

DYNAMIQUE

DES EAUX, DES SELS ET DES SÉDIMENTS EN SUSPENSION
DANS LES ESTUAIRES DU MAHURY ET DE L'APPROUAGUE.

ÉTUDE EN VUE DE L'ALIMENTATION
D'UNE USINE DE PATE DE BOIS
(GUYANE-FRANÇAISE)

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE O. R. S. T. O. M. DE CAYENNE



DYNAMIQUE
DES EAUX, DES SELS ET DES SEDIMENTS EN SUSPENSION
DANS LES ESTUAIRES DU MAHURY ET DE L'APPROUAGUE.

ETUDE EN VUE DE L'ALIMENTATION
D'UNE USINE DE PATE DE BOIS
(GUYANE FRANCAISE)

par

M.A. ROCHE
Chargé de Recherches

P. DUBREUIL
Directeur de Recherches

M. HOEPPFNER
Chargé de Recherches

MAI 1974

Résumé

Les possibilités d'alimentation d'une usine de pâte de bois par les eaux estuariennes du Mahury et de l'Approuague sont étudiées en 4 et 5 stations, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, dans des conditions hydrologiques relativement défavorables.

L'analyse statistique des données hydrométriques, recueillies pendant 5 à 22 ans sur les tributaires ou sur l'ensemble des cours d'eau de Guyane française, montre que les étiages moyens mensuels décennaux et les étiages moyens mensuels interannuels sont respectivement au moins 3 à 40 fois et 10 à 70 fois supérieurs, selon les sites possibles, aux besoins d'une grande usine moderne. La marée dynamique pénètre de 70 km dans le Mahury et de 95 km dans l'Approuague. A partir des vitesses mesurées dans l'ensemble des sections au cours de la marée, on estime les dérivées et les volumes oscillants (maximum mesuré en flot de $40 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dans le Mahury et de $70 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dans l'Approuague).

Les eaux fluviales, extrêmement peu minéralisées (12 à 15 mg/l d'ions, 3 à 5 mg/l de Cl^-), conservent leurs caractéristiques physico-chimiques jusqu'à 23 et 43 km de chaque embouchure. Leur qualité reste encore supérieure aux limites admissibles dans l'industrie de la pâte jusqu'à environ 20 et 35 km ; les teneurs demeurent respectivement inférieures à 200,65 et 20 mg/l pour la salure ionique globale, le chlore et la silice, à 3,0, 3,3 et 7,0 mg/l de CO_3Ca pour les duretés calcique, magnésienne et totale, à 36 mg/l de CO_3Ca pour l'alcalinité au méthyl orange. Les concentrations en Fe^{3+} (0,14 à 0,83 mg/l) et en matière en suspension (12 à 1700 mg/l) obligeront, quel que soit le site retenu, à une floculation et à une déferrisation. Après ce traitement et une épuration bactériologique, les eaux seront également potables.

Quelques réflexions soulignent le grave problème des rejets d'eaux résiduaires dans une des rares régions encore épargnée par toute pollution.

Abstract

Studies of quantity and quality of water supplies for a pulpmill from the Mahury and Approuague Estuaries are carried out at four and five points, under rather unfavorable hydrologic conditions.

Statistic analysis of hydrometric datas, collected during 5 to 22 years in tributaries or in the whole french guianish rivers, shows that decennial mean monthly low-waters and interannual mean monthly low-waters are relatively at least 3 to 40 times and 10 to 70 times higher, according to possible points investigated, than needs of a modern big factory. The tide penetrates 70 km in the Mahury Estuary and 95 km in the Approuague Estuary. On basis of velocities measured in the whole

sections during a tidal cycle, ebb, flood and net drifts and volumes are estimated (flood's maximum observed : $40 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ in the Mahury and $70 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ in the Approuague).

River waters, very fresh (total ions : 12 to 15 mg/l, Cl^- : 3 to 5 mg/l), conserve their physico-chemical characteristics untill 23 and 43 km of every mouth. Quality continues to be superior than the admissible limits for pulp industry untill about 20 and 35 km : contents remain respectively lower than 200, 65 and 20 mg/l for total ions, chlor and sillicate, than 3,0, 3,3 and 7,0 mg/l for the calcic, magnesian and total hardness (in CO_3Ca) and 36 mg/l for alkalinity with Orange Methyl. Fe^{3+} (0,14 to 0,83 mg/l) and suspended matter (12 to 1700 mg/l) concentrations will constrain, in any case, to flocculate and to remove iron. After such a treatment and a bacteriologic cleansing, waters will be potable.

There should be some considerations of the grave problem of sewage disposal in one of rare regions not yet polluted in the world.

SOMMAIRE

	Page
Résumé	3
1. <u>INTRODUCTION</u>	7
2. <u>METHODOLOGIE</u>	9
2.1. Méthodes hydrométriques	9
2.2. Mesures des teneurs en matières dissoutes et en suspension	11
2.3. Méthodes d'estimation des teneurs moyennes et des quantités de matières transportées	14
2.4. Méthodes d'analyses bactériologiques	15
3. <u>CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES ESTUAIRES</u>	17
4. <u>LES APPORTS FLUVIAUX AUX ESTUAIRES</u>	19
4.1. Les modules	19
4.2. Les débits moyens mensuels	21
4.3. Les étiages	21
4.4. Conclusion sur les possibilités quantitatives d'alimentation de l'usine en eaux fluviales	23
4.5. Les apports fluviaux au cours des campagnes	24
5. <u>VARIATIONS DES HAUTEURS D'EAU DANS LES ESTUAIRES</u>	27
6. <u>CARACTERISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT DANS LES ESTUAIRES</u>	31
6.1. Etablissement du jusant et du flot	31
6.2. Vitesses d'écoulement	31
6.3. Volumes et débits oscillants	36
6.4. Dérives oscillantes	41
6.4.1. Méthode et résultats	41
6.4.2. Evacuation des eaux en mer	43
6.4.3. Risques de pollution de la prise d'eau de Saint Régis	43

7.	<u>QUALITE DES EAUX ESTUARIENNES</u>	47
7.1.	La qualité des eaux requise dans l'industrie de la pâte de bois	47
7.2.	Matières en suspension : concentrations P et transports W	49
7.3.	Températures T	56
7.4.	pH	56
7.5.	Oxygène dissous O ₂	61
7.6.	Demande biologique et chimique en oxygène DBO ₅ et DCO	61
7.7.	Teneurs ioniques globales S	62
7.7.1.	Définition. Relation entre la salure globale et la conductivité	62
7.7.2.	Stratification des salures	63
7.7.3.	Variations semi-diurnes des salures	63
7.7.4.	Variations longitudinales des salures. La limite de la remontée saline	65
7.8.	Teneurs ioniques spécifiques Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Fe ³⁺ , Mn ²⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , CO ₃ H ⁻	66
7.9.	Silice dissoute SiO ₂	69
7.10.	Teneurs en nitrite NO ₂ ⁻ , nitrates NO ₃ ⁻ , et ammoniacque NH ₄ ⁺	69
7.11.	Bactériologie	69
8.	<u>LA POLLUTION PAR LES USINES DE PATE DE BOIS</u>	73
9.	<u>CONCLUSION GENERALE SUR LES POSSIBILITES D'ALIMENTATION D'UNE USINE DE PATE DE BOIS</u>	75
	BIBLIOGRAPHIE	77

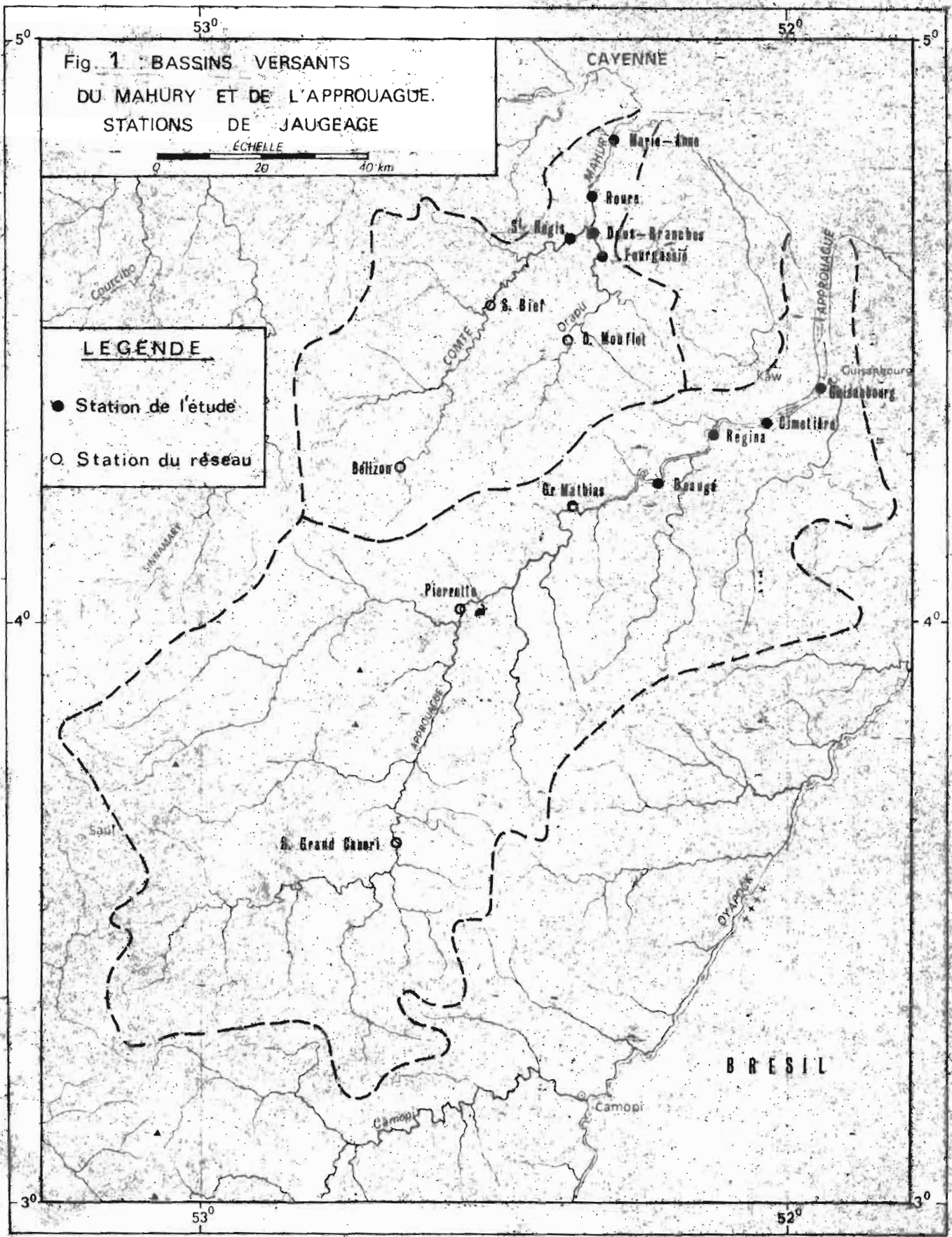
1. INTRODUCTION

Par convention, l'Office National des Forêts (O.N.F.) a confié à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.) l'étude des possibilités quantitatives et qualitatives d'alimentation en eau d'une usine de pâte de bois et d'une cité forestière attenante dont l'implantation serait envisagée sur les bords de l'estuaire du Mahury ou de l'Approuague (fig. 1).

Les déterminations à effectuer par l'O.R.S.T.O.M. sur les deux estuaires portent sur :

- les débits d'étiage moyen et décennal en amont de la zone de maréc,
- la qualité physico-chimique des eaux et sa variabilité en fonction des débits,
- la salure des eaux dans la zone estuarienne et la position maximale de remontée des eaux saumâtres en fonction des marées et des débits,
- une estimation de la quantité des matériaux en suspension dans la zone estuarienne et de leur sédimentation.

La sédimentation des matières en suspension dans le Mahury a déjà fait l'objet de deux études importantes (L. BERTHOIS et J. HOORELBECK -1968-, L.C.H.F. -1968-). Toutefois les stations contrôlées sont limitées dans la partie inférieure de l'estuaire (Stoupan, Marie-Anne) et peu ou pas d'indication sont fournies sur les quantités d'eau et de matières oscillant en différentes stations. Les résultats ne sont donc guère utilisables pour résoudre le problème posé.



2. METHODOLOGIE

Nous nous sommes attachés à caractériser les limites de l'évolution annuelle des eaux, des sels et des matières en suspension, en effectuant des observations dans les conditions les plus défavorables survenues au cours du temps qui nous était imparti.

Pour cela, trois campagnes de mesures et de prélèvements ont lieu sur chaque estuaire, soit six campagnes au total : une en période de basses eaux (octobre, novembre), deux en période de hautes eaux (décembre - janvier - mars). Elles se déroulent dans chaque estuaire pendant deux marées de vives-eaux et une marée de mortes-eaux.

Les grandes lignes du programme ont été établies par P. DUBREUIL, Directeur de Recherches à l'O.R.S.T.O.M., M. HOEPFFNER, chargé de Recherches à l'O.R.S.T.O.M. a organisé trois campagnes et dépouillé une partie des résultats des deux premières. M.A. ROCHE, Chargé de Recherches à l'O.R.S.T.O.M., a assuré les quatre dernières campagnes, dépouillé les résultats et rédigé le rapport. L'opération a bénéficié de la collaboration technique de J. KONG et J. DEWARD.

2.1. Méthodes hydrométriques

2.1.1. Mesures hydrométriques sur le terrain

a. Hors de toute influence maritime, on dispose :

- des débits journaliers mesurés depuis décembre 1970 à Saut Bief sur la Comté (principal tributaire du Mahury),
- de quelques mesures de débit effectuées à Dégrad Mouflet sur l'Orapu (deuxième affluent du Mahury), aussitôt après les campagnes sur l'estuaire,
- des débits journaliers de l'Approuague à Pierrette de 1954 à 1959 et de 1969 à 1974.

b. Dans la zone soumise à la marée dynamique, les stations de contrôle (fig. 1) sont au nombre de 5 sur le Mahury :

I	Marie Anne	(10 km de l'embouchure)
II	Roura	(22,5 km)
III	Deux Branches	(29 km)
IV	Saint Régis	(36 km)
V	Fourgassié	(35,5 km)

et de 4 sur l'Approuague :

I	Guisanbourg	(30 km de l'embouchure)
II	Cimetière	(43 km)
III	Régina	(55 km)
IV	Beugé	(71 km)

Elles sont équipées d'échelles limnimétriques.

Une pirogue de 10 m de long, bordée de planches, propulsée par un moteur hors-bord, est utilisée comme embarcation.

La vitesse des eaux à travers les sections est mesurée, avec un moulinet OTT C31 monté sur câble et poids de lestage (saumon), sur cinq verticales comprenant en général chacune quatre points étagés depuis le fond jusqu'à la surface.

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.

Par ailleurs, la marée, à cycle semi-diurne sur les côtes guyanaises, entraîne une variation rapide des paramètres hydrométriques (hauteurs, vitesses, débits). Il convient donc, pour connaître la variation des débits au cours d'une période de marée, de procéder au plus grand nombre possible de jaugages en une douzaine d'heures. Ceci demande alors d'employer une méthode particulière de dépouillement des mesures.

Les moyens en personnel (4 hommes) devaient nous restreindre à six jaugages à chaque station. C'est là un nombre limite pour une précision satisfaisante des résultats.

2.1.2. Détermination graphique des paramètres hydrométriques

Le volume écoulé

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

dont les termes vont être définis ci-dessous, est obtenu par trois intégrations graphiques successives.

a. La planimétrie de l'aire définie par une "parabole de vitesses", $u = f(z)$, permet d'évaluer le débit unitaire sur une verticale

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

avec u = vitesse et z = profondeur de la surface au fond h , pendant un temps relativement court (5 à 10 minutes) en

regard de la période de marée (fig. 2). La courbe de variation temporelle du débit unitaire $q = f(t)$ est tracée pour chaque verticale à partir des résultats des six jaugeages (fig. 3)

b. A partir de ces courbes, on peut par interpolation, estimer les débits unitaires à chaque verticale à des heures données pour tracer les courbes $q = f(y)$, y étant l'abscisse dans la section (fig. 4). Les aires délimitées par ces courbes équivalent aux débits totaux à travers la section de largeur l

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

aux temps correspondants. Leur planimétrie permet de tracer la courbe $Q = f(t)$, telle celle qui est montrée en exemple sur la figure 5.

c. Une dernière planimétrie de l'aire définie par cette courbe revient à estimer le volume écoulé

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

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. Mesures des teneurs en matières dissoutes et en suspension

2.2.1. Mesures et échantillonnage in situ

La température des eaux et les teneurs en oxygène dissous sont mesurées in situ à l'aide d'un appareil MARTEK DOA à piles.

Trois échantillons d'eau de 2 litres sont prélevés à chaque verticale, au fond (0,35 m), au milieu et en surface, immédiatement après la mesure des vitesses, soit 15 prélèvements par jaugeage. Aux trois premières campagnes, ces prélèvements sont faits sur chaque verticale, au milieu, en surface et à mi-distance de ces deux points. Ils sont destinés à la mesure en laboratoire de la conductivité et de la teneur en suspension.

Le système de prise d'eau est monté entre le saumon et le moulinet ; il est relié à l'embarcation par un tuyau en plastique branché sur une pompe à bras Japy (cf. B. BILLON -1968- et J.F. NOUVELOT -1972-).

Un échantillon supplémentaire de 2 litres, effectué à chaque jaugeage, en surface au milieu de la section, est réservé aux analyses physico-chimiques en laboratoire. En fin de jusant sont prélevés également au même point, 5 litres pour

la mesure de la DBO 5 avec l'oxymètre et un flacon stérilisé. Ce dernier, conservé en glacière, sera l'objet d'analyses bactériologiques.

Le pH des eaux échantillonnées dans la journée est mesuré chaque soir à l'aide d'un pH-mètre Prolabo à piles.

2.2.2. Méthodes d'analyses physico-chimiques en laboratoire

Les teneurs en matières en suspension, le pH, la conductivité, les teneurs en Cl^- , CO_3H^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Fe^{3+} , Mn^{2+} et en silice dissoute, sont déterminées au laboratoire du Centre ORSTOM de Cayenne.

La gamme très étendue des concentrations a conduit les Hydrologues à proposer au laboratoire des méthodes adaptées au dosage des très faibles teneurs en anions et en matières en suspension.

- Charge en suspension P. Elle est recueillie sur filtre en papier Durieux rouge, après addition de 5 ml d'acide chlorhydrique 12N, puis pesée, après passage à l'étuve à 60° et refroidissement au dessiccateur. Les filtres subissent au cours de leur séchage à l'étuve une perte de poids de 20 à 40%, dont on tient compte dans le résultat final. A partir de janvier, chaque filtre est passé une première fois à l'étuve avant d'être taré à vide et de recueillir la matière en suspension. La perte de poids n'est plus alors que de quelques % lors du deuxième séchage.

- Conductivité C. Elle est mesurée à l'aide d'un conductimètre Philips (type PW 9504, pile-secteur).

- Chlore Cl^- . La méthode de Mohr (nitrate d'argent, bichromate de potassium) est utilisée. A partir de janvier, les teneurs inférieures à 35 mg/l sont concentrées 10 fois par évaporation des eaux avant l'analyse car les valeurs trouvées sur les échantillons bruts s'avèrent anormalement élevées. L'iode et le brome, en très faibles teneurs, sont comptés dans le résultat.

- Bicarbonate CO_3H^- . La méthode qui utilise l'héliantine comme indicateur coloré (virage vers pH 4,5), la seule employée pour les trois premières campagnes, fournit pour les faibles concentrations des valeurs trop fortes et a dû être doublée par la suite par un dosage potentiométrique (variation du pH en fonction du volume d'acide sulfurique et détermination du point d'inflexion) qui fournit la teneur exacte en acide carbonique. Il est un fait que les valeurs obtenues, contrairement à celles de la première méthode, satisfont à l'équilibre de la balance ionique. La limite de sensibilité est de 1 mg/l.

- Sulfate SO_4^{2-} . Le dosage gravimétrique a une limite de sensibilité beaucoup trop élevée (5 mg/l). Elle a été remplacée après la troisième campagne par la mesure turbidimétrique dont la limite de sensibilité atteint en principe 0,5 mg/l.

VITESSE (m/s)

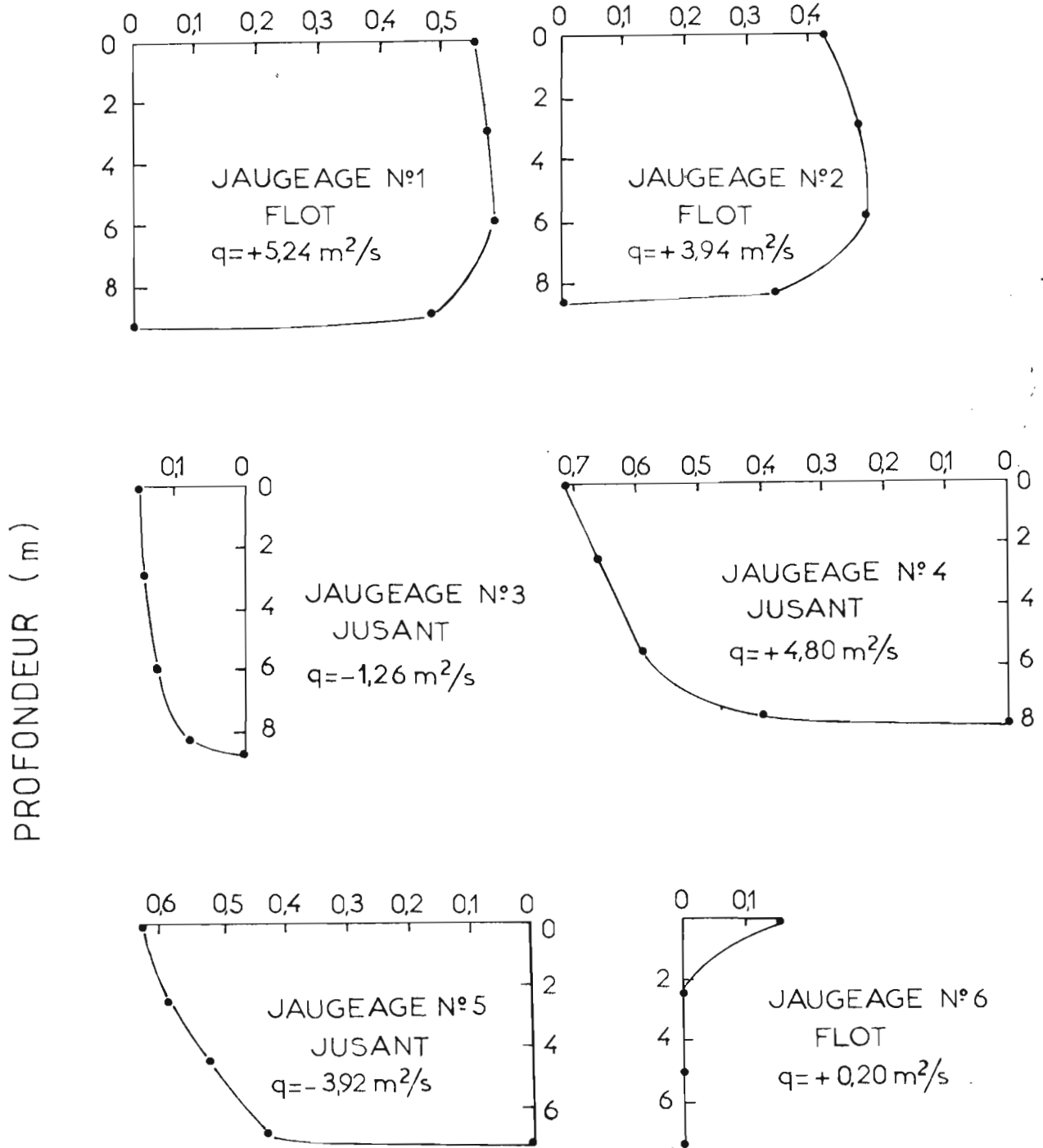


Fig. 2 : Fourgassié, le 13 décembre 1973. Vitesse des eaux fonction de la profondeur sur la verticale du milieu de la section ("paraboles de vitesse"), au cours d'une période de marée.

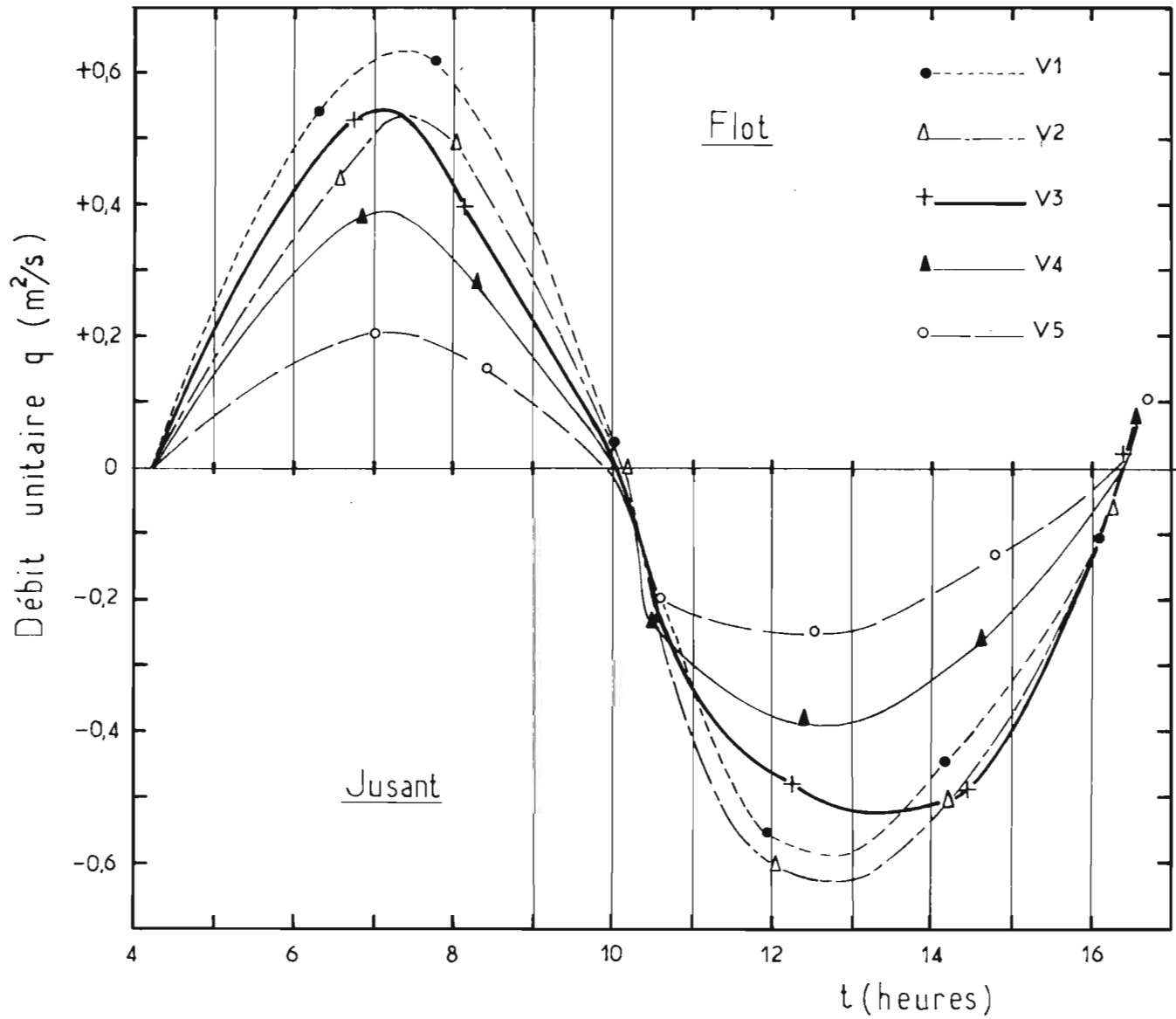


Fig. 3 : Fourgassié, le 13 décembre 1973. Variation du débit liquide unitaire au cours d'une période de marée à chaque verticale de la section.

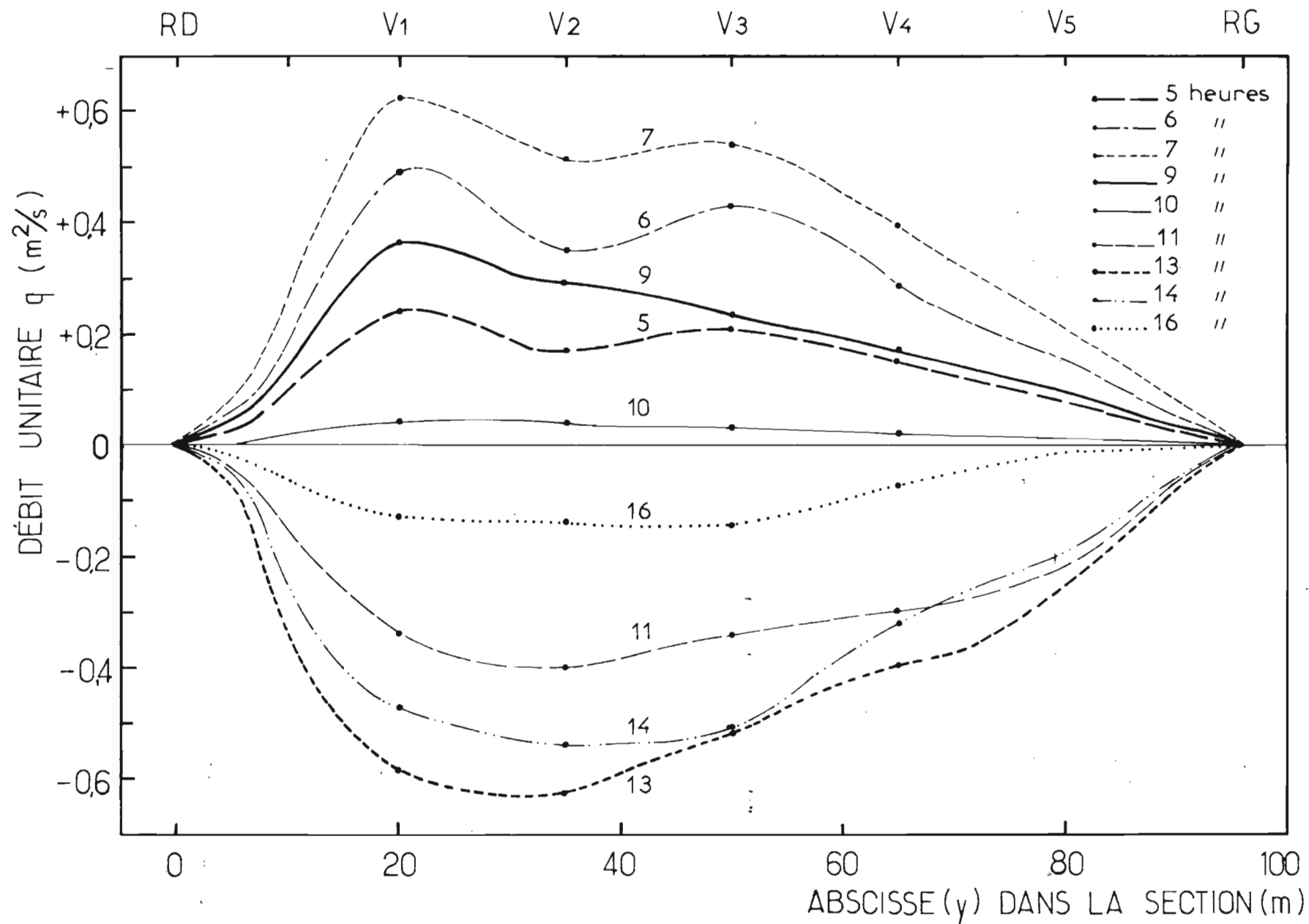


Fig.4: Fourgassié, le 13 décembre 1973. Variation du débit liquide unitaire dans l'ensemble de la section à différentes heures d'une période de marée.

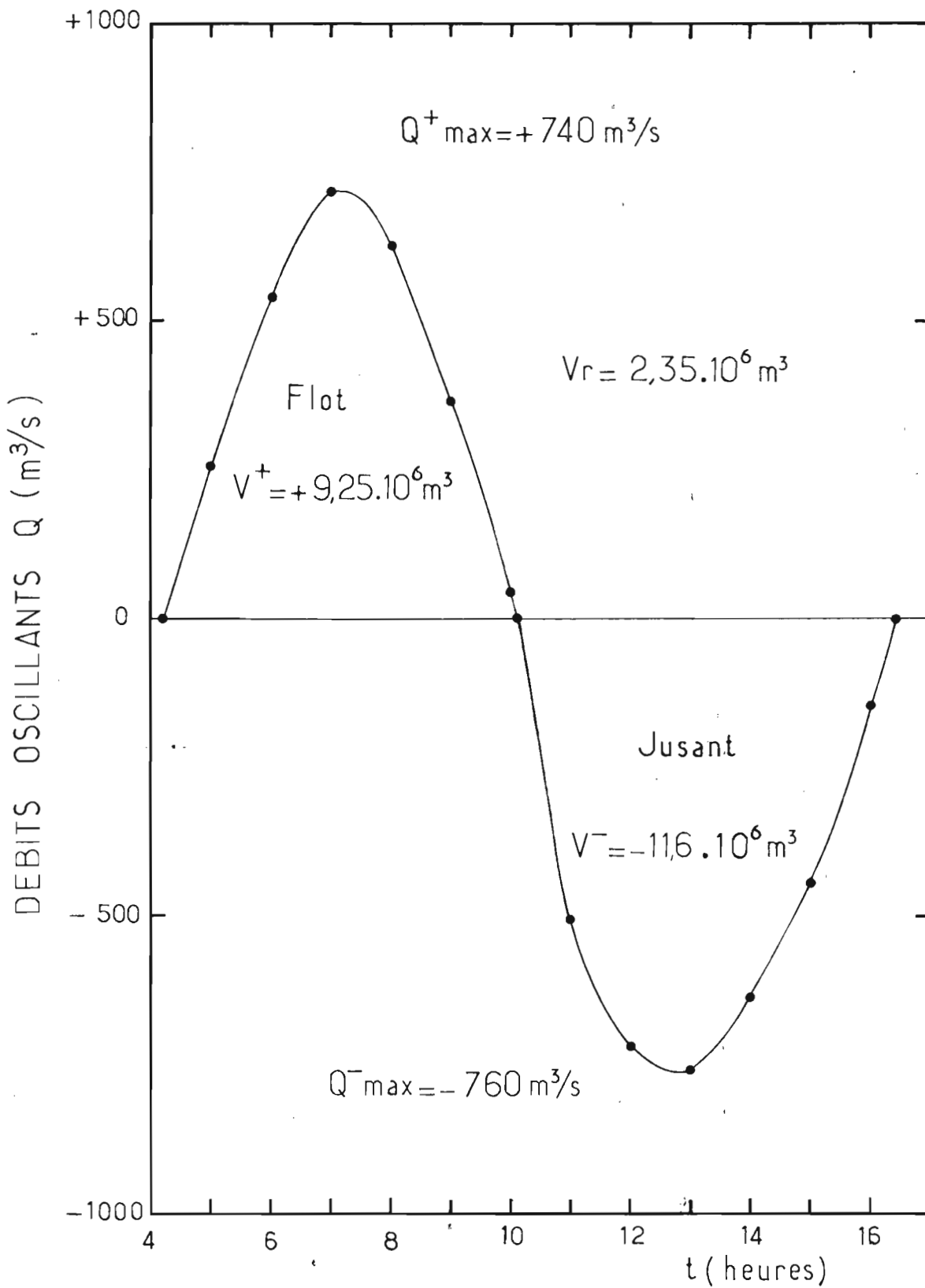


Fig. 5 : Fourgassié, le 13 décembre 1973. Variation du débit liquide au cours d'une période de marée dans l'ensemble de la section.

- Nitrates NO_3^- . Le réactif sulfaphénique donne avec l'ion NO_3^- l'acide nitro-phénol disulfonique. En présence d'ammoniaque, il se forme du nitro-phénol disulfonate d'ammoniaque d'une coloration jaune mesurée par colorimétrie. La limite de sensibilité est de 0,1 mg/l.

- Azote ammoniacale NH_4^+ . Le réactif de Nessler, en présence d'ammoniaque et de sels d'ammonium donne un précipité rouge d'iodure de dimercuri-ammonium qui permet un dosage colorimétrique. La limite de sensibilité est 0,05 mg/l.

- Les cations majeurs, le fer et le manganèse. Leur dosage est effectué par spectrophotométrie d'absorption atomique (Perkin-Elmer 107), après concentration par évaporation (jusqu'à 10 fois) ou dilution (jusqu'à 2000 fois) des solutions selon les teneurs. Les limites de sensibilité (en mg/l) sont les suivantes :

Ca^{2+} : 0,002 Mg^{2+} : 0,0001 Na^+ : 0,001 K^+ : 0,004
 Fe^{3+} : 0,01 Mn^{2+} : 0,1

Le fer et le manganèse ne sont dosés qu'à partir de la troisième campagne. Il en est de même pour le manganèse mais la limite de sensibilité n'a pas été abaissée en dessous de 0,1 mg/l.

- Silice dissoute. La teneur est déterminée par colorimétrie avec le molybdate d'ammoniaque comme réactif. La limite de sensibilité est 1 mg/l et peut être abaissée à 0,1 mg/l. Les analyses sont réalisées à partir de la troisième campagne.

- Consommation d'oxygène du permanganate à chaud DCO. Le dosage des matières organiques au permanganate de potassium consiste à mesurer la quantité d'oxygène absorbée dans des conditions bien définies (norme AFNOR T 90-018). En milieu acide, on oxyde l'échantillon d'eau par un excès de KMnO_4 , en 10 minutes d'ébullition. On ajoute ensuite une quantité de sulfate ferreux d'ammonium équivalente à celle du permanganate. L'excès de sulfate est titré à l'aide de MnO_4K . Il correspond au permanganate consommé par les matières oxydables.

- Demande biologique d'oxygène dissous DBO. La demande biologique d'oxygène est la quantité d'oxygène consommée par les germes aérobies pour assurer, dans des conditions très précises, la décomposition des matières organiques contenues dans l'eau.

Nous n'avons pu suivre les normes de la méthode et les résultats ne seront donnés qu'à titre indicatif.

Nous mesurons la teneur en oxygène in situ. Un

échantillon, est prélevé simultanément et conservé à 25°C dans l'obscurité. Une deuxième mesure, cinq jours plus tard, permet de déterminer la consommation d'oxygène.

2.3. Méthodes d'estimation des teneurs moyennes et des quantités de matières transportées.

Selon la variation spatio-temporelle des concentrations au cours de la période de marée à la station considérée, trois méthodes de simplicité croissante peuvent être utilisées pour l'évaluation des quantités de sédiments en suspension ou de sels transités et des concentrations moyennes pondérées.

2.3.1. Lorsqu'il existe une stratification ou une variation temporelle marquée au cours de la période de marée, la méthode de la triple intégration graphique (cf. § 2.1. pour l'estimation du volume d'eau) doit être employée. La quantité de sels transitée W s'écrit

$$W = \iiint S_1 u_1 dt dy dz$$

S_1 étant la salinité ponctuelle au point de coordonnées y, z (abscisse et profondeur dans la section) à l'instant t et u_1 la vitesse des eaux au même point et au même instant. Le débit salin moyen \overline{QS} au cours du jusant ou du flot est ainsi défini par

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

et la concentration moyenne par

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

V étant le volume écoulé.

2.3.2. Lorsqu'est mise en évidence une variation des concentrations au cours de la marée mais une stratification très faible, une méthode de calcul simplifiée et plus rapide que la première (§ 2.3.1.) consiste à évaluer, pour chaque jaugeage, la valeur moyenne arithmétique \overline{S}_3 des teneurs ponctuelles S_1 de la section. Le débit de matière QS à l'heure moyenne du jaugeage est défini par la relation

$$QS = Q \cdot \overline{S}_3$$

Q étant le débit lu sur la courbe $Q = f(t)$, à l'heure prise en considération (fig. 5).

On peut ainsi tracer la courbe $QS = f(t)$, à partir de laquelle on obtient, par planimétrie la quantité de matière

transitée

$$W \pm = \int_{t_0}^{t \pm} QS \, dt$$

2.3.3. Lorsqu'il n'apparaît dans la section aucune variation significative des teneurs S_1 au cours de la marée, la moyenne arithmétique de toutes ces valeurs est calculée. On peut éventuellement calculer séparément les moyennes $\bar{S} \pm$ pour le flot et le jusant. Il vient alors

$$W \pm = v \pm \cdot \bar{S} \pm$$

2.4. Méthodes d'examens bactériologiques

Les examens bactériologiques effectués par l'Institut Pasteur de Cayenne comportent les dénombrements de :

- colonies de bactéries après culture sur gélose nutritive pendant 24 heures à 37°C et pendant 72 heures à 20 - 22°C,
- des bactéries coliformes (méthodes des membranes filtrantes à 37°C) et de Escherichia coli (méthode des membranes filtrantes à 44°C et Test d'Eijkman), c'est-à-dire une colimétrie,
- des streptocoques fécaux (méthode des membranes filtrantes, milieu au TTC),
- de Clostridium sulfito-réducteurs.

3. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES ESTUAIRES

En tant que partie d'un cours d'eau influencée par la mer, un estuaire subit trois types de phénomènes. Par ordre de propagation décroissante vers l'amont, on peut ainsi observer dans les estuaires de Guyane, où la marée est semi-diurne :

- la marée dynamique qui se traduit par une oscillation des hauteurs d'eau, avec deux minimums et deux maximums journaliers. Elle remonte environ sur 70 km dans le Mahury et 95 km dans l'Approuague.

- 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.

Les largeurs des deux estuaires diminuent vers l'amont, de plusieurs kilomètres à l'embouchure à 100 ou 200 mètres environ à la limite de propagation de la marée. En revanche, les profondeurs moyennes augmentent vers l'amont et peuvent atteindre 8 mètres dans l'Approuague et dépasser 10 mètres dans le Mahury.

Les bassins versants, sur roches éruptives et schistes antécambriens, couvrent 3650 km² à l'embouchure du Mahury et 11 000 km² à celle de l'Approuague.

Le Mahury change de nom vingt kilomètres en amont de l'embouchure (confluence avec la rivière du Tour de l'Île). Il devient l'Oyac, long de neuf kilomètres. Celui-ci est alimenté essentiellement par la Comté et l'Orapu qui sont soumis à l'influence océanique sur une certaine distance. Nos investigations ont été menées jusque dans ces deux cours d'eau et nous parlerons en fait souvent du Mahury, au sens large, pour désigner éventuellement l'ensemble de l'estuaire.

4. LES APPORTS FLUVIAUX AUX ESTUAIRES

Les apports fluviaux aux estuaires sont contrôlés au-delà de la limite de propagation de la marée dynamique, à Saut-Bief dans la Conté et à Pierrette dans l'Approuague. Le Service Hydrologique O.R.S.T.O.M. dispose de 5 années d'observation à la première station et de 10 années à la seconde, avec toutefois quelques lacunes (G. HIEZ et P. DUBREUIL -1963-, M. HOEPFFNER -1974-).

Nous étudierons successivement les modules et les débits fluviaux moyens mensuels qui représentent des caractéristiques estuariennes importantes et des éléments de calcul essentiels pour d'éventuelles recherches sur des modèles de pollution. Nous examinerons ensuite les étiages absolus journaliers. Toutefois, dans la partie amont d'un estuaire se réalise, sous la poussée contraire des eaux marines, une accumulation plus ou moins importante des eaux fluviales. Une réserve d'appoint, utilisable pour l'alimentation d'une usine, est ainsi naturellement constituée, même lors de courtes périodes d'étiage. C'est pourquoi il est encore probablement plus utile de connaître les étiages moyens pendant des durées plus longues que celles de l'étiage absolu journalier. Nous considérerons donc aussi les débits moyens mensuels minimums.

Les estimations seront faites seulement aux stations les plus propices à l'implantation de l'usine. Elles seront en outre suffisantes pour interpoler facilement les résultats à une station voisine.

4.1. Les modules.

Les modules ou débits moyens annuels mesurés sont indiqués dans le tableau I.

Les modules interannuels à Saut Bief et à Pierrette sont respectivement de 110 et 215 m³/s.

On peut estimer les modules fluviaux à une station de l'estuaire, en admettant une augmentation des débits proportionnelle au rapport des superficies des bassins (tableau ci-après). Ce qui est en accord avec l'évolution des régimes hydrologiques guyanais de l'amont vers l'aval.

Estuaire	Station	Superficie du bassin (km ²)	Module interannuel (m ³ /s)
Mahury	Saut Bief	1750	110
	Fourgassié	1040	65
	Roura	3400	215
	Embouchure	3650	230
Approuague	Pierrette	6200	215
	Régina	9100	355
	Embouchure	11000	380

Tableau I : Modules et débits d'étiage absolus journaliers et moyens mensuels de la Comté à Saut Bief et de l'Approuague à Pierrette. Les mois d'étiage sont portés entre parenthèses.

COMTE A SAUT-BIEF

Année	Module (m ³ /s)	Débit journalier minimum (m ³ /s)	Débit moyen mensuel minimum (m ³ /s)
1973	84	20 (mars)	40 (janvier)
1972	109	22 (octobre)	33 (octobre)
1971	138	25 (novembre)	36 (octobre)
1970	111	19 (janvier)	35 (octobre)
1969		11 (novembre)	(11) (novembre)
Moyenne	111	15 (novembre)	31 (octobre)

APPROUAGUE A PIERRETTE

Année	Module (m ³ /s)	Débit journalier minimum (m ³ /s)	Débit moyen mensuel minimum (m ³ /s)
1973	192	68 (novembre)	120 (octobre)
1972	249	62 (octobre-novembre)	77 (octobre)
1971	-	60 (novembre)	93 (novembre)
1970	219	62 (octobre [*])	76 (octobre [*])
1964	-	46 (octobre ^{**})	59 (septembre ^{**})
1963	269	61 (novembre)	76 (octobre-novembre)
1962	183	50 (novembre)	56 (novembre)
1961	181	68 (novembre)	95 (octobre-novembre)
1960	241	72 (décembre)	100 (novembre)
1959	202	53 (octobre)	63 (octobre)
Moyenne	217	60 (novembre)	81 (novembre)

* minimum possible en novembre (lacunes)

** minimum possible fin octobre ou en novembre (lacunes)

4.2. Les débits moyens mensuels

Le tableau ci-après présente les débits moyens mensuels à Saut-Bief et à Pierrette ainsi que ceux qui ont été calculés à des stations des estuaires en multipliant les débits amont par le rapport des superficies des bassins (fig. 6)

	Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
MAHURY	Saut Bief	104	154	125	184	191	178	114	66	47	44	41	64	110
	Fourgassié	62	91	74	109	113	106	68	39	28	26	24	38	65
	Roura	202	299	243	357	371	346	221	128	91	85	80	124	215
	Embouchure	217	321	261	384	398	371	238	138	98	92	86	134	230
APPROUAGUE	Pierrette	191	234	234	296	349	374	294	175	114	91	89	133	215
	Régina	315	386	386	488	575	616	485	288	188	150	147	219	355
	Embouchure	339	415	415	525	619	663	522	310	202	161	158	236	380

4.3. Les étiages

Pour évaluer le débit d'étiage de fréquence décennale à une station de l'estuaire, on a estimé d'abord ce débit à une station amont (non influencée par la marée dynamique) par l'analyse statistique des étiages mesurés au cours des années précédentes. Puis on a extrapolé à la station aval le débit évalué à cette station amont, en affectant celui-ci d'un coefficient égal au rapport des superficies des bassins (cf. § 4.1. et 4.2.).

Au paragraphe 4.3.2 sera mentionnée pour mémoire une deuxième méthode d'estimation.

4.3.1. Etiage aux stations amont

Signalons que les observations hydrométriques ont pu être effectuées pendant 15 à 22 ans à six stations de la Guyane. L'étiage le plus sévère que l'on connaisse est celui de 1958, avec une récurrence supérieure à 34 ans à toutes les stations. Mais il n'a pu être mesuré à Pierrette et qu'imparfaitement à Saut Bief.

Il est délicat de chercher à ajuster à des lois statistiques les résultats disponibles à Saut Bief, en raison de leur faible nombre (tableau I). On peut penser que l'étiage absolu journalier de fréquence décennale est compris entre 11

et 19 m³/s. Les débits moyens mensuels minimums observés à cette même station sont compris entre 33 et 40 m³/s. En 1958, le débit moyen de novembre doit être voisin de 11 m³/s. l'étiage moyen mensuel de fréquence décennale serait ainsi compris entre 11 et 33 m³/s.

A Pierrette, les étiages absolus journaliers et moyens mensuels s'ajustent à une loi de Galton (fig. 7) qui permet d'estimer les valeurs décennales à 48 m³/s pour les premiers et à 60 m³/s pour les seconds.

En résumé, on peut ainsi définir les débits d'étiage absolus journaliers et moyens mensuels de fréquence décennale :

Station	Etiage absolu journalier (m ³ /s)	Etiage moyen mensuel (m ³ /s)
Comté à Saut Bief	11 - 19	11 - 33
Approuague à Pierrette	48	60

4.3.2. Etiages de fréquence décennale aux stations estuariennes

Les débits d'étiage de fréquence décennale dans le Mahury et dans l'Approuague sont mentionnés dans le tableau ci-après. (Les valeurs sont calculées en multipliant par le rapport des superficies des bassins les valeurs estimées précédemment aux stations amont par l'analyse statistique).

	Station	Etiage décennal (m ³ /s)	
		absolu journalier	moyen mensuel
Mahury	Saut Bief	11 - 19	11 - 33
	Fourgassié	7 - 11	7 - 20
	Roura	21 - 37	21 - 64
	Embouchure	23 - 40	23 - 69
Approuague	Pierrette	48	60
	Régina	70	88
	Embouchure	85	106

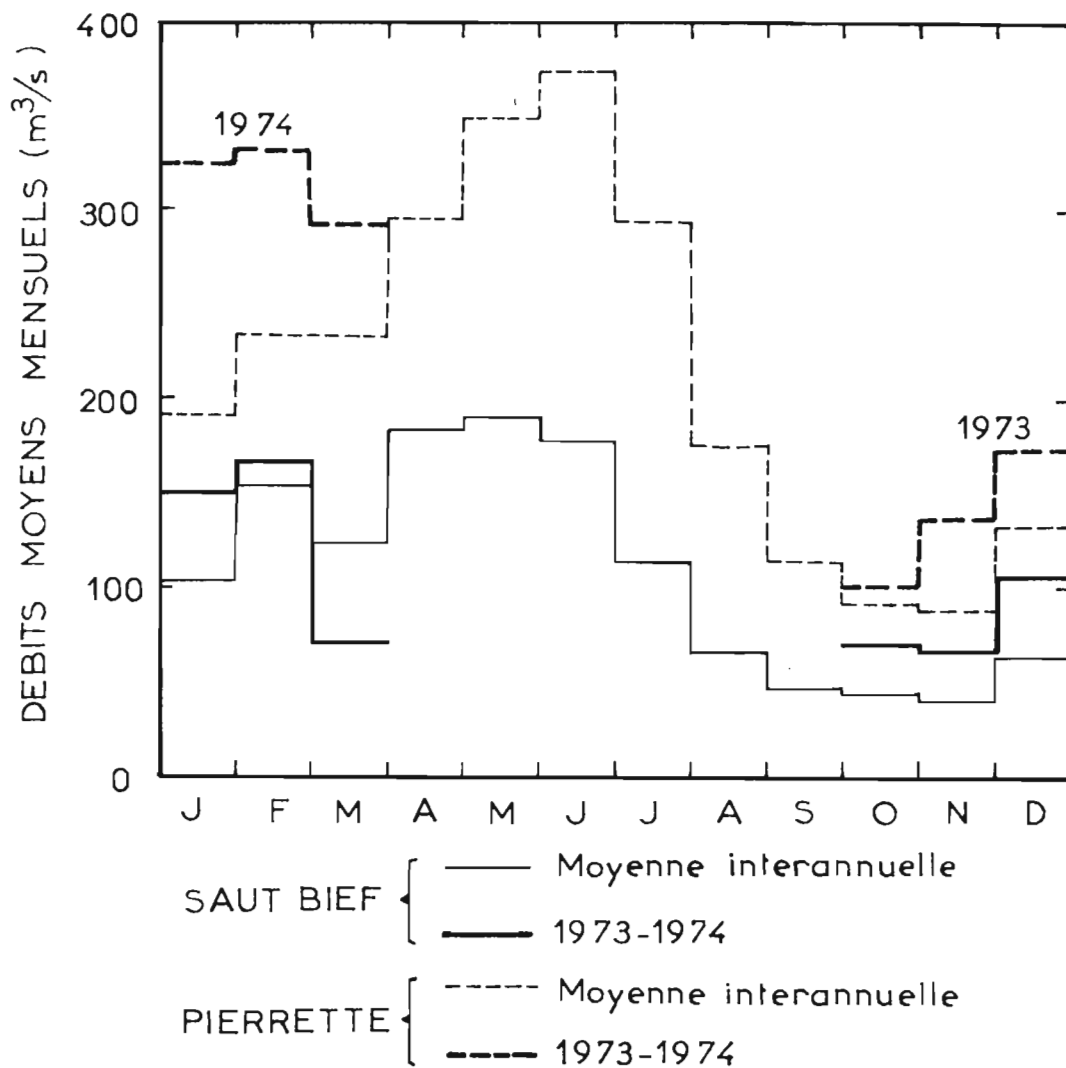


Fig. 6 : La Comté à Saut Bief et l'Approuague à Pierrette. Débit moyens mensuels interannuels et en 1973-1974, au cours de l'étude des estuaires du Mahury et de l'Approuague.

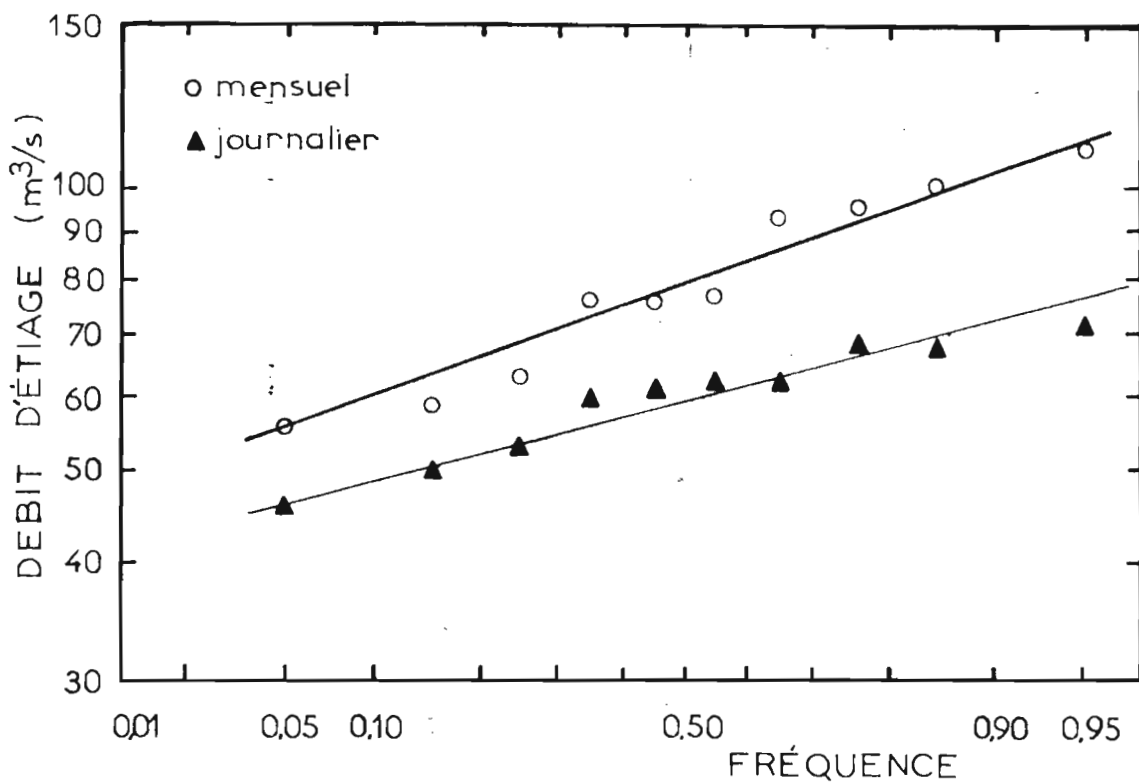


Fig. 7 : Approuague à Pierrette.

Ajustement de la distribution des débits d'étiage moyens journaliers et mensuels à la loi de Galton.

4.3.3. Estimation des étiages aux stations estuariennes par corrélation entre les débits spécifiques d'étiage de fréquence donnée et les superficies des bassins

On a également tenté d'évaluer le débit d'étiage d'après la corrélation établie entre étiage de fréquence donnée et diverses caractéristiques des bassins guyanais, plus longuement étudiés que ceux du Mahury et de l'Approuague. On a retenu la relation $q_{10} = f(A)$ entre étiage spécifique journalier ou moyen mensuel de fréquence décennale q_{10} et superficie du bassin A, les valeurs de celles-ci étant comprises entre 7650 et 35000 km².

Cette relation $q_{10} = f(A)$ a été établie après avoir déterminé à diverses stations le débit d'étiage de fréquence décennale par ajustement de la répartition statistique des débits d'étiage à la loi de Galton. Ces stations, contrôlées durant 15 à 22 ans, sont Grand Santi, Maripasoula, Dégrad Roche, Saut Sabbat, Camopi.

Les valeurs absolues journalières et mensuelles de fréquence décennale sont ainsi estimées respectivement à 15 et 15 m³/s à Saut Bief et à 35 et 36 m³/s à Pierrette.

Nous avons tenu à mentionner cette méthode d'évaluation qui, pour certains régimes hydrologiques, peut permettre une bonne estimation. Toutefois, dans le cas présent on est amené à souligner que la précision de ces évaluations n'est pas très élevée en raison notamment du faible nombre de points définissant les courbes $q_{10} = f(A)$, de la dispersion de ceux-ci de part et d'autre de ces courbes, de la position des bassins, plus méridionale que celle des bassins du Mahury et de l'Approuague.

Ceci se traduit en particulier par des résultats journaliers et mensuels pratiquement identiques dans la gamme des superficies des bassins du Mahury et de l'Approuague. A Saut Bief, les débits trouvés par cette deuxième méthode sont compris dans l'intervalle des valeurs fournies par la première méthode (rapport des superficies). A Pierrette, ils apparaissent 50% plus faibles que les premiers.

Dans le cas guyanais, on préfère finalement ne retenir que les résultats (§ 4.3.2.) qui découlent de l'hypothèse d'une croissance des débits directement proportionnelle à celle des superficies.

4.4. Conclusion sur les possibilités quantitatives d'alimentation de l'usine en eaux fluviales.

La précision des évaluations de débits, faites aux paragraphes précédents, et en particulier celle des étiages

décennaux, n'est pas très élevée. Il est probable qu'il est possible d'améliorer ces estimations et de resserrer l'intervalle des valeurs, en procédant à une analyse plus fine des données, notamment à l'aide de comparaisons avec les stations contrôlées plus longtemps que celles de la Comté et de l'Approuague, ou bien, pour ce dernier tributaire, en menant l'étude de l'évolution longitudinale des débits. Nous ne l'avons pas fait car les valeurs limites inférieures auxquelles nous aboutissons laissent prévoir un apport fluvial suffisant pour l'alimentation d'une usine de pâte à bois : les étiages moyens mensuels de fréquence décennale sont supérieurs à 1,8 millions de m³/jour à Roura et à 7,6 millions de m³/jour à Régina.

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'abondantes indications sur la consommation exacte d'eau par une usine de pâte à bois :

- Un besoin de 100 m³ par tonne de papier, avec un taux de recyclage de 50 à 70%, est rapporté dans le Livre de l'Eau (tome V, 1966). Les usines modernes tendent à utiliser des eaux de bonne qualité en moindre quantité.

- W.W. ECKENFELDER (1970) indique pour les usines papetières des rejets moyens de 100 m³/t pour le blanchissement Kraft et de 125 m³/t, avec des valeurs extrêmes de 415 et 70 m³/t, pour le blanchissement au sulfite. Les taux de recyclage moyen varient de 30 à 80% au cours des différentes opérations qui conduisent au produit final.

- G. PETROFF (1973, communication personnelle) avance d'un point de vue théorique environ 200 m³ d'eau résiduaire par tonne de pâte alcaline blanche et signale que la production des usines modernes se situe en général entre 100 et 700 t de pâte sèche par jour.

On retiendra pour chiffres maximums une demande de 300 m³/t de pâte et une production de 700 t de pâte, soit une consommation journalière de 210 000 m³. Ces besoins étant au pire respectivement 10 et 40 fois moindre que l'apport fluvial au Mahury et à l'Approuague en période d'étiage moyen mensuel de fréquence décennale, on conclut qu'aucun problème d'alimentation ne peut être dû à cet apport.

4.5. Les apports fluviaux au cours des campagnes

La comparaison des débits moyens mensuels inter-annuels avec ceux de 1973-1974 (tableau ci-après, fig. 6) montre que les mesures dans les estuaires ont été effectuées dans des conditions d'alimentation fluviale supérieures à la

moyenne. Un petit été de mars, assez bien marqué, se traduit ce mois là par une diminution des débits. Dans la Comté, ceux-ci deviennent alors inférieurs à la moyenne, avec une valeur analogue à celle d'octobre.

Station	Période	O	N	D	J	F	M
Comté à Saut Bief	Moyenne	44	41	64	104	154	125
	1973-1974	70	68	107	151	168	72
Approuague à Pierrette	Moyenne	91	89	133	191	234	234
	1973-1974	120	136	172	325	330	291

Quelques jours avant ou après les campagnes sur les estuaires, des jaugeages ont été réalisés dans les tributaires, à Saut Bief et Dégrad Mouflet dans la Comté et l'Orapu et à Grand Mathias dans l'Approuague (tableau II), c'est-à-dire à la limite de la marée dynamique.

Ces mesures offrent un moyen d'approcher les valeurs de l'apport fluvial à l'amont des estuaires lors des campagnes de mesures et de faciliter ainsi l'extrapolation des volumes oscillants jusqu'à leur limite amont (cf. § 6.3.). Il convient cependant de tenir compte de la variation temporelle des débits au cours de la période séparant les opérations à la station estuarienne la plus amont et à la station fluviale considérée. Afin d'estimer l'apport à la date où ont été effectuées les opérations à cette station estuarienne (tableau II), on affecte les débits mesurés à la station fluviale du même taux de variation temporelle que celui que l'on peut calculer aux stations de Saut Bief et de Pierrette, grâce aux enregistrements limnigraphiques.

Les résultats apparaissent en bon accord avec ceux que l'on obtiendra aux stations estuariennes (§ 6.3.).

Tableau II Résultats de jaugeages des principaux tributaires des estuaires du Mahury et de l'Approuague. Estimation de l'apport fluvial à la limite de propagation de la marée dynamique.

MAHURY

Date des jaugeages	Débit à Saut Bief (m ³ /s)	Débit à Mouflet (m ³ /s)	Débit à Saut Bief + Mouflet (m ³ /s)	Coefficient de variation temporelle	Débit à Saut Bief + Mouflet corrigé (m ³ /s)	Volume d'apport par période de marée (12h20) (10 ⁶ m ³)	
10 oct. 1973	48,9	18,4	67,3	0,88	6-7 oct.	59,2	2,64
17 déc. 1973	66,7	123	190	1,20	12-13 déc. 1973	228	10,1
18-19 mars 1974	48,6	118	167	1,62	9-10 mars 1974	271	12,0

APPROUAGUE

Date des jaugeages	Débit à Pierrette (m ³ /s)	Débit à Grand Mathias (m ³ /s)	Coefficient de variation temporelle	Débit à Grand Mathias corrigé (m ³ /s)	Volume d'apport par période de marée (12h20) (10 ⁶ m ³)		
19-20 nov. 1973	-	77,5	102	1,62	26 nov. 1973	165	7,34
24-23 janv. 1973	-	346	345	0,80	18 janv. 1974	276	12,3
30-29 mars 1974	-	456	487	0,95	26 mars 1974	465	20,6

5. VARIATIONS DES HAUTEURS D'EAU

5.1. Marnage en mer

La marée sur les côtes guyanaises est semi-diurne : il se produit chaque jour deux pleines mers et deux basses mer (fig. 8 et 9) dont les hauteurs diffèrent au maximum d'une trentaine de centimètres. Les hauteurs d'eau mentionnées dans l'annuaire officiel des marées pour les Iles du Salut sont prises comme référence.

Les marnages les plus faibles sont de 0,6 m tandis que les plus forts atteignent 2,9 m.

Le tableau III indique les valeurs extrêmes du marnage aux Iles du Salut pendant les campagnes de mesures dans les estuaires.

5.2. Marnage dans les estuaires

5.2.1. "Marnage absolu"

Dans un estuaire, le marnage et par conséquent les autres caractéristiques hydrodynamiques, dépendent en un point :

- du coefficient de marée,
- du débit fluvial,
- de la vitesse et de la direction des vents.

L'évolution longitudinale du marnage est conditionnée par ces mêmes facteurs et en outre par la morphologie du lit (îles, méandres, ...) qui déterminent les forces résistantes et en particulier par la pente du lit. Les affluents secondaires et les zones de débordement peuvent également jouer un rôle important à prendre en considération dans certaines évaluations.

Les résultats, mentionnés dans le tableau III, montrent que les marnages dans le Mahury et l'Approuague n'échappent pas à cette règle. Les figures 10 et 11 illustrent les variations de hauteur d'eau observées ainsi que le décalage dans le temps et la déformation de la courbe de marée vers l'amont. Les échelles des différentes stations n'étant pas rattachées au nivellement général, on a placé arbitrairement les hauteurs de pleine mer au même niveau que celles que l'on connaît aux Iles du Salut. En fait, ceci est assez conforme à la réalité car, dans la partie d'un estuaire la plus proche de la mer, le lieu géométrique des pleines mers, de vives-eaux et de mortes-eaux, diffère peu d'une horizontale. Ceci est d'ailleurs d'autant plus exacte que la perte d'énergie est forte.

Tableau III : Marnage dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague pour des marées de mortes eaux et vives-eaux, en période d'étiage et de hautes eaux des fleuves.

Mahury = I : Marie-Anne, II : Roura, III : Deux-Branches,
IV : St Régis, V : Fourgassié

Approuague = I : Guisanbourg, II : Cimetière, III : Régina,
IV : Beaugé.

	Date	Débit amont (m ³ /s)	Coeff. marée	Marnage (m)					
				mer	I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46	0,6-1,2	0,9	0,9	0,9	1,1	1,3
	décembre 73	228	85-99	2,0-2,5	2,5	2,4	2,0	1,6	1,7
	mars 74	271	75-111	2,2-2,6	2,2	2,3	2,1	1,7	1,8
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80	1,6-1,9	2,4	2,5	2,2	2,1	-
	janvier 74	276	41-60	1,2-1,5	2,1	1,8	1,9	1,8	-
	mars 1974	465	85-96	2,2-2,4	2,7	2,8	2,7	2,3	

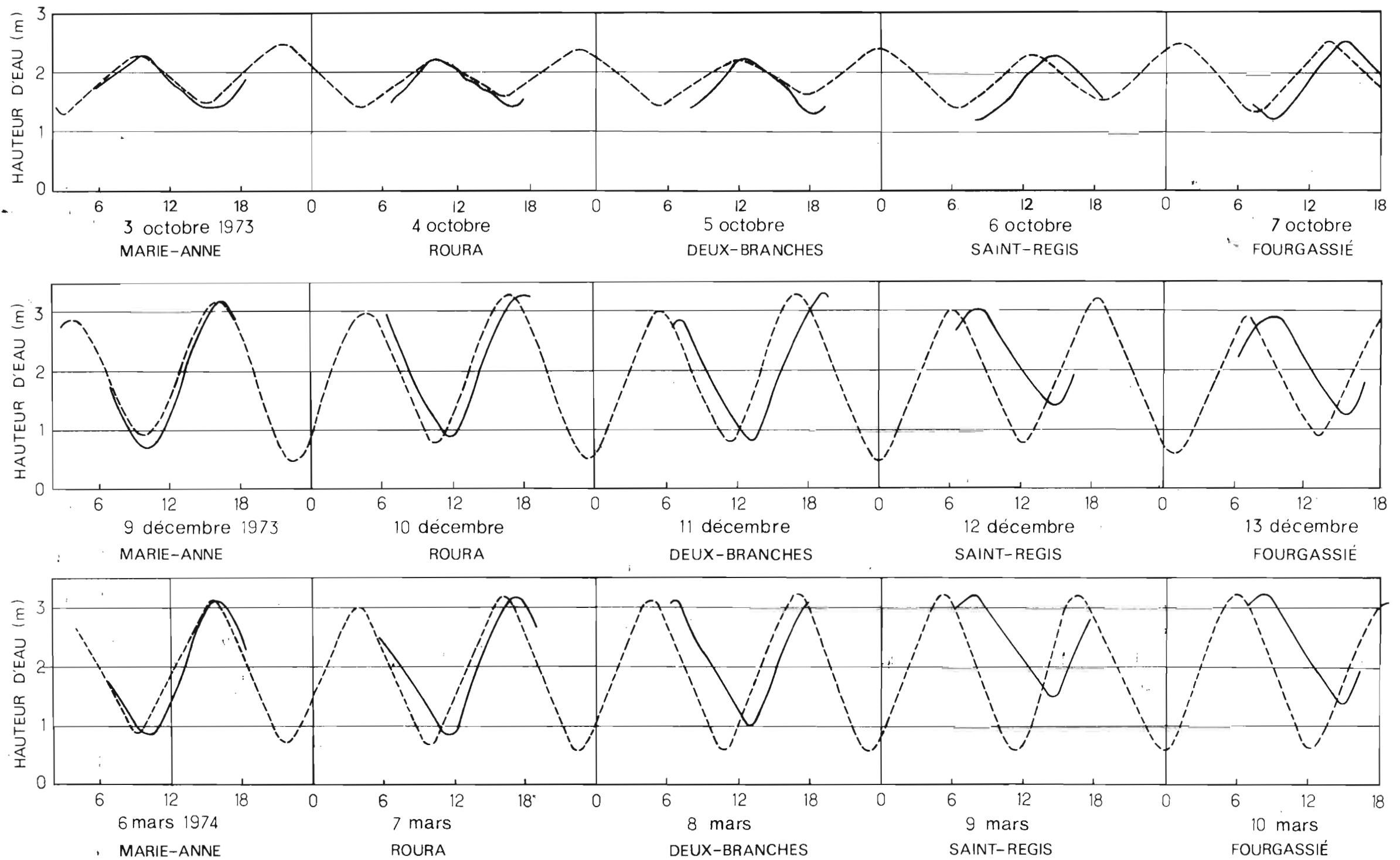


Fig. 8 Variations des hauteurs d'eau aux Iles du Salut (courbes en tiretés) et dans le Mahury, la Comté et l'Orapu (courbes continues).
 Les courbes de variation dans l'estuaire sont calées arbitrairement.

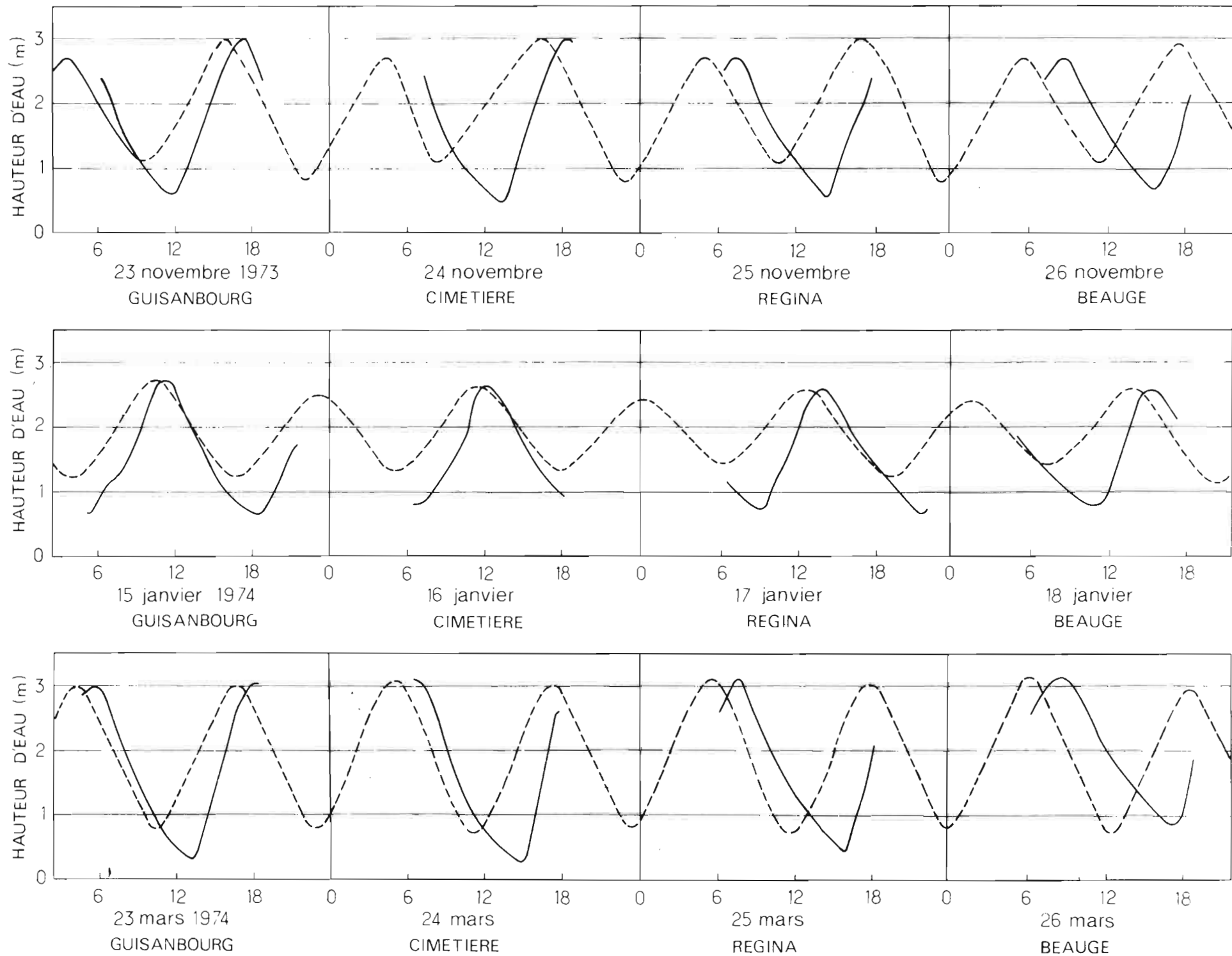


Fig. 9 : Variations des hauteurs d'eau aux Iles du Salut (courbes en tiretés) et dans l'Approuague (courbes continues).
 Les courbes de variation dans l'estuaire sont calées arbitrairement.

Les marnages que nous avons observés varient entre 0,9 et 2,5 m dans le Mahury et entre 1,8 et 2,8 m dans l'Approuague. Compte tenu des facteurs conditionnels du moment, ces valeurs ne représentent évidemment pas des limites extrêmes.

Saut Bief sur la Conté, Dégrad Mouflet sur l'Orapu et Saut Grand Mathias sur l'Approuague constituent approximativement les limites amont du marnage. A Saut Bief, on peut toutefois noter une variation semi-diurne de l'ordre de 5 cm (J.M. BRUGIERE et J. HOORELBECK -1966-).

5.2.2. "Marnage relatif"

Une campagne de mesure se déroule pendant quatre ou cinq jours consécutifs, à raison d'une journée par station. Le coefficient de marée variant au cours de cette période, il est préférable, pour mieux caractériser l'évolution longitudinale de prendre en considération le marnage relatif. Celui-ci est défini comme le rapport du marnage en estuaire sur le marnage en mer correspondant.

Le tableau IV, dans lequel sont reportés les marnages relatifs, permet de faire les remarques suivantes, générales à la plupart des estuaires (fig. 10) :

- Le marnage augmente vers l'amont jusqu'à une certaine distance de l'embouchure puis diminue en conservant éventuellement sur une grande distance une valeur supérieure à celle que l'on observe en mer. La marée concentre en effet plus d'énergie à cause de la convergence du lit qu'elle n'en détruit par frottement au cours de sa propagation vers l'amont. Si, comme nous venons de le signaler, le lieu géométrique de pleine mer est proche d'une horizontale, le gain d'amplitude serait à relier au fait que le lieu géométrique de basse mer s'abaisse, jusqu'à une certaine distance de l'embouchure, en dessous du niveau minimum en mer.

- Le marnage maximum se situe d'autant plus en amont que le coefficient de marée est petit, c'est-à-dire que la consommation relative d'énergie est faible.

Ainsi en mortes-eaux, le marnage maximum dans le Mahury a lieu entre Roura et Deux Branches alors qu'il se situe vers Marie-Anne en vives-eaux. De même, dans l'Approuague, il se produit après Beaugé dans le premier cas et vers Guisanbourg dans le second cas.

- D'après ce qui précède, on comprend que l'écart d'amplitude entre la mer et une station varie en sens inverse du coefficient.

A Deux-Branches par exemple, le gain atteint 50% du marnage en mer pour une marée de 29 alors que l'on enregistre une diminution de 16% pour une marée de 104.

Tableau IV : Marnage relatif (m) dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague.
(Marnage relatif = Marnage en estuaire/ Marnage en mer).

	Date	Débit amont (m ³ /s)	Coeff. marée	Marnage en estuaire/Marnage en mer				
				I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46	1,11	1,43	1,50	1,20	1,07
	décembre 73	228	85-99	1,07	0,97	0,92	0,73	0,82
	mars 74	271	75-111	1,00	0,92	0,84	0,67	0,70
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80	1,26	1,31	1,36	1,28	-
	janvier 74	276	41-60	1,38	1,41	1,43	1,52	-
	mars 74	465	85-96	1,21	1,18	1,12	0,94	-

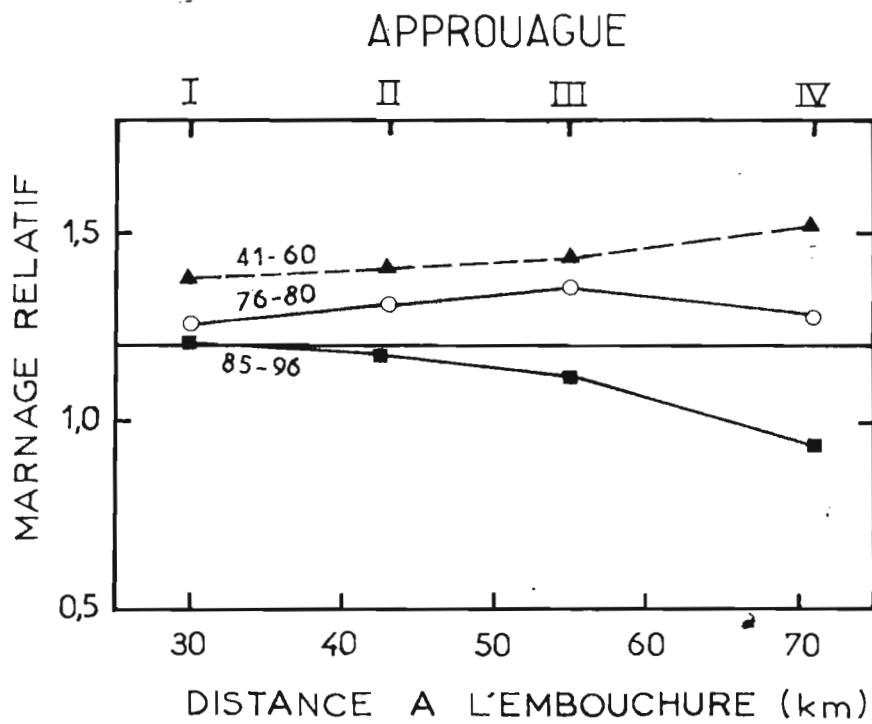
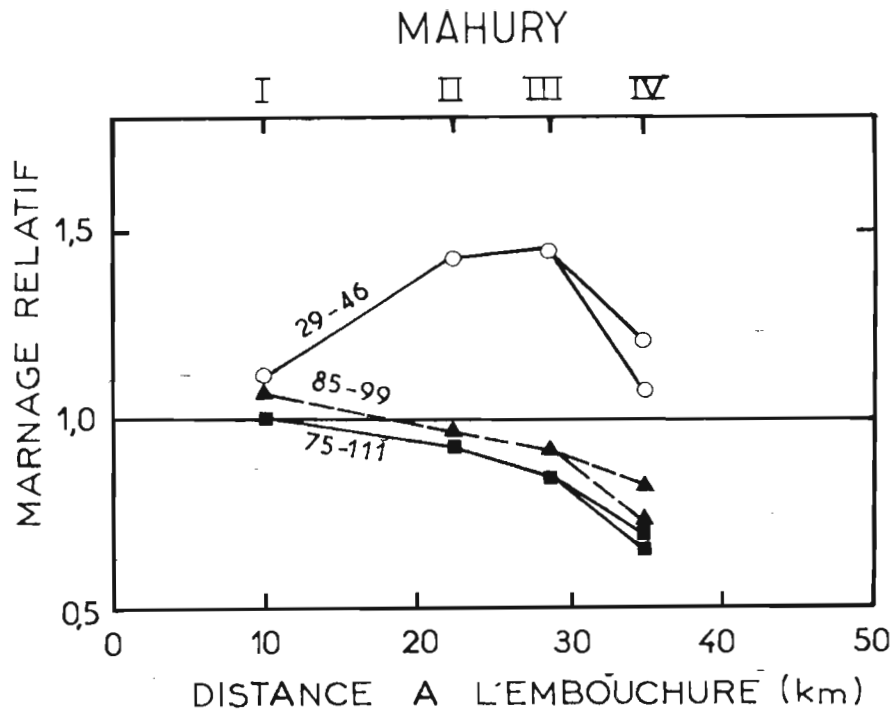


Fig. 10: Variation longitudinale du marnage relatif (marnage/marnage. en mer) dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague, pour différents coefficients de marée .

6. CARACTERISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT

6.1. Etablissement du jusant et du flot

Dans un estuaire, le courant s'annule généralement avec un certain retard par rapport aux heures du maximum et du minimum de hauteur d'eau.

L'écoulement des eaux est en effet déterminé par la pente hydraulique dont les inversions rapides ne sont pas forcément synchronisées avec celles des hauteurs d'eau en un point.

Après le début de la baisse des eaux, le flot peut ainsi s'écouler encore pendant 1h30 dans le Mahury et 1h05 dans l'Approuague (tableau V).

Le retard du jusant tend cependant à diminuer vers l'amont. Dans l'Approuague, il finit par devenir nul puis le jusant s'établit avant la hauteur maximale. Cette avance, que nous indiquons par le signe + dans le tableau V, peut alors atteindre une demi-heure. Il semble qu'elle soit d'autant plus grande que le débit fluvial est fort et le coefficient de marée faible. Un tel phénomène paraît peu mentionné dans la littérature.

Le retard de l'établissement du flot par rapport à la basse mer à la station évolue moins nettement vers l'amont car il doit être très sensible aux variations journalières des facteurs conditionnels de l'écoulement estuarien. Il s'accroît toutefois rapidement, jusqu'à 2 à 3 heures, à l'amont de l'Approuague, entre Régina et Beaugé.

6.2. Vitesses d'écoulement

6.2.1. Variations verticales des vitesses

La variation des vitesses en profondeur se réalise sous l'influence :

- de la densité des eaux, essentiellement fonction des salinités et des suspensions qui sont elles-mêmes stratifiées verticalement. Les températures des eaux, plus basses dans les fleuves qu'en mer ne peuvent par contre que favoriser les mélanges.

- du frottement des vents à la surface des eaux. De secteur NE à ENE, les Alizées doivent freiner le jusant et accélérer le flot. L'intensité de ces forces est probablement supérieure au cours jusant en raison de la houle que créent les vents de sens opposé au courant.

Tableau V : Retard de l'établissement du jusant (J) et du flot (F) par rapport au maximum et au minimum de hauteur d'eau dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague. (Le signe + indique qu'il s'agit d'une avance au lieu d'un retard).

	Date	Débit amont (m ³ /s)	Coeff. marée	J F	Retard (heure - minute)				
					I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46		0.30	1.30	0.35	0.25	0.20
	décembre 73	228	85-99	J	1.30	0.45	0.45	0.05	0.50
	mars 74	271	75-111		1.30	1.00	1.00	0.15	0.40
	octobre 73	59	29-46		0.35	2.10	-	2.45	1.30
	décembre 73	228	85-99	F	1.15	1.35	0.50	1.00	0.55
	mars 74	271	75-111		0.50	1.15	0.50	0.50	0.50
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80		0.25	1.05	0.35	0.00	-
	janvier 74	276	41-60	J	0.50	0.30	+0.10	+0.30	-
	mars 74	465	85-96		0.35	0.30	0.20	+0.20	-
	novembre 73	165	76-80		0.15	0.05	0.30	2.10	-
	janvier 74	276	41-60	F	0.45	1.20	1.10	3.00	-
	mars 74	465	85-96		0.40	0.20	0.20	2.30	-

- du frottement sur le fond et sur les branches et les racines immergées sur la slikke.

Les vitesses moyennes du jusant sont le plus souvent supérieures à celles du flot. Il en est de même des vitesses maximales de surface mais cette règle ne prévaut pas toujours à Guisanbourg.

Les paraboles de vitesses sont relativement régulières (cf. fig. 2). Au moment des étales et renverses de courant, des écoulements superposés et de sens opposés, très fugaces, ont pu être mis en évidence à certaines marées, à la station la plus proche de la mer.

A Marie-Anne par exemple, station la plus en aval sur le Mahury, la variation verticale des vitesses, au milieu de la section et au cours d'une période de marée à fort coefficient, est illustrée sur la figure 11. Les vitesses maximales et moyennes diminuent vers le bas et sont plus fortes au jusant qu'au flot. Au moins entre la surface et 2 mètres au-dessus du fond, la résultante est dirigée vers la mer. Par contre, elle est orientée vers l'amont à 0,35 m du fond. Au cours de la période de marée, les eaux salées remontent ainsi vers l'amont sur le fond de l'estuaire. Bien que dans ce cas précis, la résultante puisse être consécutive à l'inégalité diurne de la marée, c'est là le phénomène général qui détermine l'existence du coin salé dans les estuaires. Les eaux salées, en se mélangeant avec les eaux douces finissent par acquérir vers le haut un mouvement résultant dirigé vers l'aval et par être ainsi chassées en mer.

Dès Roura, ce phénomène n'existe plus. L'écoulement résultant, toujours plus faible au fond qu'en surface, est dirigé vers l'aval à tous les niveaux de la section.

6.2.2. Variations longitudinales des vitesses maximales et moyennes

Les vitesses maximales (tableau VI) sont atteintes 2 heures à 3 heures et demi après le début du jusant et du flot ; d'une façon générale plus tôt pour le premier que pour le second. Elles sont aussi plus élevées au jusant car le débit du fleuve représente une composante de l'écoulement toujours dirigé vers l'aval, donc de même sens que le jusant. Ceci peut ne pas être vérifié au fond, à proximité de l'embouchure (fig. 11) mais les différences demeurent faibles.

Les vitesses maximales, mesurées en surface (tableau VI, fig. 12) tendent souvent à croître vers l'aval, les plus fortes valeurs, 1,5 m/s, ont été observées à Marie-Anne. La variation est plus nette pour le flot que pour le jusant.

Par contre, il paraît plus délicat, avec les ré-

Tableau VI : Vitesses maximales (m/s) du jusant (J) et du flot (F) mesurées au milieu de chaque section en surface (s) et à 0,35 m du fond (f) dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague.

	Date	Débit amont m ³ /s	Coeff. marée	J F	s f	Vitesses maximales (m/s) du jusant et du flot en surface et au fond (0,35m)				
						I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46		s	0,51	0,47	0,50	0,41	0,45
					f	0,05	0,21	0,04	0,31	0,26
	décembre 73	228	85-99	J	s	1,45	1,00	1,10	0,80	0,80
					f	0,30	0,50	(0,80)	0,55	0,50
	mars 74	271	75-111		s	0,84	0,86	1,00	0,82	0,72
					f	0,52	0,44	0,64	0,39	0,48
MAHURY	octobre 73	59	29-46		s	0,44	0,31	0,36	0,17	0,38
					f	0,18	0,17	0,16	0,16	0,29
	décembre 73	228	85-99	F	s	1,10	1,00	0,80	(0,50)	0,60
					f	0,35	0,50	0,35	(0,40)	0,50
	mars 74	271	75-111		s	0,62	1,00	0,74	0,54	0,58
					f	0,40	0,56	0,40	0,24	0,34
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80		s	0,52	0,66	0,70	0,60	-
					f	0,42	0,22	0,40	0,54	-
	janvier 74	276	41-60	J	s	0,94	0,62	0,72	0,75	-
					f	0,60	0,23	0,50	0,50	-
	mars 74	465	85-96		s	0,70	0,80	0,62	0,85	-
					f	0,44	0,58	0,40	0,52	-
	novembre 73	165	76-80		s	0,78	0,60	0,60	0,36	-
					f	0,50	0,50	0,48	0,27	-
janvier 74	276	41-60	F	s	0,84	0,45	0,60	0	-	
				f	0,35	0,31	0,20	0	-	
mars 74	465	85-96		s	0,88	0,84	0,61	0,06	-	
				f	0,55	0,54	0,44	0,04	-	

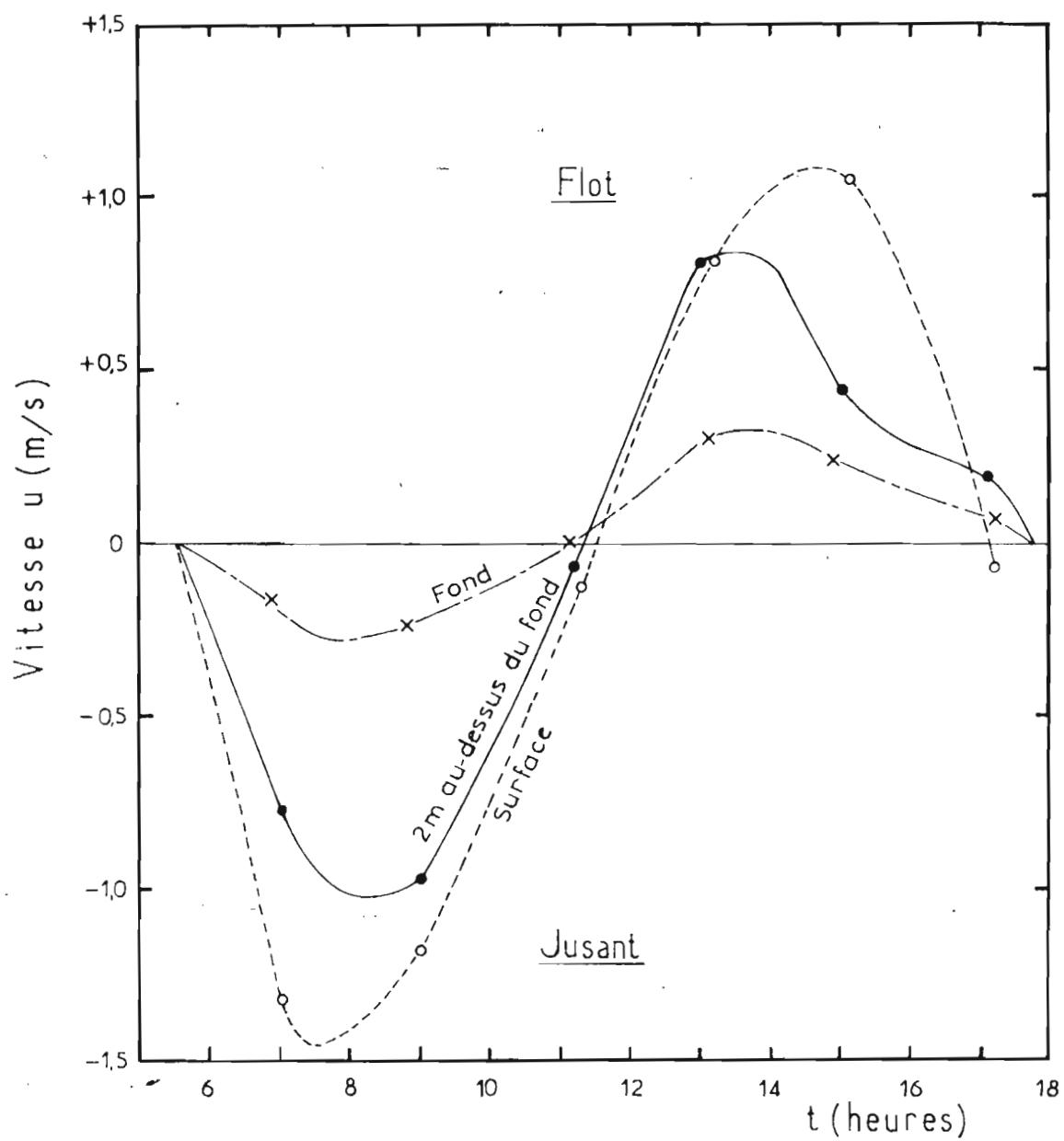


Fig. 11 : Marie-Anne le 9 décembre 1973. Variation des vitesses au cours d'une période de marée à différentes profondeurs de la verticale 3 située au milieu de la section.

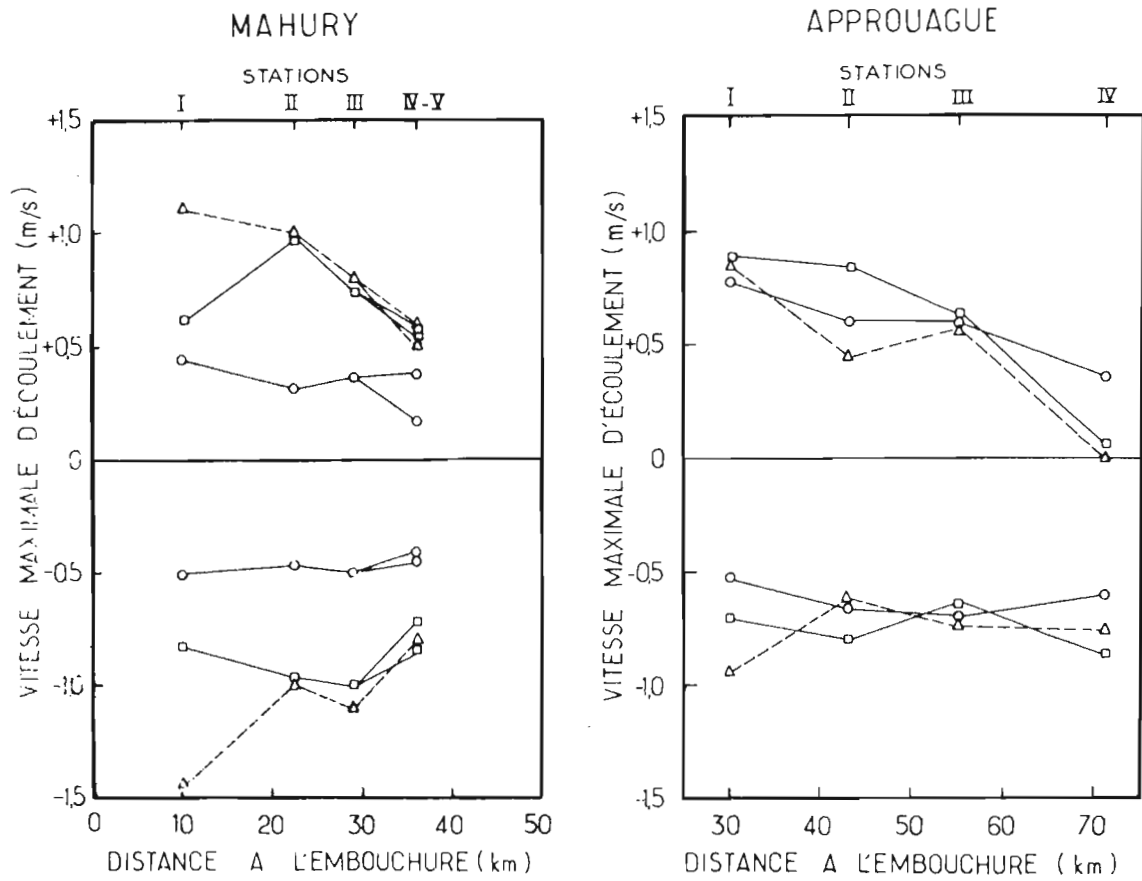


Fig.12 : Vitesses maximales d'écoulement du jusant (signe-) et du flot (signe+) en fonction de la distance à l'estuaire dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague.

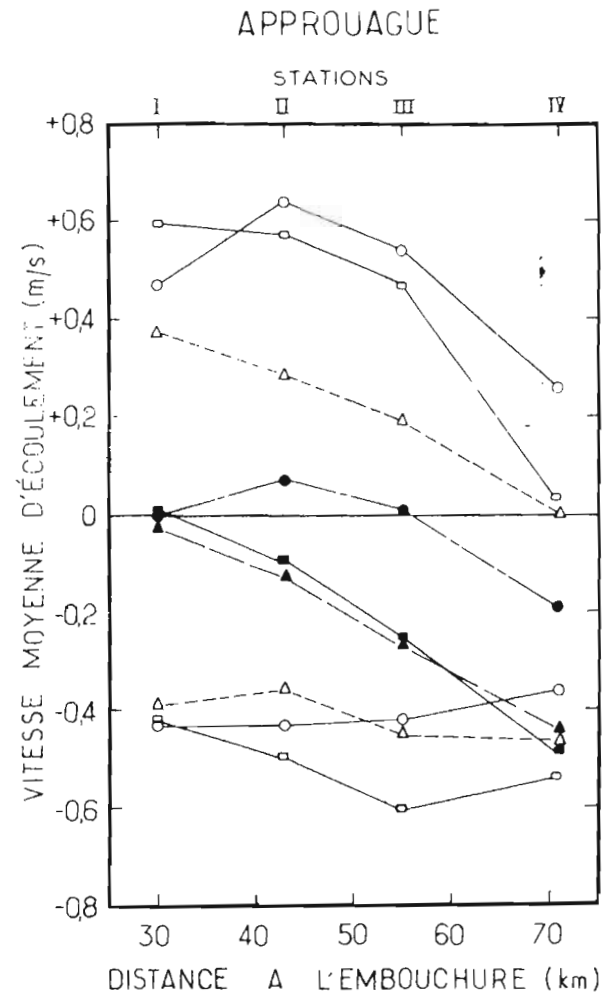
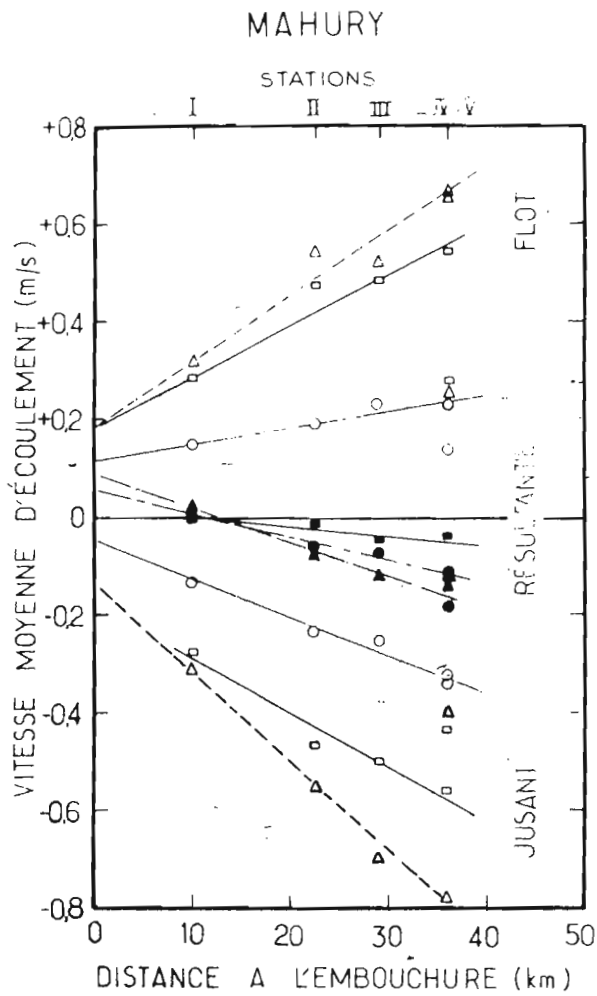


Fig.13: Vitesses moyennes d'écoulement du jusant (signe-) et du flot (signe+) et vitesses moyennes résultantes d'une période de marée (figurés noirs) dans les estuaires du Mahury.

Tableau VII : Vitesses moyennes (m/s) au cours du jusant (J), du flot (F) et de la période de marée (R) dans l'ensemble de chaque section des estuaires du Mahury et de l'Approuague.

	Date	Débit amont m ³ /s	Coeff. marée	J F R	Vitesses moyennes et résultante (m/s) du jusant et du flot				
					I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46	J	0,13	0,23	0,25	0,33	0,34
	décembre 73	228	85-99	J	0,31	0,55	0,70	0,40	0,78
	mars 74	271	75-111	J	0,28	0,47	0,50	0,44	0,56
	octobre 73	59	29-46	F	0,15	0,19	0,23	0,14	0,23
	décembre 73	228	85-99	F	0,32	0,54	0,52	0,25	0,67
	mars 74	271	75-111	F	0,28	0,48	0,48	0,26	0,54
	octobre 73	59	29-46	R	-0,01	-0,06	-0,07	-0,19	-0,11
	décembre 73	228	85-99	R	+0,02	-0,06	-0,12	-0,14	-0,11
	mars 74	271	75-111	R	+0,01	-0,02	-0,05	-0,16	-0,04
APPROUAGUE	novembre	165	76-80	J	0,43	0,43	0,42	0,36	-
	janvier 74	276	41-60	J	0,39	0,36	0,45	0,46	-
	mars 74	465	85-96	J	0,43	0,49	0,60	0,53	-
	novembre 73	165	76-80	F	0,47	0,64	0,54	0,26	-
	janvier 74	276	41-60	F	0,37	0,28	0,19	0	-
	mars 74	465	85-96	F	0,59	0,57	0,47	0,04	-
	novembre 73	165	76-80	R	+0,004	+0,07	+0,01	-0,19	-
	janvier 74	276	41-60	R	-0,03	-0,13	-0,27	-0,44	-
	mars 74	465	85-96	R	+0,006	-0,09	-0,25	-0,47	-

sultats disponibles, de généraliser sur la variation longitudinale des vitesses moyennes (tableau VII, fig. 13). Dans le Mahury, les valeurs croissent vers l'amont, alors qu'elles sont assez constantes au jusant (0,35 à 0,60 n/s) et décroissantes au flot dans l'Approuague.

Les vitesses moyennes résultantes d'une période semi-diurne apparaissent faibles (zéro à 0,47 n/s) et croissantes vers l'amont. Dans la zone proche de la mer, elles peuvent être orientées vers l'amont ou l'aval, en raison principalement de l'inégalité d'amplitude des marées.

6.3. Volumes et débits oscillants

6.3.1. Nous mentionnons :

- dans le tableau VIII, les volumes d'eau oscillants (en millions de mètres cubes) aux différentes stations pendant le jusant et le flot ainsi que le volume résultant à la suite d'une période de marée,

- dans le tableau IX, les débits moyens correspondant, en m^3/s ,

- dans le tableau X, les débits maximaux, en m^3/s .

Pour le Mahury, on dispose en outre de résultats acquis par le LCHF (1968) près de Marie-Anne :

Date	Coefficient	Marnage (m)	Vitesse maximale (n/s)	Volume oscillant ($10^6 m^3$)
25-9-1965	104-106	2,46	J : 1,2	51,5
			F : 1,2	44,2
4-10-1965	29-29	0,85	J : 0,5	17,5
			F : 0,6	16,9

L'évolution longitudinale des volumes oscillants dans les estuaires est illustrée sur les figures 14 à 17. Les valeurs maximales $40 \cdot 10^6 m^3$ dans le Mahury et $70 \cdot 10^6 m^3$ dans l'Approuague ont été mesurées à la station la plus proche de la mer au cours de marées de vives-eaux. A proximité de l'embouchure, les volumes du jusant et du flot sont très peu différents. La supériorité fréquente du flot par rapport au jusant s'explique partiellement dans cette zone des estuaires par l'inégalité diurne de la marée et par la variation du coefficient au cours d'une demi-lunaison.

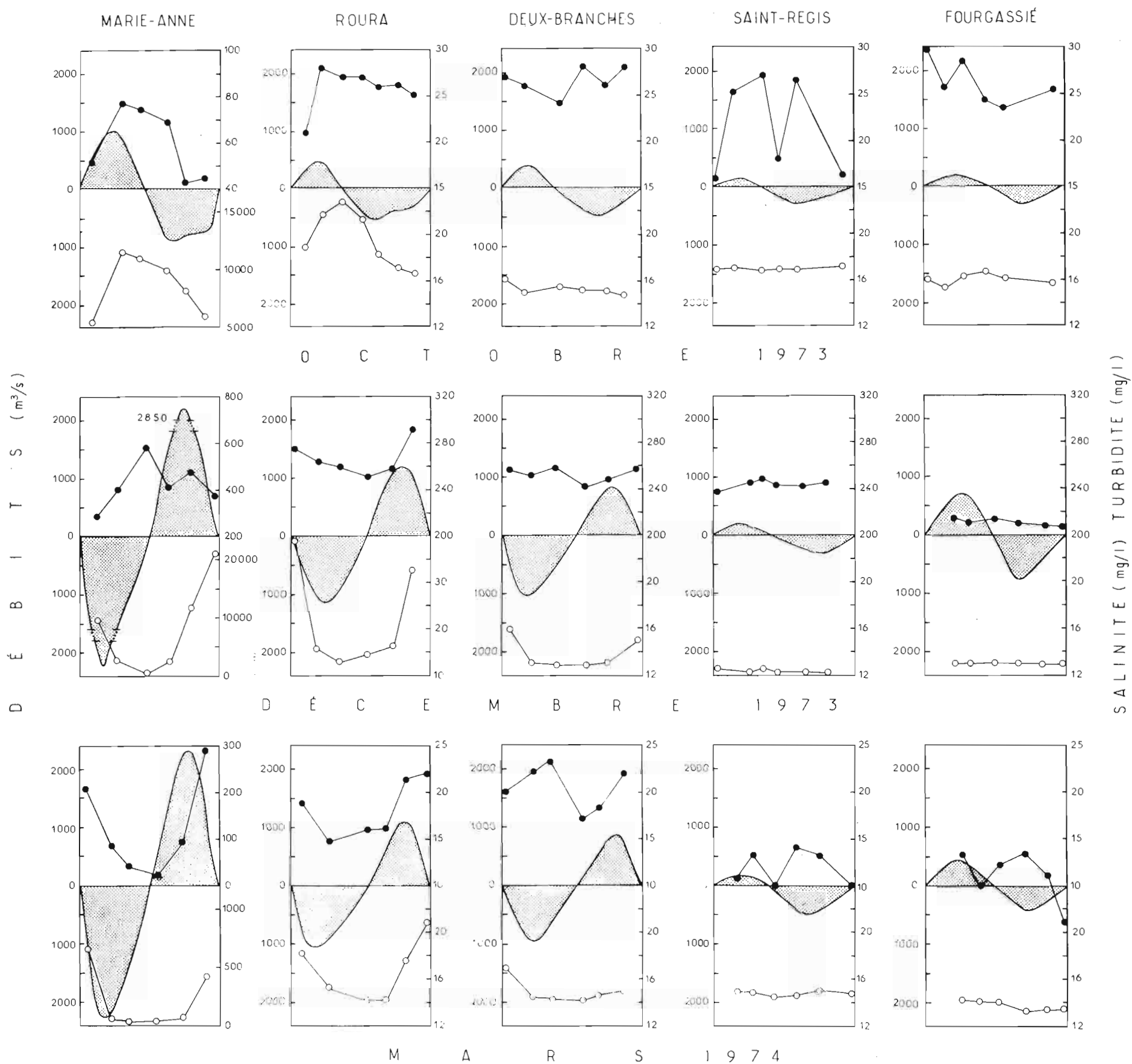


Fig.14 : Débits oscillants (m^3/s), charge en suspension (turbidité, mg/l) et salinité (mg/l) dans l'estuaire du Mahury.

D É B I T S (m³/s)

S A L I N I T É (m g / l) T U R B I D I T É (m g / l)

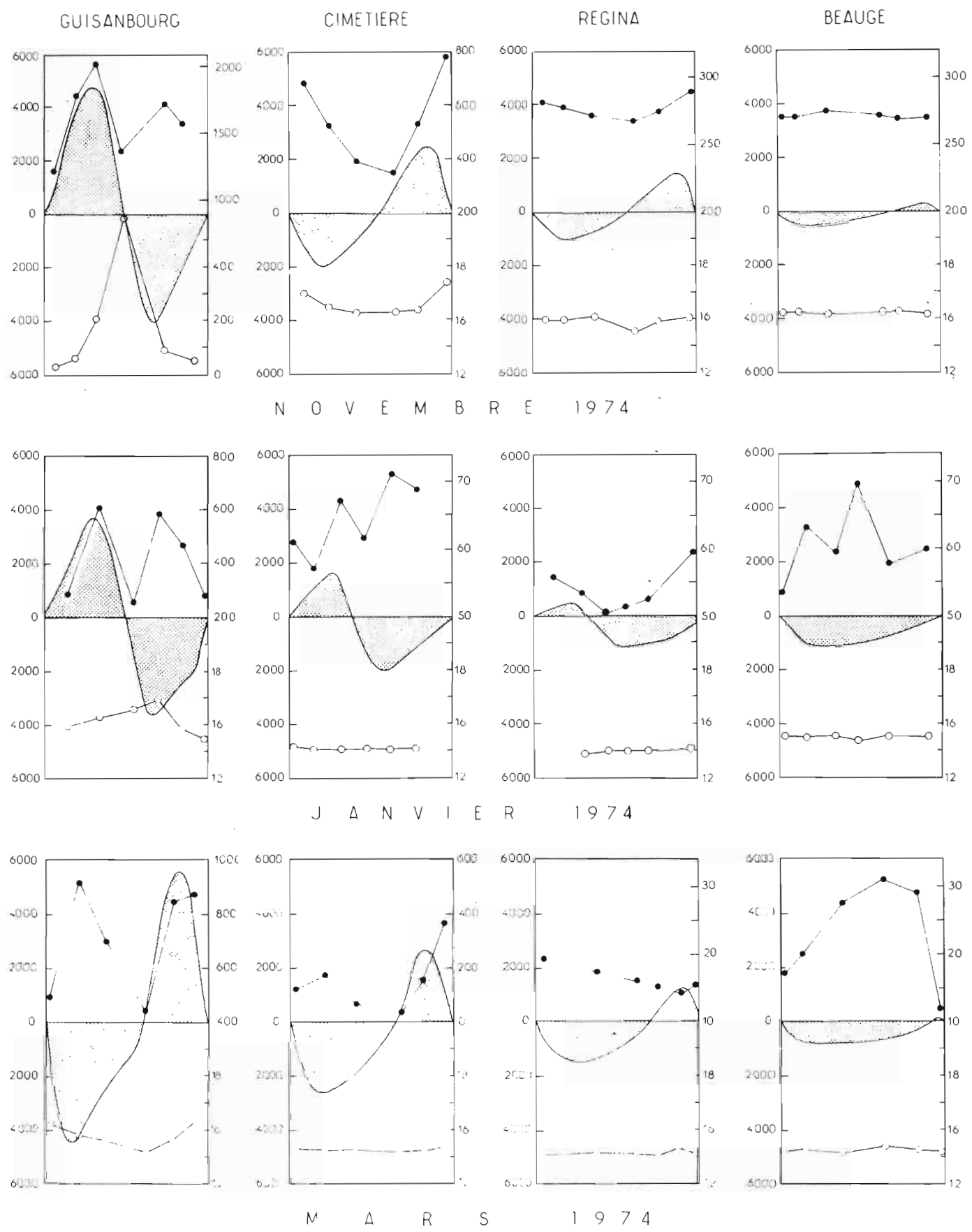


Fig 15 Débits oscillants (m³/s), charge en suspension (turbidité, mg/l) et salinité (mg/l) dans l'estuaire de l'Approuague

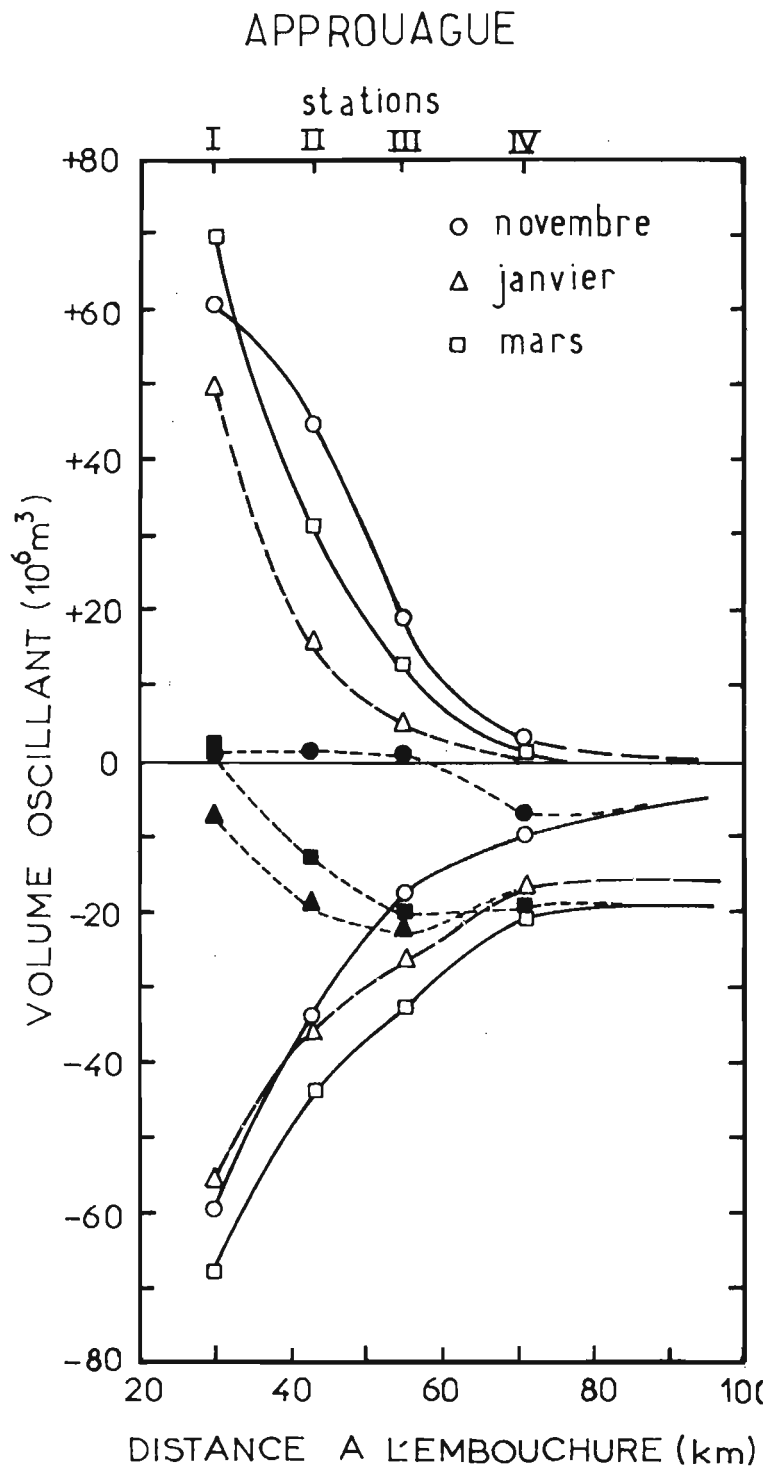
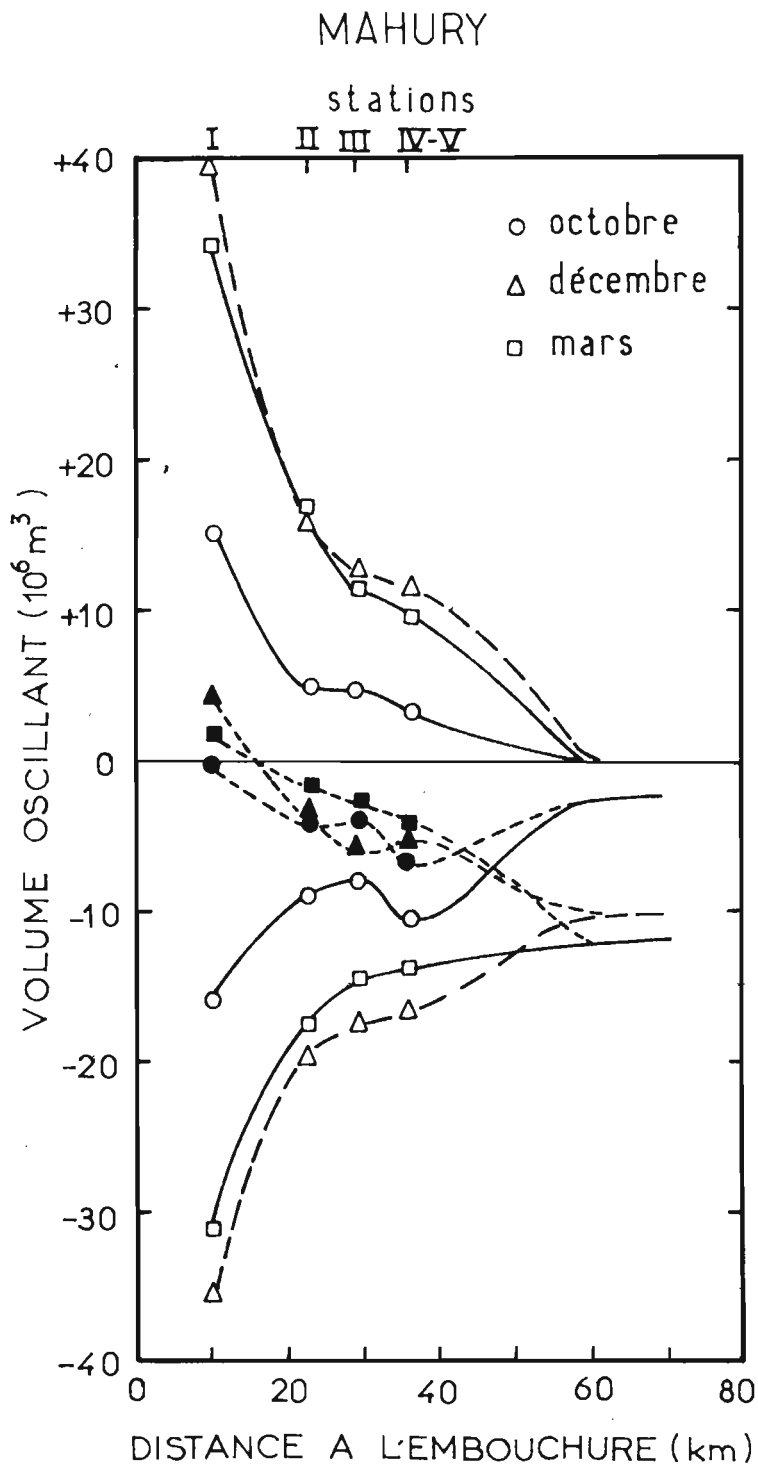


Fig.16: Evolution longitudinale des volumes oscillants dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague. Les figurés noirs représentent les volumes résultants.

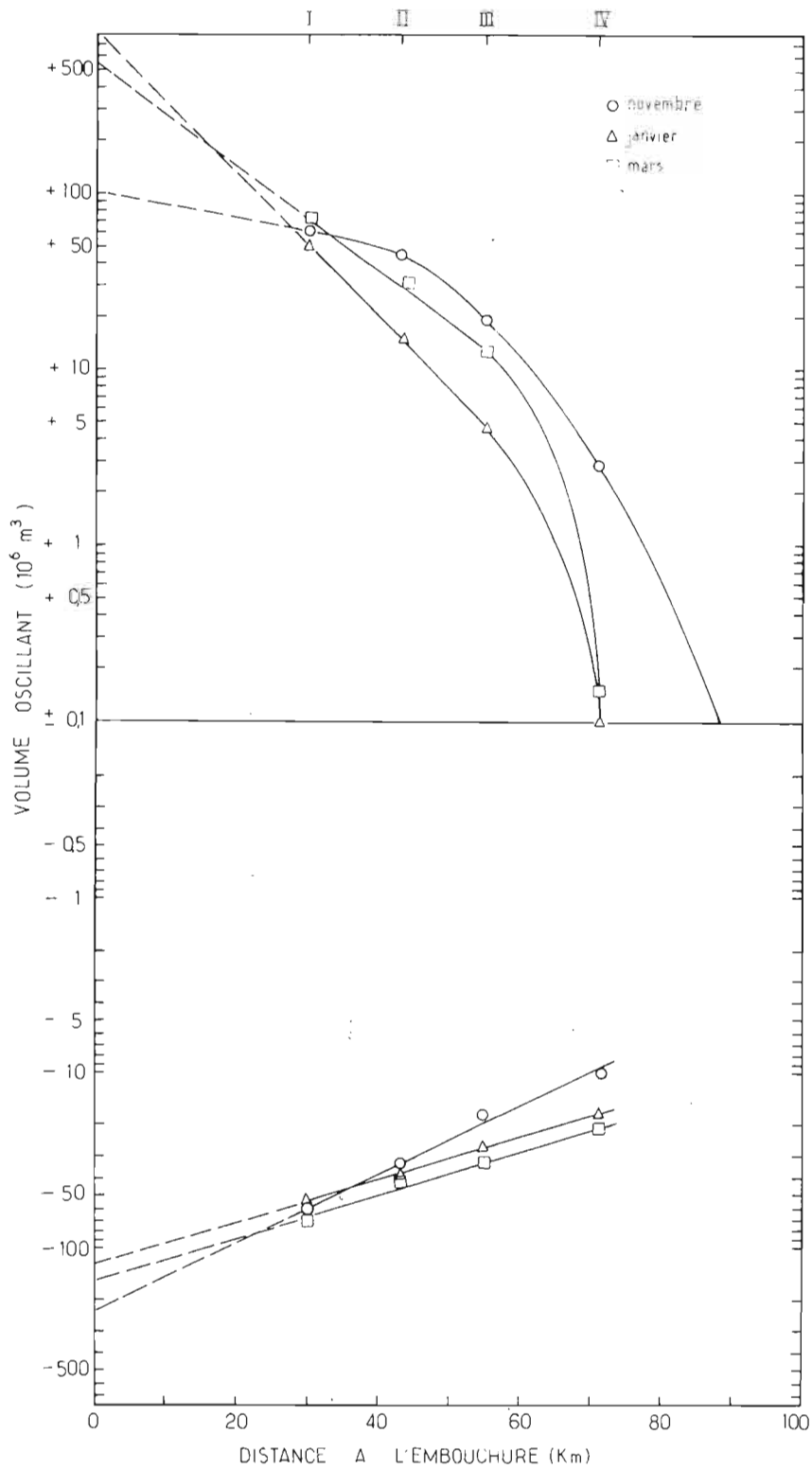


Fig 17 : Evolution longitudinale des volumes oscillants dans l'estuaire de l'Approuague. Ajustement des volumes de jusant à une loi exponentielle.

Tableau VIII : Volumes d'eau oscillants ($10^6 m^3$) au cours du jusant (J), du flot (F) et d'une période de marée (R), dans les rades du Mahury et de l'Approuague.

Date	Apport amont ($10^6 m^3$)	Coeff. marée	J F R	Volume d'eau ($10^6 m^3$)					
				I	II	III	IV	V	V + VI
octobre 73	2,63	29-46		16,0	9,07	8,28	4,45	5,67	10,1
décembre 73	10,1	85-99	J	35,3	19,7	17,5	5,06	11,6	16,7
mars 74	12,0	75-111		39,4	17,5	14,5	5,46	8,50	14,0
octobre 73	2,63	29-46		15,8	4,87	4,50	0,810	2,54	3,35
décembre 73	10,1	85-99	F	39,6	15,9	11,7	2,07	9,25	11,3
mars 74	12,0	75-111		34,2	16,1	11,8	2,18	7,42	9,60
octobre 73	2,63	29-46		-0,216	-4,18	-3,78	-3,64	-3,13	-6,77
décembre 73	10,1	85-99	R	-4,3	-3,8	-5,8	-3,0	-2,3	-5,3
mars 74	12,0	75-111		+1,8	-1,4	-2,7	-3,28	-1,08	-4,4
novembre 73	7,34	76-80		59,8	34,1	18,1	10,0	-	-
janvier 74	12,3	41-60	J	56,3	34,6	26,8	17,2	-	-
mars 74	20,6	85-96		67,9	43,8	32,6	20,9	-	-
novembre 73	7,34	76-80		60,8	44,5	18,7	2,77	-	-
janvier 74	12,3	41-60	F	49,1	15,2	4,54	0	-	-
mars 74	20,6	85-96		69,5	31,0	12,3	0,144	-	-
novembre 73	7,34	76-80		+1,08	+10,4	+0,580	-7,24	-	-
janvier 74	12,3	41-60	R	-7,20	-19,4	-22,2	-17,2	-	-
mars 74	20,6	85-96		+1,6	-12,8	-20,3	-20,8	-	-

Tableau IX : Débits moyens (m^3/s) au cours du jusant (J) du flot (F) et d'une période de marée (R) des estuaires du Mahury et de l'Approuague.

	Date	Débit amont m^3/s	Coeff. marée	J F	Débit moyen (m^3/s)				
					I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46		674	332	300	144	210
	décembre 73	228	85-99	J	1635	830	758	190	509
	mars 74	271	75-111		1460	738	612	207	359
	octobre 75	59	29-46		796	280	273	58,7	143
	décembre 73	228	85-99	F	1735	802	565	119	434
	mars 74	271	75-111		1500	757	587	125	348
	octobre 73	59	29-46		-48,6	-93,4	-87,7	-81,3	-70,1
	décembre 73	228	85-99	R	+96,9	-87,5	-133	-68,0	-52,1
	mars 74	271	75-111		+40,0	-31,3	-61,6	-74,9	-24,0
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80		2656	1370	735	309	-
	janvier 74	276	41-60	J	2346	1164	797	415	-
	mars 74	465	85-96		2600	1587	1087	512	-
	novembre 73	165	76-80		2897	2060	942	220	-
	janvier 74	276	41-60	F	2242	888	336	0	-
	mars 74	465	85-96		3677	1645	854	40,0	-
	novembre 73	165	76-80		+24,8	+223	+12,7	-161	-
	janvier 74	276	41-60	R	-157	-414	-472	-392	-
	mars 74	465	85-96		+35,8	-288	-457	-456	-

Tableau X : Débits maximums (m^3/s) au cours du jusant (J) et du flot (F) des estuaires du Mahury et de l'Approuague.

	Date	Débit amont (m^3/s)	Coeff. marée	J F	Débit maximum (m^3/s)				
					I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46		880	540	460	260	300
	décembre 73	228	85-99	J	2850	1160	1050	290	760
	mars 74	271	75-111		2260	1070	965	285	430
	octobre 73	59	29-46		1020	480	380	95	200
	décembre 73	228	85-99	F	2850	1200	830	195	720
	mars 74	271	75-111		2330	1110	900	195	445
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80		4000	2000	1050	510	-
	janvier 74	276	41-60	J	3600	1980	1175	550	-
	mars 74	465	85-96		4450	2550	1480	725	-
	novembre 73	165	76-80		4700	2500	1450	350	-
	janvier 74	276	41-60	F	3700	1620	530	0	-
	mars 74	465	85-96		5600	2650	1270	100	-

6.3.2. Il a été écrit que l'évolution longitudinale des volumes oscillants obéissait à une loi exponentielle (B. BELLESSORT et G. MIGNIOT -1972-). Il est possible que ceci soit vérifié pour les parties des estuaires très proches de la mer mais les résultats que nous avons obtenus dans les parties étudiées ne s'ajustent guère à une telle loi que pour le jusant dans l'Approuague (fig. 17).

6.3.3. Le nombre de mesures disponibles à Marie-Anne, dans le Mahury permet d'esquisser la variation des volumes oscillants en fonction du coefficient de marée (fig. 18). Dans les limites des valeurs disponibles ($15 \cdot 10^6$ - $50 \cdot 10^6$ m³), la relation peut s'exprimer approximativement par :

$$V (10^6 \text{ m}^3) = 0,45 \text{ Coefficient de marée}$$

6.3.4. Nous avons comparé,

- les volumes oscillants mesurés, dont il vient d'être question,

- les volumes oscillants évalués sommairement par la cubature du prisme de marnage, augmentée (au jusant) ou diminuée (au flot) de l'apport fluvial.

Par prisme de marnage ("tidal prism"), nous entendons le volume d'eau délimité dans l'estuaire à l'amont d'une station par les lieux géométriques de pleine mer et de basse mer. L'équation du prisme de marnage ΔV s'exprime par

$$\Delta V = \int_s^l \sigma dx$$

où σ est la section dénoyée au cours de la marée et x la distance. Les bornes d'intégration sont représentées par les axes d'abscisses s et l correspondant respectivement à la station et à la limite de propagation de l'onde de marée. La courbe $\sigma = f(x)$ est tracée pour chaque campagne à partir des mesures effectuées aux stations (fig. 19). Le petit nombre de ces résultats entraîne une imprécision dans la définition de la courbe. De toute façon, le prisme de marnage est estimé par défaut car on ne peut tenir compte des zones marginales inondées ni des affluents envahis par la marée.

Au flot, le prisme de marnage $\int_s^l \sigma dx$, limité à une station donnée, est rempli :

- par les eaux de mer et de l'estuaire qui remontent vers l'amont. Elles constituent le volume de flot V^+ que l'on cherche à estimer et à comparer au volume V^+ mesuré.

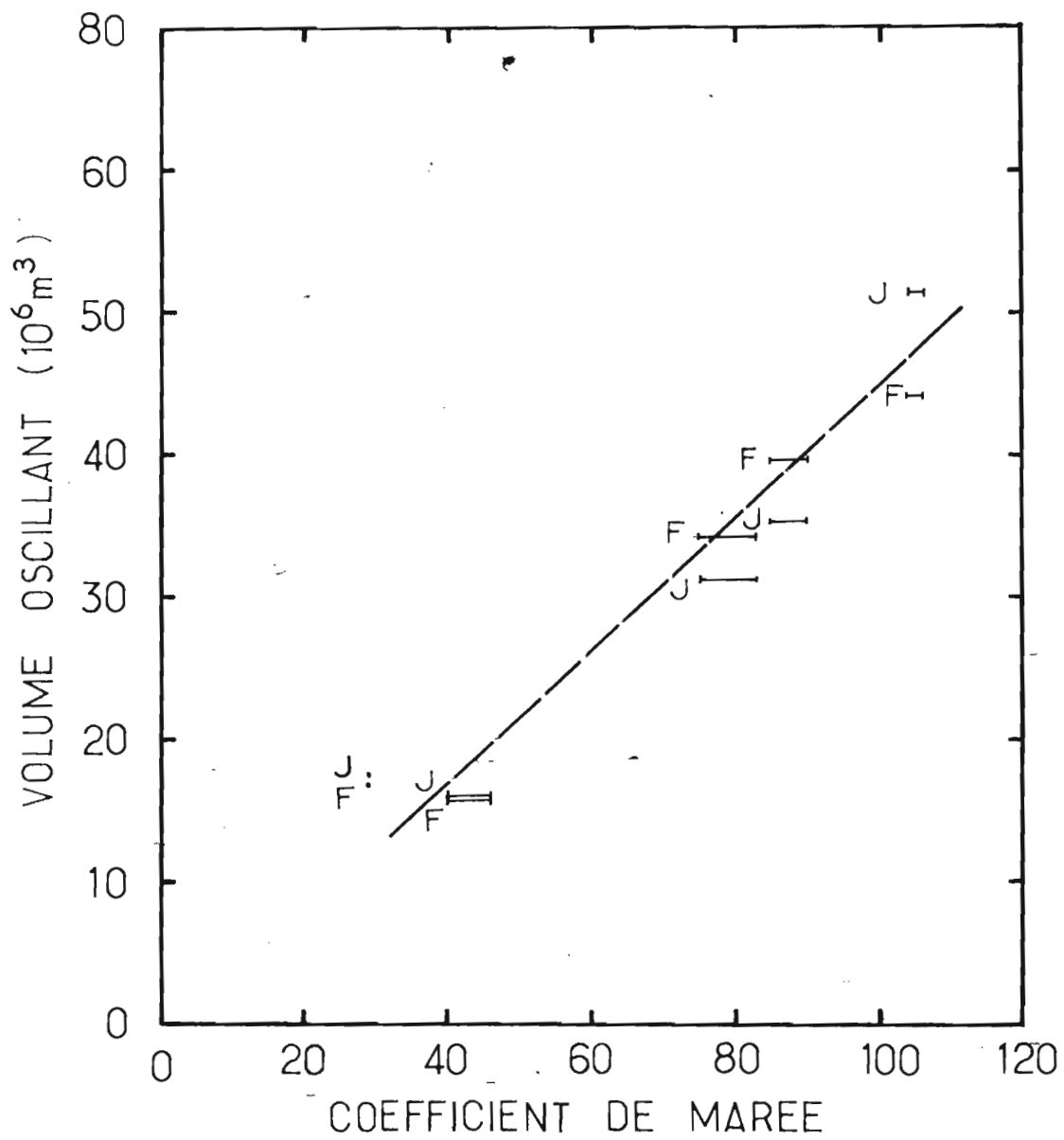


Fig.18 : Marie-Anne. Volume oscillant en jusant (J) et en Flot (F) en fonction du coefficient de marée.

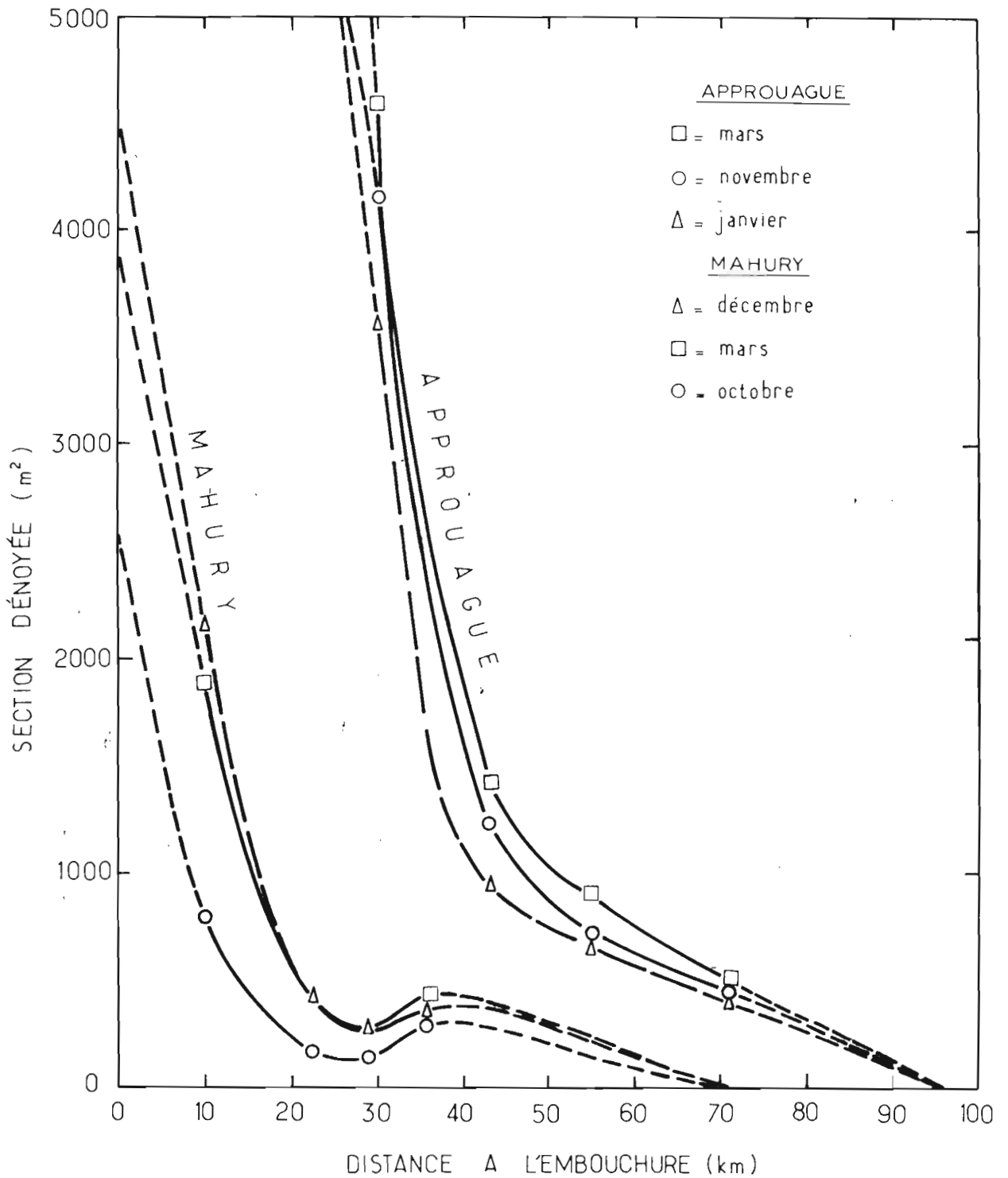


Fig.19 : Variation de la section dénuyée (σ en m^2) au cours d'une période de marée en fonction de la distance (x en km) à l'embouchure.

- par l'apport fluvial Vf^+ qui arrive dans l'estuaire pendant la montée des eaux. Ce volume peut être calculé car on connaît le débit fluvial et le temps de montée. La précision n'est cependant pas très élevée car le débit fluvial a été calculé à l'amont de l'estuaire et devrait normalement être augmenté vers l'aval.

On peut finalement écrire

$$V^{1+} = \int_s^1 \sigma \, dx - Vf^+$$

Au jusant, on aura de même

$$V^{1-} = \int_s^1 \sigma \, dx + Vf^-$$

Les écarts algébriques entre les volumes estimés et les volumes mesurés sont confrontés à ces derniers dans le tableau XI.

Ces évaluations, nettement meilleures pour le jusant que pour le flot, apparaissent le plus souvent trop faibles, probablement en raison de la mauvaise définition des sections dénoyées.

On soulignera que le volume de jusant a été estimé au cours des trois campagnes avec un écart maximum par rapport aux valeurs mesurées de -36 à +8% dans le Mahury et de -26 à +10% dans l'Approuague.

Au sujet de l'évaluation des volumes oscillants à partir du prisme de marnage, il existe une méthode mécanographique plus précise mais de même principe que celle que nous venons d'utiliser (J. LE FLOCH -1961-, J.L. MAUVAIS -1971-). Elle consiste à évaluer les volumes déduits de la variation des profils instantanés de l'onde de marée, pendant de courts laps de temps (10 minutes), au lieu de considérer seulement l'ensemble du flot et du jusant. On peut alors retracer la variation des vitesses et des débits moyens à une station au cours de la période de marée. Une telle méthode implique 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'altitudes connues.

6.4. Dérives oscillantes

6.4.1. Méthode et résultats

La dérive ou excursion est une notion importante puisqu'elle correspond à la distance parcourue par les eaux, et donc par d'éventuels polluants, de part et d'autre d'une

Tableau XI : Ecart algébrique e ($10^6 m^3$) entre les volumes oscillants mesurés V ($10^6 m^3$) et les volumes oscillants estimés par cubature du prisme de marnage (cf. §.6.3) dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague.

	Date	Vf	Coeff. marée	J F	I		II		III		IV		IV + V	
					V	e	V	e	V	e	V	e	V	e
MAHURY	octobre 73	2,63	29-46		16,0	-2,1	9,07	-0,2	8,28	-0,2	-	-	10,1	-3,6
	décembre 73	10,1	85-99	J	35,3	-5,2	19,7	-3,4	17,5	-2,8	-	-	16,7	-3,9
	mars 74	12,0	75-111		32,4	-2,2	17,5	+0,9	14,5	+1,1	-	-	14,0	+0,3
	octobre 73	2,63	29-46		15,8	-4,5	4,87	+1,4	4,50	+0,9	-	-	3,35	+0,5
	décembre 73	10,1	85-99	F	39,6	-19,6	15,9	-9,7	11,7	-7,1	-	-	11,3	-8,6
	mars 74	12,0	75-111		34,2	-16,0	16,1	-9,8	11,8	-8,2	-	-	9,60	-7,3
APPROUAGUE	novembre 73	7,34	76-80		59,8	+0,6	34,1	-4,5	18,1	+0,4	10,0	-0,6	-	-
	janvier 74	12,3	41-60	J	56,3	-3,3	34,6	-5,9	26,8	-6,9	17,2	-4,5	-	-
	mars 74	20,6	85-96		67,9	+7,1	42,6	-1,2	32,6	-2,1	20,9	-0,5	-	-
	novembre 73	7,34	76-80		60,8	-7,8	44,5	-22,3	18,7	-7,5	2,77	-0,7	-	-
	janvier 74	12,3	41-60	F	49,1	-9,3	15,2	+1,3	4,54	+3,44	0	+0,5	-	-
	mars 74	20,6	85-96		69,5	-15,4	31,0	-9,2	12,3	-2,5	0,14	-0,4	-	-

section pendant un temps déterminé. Elle permet en particulier de situer les eaux de marée haute à la marée basse suivante et vice-versa.

La dérive Δx^{\pm} à partir d'une section, au cours du jusant ou du flot peut s'écrire en première approximation :

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

v^{\pm} étant le volume oscillant et \bar{A} la section mouillée moyenne au cours de la marée. La dérive résultante, à l'issue d'une période de marée s'exprime alors par

$$\Delta x = v / \bar{A} \text{ ou par } \Delta x = v^{-} - v^{+} / \bar{A}$$

Le fait que les sections diminuent vers l'amont et augmentent vers l'aval entraîne une estimation par défaut au flot et par excès au jusant. L'utilisation d'une formule plus exacte de la dérive ne se justifierait vraiment qu'avec une meilleure connaissance des sections mouillées.

Les résultats sont reportés dans le tableau XII et sur la figure 20.

Les valeurs croissent évidemment avec le coefficient de marée et le débit fluvial amont. Les dérives résultantes décroissent vers l'aval pour devenir très réduites vers l'embouchure et éventuellement dirigées vers l'amont pour certaines périodes de marée.

6.4.2. Evacuation des eaux en mer

Dans le Mahury, les dérives de jusant à partir de Marie-Anne sont comprises entre 3 et 10 km (valeurs par excès). Cette station, située à 10 km de l'embouchure marque ainsi grosso modo l'extrême limite à l'aval de laquelle les effluents rejetés à marée haute pourraient atteindre la mer au cours d'un seul jusant, par fort coefficient.

Dans l'Approuague, à Guisanbourg, les dérives de jusant varient entre 9 et 11 km et ne peuvent donc arriver jusqu'à la mer, éloignée de 30 km, en une seule demi-période de marée.

6.4.3. Risques de pollution de la prise d'eau de Saint Régis

Une question importante est de savoir s'il existe un risque de pollution de la prise d'eau de Saint Régis, qui alimente Cayenne, par la remontée du flot, pollué lors de son passage dans l'Oyac - Mahury ou dans l'Orapu.

Tableau XII : Dérives des eaux Δx^{\pm} (km) au cours du jusant (J) et du flot (F) et dérives résultantes (R) d'une période de marée, dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague.

	Date	Apport amont (m ³ /s)	Coeff. marée	J F R	Dérive Δx^{\pm} (km)				
					I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46		3,1	6,2	7,0	10,3	9,2
	décembre 73	228	85-99	J	10,0	13,1	14,3	10,8	18,0
	mars 74	271	75-111		7,4	11,1	11,8	11,5	13,2
	octobre 73	59	29-46		3,1	3,3	3,8	1,9	4,1
	décembre 73	228	85-99	F	7,4	10,6	9,6	4,4	14,3
	mars 74	271	75-111		6,8	10,3	9,6	4,6	11,5
	octobre 73	59	29-46		-0,04	-2,8	-3,2	-8,4	-5,1
	décembre 73	228	85-99	R	+0,81	-2,5	-4,8	-6,4	-3,6
	mars 74	271	75-111		+0,34	-0,89	-2,2	-6,9	-1,7
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80		9,6	10,6	10,3	11,6	-
	janvier 74	276	41-60	J	9,3	10,8	15,1	19,2	-
	mars 74	465	85-96		11,0	13,6	17,9	21,6	-
	novembre 73	165	76-80		9,8	13,8	10,7	3,22	-
	janvier 74	276	41-60	F	8,1	4,8	2,6	0	-
	mars 74	465	85-96		11,3	9,6	6,8	0,15	-
	novembre 73	165	76-80		+0,17	+3,2	+0,33	-8,42	-
	janvier 74	276	41-60	R	-1,2	-6,1	-12,5	-19,2	-
	mars 74	465	85-96		+0,26	-4,0	-11,2	-21,4	-

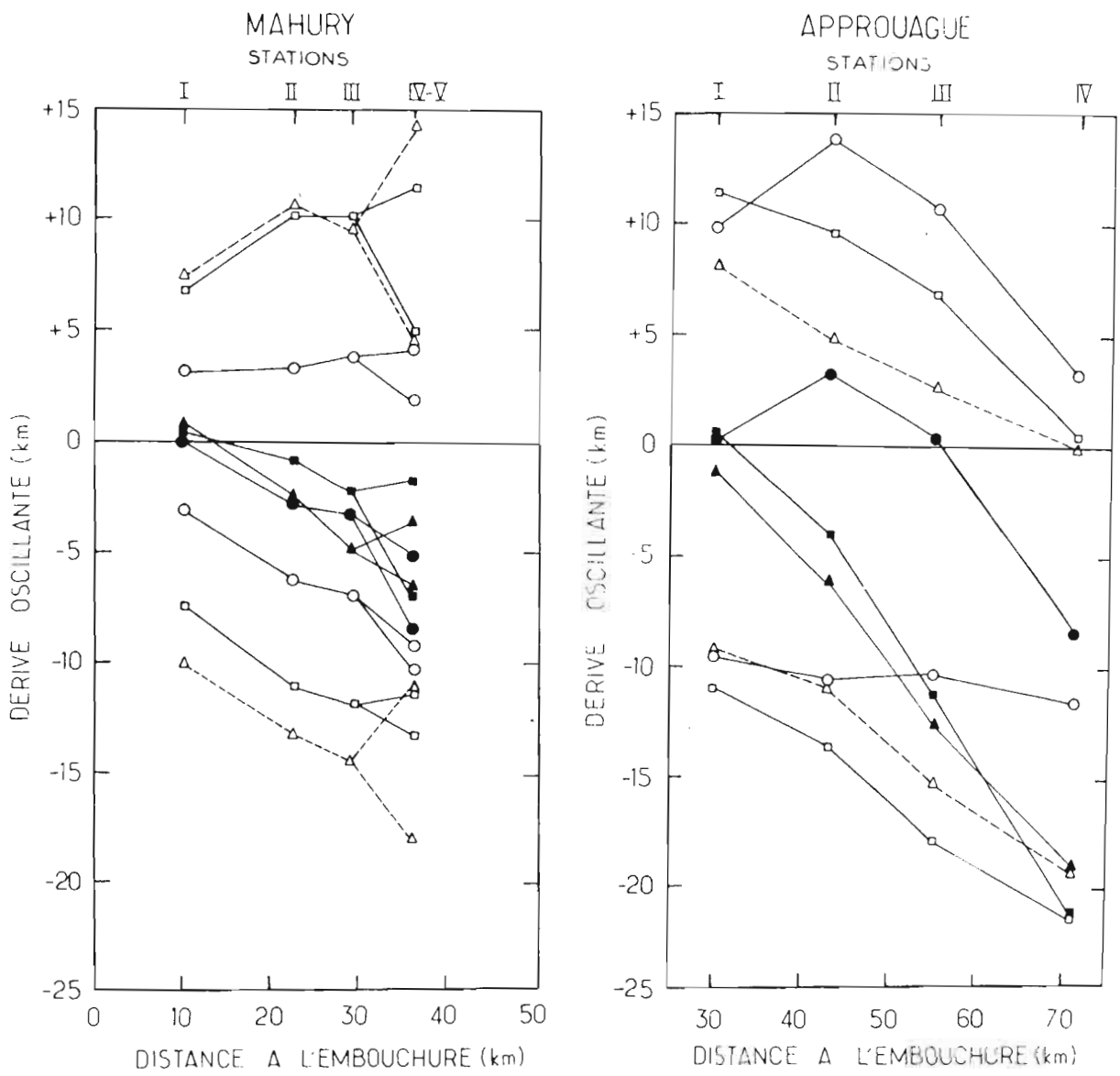


Fig.20: Dérive oscillante au jusant, au flot et résultante d'une période de marée dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague.

La dérive de flot à Saint Régis apparaît relativement faible par rapport à celle qui est évaluée aux autres stations. Ce phénomène est probablement engendré par les méandres accentués qui freinent la propagation de l'onde vers l'amont. Il représente un élément favorable à la protection du captage, car on a tout lieu de penser qu'il se produit aussi entre la station et le confluent avec l'Orapu. Quoi qu'il en soit, nous préférons nous placer dans le cas le plus défavorable en prenant en considération les dérives de flot à Roura et à Deux-Branches.

D'après les résultats du tableau XII, la dérive de flot s'étend au moins 4 à 10 km en amont de Deux-Branches, situé au confluent, et à 3 et 11 km en amont de Roura. Ces deux stations étant distantes respectivement de 7 et 14 km de Saint-Régis, il convient de proscrire absolument les rejets à marée basse en amont de Roura pour éviter, surtout par coefficients élevés, la pollution de la prise d'eau. En revanche, un rejet à marée haute à ces stations ne pourrait y revenir douze heures plus tard : d'après les dérives résultantes estimées, il se trouverait de 1 à 5 km environ en aval.

Il convient aussi d'examiner le devenir des rejets effectués à marée haute à Fourgassié, site parmi les plus intéressants pour l'implantation d'une usine forestière. La dérive de jusant détermine leur position à la basse mer suivante : les eaux dépasseraient Deux-Branches et parfois même Roura. Au flot suivant, une partie d'entre elles remonterait la Comté jusqu'à environ 5 à 2 km en aval de Saint-Régis.

Toutefois le jeu des oscillations et des diffusions turbulentes conduirait inévitablement à ce que des polluants issus de Fourgassié arrivent à Deux-Branches juste en fin de jusant et l'on se trouverait alors dans le premier cas d'une évacuation d'eaux usées dans l'Oyac à marée basse.

Une prise d'eau pour l'alimentation de la cité attenante à l'usine peut être implantée non loin du point de rejets à condition que ceux-ci soient réalisés à marée haute. La dérive résultante à Fourgassié, dirigée vers l'aval, est comprise entre 1,7 et 5,1 km.

En conclusion, ces quelques évaluations laissent augurer de grands risques de pollution des eaux alimentant la ville de Cayenne par les effluents de l'usine de pâte de bois. Dans les meilleures combinaisons, la marge de sécurité apparaît faible ; probablement trop faible si l'on considère que l'on s'est basé sur des dérives moyennes dans l'ensemble des sections et non pas maximales.

Ces conclusions ne concernent cependant que les trajets, sans préjuger de la nature des polluants, ni de leur dilution. Ces autres caractéristiques contribueront à déterminer l'importance des dommages et les nécessités nouvelles de traitement des eaux destinées à l'alimentation urbaine.

De toutes façons, la première précaution devrait consister à ne pas évacuer les effluents lors des marées de vives-eaux et des périodes d'étiage de la Comté et donc à prévoir un réservoir naturel pour stocker et traiter les eaux usées.

Enfin, soulignons que l'étude par traceurs, éventuellement de simples flotteurs lestés, représente une méthode complémentaire pour préciser la réponse au problème.

7. QUALITE DES EAUX ESTUARIENNES

La qualité des eaux estuariennes du Mahury et de l'Approuague va être étudiée dans les paragraphes suivants mais il est d'ores et déjà utile de signaler où l'on peut consulter les principaux résultats. Rappelons que les méthodes de mesures et d'estimations sont exposées aux paragraphes 2.2. à 2.4.

Les tableaux XIV et XV indiquent les concentrations en suspension extrêmes et moyennes à chaque station durant le jusant, le flot et une période de marée.

Les tableaux XVII et XVIII mentionnent les caractéristiques physico-chimiques extrêmes et moyennes arithmétiques des eaux. Ces résultats sont obtenus à partir des mesures et analyses complètes effectuées à chaque station, six fois au cours d'une période de marée.

Les moyennes des conductivités mesurées en quinze points des sections, six fois au cours d'une période de marée, ont été traduites en salures globales. Les valeurs extrêmes et moyennes semi-diurnes sont inscrites dans le tableau XIX.

Ces résultats ne peuvent bien sûr prétendre fixer les limites réelles de la variation annuelle mais, compte-tenu des conditions hydro-climatiques qui prévalaient au moment des mesures, on a tout lieu de penser que l'on en est peu éloigné.

Soulignons enfin que les concentrations moyennes pondérées par les débits sont utilisables dans les bilans de matières tandis que les concentrations moyennes arithmétiques se rapprochent de celles qu'aurait un volume d'eau prélevé à débit constant au cours de la période considérée.

7.1. La qualité des eaux requise dans l'industrie de la pâte de bois

Les usines de pâte de bois et de papier tendent à utiliser des quantités d'eau moins importantes qu'auparavant mais demandent en contrepartie une meilleure qualité physico-chimique.

Les Industriels se basent généralement sur les concentrations maximales proposées par la "Technical Association of the Pulp and Paper Industry". Le Centre Technique Forestier Tropical (G. PETROFF -1973-) nous a communiqué ces valeurs. Nous les présentons dans le tableau XIII.

Selon les produits recherchés, on prend en considération les références :

- E 600 S 48 pour la fabrication de papiers fins (livres, papiers à lettre, ...),

Tableau XIII : Concentrations maximales en éléments dans les eaux utilisées pour la fabrication de la pâte de bois et du papier. (Conseillées par la "Technical Association of the Pulp and Paper Industry").

Caractéristiques	Teneurs maximales (mg/l)			
	Réf.	Réf.	Réf.	Réf.
	E 600 S 48	E 602 S 48	E 601 S 53	E 603 S 49
Turbidité	10	50	40-100	25
dureté totale (en CO ₃ Ca)	100	200	100-200	100
dureté calcique (en CO ₃ Ca)	50	-	-	50
dureté magnésienne (en CO ₃ Ca)	-	-	-	50
Alcalinité au méthyl orange (en CO ₃ Ca)	75	150	75-150	75
Fer	0,1	0,3	0,2-1,0	0,1
Manganèse	0,05	0,1	0,1-0,5	0,05
Silice dissoute	20	50	50-100	20
Teneurs totales dissoutes	200	500	300-500	250
Chlore	2,0	75	200-200	75

- E 602 S 48 pour les papiers grossiers (journaux, annuaires, ...),
- E 601 S 53 pour les papiers Kraft préparés au sulfate,
- E 603 S 49 pour la préparation de la pâte à la soude, au sulfate ou au procédé Kraft. C'est celle qui semble convenir à une usine guyanaise de pâte de bois et à laquelle on confrontera la qualité des eaux du Mahury et de l'Approuague (fig. 27 et 28).

Une usine de cellulose est exigeante sur les teneurs en chlore qui favorisent la corrosion des parties métalliques du système de circulation des eaux. Les composés de calcium et de magnésium forment des encroûtements dans ce système de circulation et des précipités sur la pâte quand l'eau vient en contact avec les solutions alcalines utilisées pour le traitement du bois. Le fer et le manganèse sont facilement absorbés par la pâte dont ils diminuent la blancheur. Les matières organiques, à la limite de la suspension colloïdale et de la solution, sont responsables de la coloration résiduelle de l'eau décantée. Elles ont la fâcheuse propriété de se fixer sur les fibres de pâte blanchie si on ne les élimine pas totalement de l'eau. Le traitement s'effectue par le chlorure ferrique ou le sulfate d'alumine, avec ou sans adjonction de polyélectrolytes organiques. L'efficacité du traitement est contrôlé par la consommation de permanganate et la coloration résiduelle de l'eau traitée. A ce sujet la Société Parsons et Whittemore (France) Entreprises (1974) nous signale des consommations de 10 mg/l de $KMnO_4$ comme admissibles dans les eaux naturelles.

7.2. Matières en suspension : concentrations et transports

7.2.1. Concentrations en matières en suspension

Les charges maximales et minimales sont déterminées parmi les moyennes arithmétiques des 15 mesures effectuées dans l'ensemble de la section à chaque jaugeage. Par contre, la charge moyenne \bar{P} (tableaux XIV et XV) représente une valeur pondérée par les débits car elle est calculée à partir des quantités transportées W et des volumes liquides V correspondants :

$$\bar{P} = \frac{W^+}{V^+} \quad \text{et} \quad \bar{P} = \frac{W^+ + W^-}{V^+ + V^-}$$

Sauf aux stations aval, où existe une forte hétérogénéité transversale et surtout verticale des turbidités, les moyennes pondérées sont en fait peu différentes des moyennes arithmétiques. Ce qui démontre, dans certains cas, les possibilités de simplifier les dépouillements.

Tableau XIV : Concentrations en matières en suspension P (mg/l) maximales moyennes et minimales durant le jusant (J), le flot (F) et une période de marée (T) dans l'estuaire du Mahury.

	Date	Débit amont (m ³ /s)	Coeff. marée	J F T	max moy min	Charge de matières en suspension (mg/l)				
						I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46		max moy min	69 59 43	27 26 25	28 27 24	27 22 16	25 24 23
	décembre 73	228	85-99	J	max moy min	587 382 289	275 265 251	256 254 252	245 243 242	214 211 207
	mars 74	271	75-111		max moy min	207 89 42	19 16 15	23 22 20	14 12 10	13 10 6
	octobre 73	59	29-46		max moy min	77 67 51	28 28 21	27 25 24	25 21 16	30 26 24
	décembre 73	228	85-99	F	max moy min	475 458 369	291 274 251	257 248 241	248 246 238	215 213 207
	mars 74	271	75-111		max moy min	291 132 22	23 18 16	22 21 17	13 12 11	13 9 6
	octobre 73	59	29-46		max moy min	77 63 43	21 27 27	28 26 24	27 22 16	30 25 23
	décembre 73	228	85-99	T	max moy min	587 422 289	291 269 251	258 252 241	248 244 238	215 212 207
	mars 74	271	75-111		max moy min	291 111 22	23 17 15	23 22 17	14 12 10	13 9,5 6,0

Tableau XV : Concentration en matières en suspension P (mg/l) maximales, moyennes et minimales durant le jusant (J), le flot (F) et une période de marée (T) dans l'estuaire de l'Approuague.

	Date	Débit amont (m ³ /s)	Coeff. marée	J F T	max moy min	Charge de matières en suspension (mg/l)			
						I	II	III	IV
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80		max moy min	1720 1530 1580	683 469 390	282 275 272	274 271 270
	janvier 74	276	41-60	J	max moy min	586 446 260	71 66 62	60 51 50	70 62 54
	mars 74	465	85-96		max moy min	916 694 492	172 104 63	19 18 16	31 27 17
	novembre 73	165	76-80		max moy min	2020 1900 1220	986 506 348	290 277 267	271 270 269
	janvier 74	276	41-60	F	max moy min	612 503 270	67 58 57	56 55 53	- - -
	mars 74	465	85-96		max moy min	871 801 440	362 231 32	15 15 14	12 12 12
	novembre 73	165	96-80		max moy min	2020 1730 1220	986 490 348	290 269 267	274 271 269
	janvier 74	276	41-60	T	max moy min	612 472 260	71 64 57	60 52 50	70 62 54
	mars 74	465	85-96		max moy min	916 748 440	362 157 32	19 17 14	31 27 12

Les variations des turbidités moyennes arithmétiques au cours de la marée ont été tracées sur les figures 14 et 15, en regard de celles des débits et des salinités.

La stratification des turbidités n'est vraiment significative qu'à Marie-Anne, et éventuellement à Roura, dans le Mahury et à Guisanbourg et Cimetière dans l'Approuague. La figure 21 illustre un des cas les mieux marqués, observé à Guisanbourg en mars 1974. Les concentrations sont alors 2 à 13 fois plus fortes à 0,4 m du fond qu'en surface.

Les concentrations maximales mesurées en un point du fond, toujours à la station la plus aval, sont de 1750 ng/l à Marie-Anne et de 3340 ng/l à Guisanbourg. Encore faut-il souligner que ces prélèvements ont été faits alors qu'une forte houle favorisait une remise en suspension des sédiments du fond.

Si l'on considère la charge moyenne arithmétique dans la section au cours d'un jaugeage, les valeurs maximales deviennent 590 mg/l à Marie-Anne et 2020 mg/l à Guisanbourg.

Enfin, la charge maximale moyenne pondérée pendant le jusant et le flot est respectivement de 382 et 458 mg/l à Marie-Anne et de 1530 et 1900 mg/l à Guisanbourg. Ces valeurs sont de l'ordre de grandeur de celles qui ont été mesurées dans les estuaires de grands fleuves en crues (1400 mg/l à l'embouchure du Mississippi, 1100 mg/l à l'embouchure de la Betsiboka... -d'après J. LARRAS, 1964-). L. BERTHOIS et J. HOORELBECK (1963) signalent une teneur maximale de 8000 ng/l au fond du Mahury à Marie-Anne, en mai 1963.

Les fortes turbidités, supérieures à 1000 mg/l à proximité du fond, apparaissent au cours du flot ou du jusant, alors que les vitesses sont elles-mêmes maximales. Celles-ci, ainsi que la houle, sont les causes principales du phénomène : elles favorisent la remise en suspension des matières qui ont sédimenté par vitesses plus faibles et lors des étales de courant. C'est précisément la cause de la turbidité de 3340 mg/l mentionnée sur la figure 21 : le prélèvement a été effectué lors d'une rafale de vent.

Pour expliquer ces teneurs de 1000 à 3000 ng/l, il ne semble pas nécessaire de faire intervenir le passage d'une "crème de vase" ("fluid mud"). Si elle existe, une telle formation doit être localisée plus en aval. De toutes façons, on entend par ce terme des concentrations plus élevées que celles qui ont été mesurées jusqu'à présent dans les estuaires guyanais. Il n'est pas rare en effet que les charges y atteignent 100 000 à 150 000 ng/l dans certains estuaires tels par exemple ceux de la Tamise (C. INGLIS et F.H. ALLEN -1957-) ou de l'Orénoque (J. MARTIN -1974-). Les vitesses dans cette lentille sont alors très faibles.

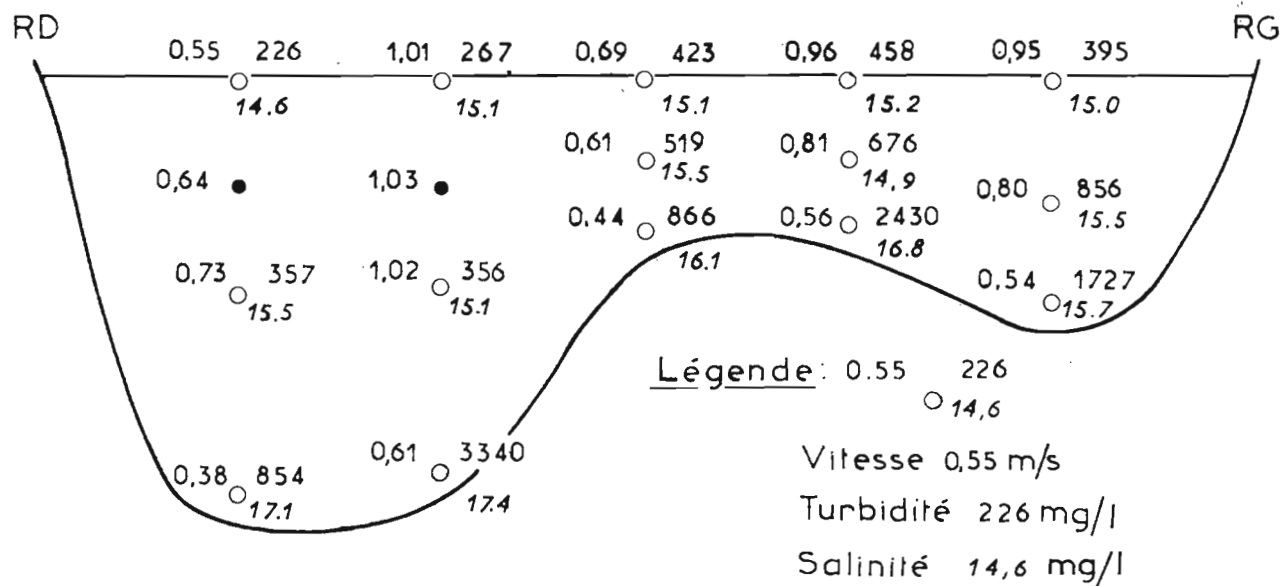


Fig. 21 : Vitesses, turbidités et salinités des eaux de l'Approuague à Guisanbourg, au cours du jusant, de 8h 25 à 9h 20 le 23 mars 1974.

En février 1963, L. BERTHOIS et J. HOORELBECK (1963) ont mis en évidence dans le Mahury une lentille de forte turbidité (1000 à 6000 ng/l) centrée sur Marie-Anne à la pleine mer et s'étalant sur 3 km de part et d'autre de la station. Au cours du jusant et surtout en période de crue, cette lentille se déplace jusqu'à l'embouchure alors que les concentrations diminuent. Ainsi en mai de la même année, les turbidités dans l'estuaire ne dépassent pas 800 ng/l avec des maximums situés au voisinage de Marie-Anne.

Les concentrations minimales se situent toujours aux stations les plus amont (fig. 14 et 15). Elles varient au cours de la marée mais l'amplitude demeure faible. La variation est surtout importante d'une époque à l'autre. D'après nos résultats, elle s'étend de 6 à 250 ng/l dans l'Oyac, la Comté et l'Orapu et de 12 à 280 ng/l dans l'Approuague en amont de Régina.

Les charges moyennes croissent vers l'aval (fig. 22). L'accroissement maximum, de 12 à 800 ng/l est observé en mars dans l'Approuague.

Les charges moyennes du flot sont le plus souvent nettement supérieures à celles du jusant.

Les turbidités requises dans l'industrie de la pâte de bois et du papier varient entre 10 et 100 ng/l selon le type de produits recherchés. La norme E 603 S 49 stipule une turbidité maximale de 25 ng/l, valeur en dessous de laquelle on peut se trouver à certaines époques dans la partie supérieure des estuaires guyanais. Quoi qu'il en soit, étant donnée que la variation temporelle peut dépasser 1000 ng/l, une floculation des suspensions devra être prévue (cf. § 7.1.).

7.2.2. Transport de matières en suspension

Les tonnages de matières en suspension transportés à travers les différentes sections au cours du jusant et du flot, ainsi que ceux qui demeurent en amont ou en aval de ces sections à l'issue d'une période de marée (transport résultant) sont reportés dans le tableau XVI. Les méthodes d'estimation ont été développées au paragraphe 2.3.

Tableau XVI : Quantités de matières en suspension transportées W (tonnes) pendant le jusant (J) et le flot (F) et à l'issue d'une période de marée (R), dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague.

	Date	Débit amont (m ³ /s)	Coeff. marée	J F R	Quantité de matières transportées en suspension (tonnes)				
					I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46		945	250	219	99,0	136
	décembre 73	228	85-99	J	13500	5220	4450	1230	2450
	mars 74	271	75-111		2870	272	323	65,1	83,7
	octobre 73	59	29-46		1060	135	114	17,3	66,2
	décembre 73	228	85-99	F	18140	4350	2900	510	1970
	mars 74	271	75-111		4520	289	251	26,2	67,3
	octobre 73	59	29-46		+115	-142	-105	-81,7	-68,7
	décembre 73	228	85-99	R	+4640	-370	-1550	-720	-480
	mars 74	271	75-111		+1652	+ 17	- 72	-38,9	-16,4
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80		91400	16000	4970	2710	-
	janvier 74	276	41-60	J	25100	2290	1380	1060	-
	mars 74	465	85-96		47100	4590	595	566	-
	novembre 73	165	76-80		116000	22500	5180	750	-
	janvier 74	276	41-60	F	24700	880	250	0	-
	mars 74	465	85-96		55700	7160	189	1,70	-
	novembre 73	165	76-80		+24200	+6500	-210	-1960	-
	janvier 74	276	41-60	R	-400	-1410	-1130	-1060	-
	mars 74	465	85-96		+8600	+2570	-406	-564	-

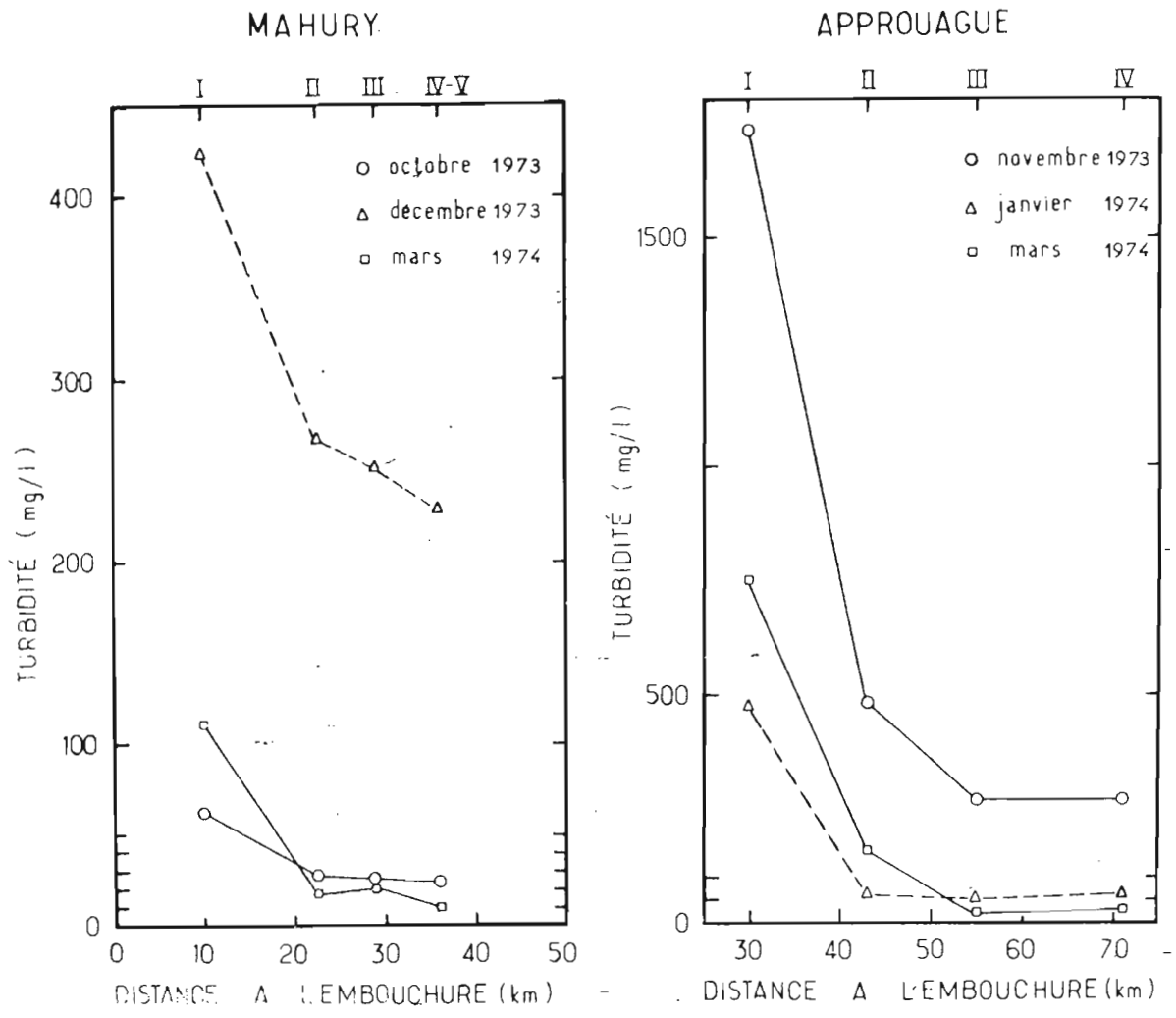


Fig.22 : Concentrations moyennes pondérées en matières solides en suspension au cours d'une période de marée dans les estuaires du Mahury et de l'Approuague.

Les quantités de matières en mouvement sont fonction :

- des volumes d'eau oscillants, lesquels sont eux-mêmes fonction des coefficients de marée et du débit fluvial amont. La variation temporelle relative de ces volumes croît avec la distance à l'embouchure.

- des charges moyennes en suspension, qui peuvent varier
- . à une même station, dans un rapport inférieur à 1/15 selon l'époque de l'année.
- . dans un rapport inférieur à 1/70 selon la distance à l'embouchure.

Ceci explique la gamme étendue des quantités de matières oscillantes.

Les transports maximums, mesurés au cours du flot, atteignent 18 000 tonnes à Marie-Anne et 116 000 tonnes à Guisanbourg.

L'augmentation vers l'aval des volumes oscillants et des concentrations entraîne fatalement celle des quantités de matières oscillantes. L'accroissement longitudinal maximum des tonnages au cours du jusant est observé en mars 1974 : le rapport d'accroissement est de 9 entre Deux-Branches et Marie-Anne et de 83 entre Beaugé et Guisanbourg.

La résultante de ces mouvements solides, en fin de marée, peut être éventuellement de sens opposé à celle des mouvements liquides puisqu'intervient le facteur concentration, variable au cours du cycle semi-diurne.

Sur la base de nos résultats, une remontée des suspensions se produit à Marie-Anne dans le Mahury et à Guisanbourg et Régina dans l'Approuague. Toutefois, en janvier 1974, par débit moyen et coefficient faible, les sédiments sont évacués en aval de Guisanbourg. C'est là un phénomène qui doit se produire périodiquement sous certaines conditions et qui évite aux estuaires de s'envaser. De plus, on peut penser que l'inégalité diurne des marées et des facteurs secondaires, tels que les vents, doivent parfois masquer la variation semi-lunaire.

Au sujet des risques de pollution par l'usine, on retiendra qu'une accumulation de déchets pourrait avoir lieu périodiquement entre Marie-Anne et Roura et entre Guisanbourg et Régina, soit à certaines saisons, soit pendant une partie du cycle semi-lunaire. Il est aussi probable que les nuisances apparaîtraient surtout en aval de Marie-Anne et de Guisanbourg.

On sait en fait que la décantation finale des

sédiments s'effectue essentiellement au niveau de la zone d'équilibre fluvio-océanique (L. BERTHOIS -1958-) qui, pour le Mahury, se situe en moyenne entre la côte et les filets distants de quelques kilomètres. En cet endroit les profondeurs ne sont plus que d'environ 1 mètre à marée basse de vives-eaux. Mentionnons un phénomène curieux qui, d'après H. BENNETT et al. (1968), conditionnerait les cycles d'érosion et de sédimentation observé en aval de Marie-Anne et en mer. Des bancs de vases de 25 km de long sont charriés par le courant équatorial, distants les uns des autres de 25 km, au large des côtes depuis l'embouchure de l'Amazonie. Le passage d'un de ces bancs favorise la sédimentation devant l'estuaire. La durée de passage d'un banc serait de l'ordre de dix-huit ans, correspondant à une vitesse de déplacement de 1,5 km/an.

Nous n'aborderons pas ici le problème de l'origine amazonienne ou autochtone des sédiments présents dans les estuaires guyanais car il est semble-t-il sans importance pour l'alimentation de l'usine. Toutefois, nous pensons d'un point de vue plus fondamental, qu'un bilan pluriannuel des exportations amont de matières en suspension représenterait un élément précieux de réponse à cet objet de bien des "querelles".

7.3. Températures T

Les températures des eaux en surface varient entre 24 et 28°C (tableaux XVII et XVIII). Elles paraissent augmenter vers la mer. L'écart entre la surface et le fond ne dépassent pas $\pm 0,8^\circ\text{C}$. Il est le plus souvent nul ou inférieur à $0,2^\circ\text{C}$.

L'écart diurne reste inférieur à $1,5^\circ\text{C}$. Il est pratiquement inexistant par temps couvert sans pluies.

Rapportons que les températures moyennes mensuelles mesurées en 1972 et 1973 par l'Institut scientifique et technique des Pêches Maritimes dans l'estuaire de la rivière de Montsinéry (crique Thoulouse), 20 km à l'ouest du Mahury, varient entre 26,1 et 29,9°C, avec une moyenne interannuelle de 28,1°C. Elles sont en général plus élevées en saison sèche qu'en saison des pluies.

7.4. pH

Dans la partie des estuaires non influencée par les eaux de mer, les pH conservent leurs faibles valeurs originelles, comprises entre 5,9 et 6,6 dans le Mahury et entre 6,3 et 6,8 dans l'Approuague (tableaux XVII et XVIII). Ils croissent avec la salinité et atteignent par exemple 7,6 à Marie-Anne, pour une salure de 15‰.

Tableau XVII : Caractéristiques physico-chimiques et teneurs en éléments maxiales, moyennes et minimales des eaux du Mahury.

Stations	I			II			III			IV			V		
	oct.	déc.	mars	oct.	déc.	mars	oct.	déc.	mars	oct.	déc.	mars	oct.	déc.	mars
P	31 19 7	425 325 270	212 95 11	30 20 11	292 266 247	34 26 18	33 26 22	276 256 240	22 16 10	37 29 20	243 240 234	28 17 8	29 25 20	212 206 200	19 11 6
S	4257 2784 1414	15100 5050 227	669 212 (17,5)	(23,5) (19,2) (16,1)	(42,7) (22,5) (12,8)	(23,0) (17,8) (13,9)	(20,0) (15,3) (13,8)	(15,0) (13,8) (12,8)	(18,1) (15,9) (14,4)	(18,3) (16,9) (15,7)	(12,5) (12,1) (11,7)	(16,2) (15,3) (14,3)	(15,2) (14,8) (13,8)	(12,9) (12,8) (12,7)	(16,9) (14,0) (12,3)
C	6900 4580 2400	23020 8055 88,0	1010 322 28,2	34,0 26,9 21,9	65,8 32,4 16,4	28,3 22,3 17,6	26,6 20,5 18,0	20,0 18,0 16,4	23,1 19,4 17,4	25,5 23,1 21,1	15,9 15,2 14,6	20,0 19,4 18,8	20,4 19,6 18,0	16,6 16,4 16,2	19,2 17,4 16,9
T	-	-	26,2 25,7 25,3	-	-	25,9 25,5 25,2	-	25,2 25,1 25,0	25,5 25,4 25,3	-	24,8 24,4 24,1	25,2 25,1 25,0	-	25,3 25,0 24,8	25,2 25,2 25,2
pH	-	7,6 6,8 6,1	6,5 6,3 6,1	-	6,1 6,0 5,9	6,9 6,5 6,2	-	6,0 6,1 6,1	6,3 6,2 6,1	-	5,9 6,0 6,0	6,6 6,5 6,4	-	5,9 6,0 6,1	6,4 6,3 6,2
O ²	-	-	6,2 6,1 6,0	-	-	5,8 5,7 5,7	-	-	5,7 5,6 5,6	-	-	6,0 5,9 5,8	-	-	5,6 5,5 5,4
DBO5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DCO	-	-	4,08 3,61 3,21	-	-	2,84 2,58 2,34	-	-	3,31 2,61 2,37	-	-	2,73 2,30 1,98	-	-	2,61 2,16 1,86
Cl ⁻	2415 1560 781	8590 1430 107	312 96,9 6,25	(8,3) (6,3) (4,9)	(17,2) (7,9) (3,4)	6,53 5,13 3,91	(6,2) (4,5) (3,8)	(4,4) (3,8) (3,4)	5,11 3,92 3,40	(5,9) (5,3) (4,7)	(3,3) (3,1) (2,9)	3,98 3,64 3,48	(4,5) (4,3) (3,8)	(3,4) (3,4) (3,3)	4,04 3,78 3,69
CO ₃ H ⁻	30,5 25,7 18,9	77,5 35,6 (17,0)	8,17 5,52 3,97	18,3 17,9 11,6	18,3 16,6 14,0	4,82 4,45 4,21	18,9 17,1 14,6	17,1 14,5 12,2	5,43 4,78 4,39	18,3 17,0 14,6	14,0 11,6 9,2	6,47 5,89 5,56	15,2 13,6 11,0	14,0 12,3 10,4	4,64 3,97 3,11
SO ₄ ²⁻	324 202 97	816 301 24,7	(106) (33,3) (0,96)	(1,8) (0,9) (0)	(8,0) (3,2) (0,8)	(5,23) (2,67) (1,01)	(0,8) (0,3) (0,7)	(1,8) (1,5) (0)	(3,36) (2,26) (1,34)	(1,0) (0,4) (0)	(3,4) (2,4) (1,9)	(1,54) (1,09) (0,58)	(1,5) (0,3) (0)	(2,2) (1,8) (1,4)	(3,07) (1,82) (0,82)
Na ⁺	1205 788 4,10	4350 1465 61,0	203 126 3,91	4,80 3,90 2,91	8,41 4,17 2,15	5,86 3,98 2,73	3,83 3,30 3,03	2,90 2,42 2,05	3,95 3,31 2,61	3,88 3,44 3,14	2,52 2,14 1,91	3,23 2,95 2,59	5,43 3,44 1,88	2,43 2,34 2,10	3,86 3,14 2,73
Mg ²⁺	150 108 60,0	634 203 8,13	19,2 6,23 0,64	0,85 0,78 0,64	1,50 0,81 0,50	0,70 0,58 0,52	0,62 0,68 0,76	0,51 0,47 0,43	0,60 0,55 0,51	0,88 0,78 0,76	0,44 0,41 0,38	0,58 0,55 0,54	0,71 0,68 0,65	0,48 0,46 0,45	0,50 0,48 0,47
Ca ²⁺	55,6 43,5 18,3	218 68,5 1,88	8,59 2,97 0,49	1,96 1,22 1,00	0,78 0,65 0,55	0,53 0,48 0,44	1,10 0,82 0,33	0,70 0,60 0,50	0,75 0,57 0,47	1,03 0,87 0,67	0,83 0,69 0,58	0,79 0,63 0,54	1,10 0,83 0,50	0,53 0,77 1,00	0,58 0,46 0,40
K ⁺	84,0 54,8 28,5	420 132 5,20	12,3 4,57 0,57	0,89 0,75 0,61	1,32 0,75 0,47	0,65 0,49 0,40	0,68 0,58 0,49	0,64 0,51 0,44	0,63 0,53 0,41	0,78 0,74 0,70	0,49 0,45 0,39	0,71 0,59 0,45	0,51 0,43 0,36	0,41 0,31 0,27	0,39 0,33 0,27
Fe ³⁺	-	1,20 0,35 0	0,28 0,16 0,04	-	0,25 0,19 0,15	0,20 0,14 0,11	-	0,25 0,20 0,15	0,33 0,21 0,13	-	0,20 0,18 0,15	0,35 0,24 0,16	-	0,25 0,24 0,20	0,20 0,15 0,10
SiO ₂	-	8,4 3,6 0	4,4 3,8 3,4	-	16,6 11,9 7,8	4,8 4,6 4,4	-	13,3 10,5 8,4	6,4 4,9 3,4	-	23,2 14,1 7,3	6,8 5,7 4,8	-	23,6 21,0 18,8	6,6 5,0 4,4

Tableau XVIII : Caractéristiques physiques et teneurs en éléments maximales moyennes et minimales (mg/l) des eaux de l'Anprouague.

Sta- tions	I			II			III			IV		
	nov.	janv.	mars	nov.	janv.	mars	nov.	janv.	mars	nov.	janv.	mars
P	2230 1685 997	353 227 122	647 386 22	545 435 253	69 64 58	195 114 34	279 274 264	63 53 40	41 28 22	277 273 269	46 57 65	33 27 22
S	{ 564 142 (20,3)	{ 15,1 14,5 (13,4)	{ 22,4 18,3 (16,8)	{ 18,9 17,7 (15,8)	{ 13,4 12,9 (12,3)	{ 15,9 15,2 (14,8)	{ 18,7 17,5 (16,9)	{ 14,7 13,1 (12,3)	{ 15,9 15,1 (14,6)	{ 16,6 16,4 (16,2)	{ 15,0 14,1 (13,5)	{ 15,7 14,8 (14,3)
C	928 230 28,7	22,1 20,5 19,4	27,1 22,8 19,8	26,5 24,4 21,3	18,9 18,8 18,6	19,2 19,9 20,7	26,1 24,1 23,1	18,9 18,7 18,4	19,8 19,1 18,4	22,0 22,3 22,6	21,3 20,4 19,8	22,4 20,4 19,5
T	- - -	26,5 25,3 24,8	27,9 27,4 -	- - -	25,0 24,7 24,5	27,0 26,6 26,4	- - -	25,3 24,7 24,3	27,0 26,6 26,4	- - -	24,4 24,3 24,2	25,0 24,9 24,8
pH	7,3 7,0 6,8	6,8 6,7 6,6	6,6 6,5 6,4	6,9 6,9 6,8	6,5 6,4 6,3	6,7 6,6 6,5	6,9 6,8 6,8	6,6 6,5 6,4	6,7 6,6 6,6	7,0 6,9 6,9	6,8 6,7 6,6	6,7 6,6 6,5
O ₂	- - -	6,4 6,2 6,1	5,8 5,9 6,2	- - -	6,7 6,5 6,4	6,6 6,2 6,0	- - -	6,8 6,7 6,5	6,5 6,3 6,0	- - -	7,0 6,8 6,6	6,9 6,6 6,3
DBO ₅	- - -	1,0 -	1,7 -	- -	1,0 -	1,5 -	- -	1,1 -	1,2 -	- -	1,2 -	1,2 -
DCO	- - -	6,2 5,1 4,5	3,7 3,0 2,6	- -	5,3 5,2 5,0	3,9 2,9 2,3	- -	5,1 4,9 4,6	3,1 2,9 2,7	- -	4,9 4,6 4,3	4,2 4,0 3,7
Cl ⁻	253 64,4 (6,8)	3,69 3,34 3,12	6,00 4,87 3,98	{ 6,2 5,6 (4,8)	3,62 3,28 2,98	5,61 4,50 3,83	{ 6,1 5,5 (5,3)	3,34 3,15 3,05	4,83 4,27 3,76	{ 5,1 5,0 (5,0)	3,20 3,03 2,84	4,90 4,69 4,54
CO ₃ H ⁻	21,4 17,7 14,3	5,49 5,18 4,70	6,95 6,50 6,22	16,5 15,0 14,3	4,88 4,23 3,90	5,73 5,53 5,00	15,9 14,0 13,4	5,12 4,83 4,58	6,83 5,79 5,31	16,2 14,9 13,7	6,28 5,81 5,43	5,92 5,40 5,06
SO ₄ ²⁻	{ 11,6 26,0 (1,1)	{ 2,1 1,5 (0,8)	{ 3,6 1,3 (0)	{ 1,6 1,2 (0,2)	{ 2,0 1,3 (0,6)	{ 1,7 0,4 (0)	{ 1,9 1,4 (1,0)	{ 2,1 1,0 (0,5)	{ 1,1 0,3 (0)	{ 1,0 0,5 (0,4)	{ 1,4 1,0 (0)	{ 0,5 0,2 (0)
Na ⁺	144 33,9 3,74	2,36 2,19 2,00	4,23 3,16 2,45	2,99 2,68 2,43	2,32 2,12 2,00	3,09 2,91 2,73	2,80 2,50 2,24	2,09 2,07 1,86	3,41 2,85 2,30	-	2,14 2,10 1,95	3,23 2,68 2,34
Mg ²⁺	18,1 4,88 1,14	0,67 0,61 0,56	0,79 0,67 0,55	0,96 0,79 0,68	0,46 0,44 0,42	0,54 0,51 0,47	0,64 0,61 0,56	0,47 0,45 0,43	0,50 0,49 0,47	0,68 0,65 0,63	0,54 0,51 0,49	0,52 0,50 0,45
Ca ²⁺	6,50 1,88 0,73	1,10 0,81 0,70	0,97 0,63 0,42	0,95 0,74 0,55	0,87 0,78 0,70	0,58 0,54 0,47	1,08 0,77 0,55	0,90 0,80 0,73	0,67 0,60 0,53	0,85 0,77 0,65	0,37 0,87 0,80	0,70 0,59 0,52
K ⁺	1,14 4,88 18,1	0,98 0,90 0,85	1,39 1,16 0,89	1,17 0,99 0,86	0,91 0,78 0,66	0,83 0,76 0,73	1,07 0,99 0,83	0,96 0,78 0,70	0,77 0,76 0,73	1,15 1,07 1,02	0,96 0,87 0,78	0,77 0,74 0,71
Fe ³⁺	- - -	0,19 0,15 0,10	1,78 0,83 -	- -	0,21 0,17 0,12	0,23 0,34 0,50	- -	0,25 0,19 0,13	0,27 0,23 0,20	- -	0,24 0,18 0,15	0,30 0,29 0,27
SiO ₂	- -	12,0 10,0 7,4	16,0 12,7 8,1	- -	12,0 9,7 7,6	17,0 10,2 7,4	- -	13,1 9,3 7,8	14,4 12,0 8,0	- -	13,1 9,7 7,4	18,4 11,5 4,8



Le pH optimal dans l'industrie de la pâte de bois étant 7, les eaux des deux estuaires apparaissent donc légèrement trop acides.

7.5. Oxygène dissous O₂

En mars, les teneurs moyennes en oxygène dissous sont comprises entre 5,5 et 6,1 mg/l dans le Mahury (tableaux XII et XIII). Dans l'Approuague, elles varient entre 5,9 et 6,6 mg/l en mars et entre 6,2 et 6,8 mg/l en décembre. Le déficit d'oxygène est d'environ 1,5 à 2,5 mg/l, comme on peut en juger d'après les solubilités mentionnées dans le tableau ci-dessous pour différentes températures et salinités.

Température (°C)	solubilité (mg/l)	
	salinité 0‰	salinité 10‰
20	8,85	8,37
22	8,53	8,19
24	8,25	8,80
26	8,00	7,55
28	7,75	7,35
30	7,55	7,15

La variation diurne maximale que l'on a pu mesurer est de 0,6 mg/l. Les variations de température et de salinité ne peuvent à elles seules engendrer une variation aussi forte. Il semblerait qu'elle soit surtout provoquée par celle de l'insolation.

7.6. Demande biochimique et chimique en oxygène DBO₅ et DCO

La demande biochimique en oxygène DBO représente la quantité d'oxygène éventuellement consommée par les germes aérobies, pour décomposer les matières organiques.

La DBO₅ mesurée à 25°C demeure inférieure à 1,9 mg/l (tableaux XVII et XVIII) et il en est donc de même pour la DBO₅ à 20°C. Elle peut être pratiquement nulle pour certaines eaux prélevées dans la partie amont des estuaires. D'une façon générale, il semblerait que la DBO augmente vers l'aval.

La demande chimique en oxygène DCO est comprise entre 1,9 et 6,2 mg/l (tableaux XVII et XVIII). Elle tend parfois à augmenter également vers l'aval mais demeure satisfaisante car la valeur limite est de 10 mg/l pour l'utilisation en usine de pâte de bois (J.P. BOURIT -1974-).

L'oxygène est consommé pour la destruction de la matière organique "naturelle" contenue dans ces eaux estuariennes, puisqu'aucune source de pollution n'existe encore sur les bassins versants peuplés seulement de quelques dizaines de personnes.

7.7. Teneurs ioniques globales S

7.7.1. Définition. Relation entre la salure globale et la conductivité

Pour les Océanographes, la salinité correspond à la teneur globale en éléments dissous dans l'eau de mer. La silice représente alors moins de 0,2% de cette salinité. Lorsqu'on étudie la chimie des eaux continentales, il s'avère nécessaire de considérer séparément les ions et la silice. Celle-ci peut en effet représenter jusqu'à environ 40% du poids des éléments dissous. En outre, ses variations diffèrent généralement de celles des ions en solution et les corrélations avec la conductivité sont lâches et variables en fonction de divers facteurs. En conséquence, nous ne parlons plus de salinité mais de salure ionique globale pour exprimer la somme des teneurs en Cl^- , CO_3H^- , SO_4^{2-} , Na^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} .

Ces ions majeurs en solution assurent aux eaux l'essentiel de leur conductivité électrique, dont la mesure facile permet par corrélation de connaître les teneurs ioniques globales. Cette corrélation (fig. 23) est établie pour les deux estuaires à partir des résultats d'analyses de janvier et de mars, pour les salures inférieures à 100 mg/l, et de l'ensemble des campagnes pour les fortes salures. Il a fallu souvent estimer les teneurs en sulfates, trop basses pour être dosées, en admettant qu'elles correspondent à la différence constatée entre la somme des cations majeurs et la somme des chlorures et des bicarbonates comptés en milli-équivalents.

L'équation donnant la teneur ionique globale S (mg/l ou $10^{-3}\%$) en fonction de la conductivité C ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$ à 25°C) s'écrit :

$$S = 0,605 C + 2,9$$

Les salures mentionnées dans les tableaux XVII et XVIII sont ainsi reconstituées pour les campagnes d'octobre,

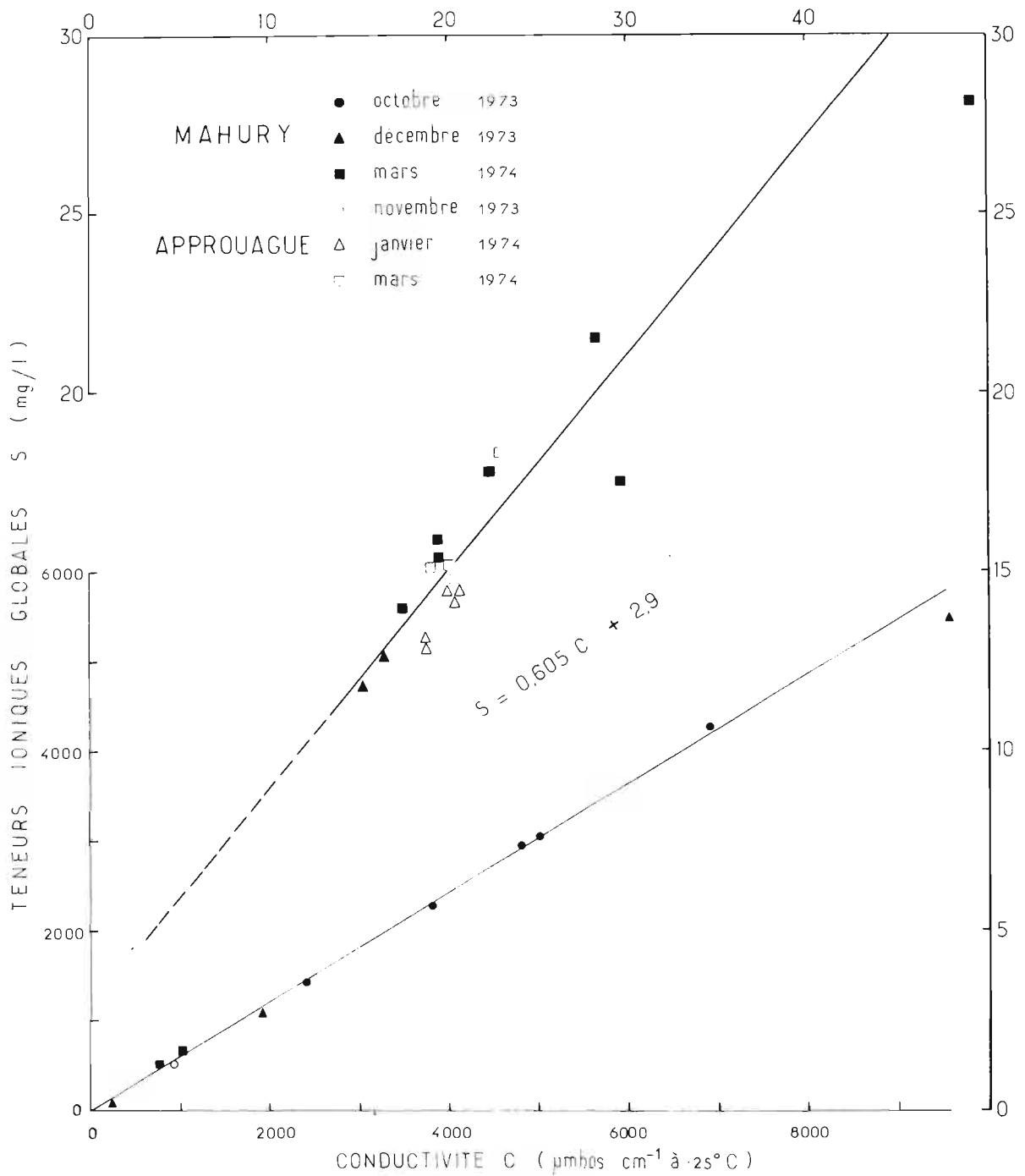


Fig.23 : Relation entre la teneur ionique globale S (somme de Cl^- , CO_3H^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et la conductivité C des eaux du Mahury et de l'Approuague.

novembre et décembre car on n'a pu alors doser aucun des anions qui représentent cependant l'essentiel du poids ionique. Ces valeurs ne prétendent fournir qu'un ordre de grandeur. Par ailleurs, les moyennes des quinze conductivités mesurées dans chaque section, six fois au cours d'une période de marée (cf. § 2.2.1.), sont traduites en salures globales. Les valeurs extrêmes et moyennes sont regroupées dans le tableau XIX. On peut ainsi suivre la variation semi-diurne des salures en regard de celle des débits oscillants et des charges en suspension (fig. 14 et 15).

7.7.2. Stratification des salures

Les eaux de mer, plus salées donc plus denses que les eaux fluviales, pénètrent dans l'estuaire en s'écoulant préférentiellement près du fond. Nous avons pu confirmer à Marie-Anne ce phénomène général par la mesure des vitesses résultantes à différentes profondeurs (cf. § 6.2.1.). Les eaux marines se mélangent essentiellement par diffusion turbulente avec les eaux fluviales qui s'écoulent au-dessus et dans le sens opposé. Ces premières regagnent alors la mer après avoir été diluées.

La répartition longitudinale des salures prend ainsi l'aspect d'un "coin salé" tandis qu'une stratification des salures s'établit verticalement. Une telle stratification permet de mettre en évidence l'influence marine jusqu'à des salures extrêmement faibles (fig. 21) et peut contribuer à préciser la limite extrême de remontée du front salé.

Dans le Mahury, la stratification saline est observée à chaque marée à Marie-Anne, mais n'existe plus à Roura et à fortiori aux stations plus amont.

Dans l'Approuague, les salures augmentent vers le bas à Guisanbourg (fig. 21). Le phénomène n'est cependant pas net en novembre, malgré des teneurs en solution qui dénotent une influence marine. En revanche, il existe à Cimetière à la même époque. On doit voir là, l'influence de la profondeur, plus faible à Guisanbourg qu'à Cimetière, et de la houle sur le mélange des eaux. En mars et janvier, aucune stratification ne se crée à Cimetière et aux stations plus amont.

7.7.3. Variations semi-diurnes des salures

Les eaux salées remontent un estuaire au cours du flot et atteignent leur extension maximale vers l'amont à l'étale de courant qui succède à la pleine mer.

D'après les salures moyennes arithmétiques mesurées au cours d'une période de marée dans l'ensemble des sections, ceci est vérifié dans le Mahury et l'Approuague (fig. 14 et 15)

Tableau XIX : Teneurs ioniques globales (ng/l) maximales moyennes et minimales au cours d'une période de marée dans les estuaires du Mahury, et de l'Approuague (d'après 90 mesures à chaque station - cf. § 2.2.1.)

	Date	Débit anont (m ³ /s)	Coeff. marée	max moy min	Teneurs ioniques globales (10 ⁻³ ‰)				
					I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46	max	11500	22,7	15,4	17,1	16,6
				moy	8630	19,4	15,0	16,8	15,9
				min	5440	16,5	14,6	16,7	15,1
	décembre 73	228	85-99	max	20700	39,2	15,9	12,6	13,1
				moy	7830	21,9	13,8	12,3	13,0
				min	96,1	13,2	12,9	11,9	12,9
	mars 74	271	75-111	max	658	20,8	16,9	15,1	14,2
				moy	208	16,9	14,9	14,8	13,8
				min	19,8	14,2	14,2	14,5	13,3
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80	max	592	18,7	16,1	16,5	-
				moy	166	17,2	15,8	16,4	-
				min	25,6	16,5	15,0	16,3	-
	janvier 74	276	41-60	max	17,2	14,3	14,2	15,1	-
				moy	16,2	14,2	13,9	15,0	-
				min	14,9	14,1	13,7	14,7	-
	mars 74	465	85-96	max	16,6	14,8	14,6	14,7	-
				moy	15,6	14,5	14,3	14,5	-
				min	14,4	14,3	14,1	14,3	-

lorsque l'on se trouve sous l'influence des eaux de mer. Réciproquement, cette variation peut contribuer à délimiter l'extension du front salé.

Dans le Mahury, la variation semi-diurne se manifeste à Marie-Anne et à Roura à toutes les époques, ainsi qu'à Deux Branches en décembre et en mars.

Dans l'Approuague, cette variation confirme les conclusions de l'examen des stratifications et permet en outre de caractériser en mars l'influence marine à Cinetière.

La variation semi-diurne des valeurs dénote donc une extension de l'influence marine supérieure à celle que l'on peut caractériser par la stratification des salures.

7.7.4. Variations longitudinales des salures

Les considérations précédentes sur la stratification et la variation semi-diurne des salures permettent de fixer la limite extrême du front salé. A cette limite, les teneurs ioniques globales correspondent en fait à celles des apports fluviaux qui, de l'ordre de 12 à 15 mg/l, sont donc extrêmement faibles et ne posent aucun problème pour l'alimentation.

Ces eaux naturelles se situent parmi les moins minéralisées qui existent sur terre.

Le gradient de concentration ionique augmente très rapidement à partir d'une certaine distance à l'embouchure.

D'après la variation longitudinale des salures moyennes semi-diurnes (fig. 24), on voit que les salures du Mahury demeurent toujours inférieures à 40 mg/l à partir de Roura alors qu'elles peuvent atteindre 8600 mg/l à Marie-Anne. Dans l'Approuague, les valeurs demeurent inférieures à 17 mg/l dès Guisanbourg. Toutefois, en novembre, en période d'étiage et par marée moyenne (coefficient de 78) la salure globale moyenne atteint 170 mg/l mais s'avère encore acceptable tant pour l'alimentation de l'usine que pour celle du village. De plus, il est toujours possible de ne pas pomper les eaux à marée haute afin de diminuer notablement cette valeur. A Guisanbourg, toutefois, il convient de souligner que les eaux sont fréquemment plus salées en rive droite, c'est-à-dire du côté du village, que dans le reste de la section. Par exemple, la concentration moyenne à 300 m de cette rive est de 300 mg/l en novembre, 24,5 en janvier et 21,7 mars. Ceci peut donc avoir une importance pour l'alimentation pendant les périodes où la salure est relativement élevée.

En se basant uniquement sur la limite de 200 mg/l admise pour la minéralisation globale, on pourrait implanter l'usine en bordure du Mahury dès Roura et même légèrement en aval de cette station. Sur l'Approuague elle pourrait être

installée dès Guisanbourg avec toutefois l'obligation, à cette station, de pomper les eaux seulement quelques heures par jour lors des marées de vives-eaux coïncidant avec les périodes d'étiage. Afin d'éviter tout risque, il serait donc préférable de se placer finalement quelques kilomètres en amont de Guisanbourg.

Voyons maintenant si les teneurs des différents autres éléments dissous viennent modifier cette conclusion partielle basée sur les teneurs globales.

7.8. Teneurs ioniques spécifiques

7.8.1. Teneurs en chlore Cl^-

Les concentrations en chlore (tableaux XVII et XVIII) varient entre 3 et 5 mg/l en amont du coin salé. Ces faibles teneurs n'ont pu être dosées qu'à partir de janvier. Les résultats acquis (mg/l) permettent de tracer la corrélation avec la conductivité ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$ à 25°C)

$$Cl = 0,280 C - 1,9$$

et de reconstituer les valeurs non mesurées lors des premières campagnes (fig. 25).

Pour des conductivités comprises entre 100 et 2000 $\mu\text{mhos cm}^{-1}$, la relation devient

$$Cl = 0,310 C - 5$$

puis, au-dessus de 2000 $\mu\text{mhos cm}^{-1}$

$$Cl = 0,333 C - 50$$

D'après cette dernière relation et celle qui a été établie entre la salure globale S et la conductivité C (§ 7.7.1.), on calcule l'équation

$$S = 1,817 Cl + 94$$

Elle apparaît très peu différente de celle qui est définie pour "l'eau de mer normale":

$$S = 1,805 Cl + 30$$

et confirme une simple dilution du chlore marin dans les eaux continentales.

Les concentrations moyennes semi-diurnes les plus fortes sont de 64 mg/l à Guisanbourg et de 8 mg/l à Roura. A Marie-Anne, elles peuvent atteindre 1600 mg/l.

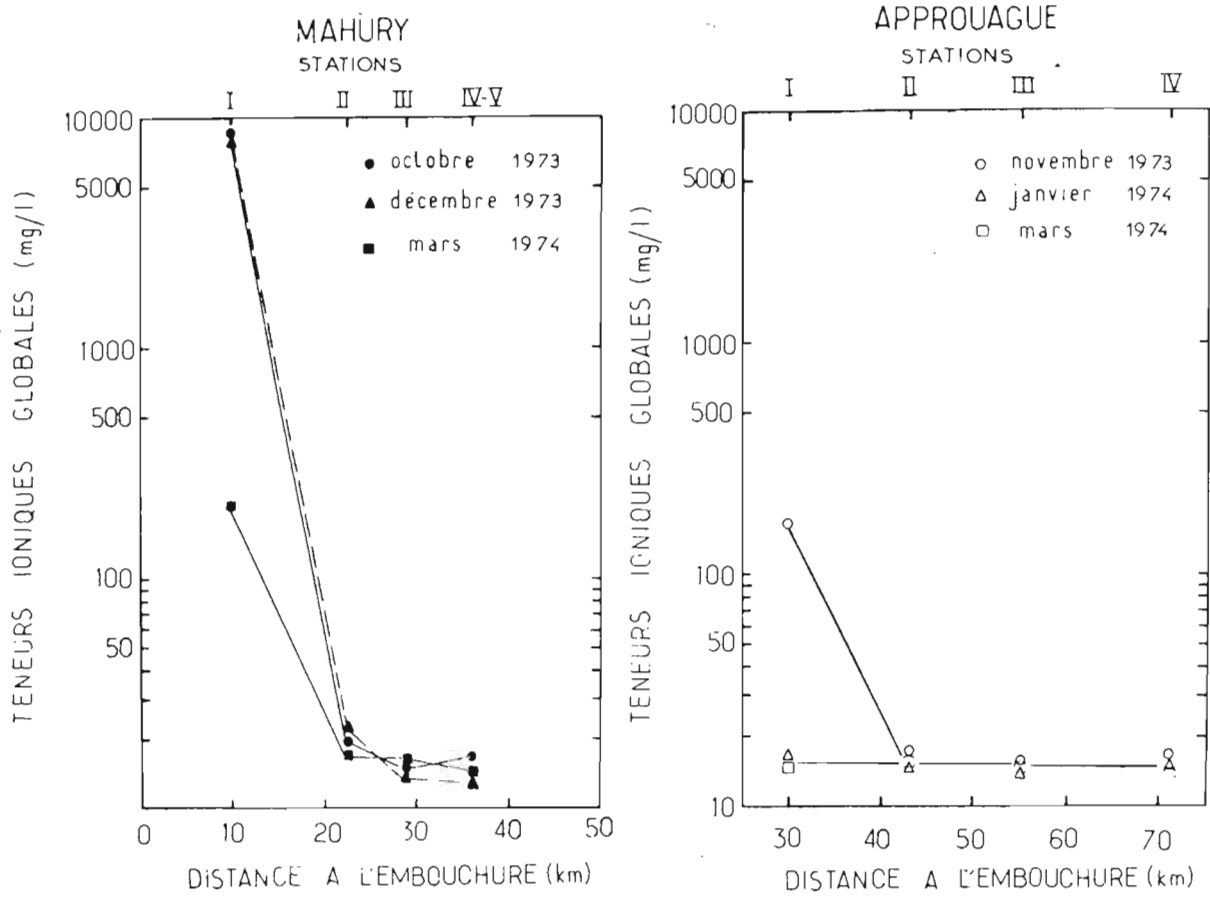


Fig 24 Variation longitudinale des teneurs ionique globale (Cl^- , CO_3H^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) des eaux des estuaires du Mahury et de l'Approuague.

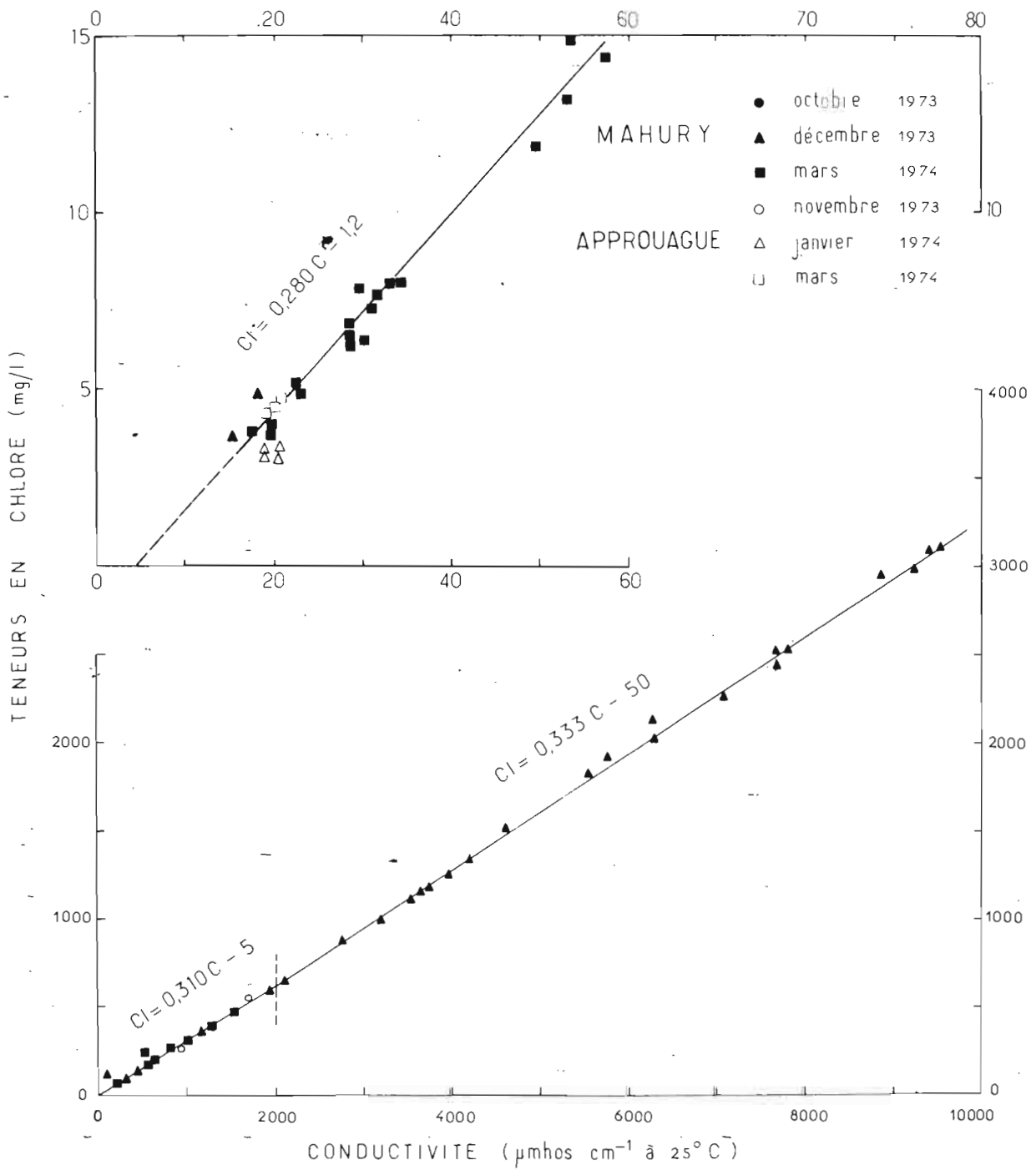


Fig.25: Relation entre la teneur en chlore Cl^- et la conductivité C des eaux du Mahury et de l'Approuague.

La limite pour l'alimentation d'une usine étant de 75 mg/l, les chlorures n'entraînent finalement pas de restrictions sur les conclusions tirées de l'examen des salures globales.

7.8.2. Teneurs en bicarbonates CO_3H^- et alcalinité au méthyl orange.

Les teneurs en bicarbonates, mesurées par potentiométrie (cf. § 2.2.2.) en janvier et mars, varient entre 3 et 7 mg/l lorsque la salure globale ne dépasse pas au moins 210 mg/l. Elles correspondent à des alcalinités de 2,5 à 5,7 mg/l de CO_3Ca .

Dans cette gamme de faibles concentrations, on trouve des valeurs trois à quatre fois plus élevées si le dosage est effectué avec le méthyl orange, comme c'est le cas en octobre, novembre et décembre. En fait le virage de l'indicateur coloré se réalise à un pH plus bas que celui auquel les bicarbonates sont neutralisés. Bien que les deux valeurs tendent l'une vers l'autre lorsqu'elles augmentent, l'examen des balances ioniques montre que l'on doit retenir celle qui est fournie par la méthode potentiométrique.

Les concentrations en CO_3H^- les plus fortes, dosées avec le méthyl orange, sont 36 mg/l (alcalinité en CO_3Ca : 30 mg/l) dans le Mahury à Marie-Anne et 18 mg/l à Guisanbourg (alcalinité en CO_3Ca : 15 mg/l).

Dans les deux estuaires, l'alcalinité au méthyl orange ne constitue donc pas un facteur limitatif à l'alimentation de l'usine puisque la valeur limite admissible est de 75 mg/l de CO_3Ca .

La corrélation entre les bicarbonates dosés par potentiométrie et la conductivité est peu étroite (fig. 26) mais nous permet, lorsqu'on ne dispose que de dosages au méthyl orange, d'évaluer quelques valeurs nécessaires à l'examen des balances ioniques.

7.8.3. Les sulfates SO_4^{2-}

Les sulfates ne sont pas gênants pour la fabrication de la pâte de bois. Ils sont étudiés ici en tant qu'ions majeurs dans les eaux naturelles. Pourtant, les sulfates n'ont pu être mis en évidence dans les eaux guyanaises de faibles salures. On a expliqué au paragraphe 7.7.1. que les teneurs présentées dans les tableaux XVII et XVIII sont estimées en admettant qu'elles correspondent au déficit des anions dosables ($\text{Cl}^- + \text{CO}_3\text{H}^-$) vis-à-vis des cations. Ces résultats, compris entre zéro et 3 mg/l, doivent être considérés avec

prudence car il est possible que les sulfates, probablement en faibles teneurs dans les précipitations, soient rapidement réduits au cours de l'écoulement. La présence de Clostridium sulfito-réducteurs, bactéries anaérobies à spores très résistants (§ 7.11.), vient étayer cette hypothèse.

Quoi qu'il en soit, l'erreur absolue sur les faibles salures globales reste modérée, que l'on rétablisse l'équilibre de la balance ionique avec des sulfates ou avec tout autre anion, de masse voisine.

Les concentrations maximales, que nous avons dosées, sont de 300 mg/l dans le Mahury à Marie-Anne et de 26 mg/l à Guisanbourg.

7.8.4. Les cations Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Fe^{3+} , Mn^{2+}

Dans la gamme des salures globales inférieures à 40 mg/l, les teneurs moyennes semi-diurnes des différents cations (tableaux XVII et XVIII) et les duretés correspondantes demeurent comprises dans les intervalles suivants :

Cations	Teneurs (mg/l)	dureté en CO_3Ca (mg/l)
Na^+	2,1 - 4,2	
Mg^{2+}	0,41 - 0,81	1,7 - 3,3
Ca^{2+}	0,54 - 1,2	1,3 - 3,0
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	0,94 - 2,0	2,2 - 6,3
K^+	0,31 - 1,2	
Fe^{3+}	0,14 - 0,83	
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$	1,1 - 2,3	2,5 - 6,7
Mn^{2+}	< 0,1	

Les duretés calcique, magnésienne et totale sont nettement inférieures aux valeurs limites, fixées à 50 mg/l pour les deux premières et à 100 mg/l pour le troisième. Ceci est encore valable en mars dans le Mahury à Marie-Anne (dureté totale : 33 mg/l) mais ce n'est plus le cas en octobre et décembre (335 et 1008 mg/l). A Guisanbourg, dans l'Approuague, avec un total maximum de 33 mg/l, les duretés sont toujours satisfaisantes.

Ceci est en accord avec les conclusions du paragraphe 7.7.4. sur les possibilités d'alimentation de l'usine.

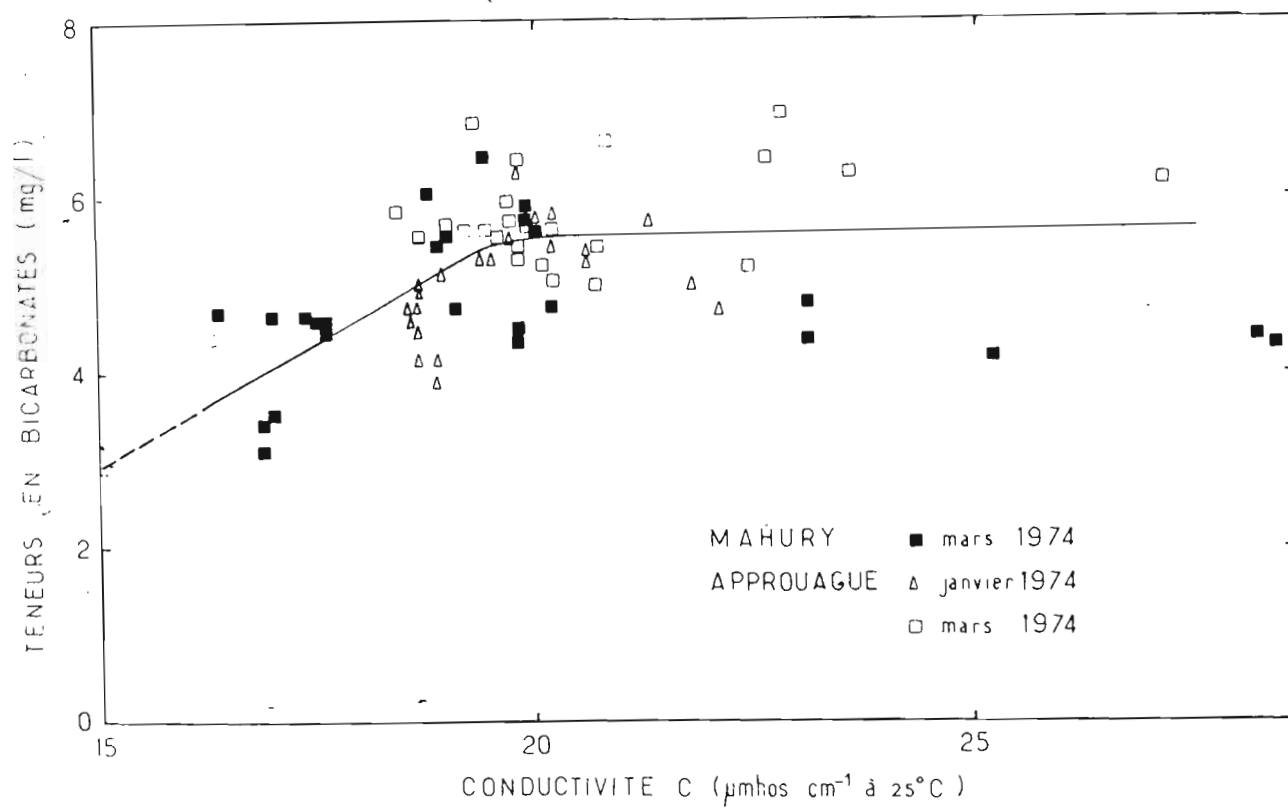


Fig.26 Relation entre la conductivité C et la teneur en bicarbonates CO_3H^- des eaux du Mahury et de l'Approuague.

Les concentrations en fer, assez fluctuantes, sont au moins de 0,14 mg/l, supérieures donc à la limite de 0,10 mg/l, ce qui obligera à une déferrisation des eaux.

Le manganèse dosé à partir de décembre a des concentrations toujours inférieures à 0,1 mg/l.

7.9. Teneurs en silice dissoute SiO₂

Dans le Mahury les teneurs moyennes en silice sont comprises entre 3,5 et 14 mg/l, avec une diminution plus ou moins bien marquée en direction de la mer. Notons que l'on a mesuré toutefois une concentration moyenne de 21 mg/l dans l'Orapu à Fourgassié, en décembre (tableaux XVII et XVIII).

Dans l'Approuague l'intervalle des teneurs est 3,5 à 14 mg/l en décembre et en mars.

Ces concentrations en silice, généralement bien inférieures à 20 mg/l, peuvent donc être jugées satisfaisantes pour la fabrication de la pâte de bois, tout au long des estuaires.

7.10. Teneurs en nitrites NO₂⁻, nitrates NO₃⁻ et ammoniacque NH₄⁻

Les concentrations en nitrites, en nitrates et en ammoniacque sont respectivement inférieures à 0,01 mg/l, 0,1 mg/l et 0,05 mg/l qui représentent les limites des méthodes de dosage utilisées.

7.11. Bactériologie

Les résultats d'analyses bactériologique des eaux du Mahury et de l'Approuague, mentionnées dans le tableau XX, indiquent un nombre total très élevé de bactéries, de levures et de champignons.

Des contaminations fécales anciennes, dénotées par la présence de bactéries coliformes, de streptocoques fécaux (germes résistants à l'autoépuration des eaux de surface) et de Clostridium sulfito-réducteurs (à spores très résistantes), ont lieu dans les estuaires ou dans les tributaires qui les alimentent. De plus, des contaminations récentes se manifestent fréquemment par la présence de Escherichia coli.

Certains germes peuvent avoir des origines naturelles (champignons, levures, bactéries sulfito-réductrices...). D'autres, tels les streptocopes et Escherichia coli, hôtes du tube digestif, sont les témoins de contaminations animales et

Tableau XX : Exanens bactériologiques des eaux estuariennes du Mahury et de l'Approuague. Ligne 1 : Nombre de colonies de bactéries après 24 heures à 37° sur gélose nutritive (10³/ml). Ligne 2 : Nombre de colonies de bactéries après 72 heures à 20-22° sur gélose nutritive (10³/ml). Ligne 3 : Bactéries coliformes (10³/100ml). Ligne 4 : Escherichia coli (10³/100ml). Ligne 5 : Streptocoques fécaux (10³/100ml). Ligne 6 : Clostridium sulfitoréducteur (10³/100ml). Le signe # signifie que les colonies n'ont pu être comptées

	Date	Débit amont (m ³ /s)	Coeff. marée	1 2 3 4 5 6	Nombre				
					I	II	III	IV	V
MAHURY	octobre 73	59	29-46	1	0,30	150	1 800	1,44	0,48
				2	1,20	320	#	10,0	0,60
				3	0	11,5	0,20	1,83	0,72
				4	0	0	0,03	0,84	0,30
				5	0,60	5,60	#	4,32	3,43
				6	0	0,030	0,08	0	0
	décembre 73	228	85-99	1	168	316	116	101	45
				2	220	353	132	108	47
				3	6,60	3,10	2,10	3,90	1,98
				4	3,56	0,45	1,17	2,06	1,08
				5	192	13,8	19,9	39	11,4
				6	0,154	0,19	0,41	0,42	2,57
	mars 74	271	75-111	1	66 000	79 000	5,00	10,0	400
				2	120 000	199 000	30,0	220	800
				3	5,00	2,00	2,00	1,00	2,00
				4	0	0	0	0	0
				5	400	420	0	100	0
				6	10	10	0,03	0,02	0,02
APPROUAGUE	novembre 73	165	76-80	1	34 300	13 100	7,90	39 100	-
				2	#	#	9,00	#	-
				3	8,20	28,0	4,90	2,30	-
				4	1,10	15,2	1,20	0	-
				5	1 000	137	151	4,10	-
				6	0,60	0,40	0,04	0	-
	janvier 74	276	41-60	1	8 000	195	12 000	140	-
				2	9 800	230	15 600	300	-
				3	5,00	6,00	14,0	5,00	-
				4	0,30	0	0	0	-
				5	27	570	300	20,0	-
				6	0,02	0,02	0	0,04	-
	mars 74	276	41-60	1	1 500	770	120 000	900	-
				2	5 000	1 900	204 000	46 000	-
				3	52,0	0,50	4,00	0,30	-
				4	0	0,10	0	0,10	-
				5	1 900	316	2 200	310	-
				6	0,04	0,10	0,10	0,04	-

humaines, sans être par eux-mêmes pathogènes. Cette contamination, ainsi mise en évidence, peut être par contre la source de bactéries, microbes et virus à l'origine de graves maladies, telles les dysenteries, l'hépatite virale, la thyphoïde, la polyomélite...

Les eaux estuariennes du Mahury et de l'Approuague doivent donc être filtrées et traitées chimiquement avant de servir à l'alimentation humaine. La floculation constitue déjà un premier traitement contre les germes les plus résistants (hépatite virale).

Sur un plan général, ces résultats traduisent la puissance de contamination de quelques dizaine de personnes. C'est en effet le nombre d'habitants peuplant, en bordure des cours d'eau, ces bassins versants de plusieurs milliers de kilomètres carrés.



8. POLLUTION PAR LES REJETS D'UNE USINE DE PATE DE BOIS

Les usines de pâte de bois se situent parmi les industries les plus polluantes.

D'après G. PETROFF (1973, communication personnelle), une usine de pâte de bois rejette environ, par tonne de pâte produite, 200 m³ d'eaux résiduaires et 100 kg de produits dérivant des composés du bois (lignine, pentosanes, cellulose ...). Les teneurs sont donc de 500 mg/l. Selon J. EVORA -1974- 50% du bois serait perdu avant d'aboutir à la pâte. Cependant, le rejet n'atteint pas cette proportion car les usines qui utilisent le procédé à la soude ou au sulfate de soude traitent ces déchets. La combinaison de la lignine avec les produits chimiques donne un extrait séparable de la phase liquide. Après concentration, on obtient un corps visqueux, une sorte de gomme, qui sert de combustible. Il fournit ainsi de la chaleur et des cendres. Celles-ci contiennent du carbonate de sodium que l'on récupère et à partir duquel on fabrique de la soude par réaction avec de la chaux. Sur le plan budgétaire, il n'y a qu'à payer les pertes du recyclage.

La quantité de matières organiques et de matières minérales alcalines dépend donc beaucoup des circuits de régénération et de leur bonne marche.

Les produits alcalins CO₃Na₂, NaOH, SNa₂ utilisés pour la cuisson du bois et l'extraction de la pâte après lavage (W.W. ECKENFELDER -1972-) se retrouveraient dans les eaux résiduaires à des concentrations d'environ 250 à 500 mg/l. Les teneurs en produits chlorés ClNa, Cl⁻, ClO₂⁻, ClO₃⁻ ..., nécessaires pour blanchir la pâte, sont du même ordre de grandeur (G. PETROFF -1973-).

Selon ces chiffres, pour une production journalière de 700 tonnes par jour, 70 à 150 tonnes de produits chimiques pourraient donc être déversées dans l'estuaire sur les bords duquel l'usine serait implantée. En période d'étiage décennal on a vu que le débit à Roura était au moins de 21 m³/s. Pour une concentration ionique "naturelle" de 14 mg/l cette valeur conduit à une quantité transportée de 25 tonnes de sels par jour. Dans l'hypothèse où les eaux usées seraient rejetées sans pertes ni traitement, on peut donc évaluer sommairement que les concentrations dans l'estuaire atteindraient ainsi des valeurs 3 à 7 fois supérieures aux valeurs originelles.

Outre les produits chimiques bien définis, les effluents contiennent aussi des résines et de l'alun.

Parallèlement à la pollution chimique, un danger grave, probablement le plus grave, provient des fibres de bois en suspension. La matière organique colore les eaux, et en outre conduit lors de sa décomposition à une forte consommation

d'oxygène dissous. De plus, la cellulose contient du sucre, lequel constitue un aliment apprécié par le zooplancton. Trop bien nourri, celui-ci se multiplie rapidement et augmente la consommation d'oxygène dans l'estuaire avec les conséquences désastreuses que cela entraîne pour la faune et la flore.

On comprend une raisons pour lesquelles les eaux usées des usines de pâte de bois ou de papier ne sont généralement rejetées qu'après divers recyclages et un séjour dans des réservoirs où l'activité biologique contrôlée réduit la cellulose.

Nota : Un article paru tout dernièrement (J.P. SERGENT -mai 1974-) fait état d'une très forte valeur de DBO, consécutive à la destruction de la matière organique rejetée par les usines de pâte de bois. Il ressort que le blanchissement de la pâte est une opération qui accroît énormément la pollution et en particulier la concentration en matière en suspension à laquelle est liée la DBO.

9. CONCLUSION GENERALE SUR LES POSSIBILITES D'ALIMENTATION D'UNE USINE DE PATE DE BOIS

Les quantités et les qualités des eaux estuariennes du Mahury et de l'Approuague apparaissent largement satisfaisantes pour l'alimentation d'une usine de pâte de bois.

Les débits moyens mensuels minimums, observés en octobre et novembre, sont estimés à environ 24 m³/s dans l'Orapu à Fourgassié, 80 m³/s dans le Mahury à Roura et 147 m³/s dans l'Approuague à Beaugé (§ 4.2.). Les débits moyens mensuels de fréquence décennale à ces trois stations (§ 4.3.2.) sont respectivement compris entre 7 et 20 m³/s, 21 et 64 m³/s, et de 88 m³/s. Pour l'étiage absolu journalier de même fréquence ces valeurs deviennent 7 et 11, 21 et 37, et 70 m³/s. Les valeurs les plus faibles sont ainsi 3, 10 et 35 fois supérieures aux besoins en eau (2 m³/s environ) d'une grande usine de pâte de bois (§ 4.4.). On peut donc conclure que les débits fluviaux ne poseront aucun problème pour l'alimentation en eau de l'usine, même en période d'étiage de fréquence décennale.

En Guyane française, coulent les eaux parmi les moins minéralisées du globe. Des salures ioniques globales de 12 à 15 mg/l sont conservées intactes dans la plus grande partie des deux estuaires.

Les principaux facteurs physico-chimiques qui conditionnent la limite aval du site d'implantation de l'usine (§ 7.) sont résumés sur les figures 27 et 28 pour les stations de Marie-Anne, Roura, Guisanbourg et Cimetière, en regard des valeurs maximales admissibles dans la fabrication de la pâte (§ 7.1.).

- Sur les bords du Mahury, l'usine pourrait s'implanter dès Roura et même quelques kilomètres en aval de ce village, soit au plus près à une vingtaine de kilomètres de l'embouchure. Ce serait également en aval de cette limite que les effluents de l'usine risqueraient le moins de polluer la prise d'eau de Saint-Régis, qui alimente Cayenne (§ 6.4.3.) et où les pollutions séjourneraient le moins dans l'estuaire (§ 6.4.2.).

- Sur l'Approuague, afin d'éviter de disposer d'eaux légèrement trop minéralisées par marées de vives-eaux coïncidant avec les étiages, on ne devra pas prévoir une installation en aval de Guisanbourg. Il sera même conseillé de dépasser ce village de quelques kilomètres vers l'amont et de se situer ainsi au moins à 35 kilomètres de la mer.

En amont de ces limites, on disposera d'eau contenant toujours moins de 40 mg/l d'ions. Mais il est de toutes façons probable que les ressources en bois, les possibilités d'ex-

exploitation et surtout des facteurs socio-économiques imposent une localisation de l'usine très en aval des limites "physico-chimiques" que nous avons définies. Les eaux d'alimentation pourraient alors être captées au moins à ces limites et amenées par conduites à l'usine. De même les rejets pourraient être acheminés vers la mer selon le même principe technique.

Quels que soient les sites retenus, les principaux traitements à prévoir seront au minimum une floculation des matières en suspension (12 à 1700 mg/l) et une déferrisation des eaux ($\text{Fe}^{3+} > 0,14 \text{ mg/l}$).

La qualité physico-chimique des eaux requise pour l'alimentation humaine n'est guère supérieure à celle que nécessite la fabrication de la pâte. C'est pourquoi les eaux, captées après ou en cours des traitements proposés ci-dessus pour l'usine, ne devraient subir qu'une épuration bactériologique (§ 7.11.) pour pouvoir être consommées. Ceci sous réserve bien sûr que la fabrique et la ville attenante, elles-mêmes ne polluent pas outre mesure les eaux (§ 6.4.). Nous supposons même, avec par exemple beaucoup de dentistes guyanais, que ces eaux sont finalement trop douces pour être consommées avec profit par l'organisme.

Le problème de la pollution n'a été qu'effleuré (§ 6.4.3. et 8.) mais nous pensons qu'on pourra trouver ici certains éléments de base pour s'y attaquer. Une réglementation aurait été mise au point spécialement pour les usines de pâte (J. EVORA -1974-). Elle prévoit que 90% des pollutions seront supprimées dans les prochaines années. Cette industrie, parmi les plus polluantes (§ 8.), deviendrait ainsi un modèle de lutte contre ce fléau nouveau mais redoutable pour l'humanité. Le problème devra donc impérativement retenir l'attention des Autorités et des Industriels, quand on sait que la Guyane est une des dernières régions de la planète encore vierge de toute pollution.

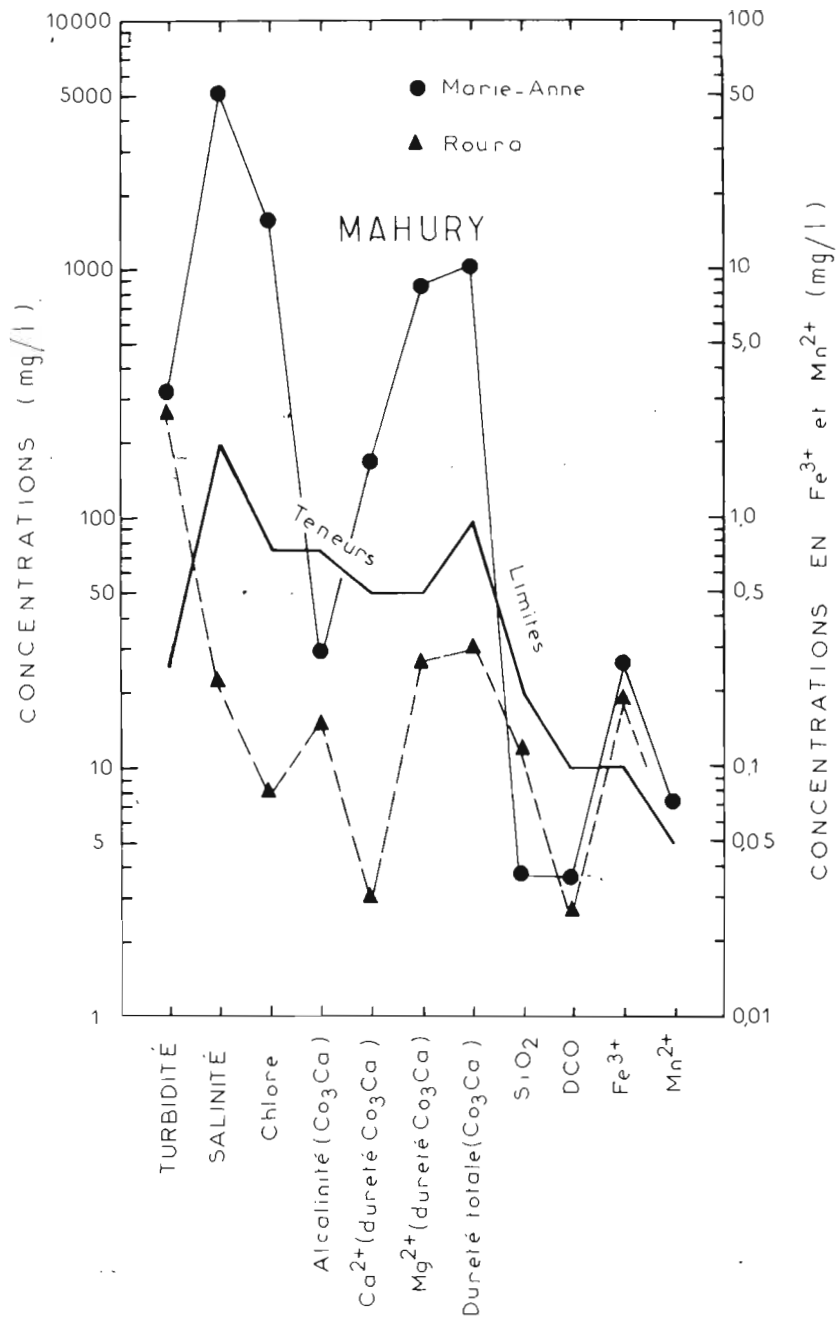


Fig. 27 : Teneurs moyenne semi-diurnes maximales observées au cours des trois campagnes sur l'estuaire du Mahury.

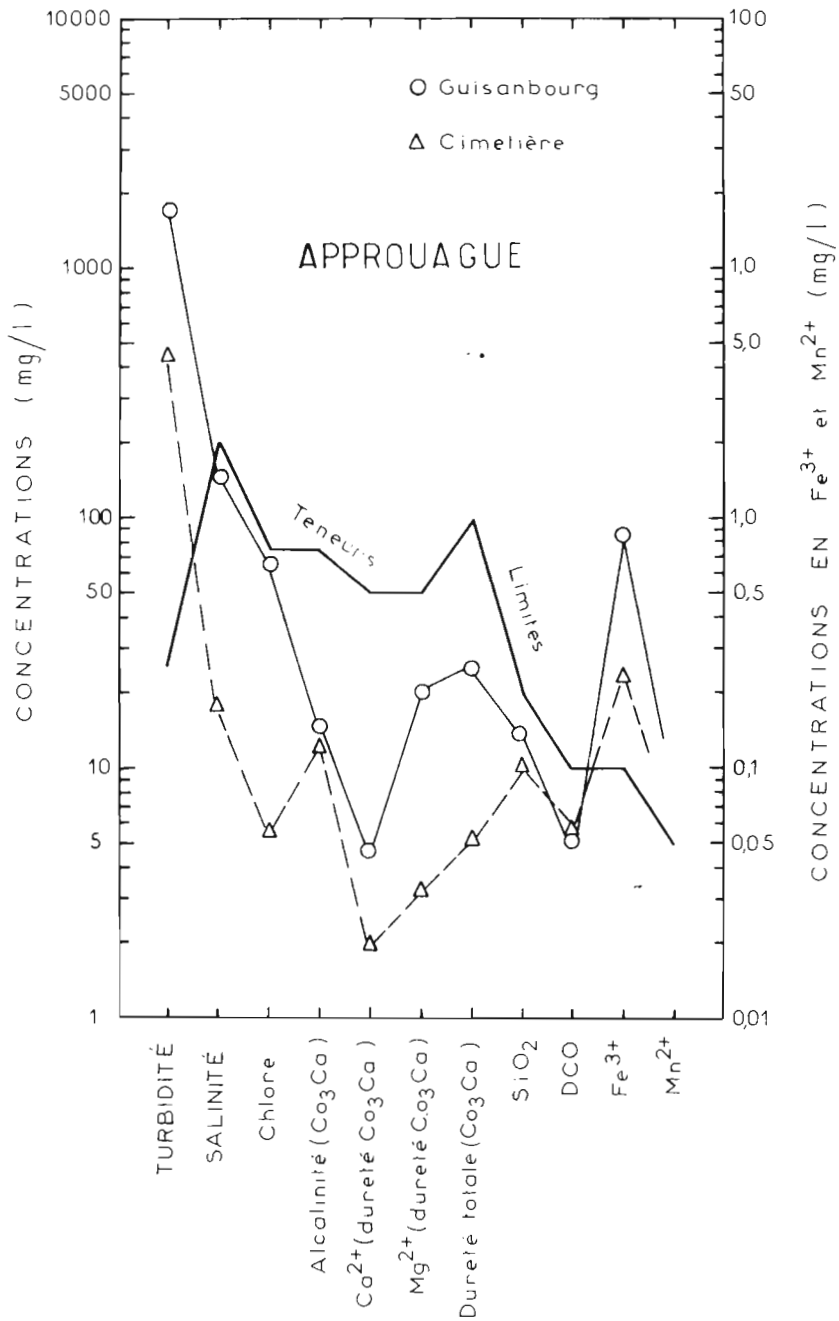


Fig. 28 : Teneurs moyenne semi-diurnes maximales observées au cours des trois campagnes sur l'estuaire de l'Approuague

B I B L I O G R A P H I E

- 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.
- RELLESORT (B.), MIGNIOT (Cl.) -1972- Etude comparative des mouvements sédimentaires dans quelques estuaires. La Houille Blanche, 8, pp. 695-702, 5 fig.
- BENNERT (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
- BOURIT (J.P.) -1974- Communication personnelle. 30 mai 1974.
- BRUGIERE (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.
- FONTES (J.Ch.), GONFIANTINI (R.), ROCHE (M.A.) -1970- Deutérium et oxygène 18 dans les eaux du lac Tchad. Coll. sur les isotopes en Hydrologie, A.I.E.A., Vienne, pp. 387-404, 9 fig.

- FRANCIS-BOEUF (C.) -1947- Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire. Ann. Inst. Ocean., XXIII, 3, 344 p.
- GAUTHIER (M.J.) -1973- Milieu d'estuaire et pollution. Rev. intern. ocean. 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.
- HOEPPFNER (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.
- HOEPPFNER (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.
- HOEPPFNER (M.) -1974- Les bassins versants de la crique Grégoire. Serv. Hydrol. O.R.S.T.O.M., rapport provisoire,, 2 t., 154 p.
- 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.
- LARRAS (J.) -1964- Embouchures, estuaires, lagunes et deltas. Eyrolles ed., 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.) -1974- Estuaire de l'Orénoque. En préparation. Coll. Géol. Caraïbes, juillet 1974.
- MAUVAIS (J.L.) -1971- Calcul des vitesses moyennes instantanées en Loire Maritime. Cah. Ocean., XXIII, 3, pp. 251-266, 13 fig.

- MEADE (R.H.) -1968- Relations between suspended matter and salinity in estuaries of the atlantic seaboard, U.S.A.. U.S. Geol. Surv., Woods Hole, Massachusetts, pp. 96-109, 10 fig.
- MIGNIOT (G.) -1969- Etude des principales caractéristiques de l'estuaire de la Gironde et des paramètres susceptibles d'intervenir dans un estuaire schématique. L.C.H.F., 12 p.
- 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 Pédro. Fleuves San Pédro, 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.
- PETROFF (G.) -1973- Communication personnelle. 27 août 1973.
- PRITCHARD (D.W.) -1958- The equations of mass continuity and salt continuity in estuaries. J. Mar. Res., 17, pp. 412-423.
- 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.) -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.
- RATTRAY (M.), HANSEN (D.V.) -1962- A similarity solution for circulation in an estuary. J. Mar. Res., pp. 121-133, 9 fig.
- 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.

- 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'aval d'un fleuve à marée. in "Mélange offert à Maurice Parquet", pp. 657-660, 1 fig.
- TODD (D.K.), LEUNG-KU (L.) -1956- On estimating streamflow into a tidal estuary. Trans. Amer. Geophys. Un., 37, 4, pp. 468-473.
- VARLET (F.), MENACHE (M.) -1947- L'estuaire du Moros à Concarneau (Finistère). Etude du mélange des eaux douces et salées. Bul. Inst. Ocean., 917, pp. 1-26, 21 fig.
- VAILLANT (J.R.) -1973- Protection de la qualité des eaux et maîtrise de la pollution. Contrôle de déversement d'eaux polluées. Eyrolles Ed., Paris, 403 p. 62 fig.
- SERGEANT (J.P.) -1974- Les dessous de la crise du papier. La vie des bêtes, n° 190, mai, pp. 42-44, 1 photo.