

La mécanique des fluides et l'environnement
Prévision et maîtrise de la qualité de l'eau et de l'air

QUESTION III
RAPPORT 1

**Méthodologie de mesure
de la dynamique des eaux, des sels
et des suspensions en estuaire**

M. A. ROCHE
O.R.S.T.O.M., Cayenne.

Un groupe d'Hydrologues, équipé d'un matériel classique de jaugeage, peut mesurer les principaux paramètres nécessaires à l'élaboration et à la vérification de modèles d'étude de pollution en estuaire : topographie, apports fluviaux, marnages, vitesses, débits, volumes et dérives oscillants, prisme de marnage, débits et quantités de matières oscillants, charges moyennes.

A group of hydrologists with a standard gauging equipment can measure the main parameters necessary for establishing and checking the pollution within estuaries investigation models : topography, river solid materials that flow into, speeds, flows, level change and its prism, oscillating volumes and drifts, oscillating flows and matters, average loads.

INTRODUCTION

Les problèmes de pollution par des complexes industriels ou urbains, liés ou non à ceux de l'alimentation en eau de ces complexes, demandent fréquemment de caractériser l'évolution dynamique des eaux, des matières en suspension et en solution dans un estuaire. Quelle peut être alors la participation effective de l'hydrologue sur le terrain ?

La Section hydrologique de l'ORSTOM a acquis en ce domaine une expérience sur les estuaires du Sénégal (C. Rochette, 1964); du Gabon (J. Lérique, 1965), de Côte d'Ivoire (M. Molinier, J. Toilliez, 1973), de Guyane Française (E. Berthois, J. Hoerlbeck, 1968 et M.A. Roche, P. Dubreuil, M. Hoepfner, 1974). Cette expérience permet de dégager une méthodologie simple mais concrète de mesures, apte à définir l'évolution dynamique des eaux et des polluants et à fournir tous les éléments nécessaires à l'élaboration et à la vérification de modèles.

Une telle méthodologie peut être utilisée lorsque les moyens en personnel et en matériel sont relativement modestes et le délai d'étude court, de l'ordre d'un mois à une année.

Cette note est illustrée de quelques exemples

tirés de l'étude des estuaires du Mahury et de l'Approuague, en Guyane Française (M.A. Roche *et al.*, 1974).

**LES PARAMÈTRES RECHERCHÉS
ET LA MÉTHODOLOGIE DES MESURES**

Afin de caractériser une évolution tout au long de l'estuaire, quatre à cinq sections sont choisies entre la mer et la partie amont non influencée par la marée dynamique. Ces deux limites sont prises en considération pour certains paramètres.

Dans les estuaires guyanais étudiés (fig. 1), la marée dynamique peut se faire sentir respectivement jusqu'à 70 et 95 km en amont de l'embouchure.

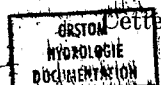
I. Dynamique des eaux.

a) *La topographie de l'estuaire* (distance à la mer, largeur, profondeur...) est déterminée sur la base des cartes topographiques et marines. Au cours des mesures hydrologiques dans l'estuaire, les sections mouillées et dénoyées pendant la marée sont mesurées aux stations étudiées et éventuel-

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39634

Cote : B



81021

19 3 JUIN 1994

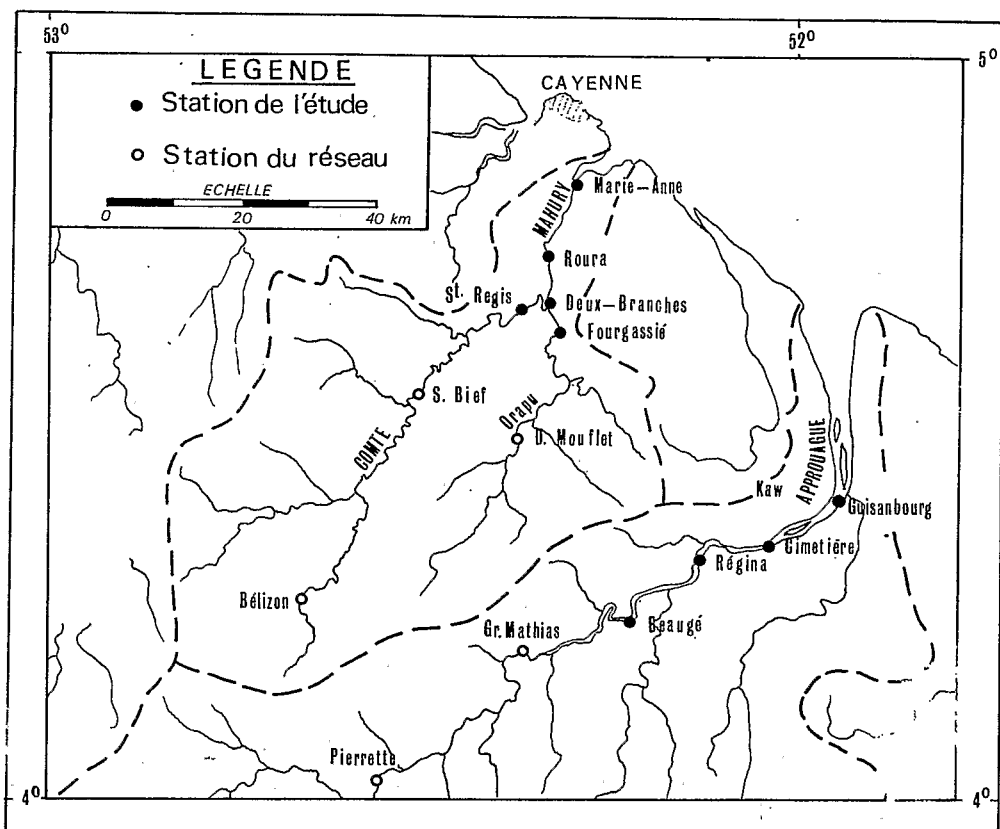


FIG. 1. — Stations étudiées dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague et stations du réseau hydrométrique.

lement à des stations intermédiaires si la documentation cartographique est insuffisante. On en déduit la relation entre la section mouillée et la hauteur d'eau. Le tableau I donne pour exemple les valeurs topographiques essentielles, obtenues à une des sections de chaque estuaire guyanais.

b) *Les apports fluviaux à l'estuaire* sont évalués à partir d'une station limnigraphique étalonnée, située le plus près possible de la limite de la marée dynamique. On bénéficie généralement de données recueillies avant l'étude dans le cadre du réseau hydrométrique régional. Il s'agit alors d'extrapoler dans l'espace et parfois le temps des données à l'aide de méthodes spécifiques, familières à l'hydrologue.

En Guyane, une station limnigraphique étalonnée existe à la limite de la marée dynamique sur chaque grand cours d'eau. On disposait ainsi de 5 et 10 années d'observations pour les stations en amont des estuaires étudiés. Les comparaisons avec d'autres stations exploitées depuis 23 années ont permis d'améliorer les déterminations, notamment celles des débits moyens et d'étiages de fréquences variées. Compte tenu des régimes hydrologiques guyanais les apports fluviaux aux diffé-

rentes sections estuariennes (tableau I) ont été estimés par application aux résultats amont d'un coefficient égal au rapport des superficies des bassins versants.

c) *Dans l'estuaire est déterminée l'évolution longitudinale :*

- des marnages,
- des heures d'établissement et des durées du jusant et du flot,
- des vitesses d'écoulement moyennes et maximales à n'importe quelle profondeur,
- des débits instantanés, moyens et maximaux,
- des volumes transités,
- des dérives.

Les variations de hauteurs d'eau sont lues sur des échelles limnimétriques pendant la durée des jaugeages. Il apparaît cependant préférable d'installer des limnigraphes de façon à pouvoir définir à tout moment le profil de l'onde de marée, et notamment les lieux géométriques de basse et haute mers et des inversions de courant. Ces éléments peuvent permettre l'élaboration de modèles mathématiques très complets.

Les marnages observés dans les estuaires du

MÉTHODOLOGIE DE MESURE
DE LA DYNAMIQUE DES EAUX, DES SELS
ET DES SUSPENSIONS EN ESTUAIRE

M. A. ROCHE

III. 1

TABLEAU I
*Paramètres topographiques, hydrologiques et physico-chimiques
dans une section des estuaires du Mahury et de l'Approuague, Guyane Française
(HM = haute mer, BM = basse mer, J = jusant, F = flot, R = résultante).*

Estuaire Station	MAHURY Roura			APPROUAGUE Régina		
	Distance à la mer (km)	23			55	
Coefficient de marée	33	95	96	80	42	95
Débit fluvial amont (m ³ /s)	75	145	125	180	305	510
Largeur moyenne	165	165	165	360	370	375
Section mouillée HM (m ²)	1 540	1 705	1 760	2 075	2 080	2 260
Section mouillée moyenne (m ²)	1 470	1 505	1 570	1 750	1 770	1 820
Section mouillée BM (m ²)	1 400	1 305	1 380	1 365	1 440	1 380
Profondeur moyenne (m)	8,9	9,1	9,6	4,8	4,8	4,9
Marnage en mer, théorique (m)	0,6	2,5	2,5	1,6	1,4	2,4
Marnage absolu, mesuré (m)	0,9	2,4	2,3	2,2	1,9	2,7
Marnage relatif (absolu/mer)	1,4	1,0	0,9	1,4	1,4	1,1
Retard du jusant/mer (h.mn)	1,30	0,45	1,00	1,05	0,30	0,30
Retard du flot/mer (h.mn)	2,10	1,35	1,15	0,05	1,20	0,20
Durée du jusant (h.mn)	7,35	6,35	6,35	6,50	9,20	8,15
Durée du flot (h.mn)	4,50	5,50	5,40	5,30	3,45	4,05
Vitesses moy. dans la section J (m/s)	0,23	0,55	0,47	0,42	0,45	0,60
F (m/s)	0,19	0,54	0,48	0,54	0,19	0,47
Vitesses max., milieu, 35 cm du fond J (m/s)	0,21	0,50	0,44	0,40	0,50	0,40
F (m/s)	0,17	0,50	0,56	0,48	0,20	0,44
Vitesses max., milieu, 10 cm de la surface J (m/s)	0,47	1,00	0,86	0,70	0,72	0,62
F (m/s)	0,31	1,00	1,00	0,60	0,60	0,61
Débit moy. dans la section J (m ³ /s)	332	830	738	735	797	1 087
F (m ³ /s)	280	802	757	942	336	854
Débit max. dans la section J (m ³ /s)	540	1 160	1 070	1 050	1 175	1 480
F (m ³ /s)	480	1 200	1 110	1 450	530	1 270
Volumes oscillants J (10 ⁶ m ³)	9,07	19,7	17,5	18,1	26,8	32,6
F (10 ⁶ m ³)	4,87	15,9	16,1	18,7	4,54	12,3
R (10 ⁶ m ³)	-4,2	-3,8	-1,4	+0,58	-22	-20
Dérives oscillantes moy. J (km)	6,2	13,1	11,1	10,3	15,1	17,9
F (km)	3,3	10,6	10,3	10,7	2,6	2,8
R (km)	-2,8	-2,5	-0,89	+0,33	-12,5	-11,2
Charges en suspension moy. par marée (mg/l)	27	270	17	270	52	17
max. par marée (mg/l)	27	290	23	290	60	19
Quantités de suspension transitées J (tonnes)	250	5 220	272	4 970	1 380	595
F (tonnes)	135	4 350	289	5 180	250	189
Teneurs ioniques globales moy. par marée (mg/l)	19,4	21,9	16,9	15,8	13,9	14,3
Teneurs ioniques globales max. par marée (mg/l)	22,7	39,2	20,8	16,1	14,2	14,6

Mahury et de l'Approuague varient entre 0,9 et 2,8 m (tableau I), avec une périodicité semi-diurne. Ils augmentent vers l'amont par amplification, jusqu'à une certaine distance de l'embouchure, puis diminuent en raison de la consommation d'énergie. L'écart d'amplitude entre la mer et une station varie en sens inverse du coefficient de

marée (tableau I). A Roura, le gain d'amplitude atteint 40 % du marnage en mer pour une marée de 33 alors que l'on note une diminution de 10 % pour une marée de 95.

La vitesse des eaux à travers les sections est mesurée, avec un moulinet monté sur câble et

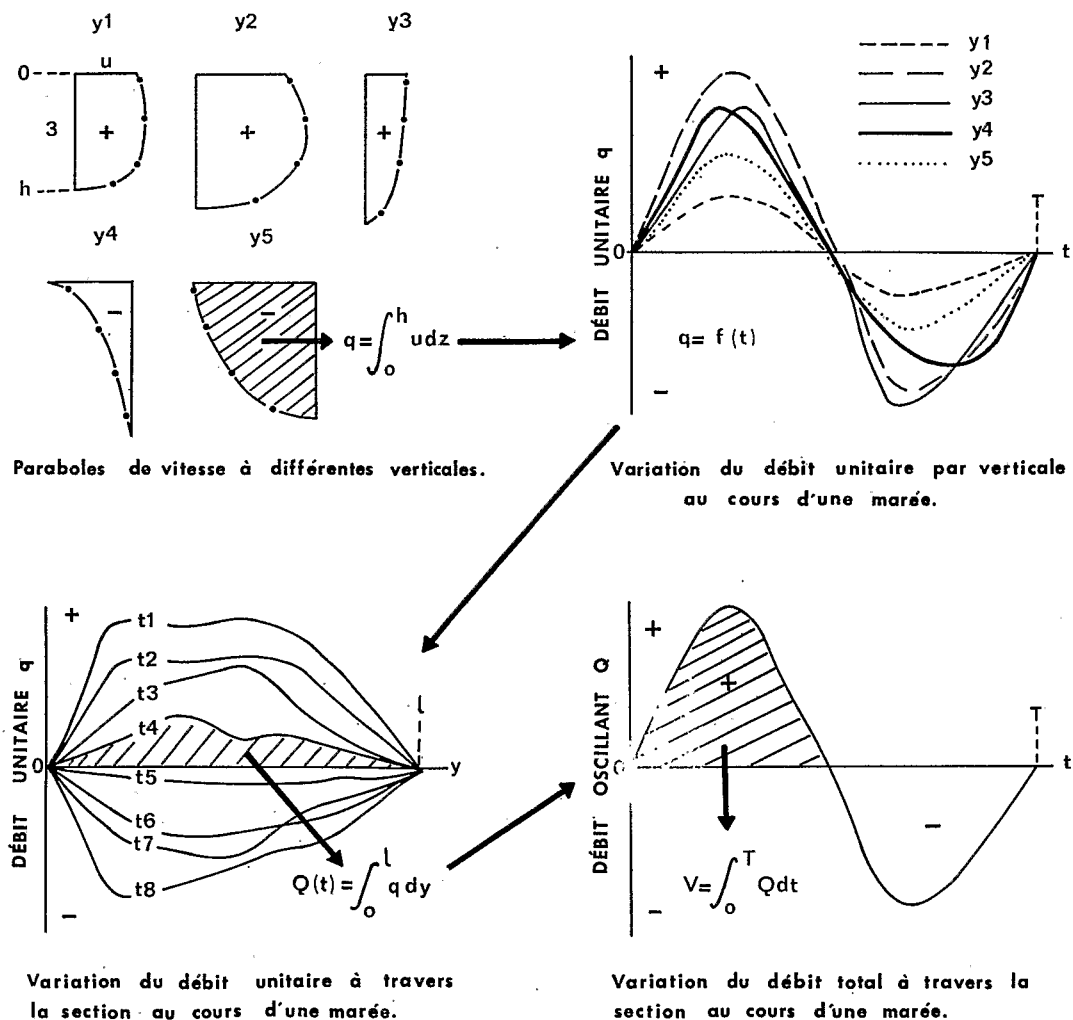


FIG. 2. — Détermination graphique de la variation des vitesses, des débits unitaires par verticale et à travers la section, des débits et des volumes oscillants à une station estuarienne, au cours d'une période de marée.

poinds de lestage, sur cinq verticales comprenant quatre points étagés depuis le fond jusqu'à la surface. Pour connaître la variation des paramètres oscillants, il convient de procéder au plus grand nombre possible de jaugeages au cours d'un cycle de marée, c'est-à-dire en une douzaine d'heures. La relation hauteur-débit n'étant pas univoque, il est vain de chercher à déduire le débit instantané des hauteurs en procédant à un étalonnage classique des stations. Ceci demande d'employer une méthode particulière de dépouillement des mesures.

En Guyane, une équipe de quatre hommes a effectué six jaugeages par période de marée à chaque station. Chaque section comprenait cinq verticales. A raison d'une douzaine d'heures de travail par jour, une campagne sur un estuaire durait ainsi cinq jours. Ce sont là des nombres limites de sections, de verticales, de jaugeages,

pour une précision satisfaisante. D'après notre expérience, la participation d'une deuxième équipe serait souhaitable. A notre avis, il serait alors préférable de répartir ce gain de main-d'œuvre entre l'augmentation du nombre de verticales par section dans la partie aval de l'estuaire et l'augmentation du nombre de sections étudiées.

Les vitesses ponctuelles u mesurées à des distances y de la rive et à des profondeurs z permettent de connaître les différents paramètres hydrauliques tels que les vitesses et les débits oscillants, jusqu'aux volumes V en fonction du temps t , selon la méthode graphique résumée sur la figure 2 (exemple des mesures effectuées à une station guyanaise au cours d'une période de marée). Après trois intégrations successives on aboutit au volume écoulé :

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

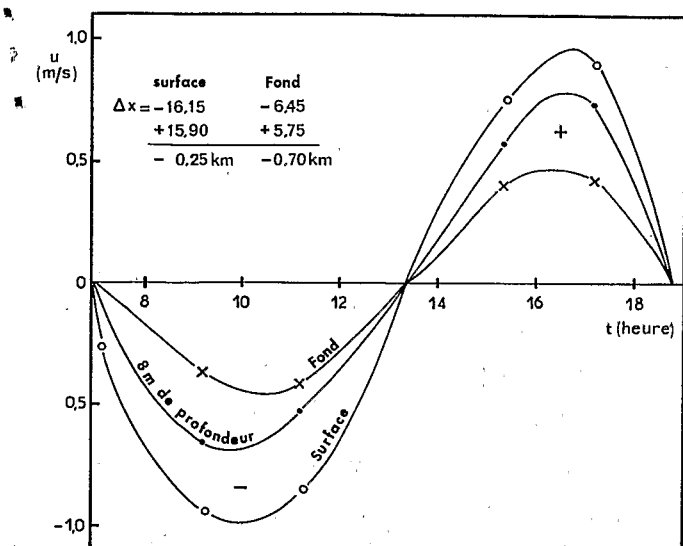


FIG. 3. — Variation des vitesses u au milieu de la section dans l'estuaire du Mahury et de l'Approuague au cours d'une période de marée. Estimation de la dérive Δx .

Sur la base de six mesures par point au cours d'une marée, auxquelles s'ajoutent les observations ou mesures des arrêts et des inversions de courant, il est possible de connaître par interpolation graphique les vitesses et les dérives en un point déterminé de la section (fig. 3).

La dérive oscillante est une notion importante pour la 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. Elle permet en particulier de situer les eaux de marée basse à la marée haute suivante et vice-versa. En première approximation, la dérive moyenne Δx^\pm à partir d'une section au cours du jusant ou du flot peut s'estimer par :

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

V^\pm étant le volume oscillant de flot ou de jusant et \bar{A} la section mouillée moyenne au cours de la marée sur la distance parcourue. La dérive résultante, à l'issue d'une période de marée représente la différence entre les deux valeurs de flot et de jusant (tableau I).

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

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

tel par exemple la dérive maximale, généralement située au milieu de la section ou à l'emplacement d'un chenal (fig. 3). Compte tenu de la variation

des sections de part et d'autre de la section de référence on obtient par cette méthode simple une estimation par excès vers l'aval et par défaut vers l'amont. Un modèle plus sophistiqué ne semble justifié que si on dispose de données topographiques très précises de l'estuaire.

Les valeurs de dérive croissent avec le coefficient de marée et le débit fluvial amont. Les dérives résultantes décroissent vers l'embouchure et peuvent être éventuellement dirigées vers l'amont pour certaines périodes de marée.

La figure 4 illustre la variation longitudinale des débits et des volumes oscillants dans l'estuaire de l'Approuague, pour des coefficients de marée et des débits fluviaux variés.

Afin de simplifier les mesures sur le terrain, nous avons cherché à relier le débit calculé par le produit de la section mouillée et de la vitesse à 1 m sous la surface, au milieu de la section, au débit lu sur la courbe $Q = f(t)$, telle qu'elle est tracée sur la figure 1. Les corrélations obtenues apparaissent très satisfaisantes. Dans le Mahury, en Guyane, les coefficients de réduction à appliquer aux valeurs ainsi trouvées sont compris entre 0,49 et 0,90 selon les stations.

Le volume d'eau contenu dans l'estuaire à marée basse V_m peut être estimé par intégration de la fonction

$$V_m = \int A m dx$$

où $A m$ est la section mouillée à marée basse et x la distance par rapport à la limite amont. En revanche, le volume du prisme de marée est plus difficile à évaluer correctement avec cette méthode cartographique, en raison des nombreux affluents et zones bordières inondées où les paramètres topographiques et le comportement de la marée sont souvent mal connus. Le volume oscillant, diminué de l'apport fluvial en jusant et augmenté de cet apport en flot, représente le prisme de marée, c'est-à-dire le volume d'eau nécessaire pour produire le marnage observé. La somme du volume de marée basse et du prisme de marée représente le volume d'eau total dans l'estuaire. Ce sont là des éléments indispensables à certains calculs de dilution et à l'application de modèles du type de ceux de B.H. Ketchum (1951), de D.W. Pritchard (1955).

Au sujet de l'évaluation des volumes oscillants à partir du prisme de marnage, il existe une méthode mathématique facilement accessible aux hydrologues (J. Le Floch, 1961; J.L. Mauvais, 1971). Elle consiste à évaluer, sur la base d'enregistrements limnigraphiques, les volumes déduits de la variation des profils instantanés de l'onde de marée, pendant de courts laps de temps (10 mn). On peut alors retracer la variation des vitesses et des débits moyens à une station au cours de la

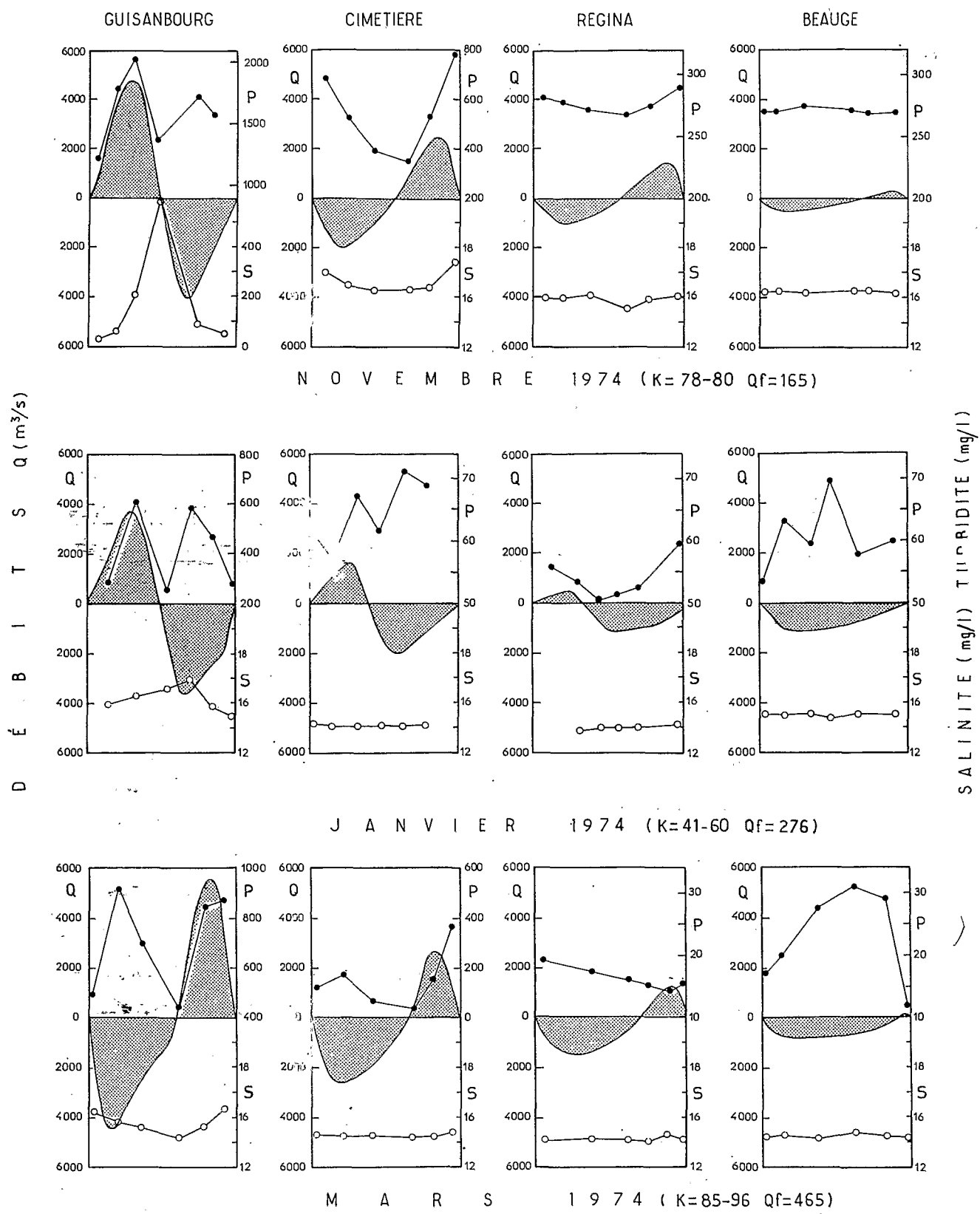


Fig. 4. — Débits oscillants Q (m^3/s), charge en suspension P (turbidité, mg/l) et salure S (mg/l) dans l'estuaire de l'Approuague pour des coefficients de marée K et des débits fluviaux Q_f (m^3/s) variés.

période de marée. Les résultats peuvent être confrontés aux mesures. Une telle méthode implique également une parfaite connaissance des apports fluviaux, de la morphologie de l'estuaire, des variations de hauteurs d'eau par enregistrement à des stations rapprochées et d'altitude connue.

2. Dynamique des éléments en suspension ou en solution.

La température, le pH et la teneur en oxygène dissous sont mesurés *in situ* à l'aide d'un appareil à sonde (Martek).

Des prélèvements d'eau de deux litres sont effectués immédiatement après la mesure d'une vitesse, à raison de trois par verticale. Ces prélèvements sont faits à l'aide d'une pompe à main et d'un tuyau branché dans le sens du courant entre l'hélice et le poids de lestage (B. BILLON, 1968; J.F. NOUVELLOT, 1972). Ils sont destinés à la mesure en laboratoire de la conductivité et de la charge en suspension.

Selon une méthode graphique analogue à celle des débits liquides (fig. 2), on évalue différentes caractéristiques (tableau I) tels que les débits oscillants de matière, les teneurs moyennes, jusqu'aux quantités de matière oscillantes :

$$W = \int S u dz dy dt$$

Le débit moyen de matière \overline{QS} au cours du jusant ou du flot est ainsi défini par

$$\overline{QS}^{\pm} = W^{\pm}/t^{\pm}$$

et la concentration moyenne S^{\pm} par

$$\overline{S}^{\pm} = W^{\pm}/V^{\pm}$$

Lorsqu'une variation des concentrations au cours de la marée est mise en évidence mais qu'il existe une stratification très faible, on peut évaluer, pour chaque jaugeage, la moyenne arithmétique des teneurs ponctuelles dans la section. Le débit de matière QS à l'heure moyenne du jaugeage est alors le produit de cette teneur moyenne par le débit lu sur la courbe $Q = f(t)$ à l'heure prise en considération. On peut ainsi tracer la courbe $QS = f(t)$, à partir de laquelle on obtient, par planimétrie, la quantité de matière transitée.

Lorsqu'il n'apparaît dans la section aucune variation significative des teneurs au cours de la marée, leur moyenne arithmétique est calculée. La quantité de matière transitée est alors égale au produit de cette valeur moyenne par le volume d'eau oscillant.

La figure 4 montre les variations semi-diurnes des salures ioniques et des charges en suspension

moyennes mesurées dans les différentes sections de l'Approuague.

Un échantillon supplémentaire de deux litres, réalisé à chaque jaugeage au milieu de la section, est destiné aux analyses d'ions en laboratoire. On établit notamment la relation qui permet la traduction de la conductivité en salinité.

CONCLUSION

Les mesures réalisées à quelques stations d'un estuaire par l'hydrologue équipé d'un matériel classique de jaugeage permettent, grâce à une méthode graphique originale, de fournir les principaux paramètres nécessaires à l'élaboration et à la vérification de modèles sur la dynamique des fluides et de polluants dissous ou en suspension dans un estuaire. Des valeurs sont facilement obtenues sur la topographie de l'estuaire, les apports fluviaux amont, les marnages, les vitesses les débits, les volumes et dérives oscillants, le volume du prisme de marnage, les débits et quantités de matière oscillants, les charges moyennes, etc. L'évolution de ces paramètres est caractérisée tout au long de l'estuaire par le choix d'environ cinq stations de mesure.

L'élaboration des modèles mathématiques est ensuite fonction des problèmes à traiter mais dépend aussi de l'abondance des données recueillies sur le terrain. Il convient donc d'effectuer les mesures pour différents coefficients de marée et différents débits fluviaux. Il est également important de déterminer les limites de l'évolution en réalisant des mesures dans des conditions extrêmes (et notamment dans les plus défavorables) survenues au cours du temps imparti pour les opérations, c'est-à-dire en période d'étiage fluvial et de forts coefficients de marée.

BIBLIOGRAPHIE

- BENNERT H., TARDIF M., ORGERON (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 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. Hydrof., V, 2, pp. 3-13.
- KETCHUM B.H. (1951) — The exchanges of fresh and salt waters in tidal estuaries. *J. Mar. Res.*, pp. 18-38, 5 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, Mbei et Awebé. Sect. Hydrol. O.R.S.T.O.M., Paris, 50 p.
- MAUVAIS J.L. (1971). — Calcul des vitesses moyennes instantanées en Loire Maritime. *Cah. Océan.*, XXIII, 3, pp. 251-266, 13 fig.
- MOLINIER M., TOILLIEZ J. (1973). — Hydrologie de la région de San Pedro. Fleuves San Pedro, Néro et Brimay. Sect. Hydrol. O.R.S.T.O.M., Paris, 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.
- PRITCHARD D.W. (1955) — The dynamic structure of a coastal plain estuary *J. Mar. Res.*, pp. 33-42 1fig.
- ROCHE M.A. (1972). — Traçage hydrochimique naturel du mouvement des eaux dans le lac Tchad. Symposium sur l'hydrologie des lacs. *A.I.H.S.*, Helsinki 1973, pp. 18-27.
- ROCHE M.A. (1975). — Geochemistry and natural ionic and isotopic tracing; two complementary ways to study the natural salinity regime of the hydrological system of lake Chad. *J. of Hydrol.*, 26, pp. 153-171, 7 fig.
- ROCHE M.A., DUBREUIL P., HOEPPFNER 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.
- ROCHETTE C. (1964). — Remontée des eaux marines dans le Sénégal. Sect. Hydrol., O.R.S.T.O.M., Paris, 81 p., 54 fig.