935	860	560	516	12,4	11,3
F	6-11	82	80	12,8	1 270	1 150	769	779	17,3	16,6

TABLEAU IV (suite)

DÉBITS MAXIMUMS (m^3/s), DÉBITS MOYENS (m^3/s) ET VOLUMES ($10^6 m^3$) OSCILLANTS DANS L'ESTUAIRE DU KOUROU

PÈRES II

N°	Date	Coefficient		Qf m^3/s	Q maximum		\bar{Q}		V	
		+	-		+	-	+	-	+	-
A	25-9	114	114	27,6	740	600	552	470	10,6	12,0
B	1-10	47	45	55,7	430	460	317	337	5,9	8,3
C	8-10	88	87	22,3	645	545	472	417	9,2	10,5
D	24-10	113	113	15,3	645	880	585	466	11,4	11,6
E	30-10	48	46	13,9	500	490	324	307	6,6	7,1
F	7-11	83	83	11,3	620	580	436	396	8,9	9,5

GOURDONVILLE IV

N°	Date	Coefficient		Qf m^3/s	Q maximum		\bar{Q}		V	
		+	-		+	-	+	-	+	-
A	26-9	112	109	25,2	350	330	260	250	5,7	5,7
B	2-10	46	45	31,5	230	290	160	200	3,2	5,1
C	9-10	88	88	20,6	310	330	240	240	4,8	5,7
D	25-10	111	107	14,1	360	330	270	250	5,3	5,9
E	31-10	46	46	12,8	280	260	180	185	3,9	4,4
F	8-11	83	82	11,0	320	290	230	220	4,7	4,8

Ces relations ont été établies pour des débits fluviaux compris entre 11 et 41 m^3/s , correspondant à un apport fluvial de $0,5 \cdot 10^6$ à $1,8 \cdot 10^6 m^3$; pour un accroissement du débit fluvial de 10 m^3/s le volume du jusant augmenterait théoriquement d'environ $0,5 \cdot 10^6 m^3$.

5.4. DÉRIVES DES POLLUANTS AU COURS D'UNE PÉRIODE DE MARÉE

5.4.1. Les différents types de dérives étudiés

La dérive oscillante est une notion importante en ce qui concerne l'estimation du risque de pollution, puisqu'elle correspond à la distance parcourue par les eaux, et donc par d'éventuels polluants, de part et d'autre d'un site pendant un temps déterminé. Sa détermination permet en particulier de situer la position des eaux de marée basse à la marée haute suivante et vice-versa.

Il est également nécessaire de prendre en considération la résultante des dérives, représentée par la différence entre les dérives de flot et de jusant, qui peut, si elle est positive, assurer une lente remontée des déchets vers l'amont.

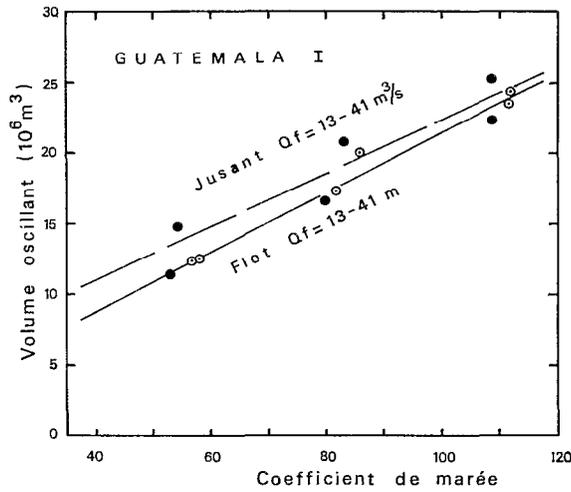


Fig. 13. — Relation entre le volume oscillant et le coefficient de marée dans l'estuaire du Kourou à Guatémala, pendant l'étiage

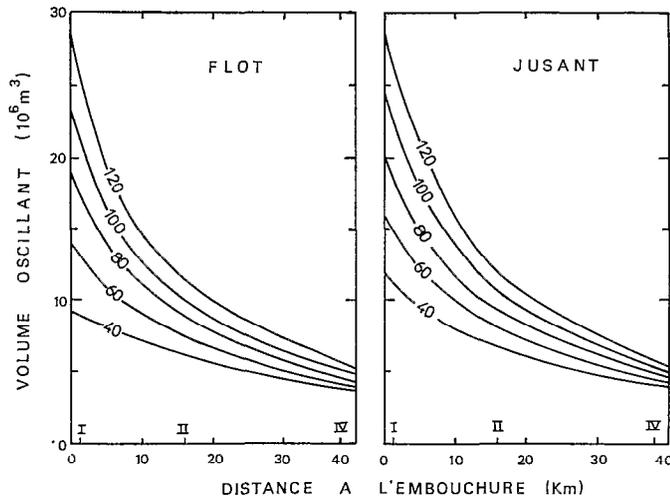


Fig. 15. — Volume oscillant dans l'estuaire du Kourou en fonction de la distance à l'embouchure et du coefficient de marée, pendant l'étiage

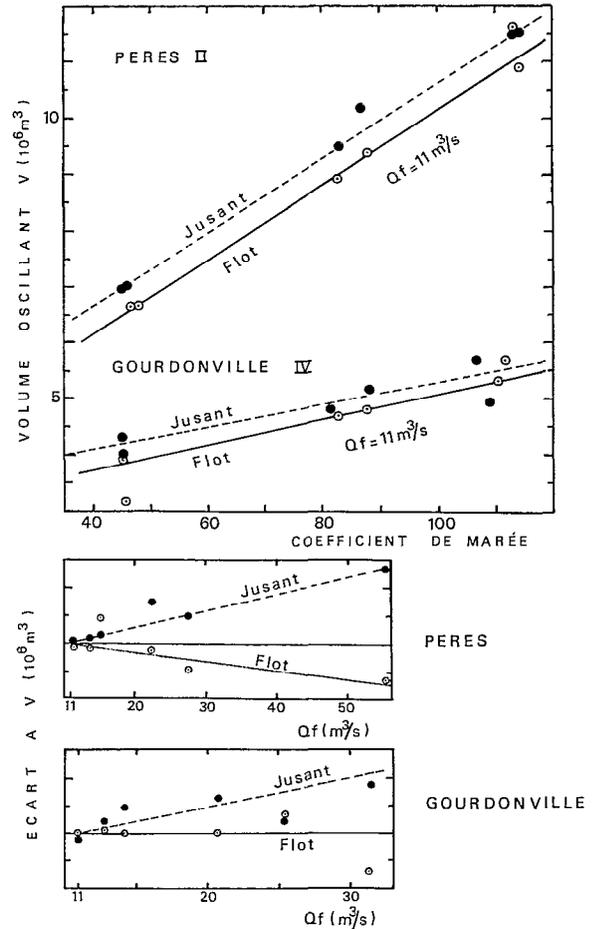


Fig. 14. — Relation entre le volume oscillant et le coefficient de marée dans l'estuaire du Kourou aux Pères et à Gourdonville, pendant l'étiage. Ecart du volume oscillant en fonction du débit fluvial amont

Trois types de dérives ont été pris en considération (cf. § méthodes 2.1.1.) :

$\Delta x_3 = \int_0^t u_3 dt$: dérive de surface ou de fond, estimée au milieu de la section à la verticale 3. La valeur ainsi établie ne peut être qu'une valeur approchée car l'expression mathématique implique que la vitesse ne varie pas longitudinalement et que la durée du jusant à la section de mesure soit égale à la durée de la dérive depuis la section.

$\overline{\Delta x} = \overline{V} / \overline{A}$: dérive estimée à travers toute la section. Elle représente la dérive du front moyen du volume

oscillant depuis la section, mais n'est également qu'une valeur approchée car les deux paramètres, volume oscillant et section moyenne, varient longitudinalement.

Δx : dérive d'un flotteur de surface. Compte tenu de la méthode employée, sa valeur doit être voisine de la dérive maximale atteinte par des éléments dissous ou en suspension.

Les résultats obtenus aux différents sites de l'estuaire sont reportés dans le tableau V.

TABLEAU V

DÉRIVES (km) DE FLOT (+) ET JUSANT (—) MESURÉES DANS L'ESTUAIRE DU KOUROU
AU COURS DE DIFFÉRENTES MARÉES (s : surface, f : fond)

GUATÉMALA I

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	Δx_3		$\overline{\Delta x}$	
		+	—			+	—	+	—
A	24-9	111	109	33,8	s	16,5	22,1	13,7	15,1
					f	9,2	10,8		
B	30-9	57	54	40,7	s	7,1	12,5	7,9	9,4
					f	5,3	2,7		
C	7-10	86	83	26,7	s	15,9	20,9	11,4	12,8
					f	4,7	7,9		
D	23-10	112	109	17,5	s	20,0	21,0	14,1	13,8
					f	7,9	11,0		
E	29-10	58	53	15,6	s	10,1	10,6	8,1	7,2
					f	2,8	4,7		
F	6-11	82	80	12,8	s	15,7	18,5	10,3	10,0
					f	7,2	9,1		

PÈRES II

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	Δx_3		$\overline{\Delta x}$		$\Delta x_{\text{flotteur}}$	
		+	—			+	—	+	—	+	—
A	25-9	114	114	27,6	s	14,3	23,6	14,0	16,0	—	—
					f	10,3	7,5				
B	1-10	47	45	55,7	s	5,1	15,2	8,0	11,3	—	—
					f	6,0	8,4				
C	8-10	88	87	22,3	s	13,8	20,3	12,3	14,0	12,3	—
	9-10		88	21,5	f	10,2	6,5				
D	24-10	113	113	15,3	s	16,9	25,2	15,0	15,3	15,6	—
	25-10		107	14,7	f	10,7	9,8				
E	30-10	48	46	13,9	s	9,1	16,1	9,0	9,5	7,4	—
					f	7,8	6,7				
F	7-11	83	83	11,3	s	13,4	20,0	11,8	12,7	12,5	—
	8-11		82	—	f	10,9	7,7				
G	15-11	47	—	11,4	—	—	—	—	—	8,1	—
H	22-11	—	107	21,0	—	—	—	—	—	—	> 15,7
	23-11	104	—	25,2	—	—	—	—	—	13,3	—

TABLEAU V (suite)

DÉRIVES (km) DE FLOT (+) ET JUSANT (—) MESURÉES DANS L'ESTUAIRE DU KOUROU
AU COURS DE DIFFÉRENTES MARÉES (s : surface, f : fond)

SOCOUMOU III

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	Δ x ₃		Δ x	
		+	—			+	—	+	—
A	25-9	114	114	27,3	s	14,4	14,1		
					f	4,5	8,4		
B	1-10	47	45	55,0	s	8,4	10,4		
					f	2,6	8,0		
C	8-10	88	87	22,0	s	11,8	14,8		
					f	4,6	9,4		
D	9-10		88	21,3					14,0
	24-10	113	113	15,1	s	13,4	17,0		
E	30-10	48	46	13,8	s	8,9	11,6		
					f	3,4	6,3		
F	7-11	83	83	11,2	s	10,8	12,8		
					f	4,0	5,9		

GOURDONVILLE IV

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	Δ x ₃		Δ x	
		+	—			+	—	+	—
A	26-9	112	109	25,2	s	12,9	13,2	10,7	10,7
					f	5,0	9,7		
B	2-10	46	45	31,5	s	8,4	10,8	6,2	9,8
					f	3,3	7,0		
C	9-10	88	88	20,6	s	11,9	12,8	9,1	10,8
					f	4,9	8,0		
D	25-10	111	107	14,1	s	12,8	13,7	9,9	11,1
					f	6,1	9,3		
E	31-10	46	46	12,8	s	9,2	10,1	7,6	8,5
					f	4,7	6,8		
F	8-11	83	82	11,0	s	11,4	11,0	9,0	9,2
					f	5,2	6,6		

TABLEAU V (suite)

DÉRIVES (km) DE FLOT (+) ET DE JUSANT (-) MESURÉES DANS L'ESTUAIRE DU KOUROU
AU COURS DE DIFFÉRENTES MARÉES (s : surface, f : fond)

SARAMACA V

N°	Date	Coefficient		Qf m ³ /s	s f	Δ x ₃	
		+	-			+	-
A	26-9	112	109	22,1	s	7,1	11,4
					f	5,0	9,2
B	2-10	46	45	27,5	s	4,8	9,2
					f	3,4	8,0
C	9-10	88	88	18,0	s	8,5	10,4
					f	5,7	8,6
D	26-10	111	107	12,1	s	8,2	10,9
					f	5,7	8,5
E	31-10	46	46	11,2	s	6,8	8,4
					f	5,2	6,2
F	8-11	83	82	9,6	s	7,6	8,8
					f	5,9	7,8

CRIQUE OUAYABO

N°	Date	Coefficient	Qf m ³ /s	s f	Δ x
D	23-10	112	17,5	s	17,7
F	6-11	82	12,8	s	12,8
G	14-11	47	12,6	s	5,8
H	21-11	105	21,0	s	18,1

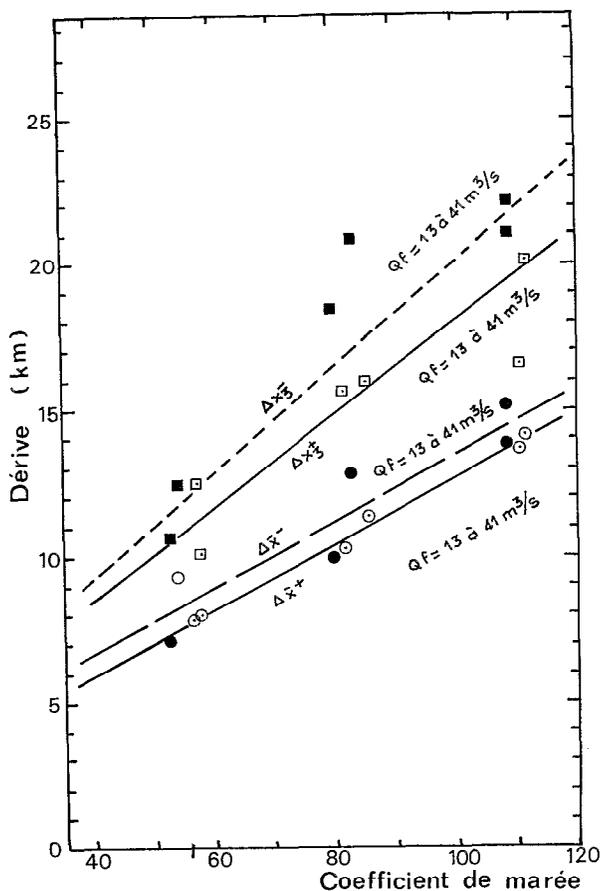
5.4.2. Relations dérive - coefficient de marée - débit fluvial

La dérive de flot et de jusant augmente avec le coefficient de marée. Lorsque le débit fluvial amont diminue, à coefficients de marée égaux, la dérive de flot croît car elle rencontre une opposition moindre, alors que celle du jusant décroît.

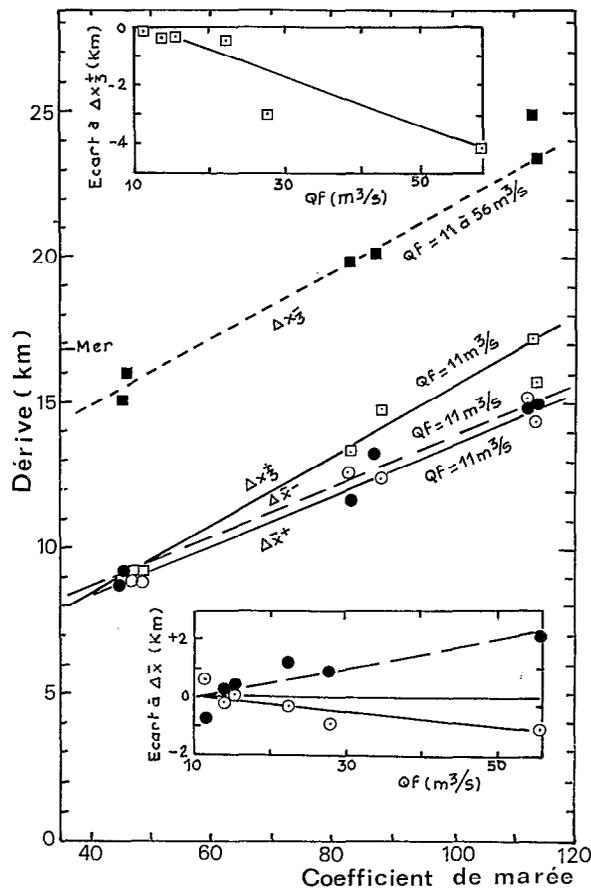
Ce phénomène est illustré sur la figure 16 par la relation établie à chaque site entre la dérive correspondant à un débit fluvial donné et le coefficient de marée. Cette relation s'ajuste à la forme linéaire. Pour chaque point représentatif d'une campagne de mesure, une correction de l'écart à la droite a été effectuée en fonction du débit fluvial sur la base d'une relation moyenne. Cette relation écart de la dérive - débit fluvial, tracée sur la figure 16, est également une droite. Cette forme toutefois est peut-être limitée à l'intervalle des débits d'étiage pris en considération.

Le débit de référence choisi pour la première relation, compris entre 10 et 13 m³/s selon les stations, est le plus faible survenu en 1977 aux sites de mesure. Toutefois, la gamme des débits fluviaux étant peu étendue lorsque les campagnes ont été effectuées, il arrive que l'influence de ce paramètre n'apparaisse pas nettement. La relation écart - débit fluvial n'a pas alors été tracée. Dans ce cas, il convient de considérer que la relation dérive - coefficient correspond à la gamme entière des débits fluviaux écoulés au moment des observations.

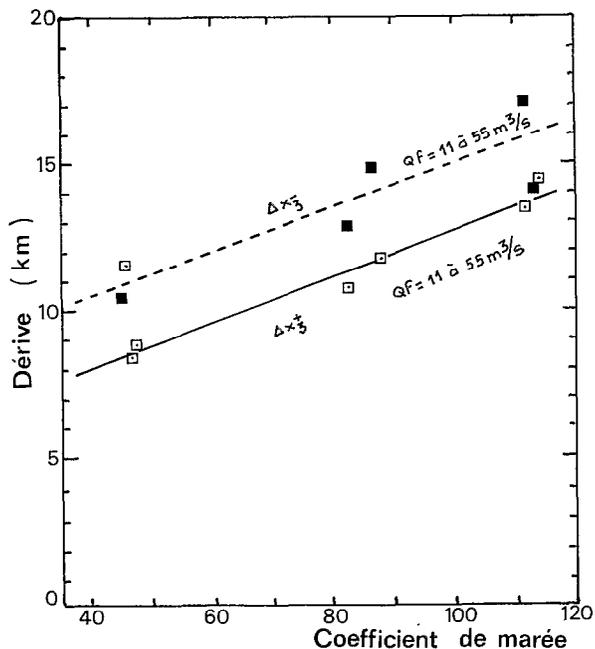
GUATEMALA I



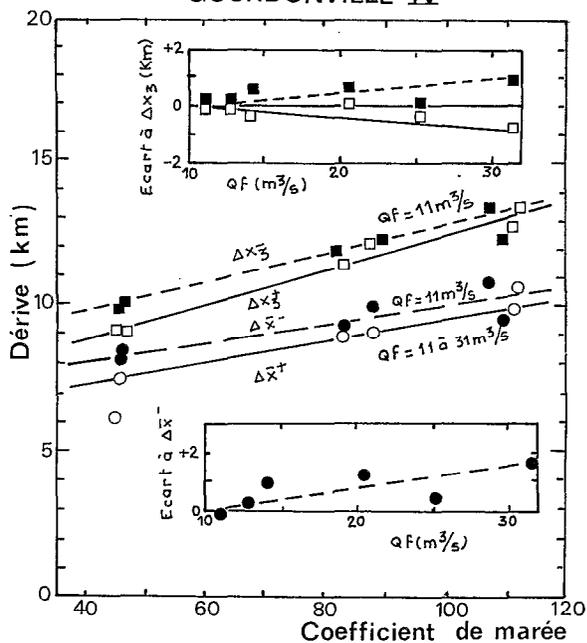
LES PÈRES II

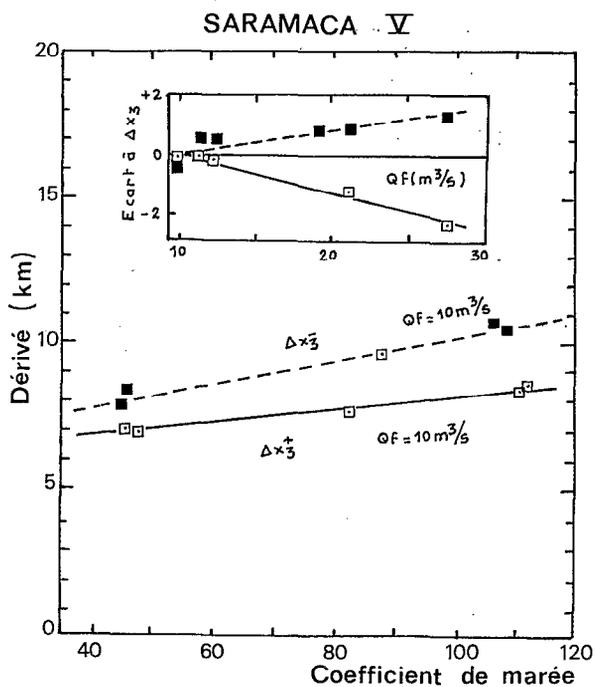
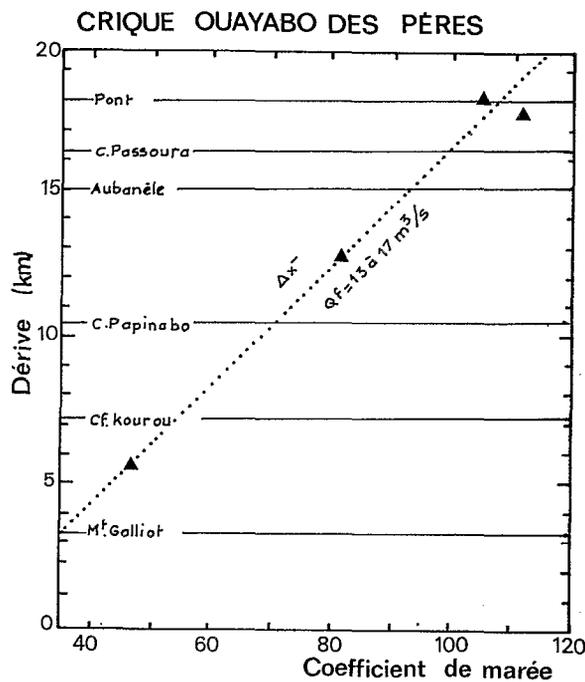
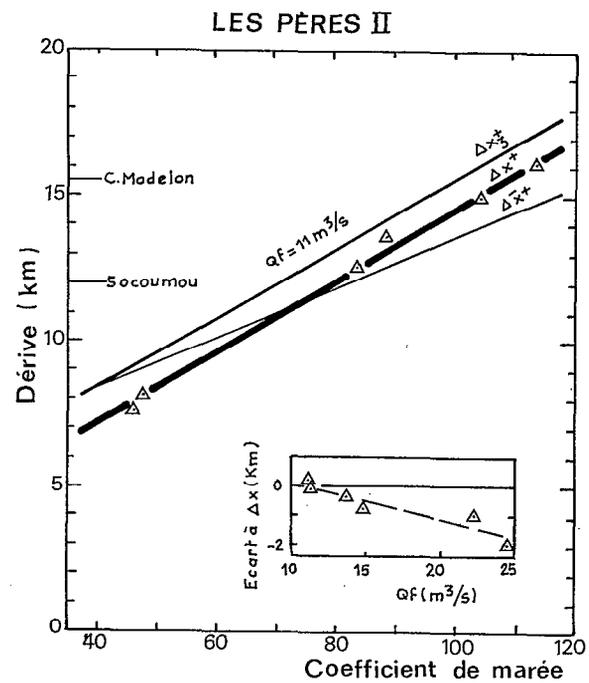


SOCOUMOU III



GOURDONVILLE IV





- LÉGENDE -
- - - - $\Delta x_3^- = \int_0^{t^-} u_3 dt$ (Jusant)
 - - - - $\Delta x_3^+ = \int_0^{t^+} u_3 dt$ (Flot)
 - - - - $\Delta \bar{x}^- = v^- / A^-$ (Jusant)
 - - - - $\Delta \bar{x}^+ = v^+ / A^+$ (Flot)
 - ▲ Δx^- : Flotteur (Jusant)
 - △ - - - Δx^+ : Flotteur (Flot)

Fig. 16. — Variations des dérives de flot et de jusant en fonction des coefficients de marée et du débit fluvial amont dans l'estuaire du Kourou, d'après les mesures effectuées au moulinet et au flotteur

On remarque que les droites de relations dérive - coefficient, de jusant et de flot, tendent à être parallèles, la dérive de jusant étant supérieure à celle de flot, à coefficients de marée et débits fluviaux égaux.

5.4.3. Comparaison des résultats relatifs aux différents types de dérives

La comparaison des dérives de flotteurs Δx , et des dérives Δx_3 de surface et $\Delta \bar{x}$, estimées sur la base des mesures au moulinet, peut être faite en plusieurs sites (fig. 16 et tableau V).

La valeur Δx_3 , obtenue par intégration des vitesses de surface au milieu de la section, apparaît toujours plus grande que la dérive moyenne $\Delta \bar{x}$ du front oscillant, les vitesses d'écoulement étant plus élevées en surface qu'en profondeur.

Lors du jusant, une dérive Δx^- , observée depuis Socoumou pour un coefficient de 88, correspond exactement à la valeur Δx_3^- . Deux dérives Δx , depuis les Pères, pour des coefficients de l'ordre de 85, se révèlent plus courtes que les valeurs Δx_3^- correspondantes mais plus longues que les dérives Δx^- . Par contre, pour des coefficients supérieurs à 110, deux dérives de flotteur à partir de cette station semblent peu différentes des dérives Δx_3^- , bien qu'elles n'aient pu être observées au-delà de l'embouchure.

Les relations dérive de flot - coefficient - débit ont pu être tracées pour les trois types de dérives (fig. 16) qui laissent apparaître que les droites représentatives de Δx^+ et Δx^{3+} sont parallèles, la dérive mesurée au moulinet en surface étant supérieure à la seconde de 1,0 km. Pour les marées à coefficient inférieur à 80, la dérive Δx^+ apparaît plus courte que la dérive $\Delta \bar{x}^+$ mais l'écart entre les deux valeurs demeure inférieur à 1,5 km.

On retiendra que les dérives mesurées en surface au moulinet et au flotteur s'avèrent peu différentes l'une de l'autre, si ce n'est que la première technique conduit, en général, à des résultats légèrement supérieurs à ceux de la seconde méthode.

5.4.4. Relation dérive - distance à l'embouchure

Les relations dérive-coefficient établies aux stations (fig. 16) permettent de tracer, pour un débit fluvial déterminé, les courbes de variation de la dérive en fonction de la distance à l'embouchure, chaque courbe correspondant à un coefficient de marée donné. Un tel abaque permet d'estimer la dérive à partir de n'importe quel point de l'estuaire.

Un tracé de ces courbes a été tenté pour la dérive Δx_3 de surface (fig. 17). Il convient de noter que ces courbes correspondent à une gamme de débits comprise entre 10 et 56 m³/s, mais ce facteur demeurant secondaire au cours de l'étiage (voir § 5.4.5.) n'entraîne pas, pendant cette période, une forte variation de la dérive.

5.4.5. Risque de pollution engendré par les dérives amont et aval

De la comparaison entre les relations dérive - coefficient de marée et écart de la dérive - débit fluvial (fig. 16), il ressort que, pendant l'étiage, l'influence du coefficient de marée prédomine nettement sur celle du débit fluvial pour déterminer la dérive.

Dans le cas précis relatif à l'examen du risque de pollution de la future prise d'eau de l'usine, il convient d'évaluer les influences respectives de ces deux facteurs sur la dérive de flot et de jusant depuis le confluent de la crique des Pères, ainsi que sur la dérive de jusant dans la crique des Pères et l'estuaire du Kourou depuis le confluent de la crique Ouayabo.

a) Dérives de flot depuis la confluence de la crique des Pères

L'écart entre le débit journalier minimum d'étiage de fréquence décennale et celui qui se produit au moins une fois par an, de 17 m³/s, détermine dans le Kourou une variation de dérive amont depuis le confluent de la crique des Pères de :

$$a \Delta x_3^+ = 0,7 \text{ km}, \quad a \Delta x^+ = 0,8 \text{ km}, \quad a \Delta \bar{x}^+ = 0,2 \text{ km}$$

Par contre un accroissement du coefficient de marée de 35 à 118 entraîne une variation de dérive de :

$$a \Delta x_3^+ = 10,0 \text{ km}, \quad a \Delta x^+ = 10,2 \text{ km}, \quad a \Delta \bar{x}^+ = 8,8 \text{ km}$$

Les coefficients des marées de vives-eaux d'équinoxe, qui coïncident avec la période d'étiage, varient entre 100 et 118. Cette variation engendre alors un écart vers l'amont de :

$$a \Delta x_3^+ = 2,2 \text{ km}, \quad a \Delta x^+ = 2,2 \text{ km}, \quad a \Delta \bar{x}^+ = 1,9 \text{ km}$$

On constate ainsi que la conjugaison d'un débit d'étiage décennal et d'un coefficient de marée de fréquence rare entraînerait une dérive maximale peu différente de celle qui serait déterminée par la conjugaison d'un débit

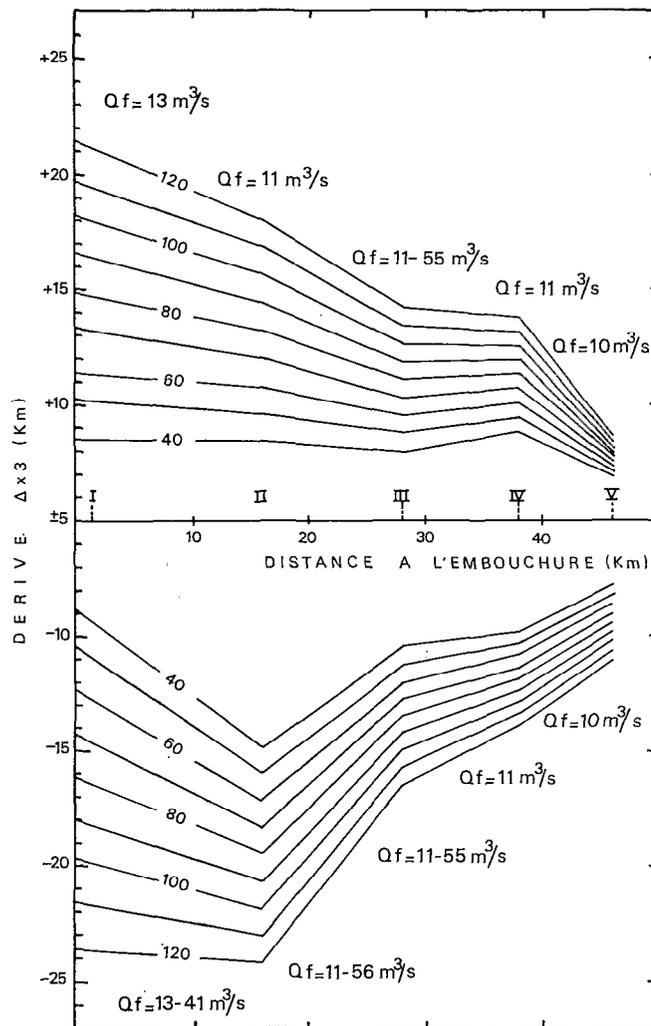


Fig. 17. — Dérive de surface dans l'estuaire du Kourou en fonction de la distance à l'embouchure et du coefficient de marée, pendant l'étiage fluvial

d'étiage de fréquence annuelle et d'un coefficient atteint plusieurs jours dans l'année, les écarts entre les deux valeurs étant :

$$a \Delta x_3^+ = 2,9 \text{ km}, \quad a \Delta x^+ = 3,0 \text{ km}, \quad a \Delta \bar{x}^+ = 2,1 \text{ km}$$

Dans des conditions de fréquence extrêmement faible, correspondant à la conjugaison d'un coefficient de marée de 118 et d'un débit journalier d'étiage de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ (minimum estimé sur la période 1952-1976), les dérives de flot depuis la confluence de la crique des Pères seraient :

$$\Delta x_3^+ = 18,1 \text{ km}, \quad \Delta x^+ = 17,3 \text{ km}, \quad \Delta \bar{x}^+ = 15,4 \text{ km}$$

La dérive maximale de 18,1 km, atteindrait ainsi un point situé à 4 km en aval de la future prise d'eau.

En considérant un coefficient de 115 et un débit journalier d'étiage décennal de $8 \text{ m}^3/\text{s}$, il est encore possible de considérer que la probabilité de telles conditions est égale ou inférieure à la décennale. Les dérives de flot seraient alors :

$$\Delta x_3^+ = 17,7 \text{ km}, \quad \Delta x^+ = 16,7 \text{ km}, \quad \Delta \bar{x}^+ = 15,1 \text{ km}$$

La dérive maximale, de 17,7 km, s'arrêterait ainsi à 4,5 km en aval de la future prise d'eau.

Une fois par an, il peut se produire qu'un débit d'étiage de 25 m³/s se conjugue avec un coefficient de 100, entraînant alors une dérive :

$$\Delta x_3 = 14,3 \text{ km}, \quad \Delta x^+ = 12,8 \text{ km}, \quad \Delta \bar{x}^+ = 13,2 \text{ km}$$

Il est donc possible de conclure que la dérive maximale de flot de fréquence décennale n'atteindrait pas, au cours d'une demi-période de marée, le site de prise d'eau, s'arrêtant à 4,5 km en aval. Chaque année, une ou plusieurs dérives maximales pourraient atteindre un point éloigné de 7 km du site en cause.

De ces résultats, il ressort que l'écart entre les dérives maximales fréquentes et rares est faible.

Le pompage pour l'alimentation en eau de l'usine entraînerait seulement un accroissement de la dérive d'une centaine de mètres. La prise d'eau, qui alimente la ville de Kourou ainsi que la base spatiale, ne semble alors courir aucun risque de danger de pollution car elle est située 12 km en amont de la limite de la dérive la plus longue (18 km) depuis la confluence de la petite rivière où seraient rejetés les déchets.

b) Dérives de jusant depuis la confluence de la crique des Pères

Il est à rappeler que la dérive aval Δx^- d'un flotteur à partir des Pères, c'est-à-dire du point de rejet dans l'estuaire proprement dit, apparaît, au cours de l'étiage, inférieure à celle, Δx_3 , qui est estimée par intégration des vitesses de surface à cette station pour des coefficients de l'ordre de 80. Par contre ces deux dérives semblent peu différentes pour des coefficients de 110 (fig. 16).

On retiendra que, durant l'étiage, les dérives Δx_3^- et Δx^- atteignent l'embouchure pour des coefficients supérieurs respectivement à 55 et 80. La dérive moyenne $\Delta \bar{x}^-$ n'arrive pas à la mer si l'étiage est faible ou normal, bien qu'elle s'en trouve peu éloignée au moment des vives-eaux. Il faudrait par exemple qu'à l'occasion d'une marée de 115 le débit fluvial soit supérieur à 25 m³/s pour que la dérive moyenne dépasse l'embouchure.

Il faut noter qu'il s'agit là de dérives maximales de produits qui, depuis la Crique des Pères, atteindraient l'estuaire au moment de l'inversion de courant à marée haute. Les rejets qui transiteraient au confluent après cette inversion s'arrêteraient en amont des limites susmentionnées. Le cas suivant, de la dérive aval Δx^- dans la crique des Pères et l'estuaire du Kourou depuis la confluence de la crique Ouayabo, en est un exemple.

c) Dérives de jusant dans la crique des Pères

La relation entre le coefficient de marée et la dérive aval Δx^- d'un flotteur dans la crique des Pères puis l'estuaire du Kourou, depuis le confluent de la crique Ouayabo, est tracée sur la figure 16, pour un débit fluvial du Kourou compris entre 13 et 17 m³/s.

Pour un tel débit d'étiage dont la fréquence est estimée supérieure à 0,50, et un coefficient de marée supérieur à 115, la dérive Δx^- s'arrête à 2 km en amont de l'embouchure. Au contraire, pour un coefficient minimum de 35, elle se confine dans la rivière, s'arrêtant 4 km en amont de la confluence avec l'estuaire. Il faut qu'avec un tel étiage le coefficient soit supérieur à 55 pour que les dérives arrivent jusqu'à l'estuaire.

Il ressort de ces observations qu'au cours d'un étiage sévère ou même normal, un rejet au site envisagé ne pourrait atteindre la mer au cours d'un seul jusant. Toutefois, il conviendrait, si cela était possible, d'effectuer les rejets lors des marées de vives-eaux et pendant un laps de temps très court, de l'ordre d'une demi-heure, au moment de l'inversion de courant de marée haute. Ainsi une grande part des produits pourrait atteindre la mer au terme de quelques jusants successifs.

On notera également que, compte tenu de ces recommandations, il serait d'autant plus facile de contrôler de tels lâchés, et de limiter ainsi la pollution, que le point de rejet dans la rivière serait proche du confluent avec l'estuaire sans qu'un trajet trop long ne vienne retarder le débouché des produits dans l'estuaire.

d) Résultante des dérives amont et aval

La résultante des dérives de flot et de jusant, consécutive à chaque période de marée (tableau V), est généralement orientée vers l'aval tant au fond qu'en surface, exception faite, cependant, pour la station Pères où une résultante dirigée vers l'amont est fréquemment mise en évidence à proximité du fond. Quoi qu'il en soit, douze kilomètres en amont, à Socoumou, ce phénomène n'existe plus. Il ne semble donc pas qu'un danger de pollution lié à des résultantes de dérives positives soit à craindre dans la zone supérieure de l'estuaire.

5.4.6. Dilution consécutive à la dérive amont

La salure des eaux mesurée par la conductivité lors de l'inversion de courant de marée basse à la confluence de la crique des Pères (S_0), puis, à l'issue de la dérive de flot Δx^+ d'un flotteur de surface (S_x), au moment de l'inversion du courant de marée haute suivante, permet d'évaluer la dilution (S_x/S_0) subie par les eaux de surface au cours de leur refoulement vers l'amont. Les valeurs de dilution, comprises entre 0,82 et 0,06, sont mentionnées dans le tableau ci-après pour les différentes dérives observées. Il convient de remarquer qu'à la dernière mesure,

effectuée en fin de l'étiage après l'accroissement des débits fluviaux (campagne H), correspond, avec 0,06, la valeur la plus prononcée de toutes les dilutions.

Compte tenu de la faible stratification saline au moment des renverses de courant, les valeurs de surface ainsi notées doivent être peu éloignées de celles qui se rapportent à l'ensemble de la section.

	Date	Coefficient +	Qf (m ³ /s)	Δ_{x^+} (km)	S ₀	S _x	Rapport de dilution S _x /S ₀
D	24-10-76	113	15,3	15,6	6 460	2 975	0,46
E	30-10-76	48	13,9	7,4	8 210	6 430	0,78
F	7-11-76	83	11,3	12,5	7 785	2 415	0,31
G	15-11-76	47	11,4	8,1	7 315	6 025	0,82
H	23-11-76	104	25,2	13,3	26 860	1 540	0,06

6. RISQUE DE POLLUTION LIÉ A L'EXTENSION DE LA MARÉE SALINE

Le phénomène de l'extension de la marée saline dans l'estuaire ainsi que les mouvements oscillants de matières, auxquels serait lié pendant l'étiage un transport des polluants vers l'amont, vont être étudiés par le traçage naturel que représentent les variations spatio-temporelles des salures ioniques globales et des teneurs en suspension. Auparavant, sont mentionnées les principales caractéristiques physico-chimiques mesurées lors de l'étude des possibilités d'alimentation en eaux de la future usine (M. A. ROCHE, 1977).

6.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX ESTUARIENNES

Les eaux de la rivière Kourou qui alimentent l'estuaire en amont se placent, comme celles des autres cours d'eau de Guyane, parmi les moins minéralisées du globe (M. A. ROCHE *et al.*, 1974). Leurs caractéristiques physico-chimiques moyennes (mg/l) peuvent être comparées ci-après à celles des eaux qui ont été prélevées à proximité de l'embouchure, à la pleine mer, lors d'une marée de vives-eaux.

Eaux fluviales :

Couleur : 30	Cl ⁻ : 4,1
pH : 6,7	CO ₃ H ⁻ : 4,1
DCO : 3,1	SO ₄ ⁺⁺ : 0,9
Teneurs en suspension : 6	Na ⁺ : 2,85
Salure ionique globale : 13,8	Mg ⁺⁺ : 0,51
SiO ₂ : 9,4	Ca ⁺⁺ : 0,22
	K ⁺ : 0,60
	Fe ⁺⁺⁺ : 0,68

Eaux estuariennes, à proximité de l'embouchure :

Couleur : 10	Cl ⁻ : 14 867
pH : 7,8	CO ₃ H ⁻ : 97,7
DCO : 2,7	SO ₄ ⁺⁺ : 2 017
Teneurs en suspension : 575	Na ⁺ : 8 177
Salure ionique globale : 26 800	Mg ⁺⁺ : 1 017
SiO ₂ : 4,2	Ca ⁺⁺ : 243
	K ⁺ : 410
	Fe ⁺⁺⁺ : 0,05

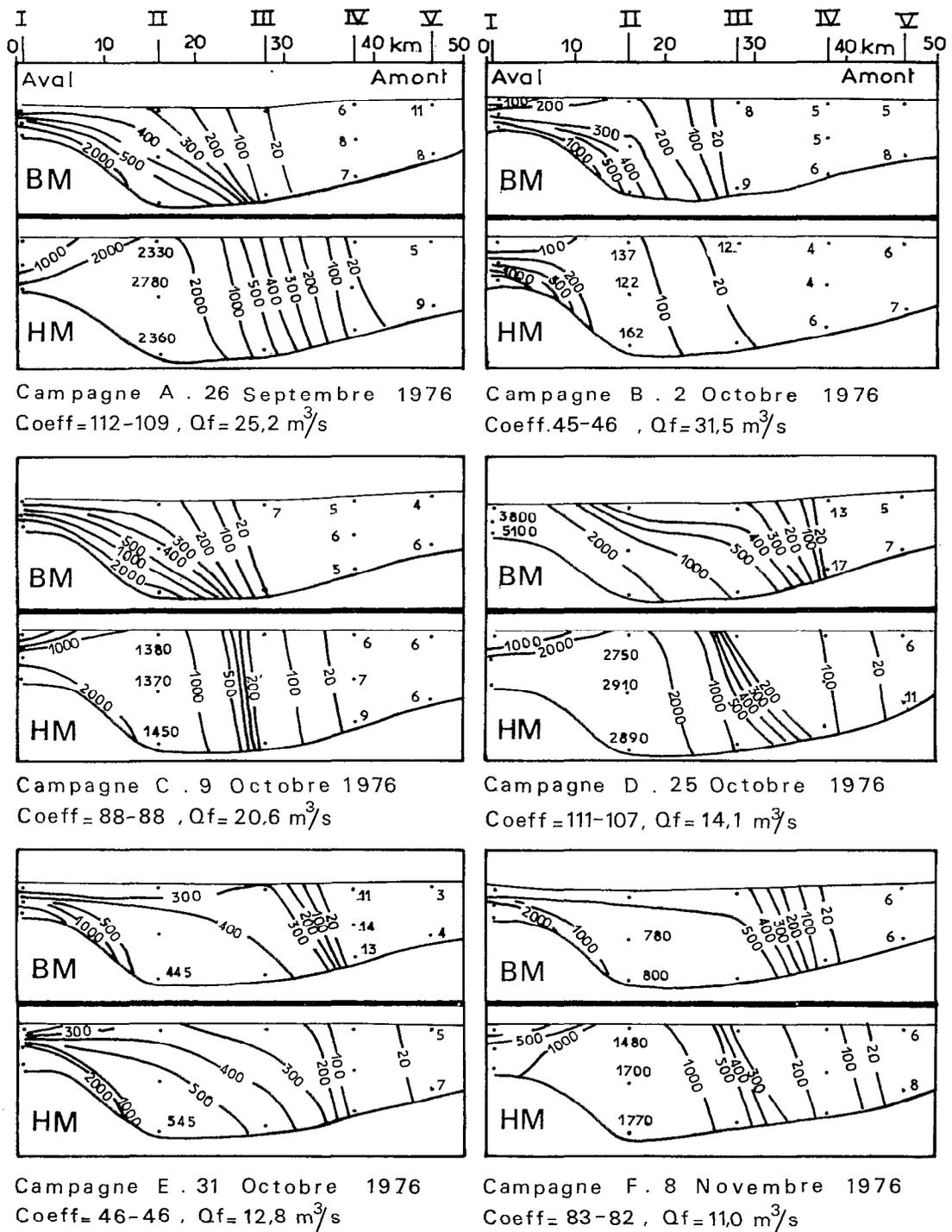


Fig. 18. — Répartition des teneurs en matières en suspension (mg/l) sur une coupe longitudinale de l'estuaire du Kourou

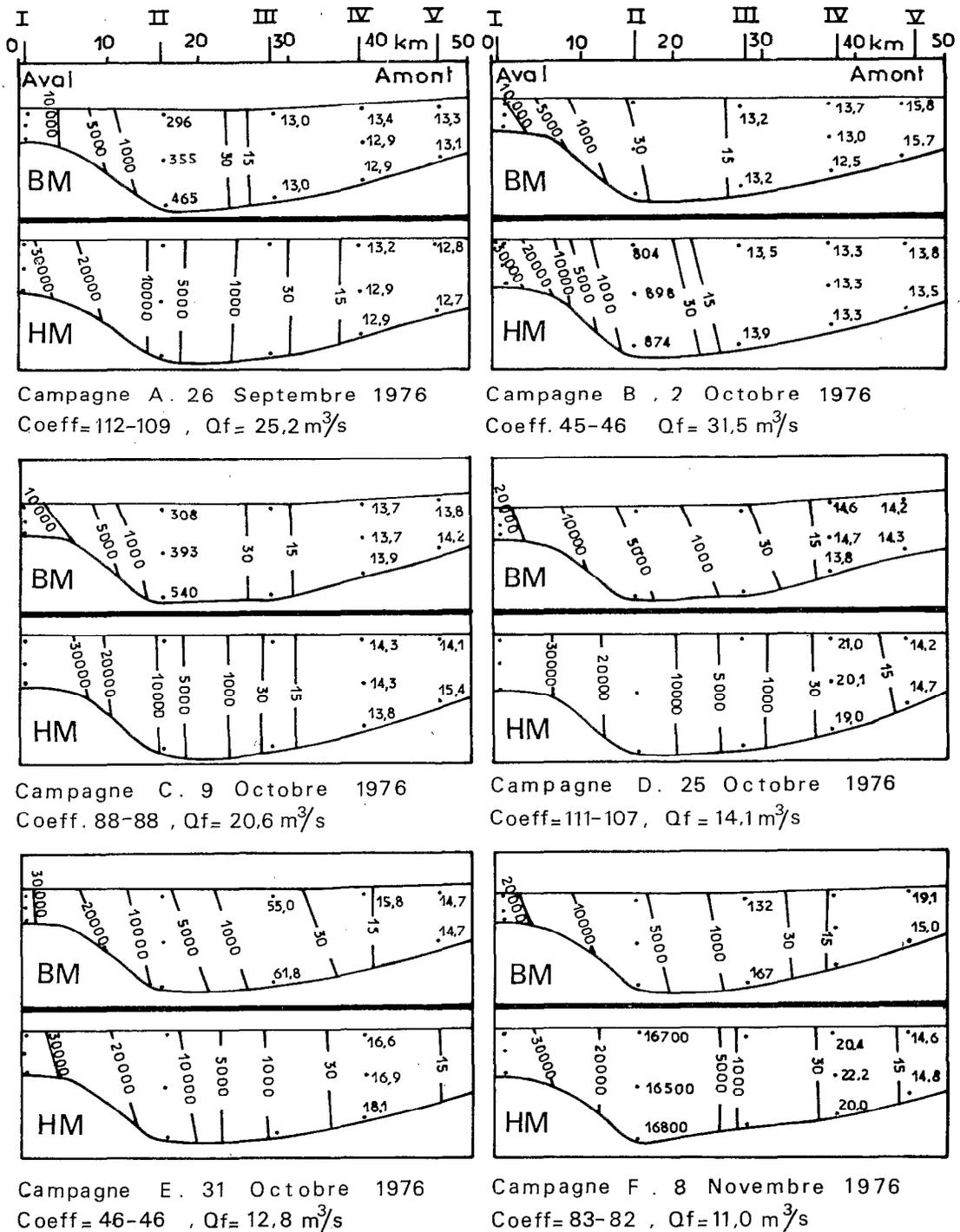


Fig. 19. — Répartition des salures (mg/l) sur une coupe longitudinale de l'estuaire du Kourou

Dans l'estuaire, les températures s'accroissent de 24° à 31°C en direction de la mer, avec un écart diurne de l'ordre de 1°C. Il en est de même pour les pH dont les valeurs varient de 6,3 à 8,1.

Le mélange des eaux fluviales aux eaux marines entraîne un accroissement des salures ioniques spécifiques similaire à celui de la salure globale. Toutefois, les teneurs en fer et en silice, ainsi que la turbidité des eaux décantées et la DCO, croissent vers l'amont, contrairement à l'évolution des autres caractéristiques physico-chimiques. Il apparaît (M. A. ROCHE, 1977) que le fer, d'origine continentale, commence à être floculé dans l'estuaire dès que la proportion des eaux marines y atteint quelques dixièmes pour cent. Par contre, les teneurs en silice sont déterminées simplement par la dilution des eaux fluviales dans les eaux marines.

6.2. VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DES MATIÈRES EN SUSPENSION

a) Répartition spatiale

Les prélèvements, effectués au moment des inversions de courant à marée haute et à marée basse, sur la verticale médiane (n° 3) de chaque section, permettent de tracer sur une coupe verticale les courbes d'égaux teneurs en matières en suspension depuis l'embouchure de l'estuaire jusqu'à l'amont (fig. 18).

La répartition spatiale des teneurs en suspension dans l'estuaire est ainsi caractérisée pendant l'étiage par :
— une augmentation des valeurs de l'amont vers l'aval,
— une augmentation depuis la surface jusqu'au fond.

Répartition longitudinale des teneurs en suspension. L'accroissement des teneurs en suspension de l'amont vers l'aval est considérable, les valeurs pouvant varier de 3 mg/l dans la zone supérieure, à 67 000 mg/l près de l'embouchure. Le gradient longitudinal augmente lui-même très rapidement. Les valeurs moyennes aux stations sont ainsi comprises entre 4 et 9 mg/l à Saramaca, 4 et 275 mg/l à Gourdonville, 100 et 3 000 mg/l aux Pères, 390 et 23 000 mg/l à Guatémala.

Dans la partie aval de l'estuaire, au cours du flot, une pénétration d'eau de mer plus claire que celles qui se trouvent dans l'estuaire se produit par l'embouchure. A marée haute, les eaux très chargées de l'estuaire sont ainsi, en surface, encadrées par des eaux de l'amont et de l'aval moins riches en matières en suspension.

Répartition verticale des teneurs en suspension. La stratification, ou gradient vertical des teneurs en suspension, est liée aux deux composantes des vitesses des eaux, l'une longitudinale, l'autre transversale et verticale (cf. § 5.1).

Malgré les mouvements verticaux, à l'origine des mélanges, les matières en suspension tendent à sédimenter sous l'action de la gravité, rétablissant ainsi une stratification des teneurs.

Les vitesses longitudinales, plus élevées en surface qu'en profondeur, contribuent à déterminer tout au long de l'estuaire une répartition des suspensions caractérisée par une inclinaison des courbes d'isoteneurs telle qu'elle est observée sur la figure 18.

La stratification apparaît plus marquée à marée basse qu'à marée haute. Ce caractère s'explique tant par la distribution verticale des vitesses longitudinales que par la répartition longitudinale des teneurs qui augmentent de l'amont vers l'aval. En effet, durant le jusant les eaux moins chargées de l'amont s'écoulent en surface plus rapidement que les eaux plus chargées du fond, accentuant ainsi sur une même verticale l'écart entre les teneurs. Par contre, durant le flot, les eaux de surface qui se dirigent vers l'amont étant plus chargées que celles qu'elles refoulent, l'écart entre les teneurs sur une même verticale tend à décroître.

Par ailleurs, il faut remarquer, comme l'illustre l'exemple de la figure 8, que l'écart entre les vitesses des eaux de fond et de surface est moins marqué au flot qu'au jusant. L'homogénéisation des eaux, considérée, sur un plan vertical, sera d'autant mieux assurée que l'écart de vitesse ainsi observé sera faible. On conçoit qu'à la limite un écart nul correspondrait à un déplacement d'une même masse au sein de laquelle les mouvements verticaux tendraient à créer un mélange optimal.

Le gradient vertical des teneurs en suspension tend à s'intensifier vers l'aval. Ainsi par exemple à Gourdonville, pour de fortes et faibles charges moyennes l'écart relatif des teneurs moyennes entre la surface et le fond ne dépasse pas respectivement 40% et 25%. Par contre en aval, à la station des Pères et à Guatémala, les concentrations près du fond, respectivement 13 et 450 fois supérieures à celles de surface, sont à l'origine d'un écart beaucoup plus prononcé qu'en amont.

Les eaux de mer, surtout lors des forts et moyens coefficients, paraissent pénétrer dans l'estuaire en refoulant dans la région des Pères les eaux à fortes concentrations situées à marée basse sur une dizaine de kilomètres avant l'embouchure. De ce fait, l'homogénéisation semble alors relativement bien réalisée à la station des Pères.

b) Variations temporelles des teneurs en suspension

A une station, la variation des teneurs en suspension au cours d'une marée dépend de plusieurs facteurs :

- le coefficient de marée qui détermine l'amplitude de l'oscillation de masses d'eau marquées par un gradient de teneurs ;
- le débit fluvial dont les effets sur le déplacement des masses d'eau s'associent au jusant ou s'opposent au flot ;
- la teneur originelle de l'apport fluvial.

L'influence de chacun de ces facteurs varie en fonction de la distance à l'embouchure.

L'intervalle de variation des teneurs sur une longue période de temps, comme les teneurs elles-mêmes, augmente vers l'aval. Ce type d'évolution, essentiellement lié à l'accroissement du gradient des teneurs, apparaît au simple examen des valeurs moyennes aux stations telles qu'elles sont mentionnées dans le paragraphe 6.1.2.a).

Dans la partie amont de l'estuaire, les teneurs sont déterminées essentiellement par les valeurs fluviales originelles. Ainsi à Saramaca, les concentrations apparaissent principalement fonction des apports solides originaires de l'amont car elles sont très faibles, tendent à diminuer avec le débit fluvial et, surtout, fluctuent relativement peu avec la marée malgré une variation des coefficients de 45 à 112, non compensée par une variation opposée du débit fluvial pendant l'étiage. Compte tenu du gradient longitudinal, il est possible qu'en cette zone les concentrations soient légèrement supérieures à celles de l'apport fluvial, mais, en raison même des valeurs, extrêmement faibles mesurées à cette station, l'écart ne peut être important.

Vers l'aval, il est ensuite constaté une variation semi-diurne des concentrations en suspension, avec un maximum et un minimum en phase respectivement avec les inversions du courant à marée haute et à marée basse. Cette variation est liée à l'oscillation semi-diurne des masses d'eau, à concentration croissante vers l'aval (fig. 20).

Dès Gourdonville, un accroissement des charges solides est observé en fin d'étiage. Ce phénomène survient quand les débits fluviaux se cantonnent pendant plusieurs jours à des valeurs minimales de 15 à 11 m³/s pour un coefficient de 111, mais les concentrations élevées se maintiennent par la suite pour des coefficients de 46 à 80, alors que des marées d'importance analogue, de 45 à 112, auxquelles en début d'étiage s'opposaient des débits plus importants, supérieurs à 20 m³/s, ne se sont pas accompagnées d'une variation marquée des teneurs.

Ce phénomène est également observé plus en aval, à Socoumou, où l'arrivée depuis l'aval des eaux chargées est constatée dès le début de l'étiage au cours d'une marée de vives-eaux. La remontée se limite plus en aval durant les mortes-eaux suivantes au cours desquelles seules transitent à la station des eaux d'origine fluviale à faibles teneurs. La marée moyenne qui succède suffit à ramener les eaux chargées. Par la suite, au minimum de l'étiage, celles-ci atteignent la station à toutes les marées, les teneurs en suspension étant d'autant plus élevées que les coefficients sont forts.

L'aggravation de l'étiage permet donc aux eaux chargées de l'aval de se mélanger progressivement, par oscillations successives au gré des marées, aux eaux fluviales de l'amont.

Dans la zone voisine de l'embouchure, les phénomènes apparaissent plus complexes. Aux Pères, les minimums sont encore observés à marée basse, sauf pour une des faibles marées. A Guatémala, le minimum a lieu au contraire le plus souvent à marée haute en raison de la présence d'eau de mer peu chargée. Il convient de remarquer aussi l'influence du vent, lequel en créant des vagues dans cette partie peu profonde de l'estuaire est un facteur essentiel de la remise en suspension des sédiments du fond. Ces vagues sont plus violentes au jusant qu'au flot en raison des orientations contraires du vent et du courant. En outre, le brassage est plus efficace quand la profondeur est moindre, c'est-à-dire à marée basse.

6.3. VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DES SALURES IONIQUES GLOBALES

a) Répartition spatiale

Les mesures effectuées sur les échantillons prélevés au moment des inversions de courant à marée haute et à marée basse sur la verticale située au milieu de chaque section, ainsi qu'à marée haute tout au long de l'estuaire, permettent de tracer les courbes isohalines sur une coupe longitudinale de l'estuaire (fig. 19).

Dans la zone supérieure de l'estuaire, les salures mesurées aux différentes campagnes C, D, E, ..., à l'inversion du courant de marée haute, sont reportées sur une carte (fig. 21) où elles indiquent ainsi avec précision la limite de la remontée saline pendant l'étiage 1976.

Répartition longitudinale des salures. L'augmentation des salures, qui marque une proportion croissante des eaux de mer sur celle du fleuve, est considérable, passant de 13,3 mg/l en amont à 34 500 mg/l près de l'embouchure. La salure moyenne des eaux fluviales durant l'étiage, d'après les valeurs obtenues aux trois stations amont, en période non influencée par la marée saline, est 13,7 mg/l. Les valeurs moyennes aux stations, observées durant les différentes périodes de marée, sont ainsi comprises entre 13,3 et 14,6 mg/l à Saramaca, 13,0 et 17,3 mg/l à Gourdonville, 13,9 et 180 mg/l à Socoumou, 23,1 et 11 900 mg/l aux Pères, 16 600 et 29 500 mg/l à Guatémala.

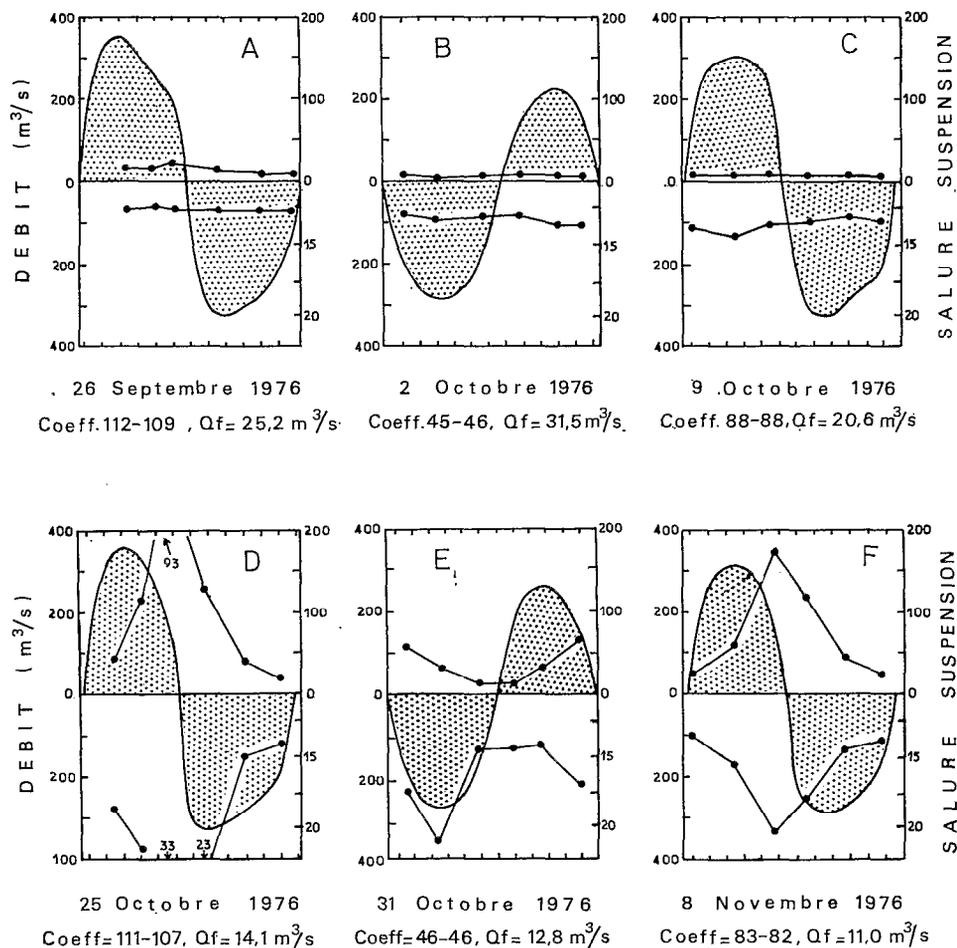


Fig. 20. — Variations semi-diurnes des débits oscillants (m³/s), des charges en suspension (mg/l) et de la salure (mg/l), dans l'estuaire du Kourou, à Gourdonville pendant l'étiage

Répartition verticale des salures. Sur la coupe longitudinale de l'estuaire, les courbes isohalines apparaissent verticales à marée haute et légèrement inclinées à marée basse (fig. 19). Cette tendance à l'homogénéisation des eaux, due aux composantes transversales et verticales du courant, est d'autant plus marquée que la marée est forte, les vitesses et par suite les turbulences croissent avec le coefficient. En raison de ces mélanges et d'un apport fluvial faible pendant l'étiage, l'estuaire montre une stratification saline très peu marquée qui le classe alors dans la catégorie des estuaires « bien mélangés ».

b) Variations temporelles des salures et extension de la remontée saline

La variation semi-diurne des salures est directement liée à celle des courants oscillants, le maximum se produisant à la renverse de marée haute et le minimum à la renverse de marée basse. Ce phénomène est illustré sur la figure 20, pour la station de Gourdonville, quand une variation semi-diurne accentuée se manifeste en fin d'étiage, avec l'accroissement des salures. Cette nette augmentation des salures et l'apparition de la variation semi-diurne marquent l'extension de l'influence marine vers l'amont à la faveur de la diminution des débits fluviaux. La remontée des salures dans la zone amont de l'estuaire (fig. 19 et 21) se maintient tant aux faibles qu'aux fortes marées, avec cependant des oscillations fonctions du coefficient de marée.

6.4. MÉCANISMES DE L'EXTENSION AMONT DE LA MARÉE SALINE ET DES POLLUANTS DURANT L'ÉTIAGE

La forte extension de la marée saline au cours de l'étiage, telle qu'elle ressort de l'étude des suspensions et des salures, révèle, jusque dans la zone propice à l'implantation de prises d'eau (région de Gourdonville), un trans-

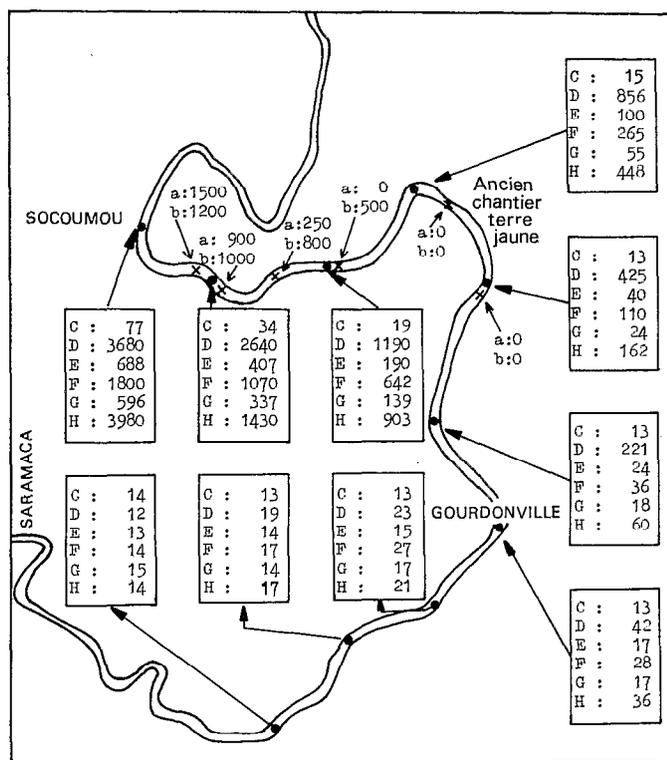


Fig. 21. — Salures (mg/l) des eaux de l'estuaire du Kourou, mesurées en octobre et novembre 1976, pendant l'étiage, au moment de l'inversion du courant, à la pleine mer de différentes marées (C, D, E, F, G, H). Les mesures correspondant aux lettres minuscules ont été effectuées en mai (a) et octobre (b) 1964

port de matières en suspension et en solution capable d'y entraîner, dans certaines conditions, des polluants originaires de l'aval.

La diminution du débit fluvial au cours de l'étiage, qui n'entraîne pas un accroissement des dérives de flot supérieur à quelques centaines de mètres (cf. § 5.4.5.), ne peut être à l'origine de l'extension des salures observée sur une dizaine de kilomètres vers l'amont.

Cette extension pourrait trouver une explication dans l'étude des résultantes de dérives. En effet, il est fréquemment rapporté que, dans un estuaire, la résultante des dérives est orientée vers l'amont à proximité du fond et vers l'aval en surface, les eaux fluviales douces et « légères » s'évacuant ainsi vers la mer en surface, après mélange progressif avec les eaux salées plus denses qui pénètrent dans l'estuaire par le fond. Toutefois, ce schéma ne saurait justifier l'extension de l'influence de la marée saline telle qu'elle est constatée dans l'estuaire à la fin de l'étiage, car les résultantes des eaux Δx_3 mesurées tant en surface qu'au fond, à Socoumou et Gourdonville, sont au contraire orientées vers l'aval pour toutes les périodes de marée observées. Les résultantes de dérives seraient donc différentes pour les eaux et pour les matières en solution et en suspension.

Pour expliquer les observations ainsi exposées une hypothèse peut être alors avancée. Il semblerait en effet qu'à l'issue de chaque dérive de flot une partie des eaux et des matières associées reste piégée tant en bordure des rives qu'avec les sédiments du fond ou dans les creux du lit (voir § 3.), échappant ainsi partiellement à la dérive aval qui les ramènerait au-delà du point de départ initial. A la marée suivante, ces matières pourraient être alors transportées en amont du point extrême atteint par la première dérive de flot, remontant ainsi dans l'estuaire. Au gré des oscillations, par dilutions successives, l'influence saline s'étendrait progressivement vers l'amont.

En ce qui concerne plus spécialement les matières en suspension, celles-ci, au cours de leurs mouvements, doivent subir par frottement sur le fond et les bords de l'estuaire un freinage qui pourrait engendrer, par rapport à la vitesse des eaux, un retard dans leur déplacement longitudinal. Au-dessous d'une vitesse limite d'écoulement

du jusant, ce phénomène se traduit par une sédimentation des suspensions les plus denses, en association avec les rides que les enregistrements d'écho-sondage ont mises en évidence sur le fond de l'estuaire (fig. 6), suivie d'une reprise par le flot suivant. Ce phénomène peut être favorisé par le fait que la vitesse limite des eaux permettant le dépôt des particules sur le fond est plus faible que celle qui est nécessaire pour leur remise en suspension.

Le freinage et le piégeage des suspensions seraient susceptibles de favoriser également l'extension amont des salures. En effet, les ions adsorbés dans les eaux salées par les suspensions peuvent être libérés lorsque ces matières se trouvent en contact avec des eaux de salures moindres.

Il est à remarquer que les phénomènes de piégeage et de freinage des matières associées aux eaux présentent une similitude avec celui du blocage de flotteurs sur les rives au cours du jusant, suivi d'une libération au flot, entraînant, au terme de plusieurs marées, une importante dérive amont (cf. § 5.1.).

Lorsque le débit fluvial augmente par l'apport des premières pluies, les eaux douces balayent plus efficacement que pendant l'étiage les « résidus » de la dérive aval. Les matières en suspension et les salures, qui marquaient l'influence marine, régressent alors en direction de la mer.

6.5. RISQUES DE POLLUTION ASSOCIÉS A L'EXTENSION AMONT DE LA MARÉE SALINE

Comme pour les matières dissoutes ou en suspension, les polluants rejetés en permanence dans la partie aval de l'estuaire pourront s'étendre vers l'amont sur des distances plus grandes que les dérives maximales de fréquences rares, pour atteindre ainsi en fin d'étiage la zone susceptible de convenir à l'implantation de prises d'eau mais avec des taux de dilution tels qu'ils ne créeront, selon toute vraisemblance, aucune détérioration de la qualité des eaux.

A titre indicatif, le rapport des salures globales des eaux de Gourdonville à marée haute et des Pères à marée basse, c'est-à-dire la dilution minimale réalisée entre les deux stations, est indiqué ci-dessous pour les différentes marées observées :

$$A = \text{non influencé} ; \quad B = \text{non influencé} ; \\ C = 0,7 \cdot 10^{-3} ; \quad D = 4 \cdot 10^{-3} ; \quad E = 0,5 \cdot 10^{-3} ; \quad F = 1 \cdot 10^{-3}$$

Pour les eaux de Gourdonville, seul l'écart de salure provoqué par l'influence marine a été pris en considération, la salure originelle des eaux étant de 13,7 mg/l.

Ainsi, les concentrations en produits résiduaux, déjà diluées par leur séjour dans la crique des Pères avant leur arrivée dans l'estuaire, subiraient une dilution de l'ordre du millième au cours de leur transport par la marée saline jusqu'à Gourdonville.

Exception faite des rejets particulièrement toxiques, aucun danger de pollution n'est donc à craindre pour une prise d'eau qui serait implantée en ce site, et a fortiori pour celle qui existe déjà à Saramaca, cette station étant hors d'atteinte de la marée saline.

7. CONCLUSION

Deux processus hydrodynamiques de pollution dans un estuaire ont été examinés dans cette étude. L'un s'exerce sur une distance limitée, avec des dilutions faibles, au cours de la rapide dérive de flot ou de jusant, l'autre accompagne loin en amont, mais avec des dilutions fortes, la lente remontée saline qui se produit durant l'étiage.

Les relations établies entre les dérives, les coefficients de marée et les débits fluviaux permettent d'estimer les dérives de fréquences variées. Il est ainsi possible de connaître la distance parcourue par la dérive de fréquence décennale ou celle, de fréquence encore plus rare, qui serait susceptible de se produire depuis un point de rejet donné. La dilution consécutive à la dérive amont qui ressort de l'analyse des salures varie considérablement selon les marées, puisque les valeurs observées s'échelonnent de 0,8 à 0,06.

Les composantes transversales et verticales de l'écoulement, mises en évidence par l'observation de flotteurs, règleraient dans une large mesure la dérive de produits flottés. Ces corps, bloqués momentanément sur les rives au cours du jusant, puis repris pendant les flots, pourraient être entraînés vers l'amont sur une distance beaucoup plus importante que les dérives de flot de fréquences rares. Il est à souligner à ce sujet l'efficacité de la méthode de traçage aux flotteurs retenue, aussi bien pour l'observation du mode d'écoulement que pour l'obtention de données utilisables pour les évaluations.

Une hypothèse sur les mécanismes de l'extension amont de la marée saline, basée sur le fait qu'une partie des matières dissoutes et en suspension progressent vers l'amont alors que tant au fond qu'en surface la résultante des dérives liquides est orientée vers l'aval, fait intervenir l'influence des phénomènes de freinage et de stockage des matières au fond et sur les rives. Ainsi, en ne revenant pas à leur point de départ initial au terme d'une période de marée, en raison du retard pris par rapport aux dérives liquides, les éléments dissous et les suspensions remontent le cours par oscillations et dilutions successives tant que le débit fluvial demeure insuffisant pour balayer les « résidus » de la dérive de jusant. Les polluants éventuels suivraient le cheminement de la marée saline tout en subissant une dilution telle que, sauf pour des rejets présentant une exceptionnelle toxicité, tout danger de pollution dans la zone optimale à l'implantation de prises d'eau semble écarté.

Cependant, comme cela est fréquent en Guyane, l'envasement ou l'ensablement pourrait connaître à l'embouchure d'un estuaire de grandes variations pluriannuelles qui seraient susceptibles de modifier à long terme les valeurs des paramètres hydrodynamiques.

Il est à remarquer que les types de données et de relations établies dans cette étude pourraient utilement être repris pour l'élaboration d'un modèle mathématique qui en permettant de simuler la dynamique des eaux en fonction des facteurs principaux, représentés par les coefficients de marée et les débits fluviaux, offrirait le moyen de développer ces recherches.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (M. J.) – 1973 – Pollutions marines et aménagement des rivages. *Rev. intern. Océan. méd.*, suppl., 309 p., 64 fig.
- BARNES (R. S. K.), GREEN (J.) – 1971 – The estuarine environment. *Applied Science*, London, 133 p.
- BELLESORT (B.), MICNIOT (Cl.) – 1972 – Etude comparative des mouvements sédimentaires dans quelques estuaires. *La Houille Blanche*, 8, pp. 695-702, 5 fig.
- BENNETT (H.), TARDIF (M.), ORGERON (C.) – 1968 – Estuaire du Mahury - Aménagement du chenal. *L.C.H.F.*, 116 p., planches.
- BERTHOIS (L.), HOORELBECK (J.) – 1968 – Etude dynamique de la sédimentation dans trois cours d'eau de la Guyane française. La rivière Mahury, la rivière de Cayenne et le fleuve Maroni. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, 128 p., 64 fig.
- BILLON (B.) – 1968 – Mise au point des mesures de débits solides en suspension. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Hydrol., V, 2, pp. 3-13.
- BRUGIÈRE (J. M.), HOORELBECK (J.) – 1966 – *Dynamique fluviale dans la basse Comté. Effets de marée à Dégrad Edmond*. O.R.S.T.O.M., Cayenne, 14 p., 3 fig.
- CARRE (P.) – 1972 – Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Hydrol., IX, 1, pp. 19-45.
- CHOUBERT (B.), BOYE (M.) – 1959 – Envasements et dévasements du littoral en Guyane française. *C.R. Ac. Sc.*, 249, pp. 145-147.
- DIACHISHIN (A. N.), ASCE (J. M.), HESS (S. G.), ASCE (M.), INGRAM (W. T.), ASCE (A. M.) – 1953 – Sewage disposal in tidal estuaries. *Americ. Soc. Civil. Engin. Proceedings*, 76, 167, pp. 1-14, 6 fig.
- DYER (K. R.) – 1973 – *Estuaries : A Physical Introduction*. John Wiley and Sons, 140 p.
- ECKENFELDER (W. W.) – 1973 – *L'eau dans l'industrie. Pollution, traitement, recherche de la qualité*. Entreprise Moderne d'Ed., Paris, 332 p.
- EVORA (J.) – 1974 – Le Papier. *Sciences et Avenir*, n° 323, pp. 38-53, 14 fig.
- FRANCIS-BŒUF (C.) – 1947 – Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire. *Ann. Inst. Océan.*, XXIII, 3, 344 p.
- GAUTHIER (M. J.) – 1973 – Milieu d'estuaire et pollution. *Rev. intern. océan. méd.*, XXX, 2, pp. 89-113, 7 fig.
- HIEZ (G.), DUBREUIL (P.) – 1963 – Les régimes hydrologiques de Guyane française. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, 119 p., 49 fig.
- HOEFFNER (M.) – 1973 – *Le réseau hydrométrique O.R.S.T.O.M. en Guyane française*. Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M. Cayenne, 40 p., 20 fig.

- HOEFFNER (M.) – 1974 – *Caractéristiques principales du régime hydrologique en Guyane française*. Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M. Cayenne, rapp. provisoire, 16 p., 31 fig.
- HOORELBECK (J.) – 1966 – *Etude de l'alimentation en eau de la base spatiale de Kourou*, Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M., 23 p., 6 fig.
- INGLIS (Sir C. C.), ALLEN (F. H.) – 1957 – The regimen of the Thames estuary as affected by current, salinities and river flow. *Maritime and Waterways Engineering Division meeting*, pp. 827-878, 21 fig.
- KETCHUM (B. H.) – 1951 – The exchanges of fresh and salt waters in tidal estuaries. *J. Mar. Res.*, pp. 18-38, 5 fig.
- LARRAS (J.) – 1964 – *Embouchures, estuaires, lagunes et deltas*. Eyrolles éd., Paris, 171 p., 60 fig.
- LE FLOCH (J.) – 1961 – *Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et de la Seine Maritime*. Thèse de Doct. ès Sciences, Paris.
- LERIQUE (J.) – 1965 – *Etude de la remontée de la marée et de la salinité dans les rivières Komo, Mbeï et Awebé*. Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M., Paris, 50 p.
- LIVRE DE L'EAU – 1964, 1966 – *CEBEDEAU*, Herstal, Belgique, 5 tomes.
- MAEDA (H.), TAKESUE (K.) – 1961 – The relation between chlorinity and silicate concentration of water observed in some estuaries. *Ocean. Works*, Japan, 6, 1, pp. 112-120.
- MARTIN (J. M.) – 1971 – *Contribution à l'étude des apports terrigènes d'oligoéléments stables et radioactifs à l'océan*. Thèse doct. ès Sciences, Paris VI, Labo. Géol. dyn., 158 p., 59 fig.
- MARTIN (J. M.), THOMAS (A.), PEREZ-NIETO (H.) – 1976 – Application des mesures de radioactivité naturelle à l'étude de la dynamique sédimentaire dans le delta de l'Orénoque. 7^e Conf. Géol. des Caraïbes, pp. 556-565.
- MAUVAIS (J. L.) – 1971 – Calcul des vitesses moyennes instantanées en Loire-Maritime. *Cah. Océan.*, XXIII, 3, pp. 251-266, 13 fig.
- MIGNIOT (G.) – 1969 – Etude des principales caractéristiques de l'estuaire de la Gironde et des paramètres susceptibles d'intervenir dans un estuaire schématisé. *L.C.H.F.*, 12 p.
- MILLIÈRE (H.) – 1967 – *Mission d'études du Kourou*. Centre Spatial Guyanais. 2 vol., 81 p., planches.
- MONNET (Cl.) – *Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama, Côte-d'Ivoire. Evolution des éléments chimiques des eaux de son estuaire*. Thèse d'Etat. Nice, O.R.S.T.O.M., 427 p., 95 fig.
- MOLINIER (M.), TOILIEZ (J.) – 1973 – *Hydrologie de la région de San Pedro. Fleuves San Pedro, Néro et Brimay*. O.R.S.T.O.M., Abidjan, 41 p., 19 fig.
- NOUVELOT (J. F.) – 1972 – Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Hydrol., IX, 1, pp. 3-18.
- PARKER (R. R.), SIBERT (J.) – 1973 – Effect of pulpmill effluent on dissolved oxygen in a stratified estuary - I. Empirical observations. *Water Research*, Pergamon Press, 7, pp. 503-514, 8 fig.
- PRITCHARD (D. W.) – 1954 – A study of the salt balance in a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.*, 13, 1, pp. 133-144, 4 fig.
- PRITCHARD (D. W.) – 1955 – The dynamic structure of a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.*, pp. 33-42, 1 fig.
- PRITCHARD (D. W.) – 1957 – Discussion of « On estimating streamflow into a tidal estuary ». *Trans. Amer. geophys. Un.*, 38, 4, pp. 581-583.
- PRITCHARD (D. W.) – 1958 – The equations of mass continuity and salt continuity in estuaries. *J. Mar. Res.*, 17, pp. 412-423.
- ROCHE (M. A.) – 1973 – *Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad*. Thèse de doct. ès Science, Paris VI, Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M., 398 p., 131 fig.
- ROCHE (M. A.) – 1972 – Traçage hydrochimique naturel du mouvement des eaux dans le lac Tchad. Note présentée au Symposium sur l'Hydrologie des lacs. *A.I.H.S.*, Helsinki, pp. 18-27.
- ROCHE (M. A.), DUBREUIL (P.), HOEFFNER (M.) – 1974 – *Dynamique des eaux, des sels et des sédiments en suspension dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague. Etude en vue de l'alimentation d'une usine de pâte de bois (Guyane française)*. Sect. Hydrol. O.R.S.T.O.M., Paris, 80 p., 28 fig.
- ROCHE (M. A.) – 1976 – Méthodologie de mesure de la dynamique des eaux, des sels et des suspensions en estuaire. *Quatorzièmes Journées de l'Hydraulique*, Paris, septembre 1976.
- ROCHE (M. A.) – 1977 – *L'estuaire du Kourou. Possibilités d'alimentation en eau d'une usine de pâte de bois et risques de pollution par rejets industriels dans l'estuaire*. Sect. Hydrol. O.R.S.T.O.M. Paris, 81 p., 28 fig.
- ROCHETTE (C.) – 1964 – *Remontée des eaux marines dans le Sénégal*. Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M., Paris, 81 p., 54 fig.
- TISON (G.) – 1963 – Méthode de détermination de la somme des débits d'amont d'un fleuve à marée. *In Mélange offert à Maurice Pardé*, pp. 657-660, 1 fig.