



CENTRE DE CAYENNE

EDF CNEH

Electricité de France
Centre National d'Équipement
Hydraulique

**EVOLUTION DE LA QUALITE DES EAUX ET
DYNAMIQUE DE L'INTRUSION SALINE
DANS L'ESTUAIRE DU SINNAMARY**

Marc LOINTIER

Convention entre Electricité de France et l'ORSTOM
dans le cadre de l'aménagement de l'ouvrage de Petit-Saut

Mai 90

FICHE DESCRIPTIVE

A joindre à tout envoi de document

à : Fonds Documentaire ORSTOM
Cellule de Collecte
70-74 route d'Aulnay
93140 BONDY

Auteur (s) : LOINTIER Marc

Titre original : EVOLUTION DE LA QUALITE DES EAUX ET DYNAMIQUE DE L'INTRUSION
SALINE DANS L'ESTUAIRE DU SINNAMARY

Titre en Anglais :

Titre en Français
(si le document est en langue
étrangère) :

Mots-clés matières : GUYANE ; SINNAMARY ; HYDROLOGIE ; ESTUAIRE ;
(10 au plus) TELEDETECTION ; PHYSICO-CHIMIE ; HYDROELECTRICITE.

Résumé en Français : Dans le cadre de l'aménagement de l'ouvrage hydroélectrique sur le fleuve Sinnamary, au site de Petit-Saut, plusieurs études ont été menées depuis 1979, soit en phase de préparation du projet, soit pour procéder à l'élaboration du dossier d'étude d'impact sur l'environnement. L'objet de cette étude a été défini par les termes d'une convention signée le 14 décembre 1988, entre Electricité de France et l'ORSTOM, et vient en complément des études menées en aval du site, depuis la décision de mettre le projet en chantier. Ces travaux se rattachent à une activité de recherche plus globale du Centre de Cayenne, notamment dans les domaines de l'hydrologie, de la physico-chimie des eaux, de l'environnement côtier et des apports à ces disciplines de la télédétection satellitaire.

Pour les documents destinés à entrer dans la Base ASFA, résumé en Anglais :
(150 mots maximum)

AVANT PROPOS

Dans le cadre de l'aménagement de l'ouvrage hydroélectrique sur le fleuve Sinnamary, au site de Petit Saut, plusieurs études ont été menées depuis 1979, soit en phase de préparation du projet, soit pour procéder à l'élaboration du dossier d'étude d'impact sur l'environnement.

L'objet de cette étude a été défini par les termes d'une convention signée le 14 Décembre 88, entre Electricité de France et l'ORSTOM, et vient en complément des études menées en aval du site, depuis la décision de mettre le projet en chantier.

Ces travaux se rattachent à une activité de recherche plus globale du Centre de Cayenne, notamment dans les domaines de l'hydrologie, de la physico-chimie des eaux, de l'environnement côtier et des apports à ces disciplines de la télédétection satellitaire.

SOMMAIRE

	pages
INTRODUCTION	
I) SYNTHESE DES RESULTATS ANTERIEURS	2
A-La dynamique littorale et son incidence sur les estuaires	2
B-Résumé des phénomènes physiques observés en estuaire	2
C-Caractéristiques générales des eaux de fleuve	4
1.Caractéristiques physico-chimiques	4
2.Les matières en suspension (MES)	5
D-Rappel des données hydrologiques du Sinnamary	6
II) MODIFICATIONS DE L'ESTUAIRE DU SINNAMARY	7
Analyse par télédétection	
III) MESURES HYDROLOGIQUES	9
A-Méthodologie d'étude	9
1.Paramètres hydrologiques enregistrés	9
2.Dispositions concernant les dates de mesure	10
B-Résultats hydrométriques - campagne 88 -	10
1.Conditions océaniques et débit à Petit Saut	11
2.Dispositif de mesure	12
3.Les sections de mesures	13
4.Limnigrammes	14
5.Vitesses	14
6.Vitesses de fond instantanées	15
7.Vitesses et cycle de marée	15
8.Débits oscillants	15
9.Volumes oscillants	17
10.Dérives moyennes et résultantes	17

IV) PHYSICO-CHIMIE DES EAUX	18
1. Analyse statistique de mesures chimiques de l'étiage	88 18
2. Mesures de conductivité	19
2.1 Conductivité en fonction du temps	19
2.2 Conductivité en fonction de la distance	20
2.3 Relation entre la conductivité et NaCl	20
2.4 Relation entre Cl ⁻ et NaCl	20
3. Evolution de la salinité en fonction de la distance	21
4. Matières en suspension	23
5. Mesures de pH et de température	25
6. Mesures de la SILICE	26
7. Mesures d'OXYGENE dissous	27
8. Distribution des eaux de surface	28
V) MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DU BISEAU SALE	30
1. Résolution de l'équation	31
2. Résultats	34
3. Commentaires	35
CONCLUSIONS	36
BIBLIOGRAPHIE	40
ANNEXES	44
1. Liste des figures	45
2. Tableaux de données	50

INTRODUCTION

Depuis le début des années 80, le projet d'ouvrage hydro-électrique de PETIT - SAUT, sur le fleuve Sinnamary, a ouvert une large collaboration entre l'ORSTOM et Electricité De France, notamment dans le domaine des études hydrologiques du fleuve (FRITSCH J.M. 1982, 84, 85) et de son estuaire (LOINTIER M., 1984, 86, 88, 89).

Les études menées sur l'évolution du littoral de Guyane (PROST M.T., 1985, 86, 87, 88, 89) en particulier par télédétection satellitaire (LOINTIER M., & M.T. PROST, 1988 - LOINTIER M., 1989) décrivent les profondes modifications dont celui-ci peut être l'objet tout comme les conséquences qui en résultent sur son hydrodynamique et ses propriétés physico-chimiques (LOINTIER M. & ROCHE M.A. 1988). Celui du Sinnamary subit actuellement les conséquences d'un dévasement littoral profond, surtout depuis mars 87, date à laquelle la rive droite du fleuve est entrée en communication avec la mer, à 4 km de son embouchure. La remontée du coin salé est désormais plus accentuée vers l'amont et l'hydrodynamique de l'estuaire s'est vue modifiée, avec une prépondérance des phénomènes orientée vers l'amont.

Une nouvelle campagne de mesures hydrochimiques a donc été réalisée, en 87-88, à trois périodes différentes du cycle hydrologique, tout en mettant l'accent sur la campagne d'octobre 88, réalisée en étiage et en période de marées de vives eaux, favorable à une extension maximale du sel vers l'amont.

Par ailleurs, afin de caractériser au mieux les eaux naturelles, avant toute modification majeure à l'amont par l'ouvrage hydroélectrique, une série de mesures de la teneur en MES, pH et oxygène dissous a été menée pendant ces périodes.

I SYNTHÈSE DES RESULTATS ANTERIEURS

A-La dynamique littorale et son incidence sur les estuaires:

Une consultation historique, faite à partir des cartes anciennes et récentes, montre que les estuaires de Guyane se classent grossièrement en deux catégories: ceux dont l'embouchure est relativement stable dans le temps (Maroni, Kourou, Mahury et rivière de Cayenne) et les autres (Mana, Iracoubo, Sinnamary, Approuague, Oyapock), dont l'embouchure est profondément transformée par la présence des bancs de vase.

Quelles sont les situations observées actuellement ?

- Pour les embouchures peu modifiées, la sortie en mer s'effectue perpendiculairement à la ligne de rivage. On y rencontre une "barre" vaseuse. Le "passage" d'un banc n'a d'effet que sur le mode de mélange des eaux océaniques dans l'estuaire (ex. Kourou). Les deux slikkes, situées de part et d'autre de l'embouchure, appartiennent à un même ensemble. Ces slikkes ont une incidence sur les circulations estuariennes et vice versa (FROIDEFOND J.M. et al., 1985)

- Pour les autres estuaires, le passage d'un banc de vase se traduit par un allongement important du cours, qui emprunte son ancien chenal sous-marin, avec une très forte déflexion vers l'Ouest (LOINTIER M. 1986). C'est le cas actuel de l'Approuague, du Sinnamary, de l'Iracoubo et de la Mana. Dans le tronçon proche de l'embouchure, les fonds sont faibles (1 à 2 m), on observe une barre vaseuse et les sections sont larges.

Plus en amont, au-delà du cordon Holocène en général, les sections ont une morphologie habituellement connue en rivière, au profil en travers en forme de "U", avec un approfondissement de la rive concave, dans les méandres.

B-Résumé des phénomènes physiques observés en estuaire:

La définition générale d'un estuaire est, pour de nombreux auteurs, la zone du fleuve où s'exerce, soit la marée dynamique (FRANCIS BOEUF C., 1947), soit la marée saline (DYER K.R., 1972). Outre l'importance de ces définitions sur le plan de la gestion administrative, il nous paraît nécessaire de faire un rappel des

principaux phénomènes physico-chimiques observés dans les estuaires Guyanais, et qui conditionnent les transports en suspension ou la dilution des matières en solution.

- La marée dynamique (d'amplitude marine entre 1,5 et 3 mètres) se traduit par une oscillation du plan d'eau de la rivière, de période voisine de celle de la marée océanique, mais dont l'amplitude décroît vers l'amont (sauf amplification ou résonance locale de l'onde). L'onde de marée - donc sans transport de matière - se propage sur des distances de l'ordre de 70 à 90 km en Guyane, et disparaît au premier obstacle rencontré lors du changement du régime d'écoulement (roches encombrant le lit c. à d. "saut" en Guyane). La célérité de l'onde est de l'ordre de la dizaine de km/h, (16 km/h sur le Sinnamary).

- Les phénomènes d'inversion des courants dus au flot et au jusant, dont la limite varie en fonction du débit propre du fleuve. En étiage, on observe la "renverse" des courants entre 30 et 50 km de l'embouchure. Pendant les faibles débits, nous avons observé sur le Sinnamary que les heures de renverse par rapport à la pleine mer de référence, en différents points de l'estuaire sont indépendants du coefficient de la marée (LOINTIER M. 1984).

- Le brassage des eaux marines et fluviales donne naissance à des eaux de turbidité élevée et au "coin salé", dont l'extension est conditionnée par les débits et le coefficient de marée. Toujours en étiage, les limites extrêmes de ce phénomène sont de l'ordre de 15 à 35 Km selon le type d'estuaire.

- Les limites amont du coin salé et du transport des vases d'embouchure se positionnent à quelques centaines de mètres près, en un même lieu (LOINTIER M. & M.A. ROCHE, 1988).

Enfin, il faut signaler:

- la présence fréquente des "dunes hydrauliques" de nature sableuses, observées au fond du lit et prouvant qu'il existe un transport de fond.

- les pentes des lignes d'eau sont faibles, de l'ordre de 3×10^{-5} (Mana, Sinnamary), c'est à dire 3 centimètres par kilomètre d'estuaire.

C-Caractéristiques générales des eaux de fleuve:

1) Caractéristiques physico-chimiques

Un préalable indispensable aux études en estuaires est de connaître la qualité des eaux qui vont se mélanger aux eaux océaniques. Plusieurs études réalisées sur les principaux fleuves Guyanais ("profils" amont - aval ou mesures répétées en un même point), permettent de préciser quels sont les éléments qui interviennent dans la faible minéralisation de ces eaux:

en mg/l	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃	SO ₄ ⁻⁻	SiO ₂
Fleuve:									
MARONI	6,0	0,8	0,9	0,9	3,6	4,8	-	-	13,8
MANA	6,4	2,0	1,4	0,9	3,9	4,8	0,5	-	15,8
SINNAMARY	6,5	0,4	0,6	0,6	2,9	3,6	1,0	1,3	10,0
KOUROU	6,7	0,2	0,5	0,6	2,9	4,1	-	1,6	9,4
APPROUAGUE	6,9	0,2	0,4	0,6	2,1	2,5	0,6	2,2	12,0
MOYENNE	6,5	0,7	0,8	0,7	3,1	4,0	0,7	1,7	12,2

Le pH est toujours acide, les valeurs ponctuelles étant souvent de l'ordre de 5,5 à 6 unités pH. Les mesures réalisées sur 200 km, d'amont en aval sur la Mana, indiquent une diminution d'une unité vers l'amont. Par ailleurs, les eaux océaniques étant d'un pH voisin de 8, on peut prévoir, lors du mélange, l'apparition d'un milieu tamponné (LAFOND, 1967).

Pour les ions mesurés, on est frappé par la très faible minéralisation. Na⁺ et Cl⁻ représentent en général 70 % de la teneur ionique globale des eaux de fleuve. Les autres ions présents ont des teneurs souvent inférieures à 1 mg/l.

De ce qui précède, on conçoit naturellement que la conductivité est très basse, les mesures moyennes étant inférieures à 35 µS/cm.

Les teneurs en silice sont comprises entre 10 et 15 mg/l, avec une remarquable constance par leur présence dans les eaux. Les "profils" amont - aval indiquent une légère décroissance vers l'aval.

Les teneurs en suspension supérieures à 0,8 μm sont de l'ordre de 10 mg/l.

Enfin, la température des eaux de fleuve est comprise entre 25 et 28 ° C, selon la saison.

De toutes ces mesures, on peut considérer un type moyen d'eau de fleuve dont la composition serait la suivante:

-Teneurs en suspension (MES > 0,8 μm)	8 à 10 mg/l
-Somme des ions majeurs	12 à 14 mg/l
-Silice dissoute	10 à 15 mg/l
-pH	6,5 unités pH

Les eaux Guyanaises se trouvent parmi les moins minéralisées du globe (ROCHE M.A. et al. 1974). Hormis les variations locales au débouché d'un affluent ou les effets dus aux crues, tous les paramètres décrits ici présentent de faibles variations à l'échelle du territoire.

2) Les matières en suspension (MES).

La teneur en MES des fleuves de Guyane est très faible, comparé aux autres fleuves tropicaux (Amazone: 140 mg/l, EISMA D., 1988). L'origine des fortes teneurs en suspension observées en estuaire provient de la remise en suspension des vases de l'embouchure, par l'énergie mécanique développée par la marée et les courants alternatifs (flot et jusant) qui en résultent. De plus, selon LAFOND (1967), les vases d'estuaire se trouvent en permanence dans des conditions de salinité aptes à assurer leur floculation totale et rapide: érosion, transport et sédimentation se feront à l'état floculé, et l'on observe pas de défloculation au contact avec les eaux douces, du fait de la salinité qui serait préservée dans le milieu intérieur du flocculat.

D-Rappel des données hydrologiques du Sinnamary:

1. Station de PETIT SAUT

	Surface à la station	Module moyen station	Surface à l' embouchure	module moyen embouchure	Volume annuel écoulé
unités	Km ²	m ³ /s	Km ²	m ³ /s	x10 ⁹ m ³
Petit Saut	5880	228	6560	290	9,15
	(valeurs moyennes annuelles)				

2. Station de SAUT TIGRE (données calculées au 01/01/86)

Superficie du bassin à la station: 5 150 km²

Pluviométrie moyenne sur 30 ans : 2700 mm

MODULES :

Période d'observation : 17 ans (de 1969 à 1985)

Décennal	Faible 173 m ³ /s	Moyen 227,6 m ³ /s	Décennal fort 283 m ³ /s
----------	---------------------------------	----------------------------------	--

Ecart-Type : 43,1 m³/s Cv : 0,19

CRUES : Maximum observé: 1310 m³/s en 1977

Crue décennale estimée à : 1040 m³/s

Crue centennale estimée à : 1300 m³/s

Fréquence d'apparition maximale du 1^{er} janvier au 30 juillet

ETIAGES : Minimum observé : 34,2 m³/s en 1969

Etiage décennal estimé à : 44,5 m³/s

Etiage centennal estimé à : 34 m³/s

Fréquence d'apparition maximale du 1^{er} novembre au 10 janvier

Débits mensuels sur la période d'observation (m³/s) :

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
234	226	243	327	386	343	273	182	127	102	106	182

Année la plus humide : 1976

Année la plus sèche : 1985

II) MODIFICATIONS DE L'ESTUAIRE DU SINNAMARY

L'hydrodynamique de l'estuaire, déjà étudiée en 1984, avait permis d'observer les transformations historiques de l'embouchure (M.LOINTIER, 1986), provoquées par la migration des banc de vase d'origine Amazonienne. Depuis 1985, on observe la régression de la ligne de rivage, désormais suivie à l'aide des données de télédétection (SPOT, LANDSAT).

Plusieurs images ont été acquises et traitées au laboratoire de traitement d'images du centre de Cayenne. Celles-ci, prises en 1976, 1986 et 1988, donnent une représentation exacte de l'évolution du phénomène, ainsi que les surfaces gagnées par la mer (LOINTIER M. & PROST M.T., 1988). Le document n° 1 est une composition colorée standard de la zone couverte par l'image SPOT du 20 octobre 1986, centrée sur l'estuaire du Sinnamary. On observe, à droite et en gris, le "front avant" du banc de Kourou, à la hauteur des battures de Malmanoury. A gauche, le banc d'Iracoubo, séparé du dernier banc par une zone de 25 km en érosion.

Au-delà du front avant du banc de Kourou la côte de Sinnamary subit une forte érosion. A l'est de l'embouchure du Sinnamary (secteur de la route n° 8, - dite de l'Anse - et de la plage Dégonde), les marais côtiers sont à présent en contact direct avec les eaux marines, du fait de la disparition presque complète de la mangrove de front de mer. La vase nue, exposée en marée basse, est parsemée



DOCUMENT N° 1

Composition colorée standard de la zone couverte par l'image SPOT du 20 octobre 1986, centrée sur l'estuaire du Sinnamary. On observe, à droite et en gris, le "front avant" du banc de Kourou, à la hauteur des battures de Malmanoury. A gauche, le banc d'Iracoubo, séparé du dernier banc par une zone de 25 km en érosion.

© CNES 86

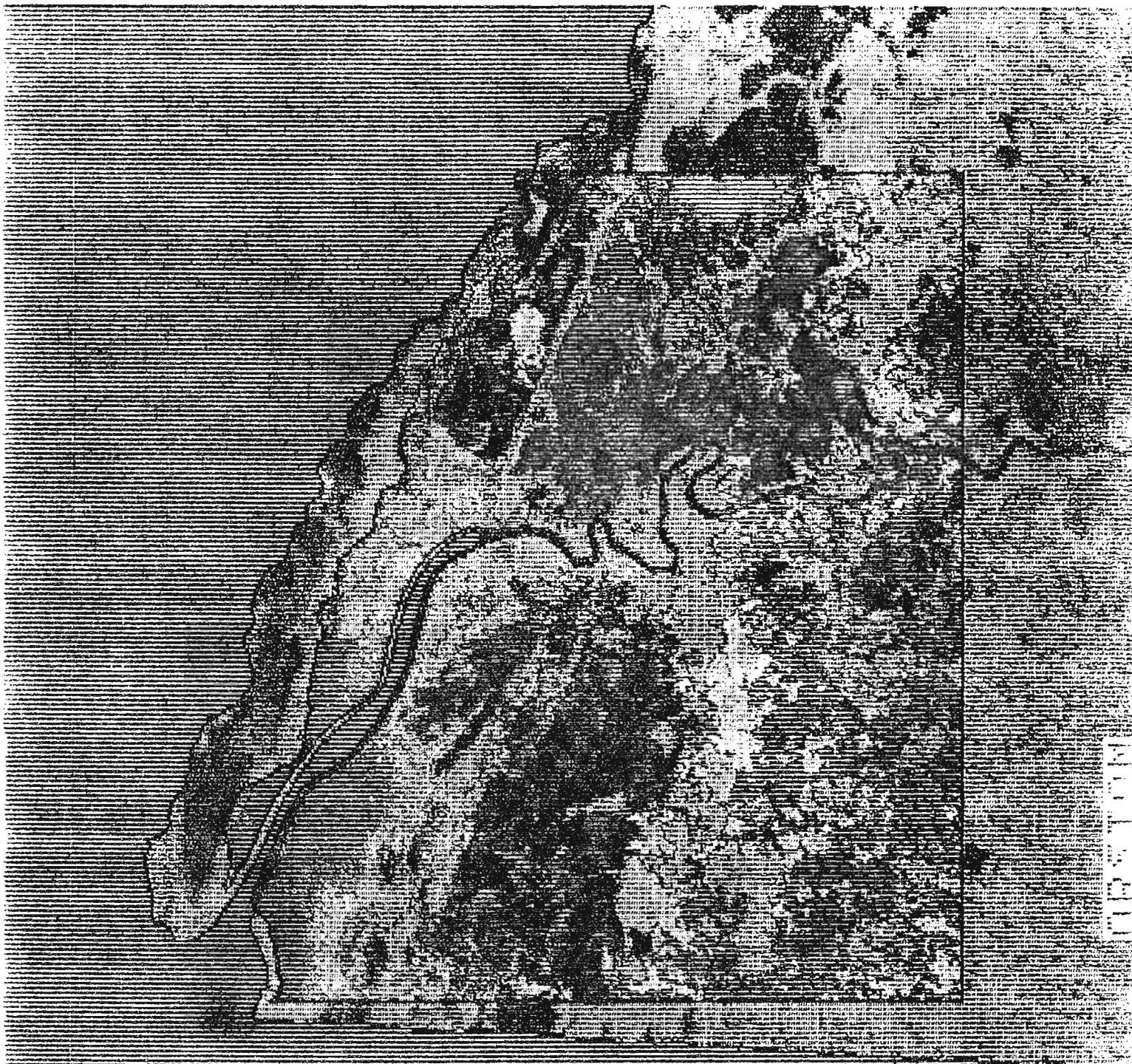
ici et là par des troncs morts et par des bosquets résiduels d'Avicennia.

Le fort recul du rivage dans ce secteur n'est pas seulement actuel. D'une part, la mer a détruit jadis la presque totalité de la route de l'Anse qui reliait Sinnamary à Kourou par la côte. D'autre part, une datation au ^{14}C des vases de l'estran de la plage Dégonde a révélé un âge de 3500 ans, ce qui prouve l'existence d'une érosion importante de cette partie de la côte.

L'hydrodynamique côtière joue également un rôle primordial dans l'évolution de certains estuaires, comme celui du Sinnamary, dont l'histoire est retracée grâce à des documents anciens. Il est acquis qu'en 1763 l'embouchure du fleuve se trouvait à plusieurs kilomètres à l'amont de sa position actuelle (YAYER, 1937), au niveau de l'actuel canal Phillippon; un banc de sable barrait légèrement la sortie du fleuve en mer et orientait le chenal vers le nord-ouest. Un document datant de 1879 montre que l'embouchure occupait la même place, mais que la barre sableuse avait disparue. YAYER a constaté que l'embouchure s'était allongée de 6 km vers le nord-ouest dans l'espace de 58 ans (1879-1937). La comparaison du tracé du fleuve entre 1936 et 1976 montre que l'estuaire a progressé d'environ 6,5 km, dans une direction sub-parallèle à la ligne du rivage (LOINTIER M., 1986). La vitesse moyenne de progression - si elle est considérée comme continue et monotone - serait de près de 170 m/an. Dans la réalité, la progression est variable, plus rapide ou plus lente, selon les conditions de l'environnement.

Nous sommes actuellement dans un processus inverse qui semble avoir débuté vers les années 75.

Simultanément à la déviation de l'estuaire (LANDSAT 1976/SPOT 1986, document n°2), des changements morphologiques saisissants se sont opérés sur la partie maritime de la rive droite du Sinnamary, modifications suivies systématiquement entre 1986 et 1988 (levés de terrain, survols en basse altitude, télédétection). La largeur de l'espace, en rive droite, séparant le fleuve de la mer a diminué de façon spectaculaire, passant de quelques centaines à quelques dizaines de mètres au courant de la période considérée; simultanément il y a eu dépérissement et mort de la mangrove de



DOCUMENT n° 2

Traitement numérique et superposition des données LANDSAT MSS du 30 octobre 1976 (résolution 80 mètres), aux données SPOT du 20 octobre 1986 (résolution 20 mètres). La côte a reculé en moyenne de 2 km en dix ans, sur une trentaine de kilomètres de rivage.

© CNES 86 © INPE 76

front de mer. Ce rétrécissement accéléré a abouti à l'ouverture d'une large brèche (qui continue à s'agrandir, document n°3) et par laquelle la houle pénètre maintenant dans l'estuaire et attaque la mangrove sur la rive gauche. L'île qui s'est formée à l'embouchure est, elle aussi, en érosion. Cette "ouverture forcée" de l'estuaire - qui reste très dynamique - modifie les paramètres hydrologiques, sédimentologiques et morphologiques.

Exception faite de ce secteur, la rive gauche est plus stable et c'est sur celle-ci qu'apparaissent plus nettement des vestiges d'anciens rivages. Le traitement numérique d'images SPOT révèle 4 classes de mangrove qui traduisent vraisemblablement des différentes phases de colonisation des vases. L'existence d'une plage ouverte à la mer il y a environ 50 ans - la plage Brigandin, qui se trouve aujourd'hui piégée derrière plusieurs centaines de mètres de mangrove - donne une idée de la périodicité de ces mécanismes qui semblent être proches du siècle. On conçoit aisément, que dans de telles conditions, la remontée des sels et des vases d'embouchure soit un phénomène qui va être l'objet de variations importantes d'intensité dans l'espace et dans le temps.

III) MESURES HYDROLOGIQUES

A- Méthodologie d'étude:

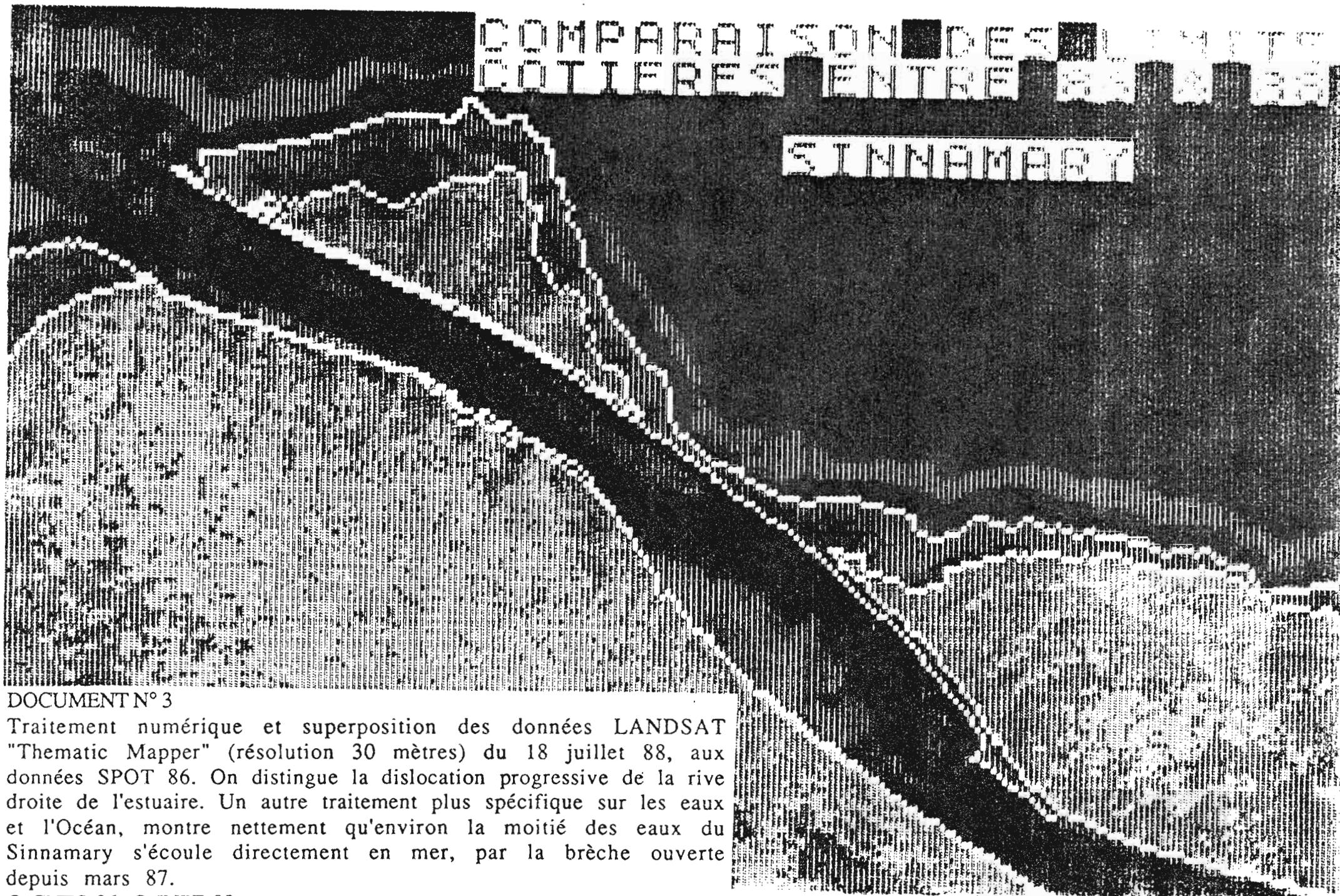
1) Paramètres hydrologiques enregistrés

-Hauteurs: En dehors de toute influence océanique, on choisit une section de mesure de référence qui permettra la connaissance des débits propres et l'évaluation des récurrences si l'on possède une série chronologique des débits (station appartenant au Réseau Hydrologique du Département: ici, Petit-Saut et Saut Tigre).

Dans la partie sous influence océanique, on définit entre 6 et 8 sections de mesure, équipées d'un limnigraphe et d'une échelle. En dehors des zones d'estuaire bordées de mangrove, une borne de calage de l'échelle doit être posée, afin de procéder aux nivellements d'usage courants, aux rattachements au NGF si besoin, et permettant un recalage en cas d'étude ultérieure.

COMPARAISON DES DONNÉES SATTERRES ANTARCTIQUES

SINNAMARY



DOCUMENT N° 3

Traitement numérique et superposition des données LANDSAT "Thematic Mapper" (résolution 30 mètres) du 18 juillet 88, aux données SPOT 86. On distingue la dislocation progressive de la rive droite de l'estuaire. Un autre traitement plus spécifique sur les eaux et l'Océan, montre nettement qu'environ la moitié des eaux du Sinnamary s'écoule directement en mer, par la brèche ouverte depuis mars 87.

-Vitesses: Celles-ci sont mesurées aux sections choisies, au moulinet hydrométrique, toutes les heures par exemple, pendant un cycle complet de marée (12 h). La variation des coefficients de marée entre le matin et le soir peut justifier, dans certains cas, des mesures pendant deux cycles (24 h).

Trois à cinq verticales et trois points de mesure de vitesse (surface, milieu et fond), sont suffisants, dans ces études, pour décrire le champ des vitesses, le principe de base étant de réaliser une mesure sur une verticale, sans variation importante du plan d'eau, sous l'effet de la marée (5 à 10 cm maximum). Pour les études en milieu connu et en moyens plus légers, le moulinet à génératrice muni d'un enregistreur donnera, en continu, une information ponctuelle sur l'évolution des vitesses dans le temps.

-Prélèvements: La mise en place du dispositif hydrométrique permet de réaliser des prélèvements d'eau par pompage manuel au moment de la mesure de vitesse. On réalise ainsi des prélèvements de 100 cm³, destinés à la détermination de la conductivité et de la teneur en suspension. Un échantillon d'eau de plus grande quantité (2 litres) est prélevé au milieu du fleuve, en surface ou à mi-profondeur, pour des analyses plus complètes.

2) Dispositions concernant les dates de mesure:

L'évolution des paramètres physico-chimiques sont conditionnés principalement par les deux paramètres: débit et coefficient de marée. Selon le type d'étude, on choisira une ou plusieurs des quatre combinaisons de base, avec tous les intermédiaires, si besoin:

Coef de marée		vives eaux	mortes eaux
débit fluvial :	crue	1	2
	étiage	3	4

B-Résultats hydrométriques - Campagne 88

Au total, trois campagnes de mesures ont été réalisées depuis l'ouverture de la brèche dans l'estuaire (mars 87):

- 16 et 17 décembre 1987. Mesures chimiques uniquement.
- 3 mai 1988. Mesures chimiques et hydrométriques

- 25-27 octobre 88. Mesures chimiques et hydrométriques au pas temps serré (30 mn).

1) Conditions océaniques et débit à Petit Saut:

Mercredi 16 déc 87:

Pleine mer	13:16	2,75 m
Basse mer	07:00	
Débit à Petit Saut	121 m ³ /s	

Jeudi 17 déc 87:

Pleine mer	01:51	2,60 m
Basse mer	07:40	
Pleine mer	14:05	2,85 m
Débit à Petit Saut	133 m ³ /s	

Mardi 3 mai 88:

Pleine mer	05:24	3,1 m
Basse mer	11:40	
Pleine mer	17:57	2,85 m
Débit à Petit Saut	(129 m ³ /s)	

Mercredi 4 mai 88:

Pleine mer	06:02	3,10 m
Basse mer	12:15	
Pleine mer	18:40	2,80 m
Débit à Petit Saut	(118 m ³ /s)	

Mercredi 26 oct 88:

Pleine mer	05:13	3,10 m
Basse mer	11:20	
Pleine mer	17:24	3,30 m
Débit à Petit Saut	(92 m ³ /s)	

Jeudi 27 oct 88:

Pleine mer	05:57	3,00 m
Basse mer	12:00	
Pleine mer	18:00	3,20 m
Débit à Petit Saut	(91 m ³ /s)	

Vendredi 28 oct 88:

Pleine mer	06:42	2,85 m
Basse mer	12:50	
Pleine mer	18:50	3,10 m
Débit à Petit Saut	(91 m ³ /s)	

Remarque: on peut s'étonner des faibles débits du mois de mai 88, puisque statistiquement, c'est la période la plus abondante de l'année: en effet, l'hydraulicité de cette période a été comparable au mois d'avril, et les pluies n'ont commencé qu'à la fin mai, pour se poursuivre en juin. Sur l'ensemble du Département, l'année 88 a été déficitaire de 20 à 30 % par rapport à la moyenne (LOINTIER M. Annuaire hydrologique 88).

Sur les trois campagnes, les débits sont du même ordre de grandeur(90 à 130 m³/s), et les amplitudes de marée sont moyennes en décembre 87 et de vives-eaux pour les deux autres campagnes.

2) Dispositif de mesure:

Les études antérieures et leurs conclusions nous ont permis d'optimiser le dispositif de mesure, tout en préservant une bonne description des phénomènes observés

Pendant les campagnes de mai et d'octobre, il a été installé un limnigraphe OTT X, à rotation journalière, au niveau du canal PHILLIPPON, en rive gauche de l'estuaire, au droit de la section "D".

Pour ces deux campagnes, prélèvements et mesures de vitesses ont été réalisés selon le schéma suivant:

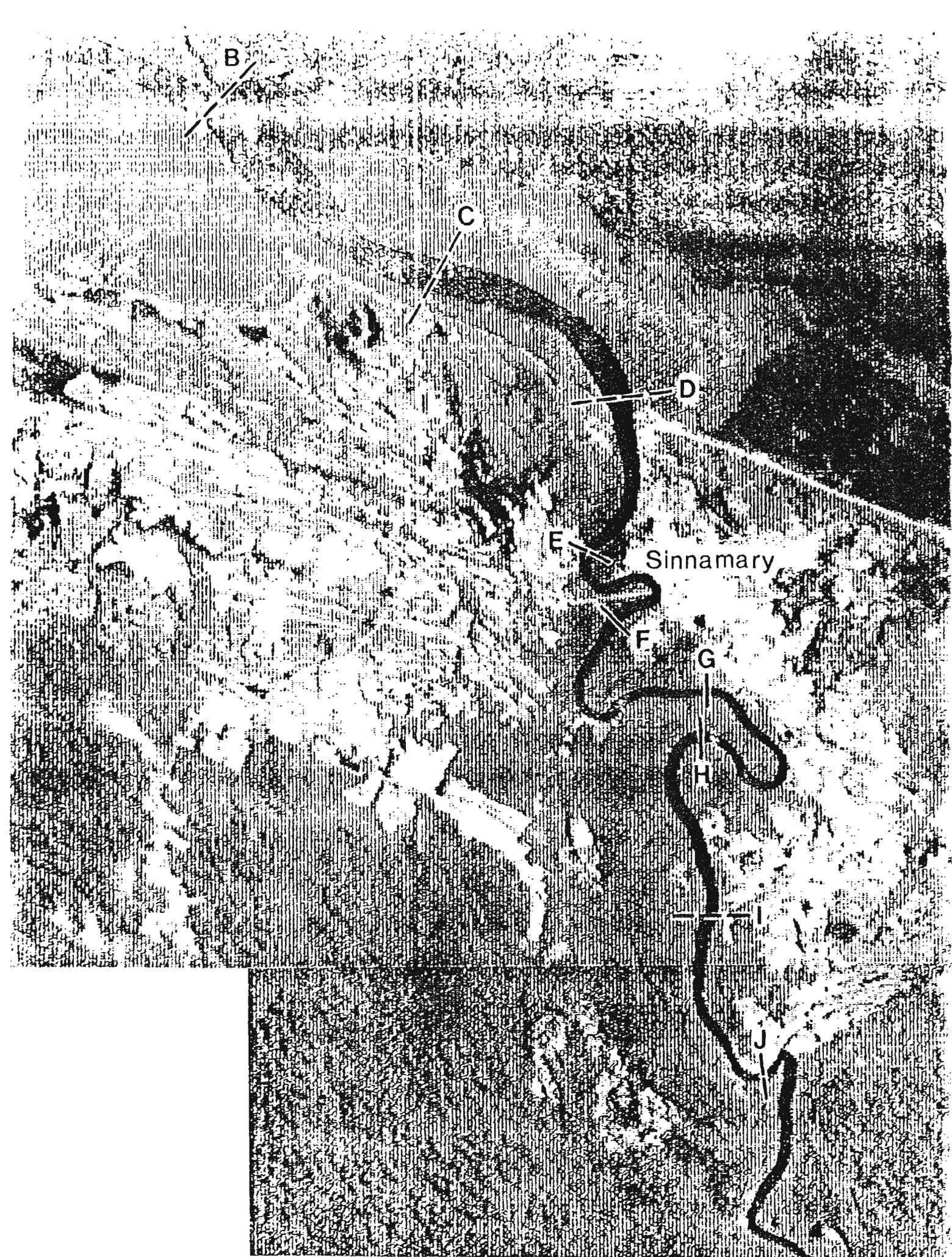


FIG 1: Carte de situation. Position des sections de mesures sur le fleuve Sinnamary, pour toutes les campagnes, depuis 1983.

Rappel de leurs positions:

Section	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Distance (km)	0	3,25	7	11	13,5	16	19,5	23	26,5	29,5

L'ouverture de la rive droite en mars 87 se situe en amont de la section "B".

Sections jaugées/prélevées en mai 88: C D F G I.

Sections jaugées/prélevées en oct 88: C F G.

Sections prélevées en oct 88: D et H.

4) Limnigrammes:

Les enregistrements (fig 2 et 3) à la section "D", nous donnent un marnage de 2,20 m pour la campagne du 3 mai, et de 2,30 m pour le 26 octobre.

Le rattachement au "zéro IGN" n'a pas été réalisé, d'autant que le macaron du point coté IGN, situé sur le mur de l'église de Sinnamary, a disparu pendant la réfection du bâtiment.

La comparaison des limnigrammes conduit à estimer la vitesse de propagation de l'onde de pleine mer à 15 km/h, comme observé en 1983.

5) Vitesses:

Dans la plupart des sections, l'évolution des vitesses sur une verticale se présente sous l'habituelle parabole des vitesses. Néanmoins, surtout à la section "C" et pendant les périodes de renverses, on rencontre les effets des "prédominances" de flot sur le jusant (courant de flot au fond, pendant que le jusant est encore en surface). De même, c'est dans cette partie de l'estuaire que l'on observe une déformation des profils de vitesse (fig 4), avec des valeurs plus élevées à mi-profondeur. Ceci traduit les remontés d'eau saline par le fond, phénomène déjà décrit, et qui a généré le concept de "coin salé".

Pour les autres sections de mesure plus en amont, la dominance fluviale est nette, l'influence du biseau salé est moindre et la déformation des paraboles de vitesses n'est plus observée.

FIG 2 : Limnigramme Section "D"

3 mai 88

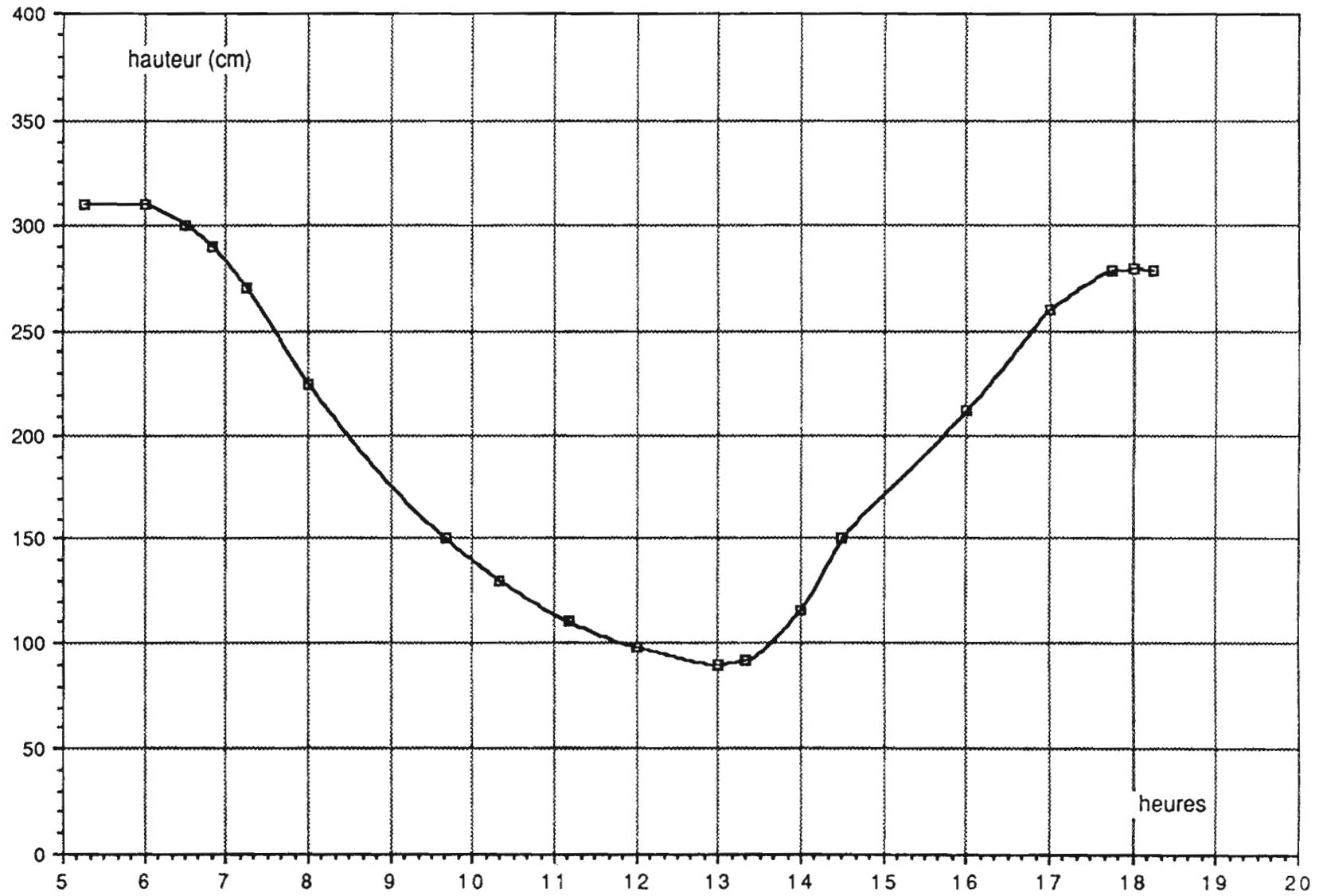
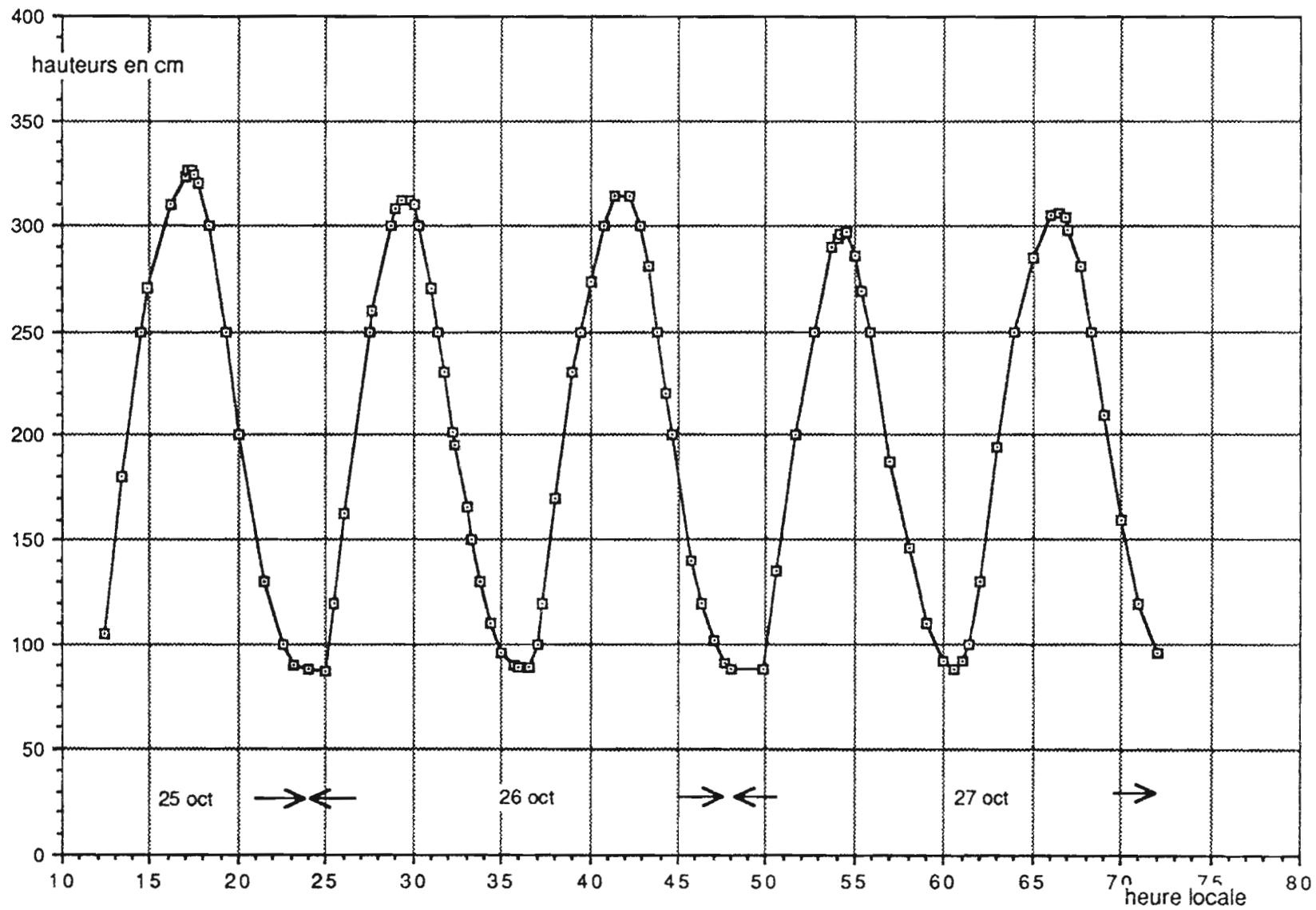


FIG 3 : Limnigramme section "D"

25 - 27 oct 88



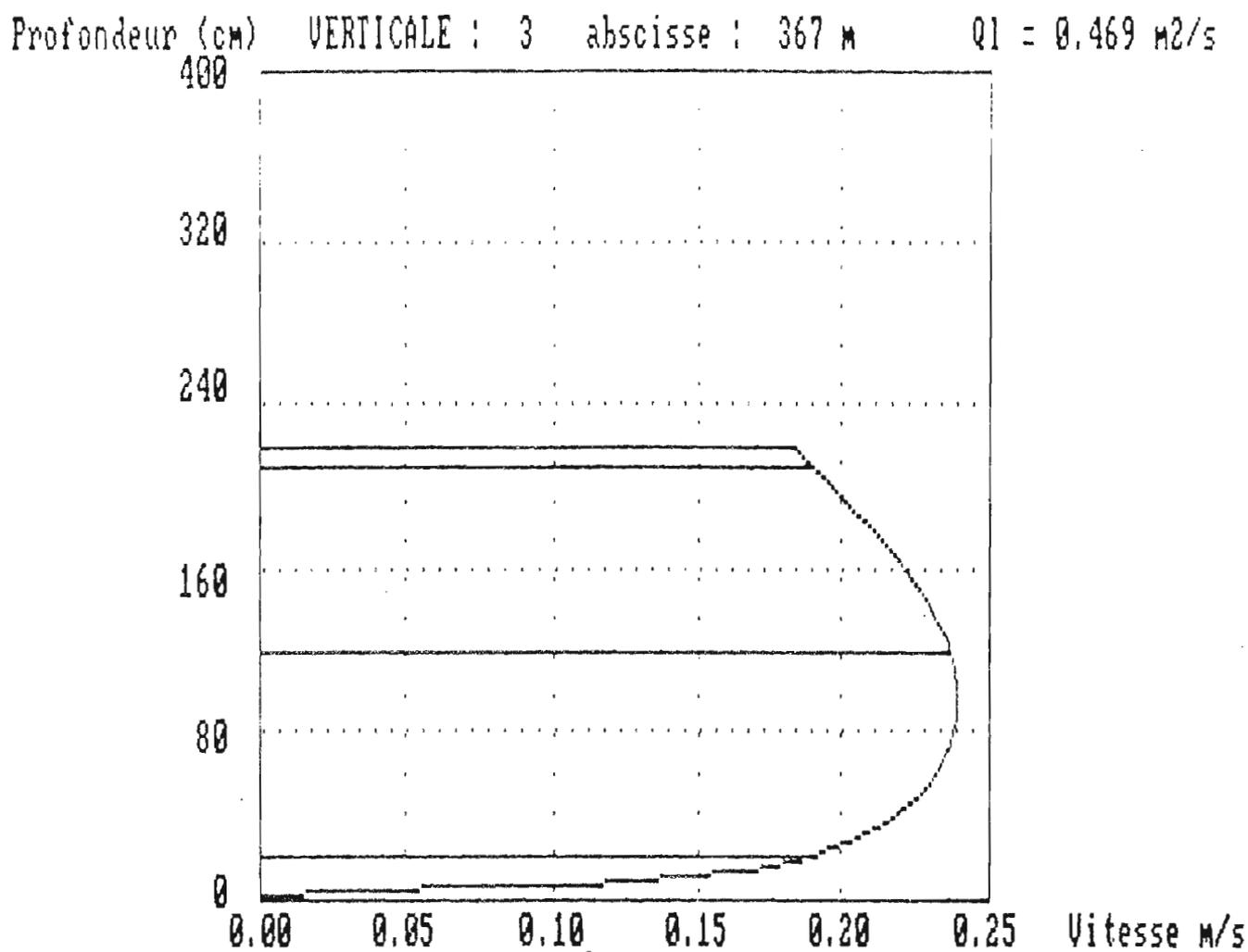


FIG 4: Exemple de dépouillement d'une verticale montrant certaines particularités du flot en estuaire. Les vitesses sont plus élevées à mi-profondeur.

6) Vitesses de fond instantanées:

Nous verrons plus loin l'évolution des vitesses pendant un cycle de marée. Néanmoins, lorsque l'on évoque les problèmes de transport de sédiments par le fleuve, il nous a paru intéressant de réserver un tableau aux vitesses de fond.

Durant la campagne d'octobre, on a observé des *vitesses maximales* suivantes (à 0,20 m au dessus du fond):

SECTION	FLOT (m/s)	JUSANT(m/s)
C	0,46	0,43
F	0,54	- -
G	0,48	0,58

7) Evolution des vitesses pendant un cycle de marée:

Les mesures de vitesses réalisées toutes les demi-heures, durant la campagne d'octobre, dépassent très rarement 1 m/s, sauf à mi-jusant et au voisinage de l'embouchure (fig 5 et 6). Dans l'estuaire, on peut remarquer les faibles vitesses de surface, pendant le flot (section "C") et les vitesses plus élevées, à mi-profondeur.

8) Débits oscillants:

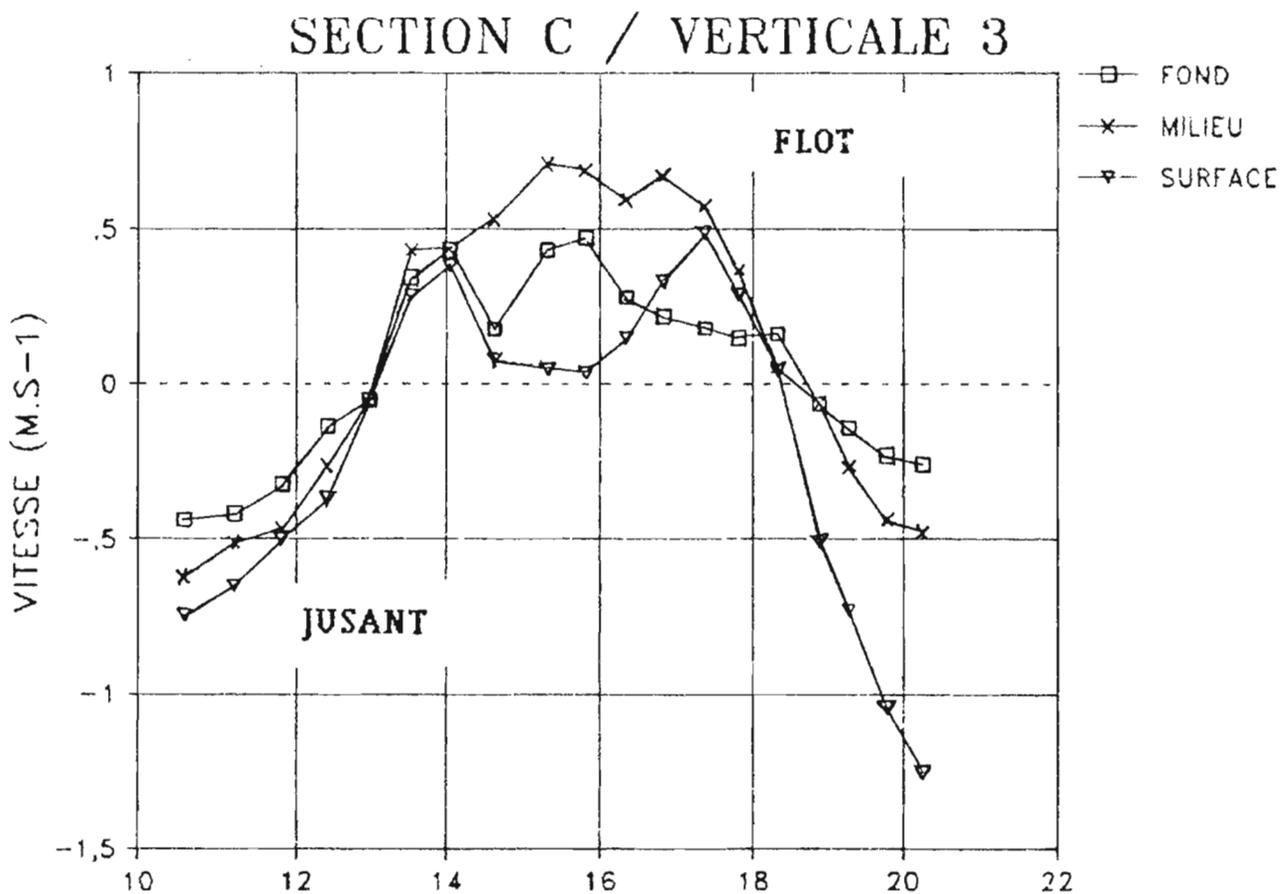
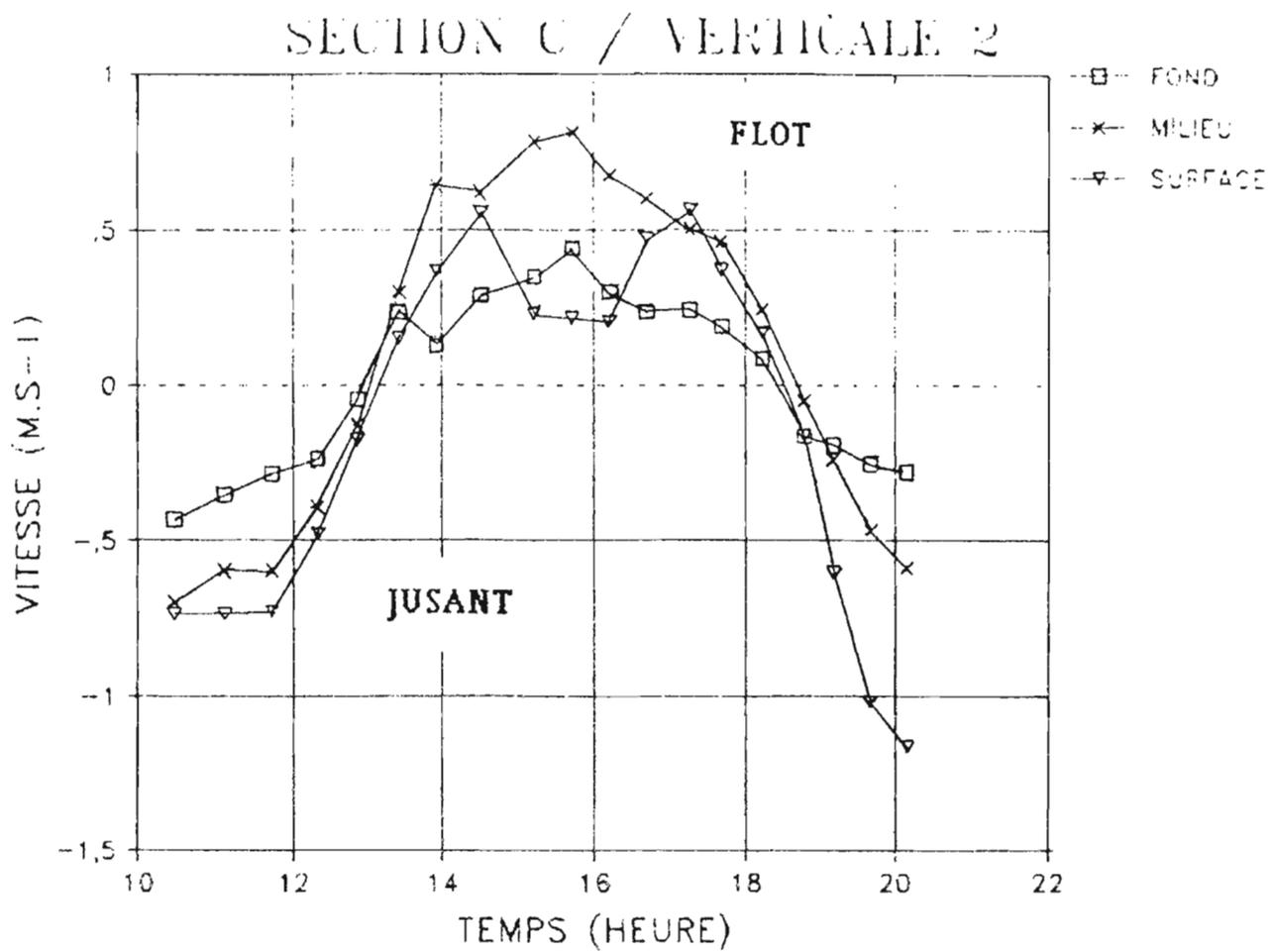
Par convention, les débits de flot seront comptés "*négatifs*" et ceux de jusant, s'écoulant dans le même sens que la rivière, seront "*positifs*".

- Campagne de Mai 88:

La figure 7 traduit les mesures réalisées en Mai 88, sur une dizaine d'heures, pendant une phase de jusant.. La superposition du limnigramme de la section "D", met en évidence les déphasages déjà décrits dans les premières campagnes de 83: aux sections "c" et "D", le maximum de jusant précède de deux heures environ la basse mer. L'étale de marée basse (débit nul) se situe par contre environ deux heures après la basse mer.

On observe également la diminution des valeurs de débits de jusant, de l'aval vers l'amont, avec une augmentation de la durée de

FIG 5: Evolution des vitesses de Fond, Milieu et Surface, pendant un cycle de marée - Section "C" - Verticales n° 2 et 3 - 26 oct 88.



SECTION G / VERTICALE 2

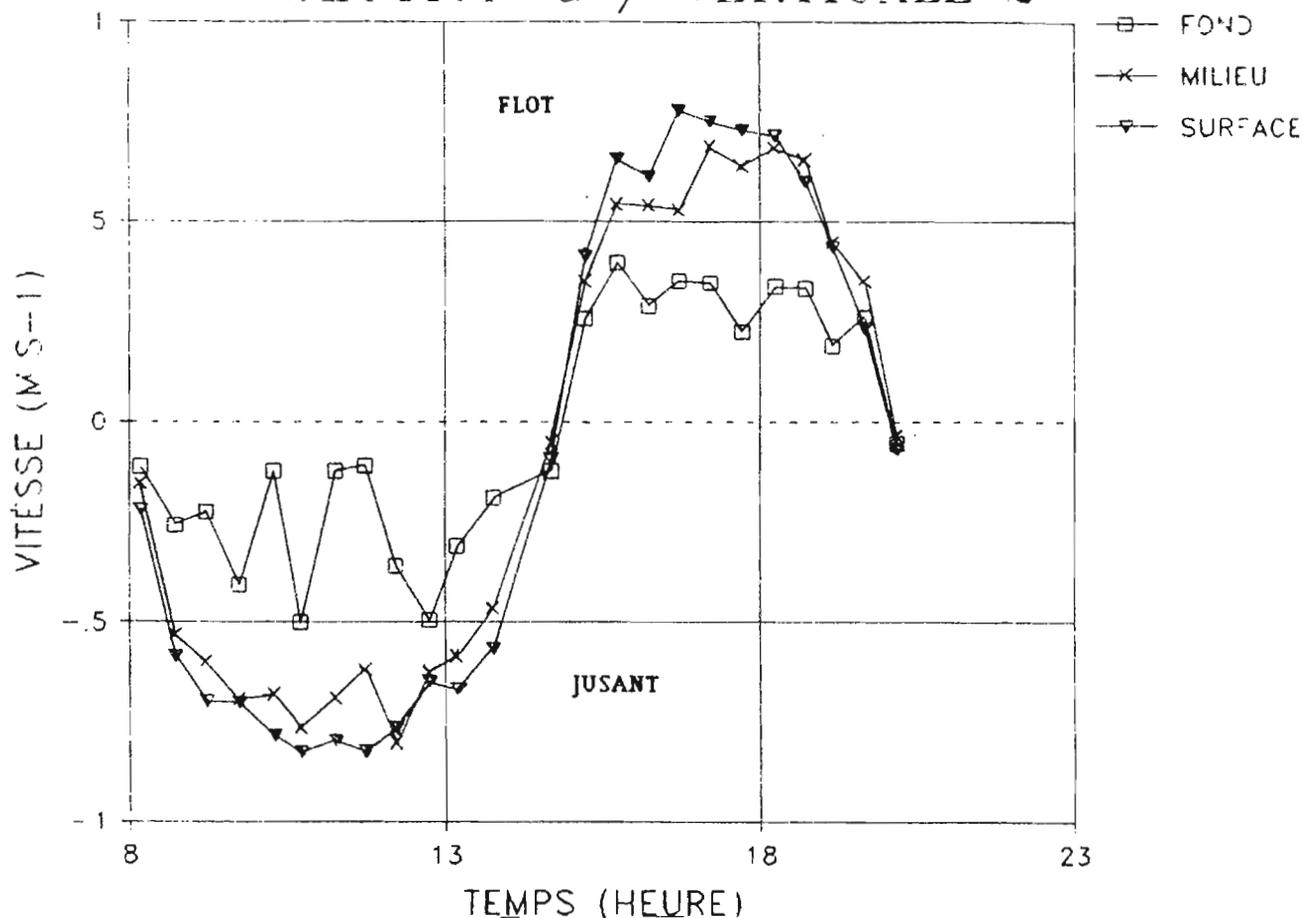


FIG 6 : Evolution des vitesses de Fond, Milieu et Surface, pendant un cycle de marée - Section "G" - Verticales n° 2 et 3 - 27 oct 88.

SECTION G / VERTICALE 3

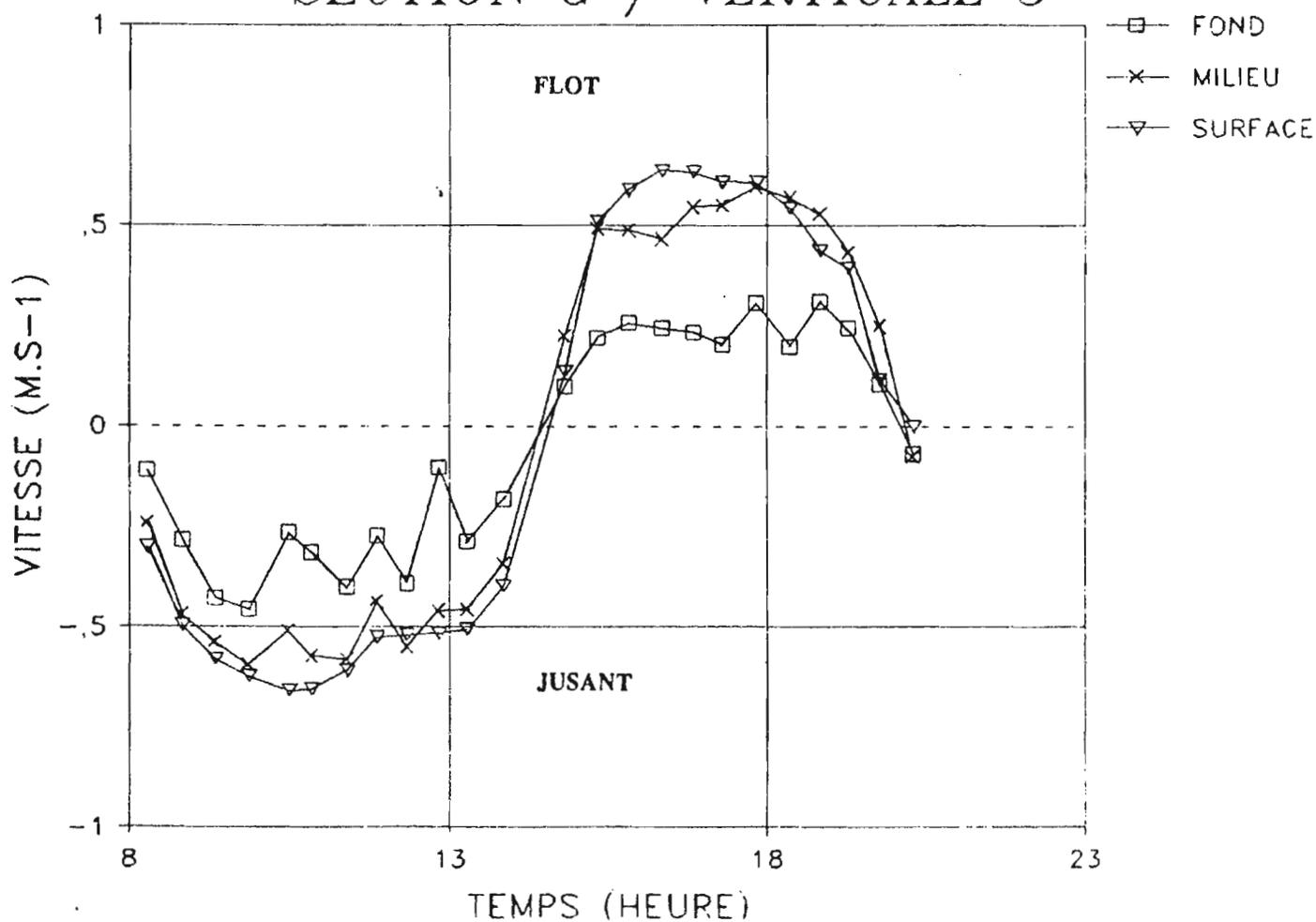
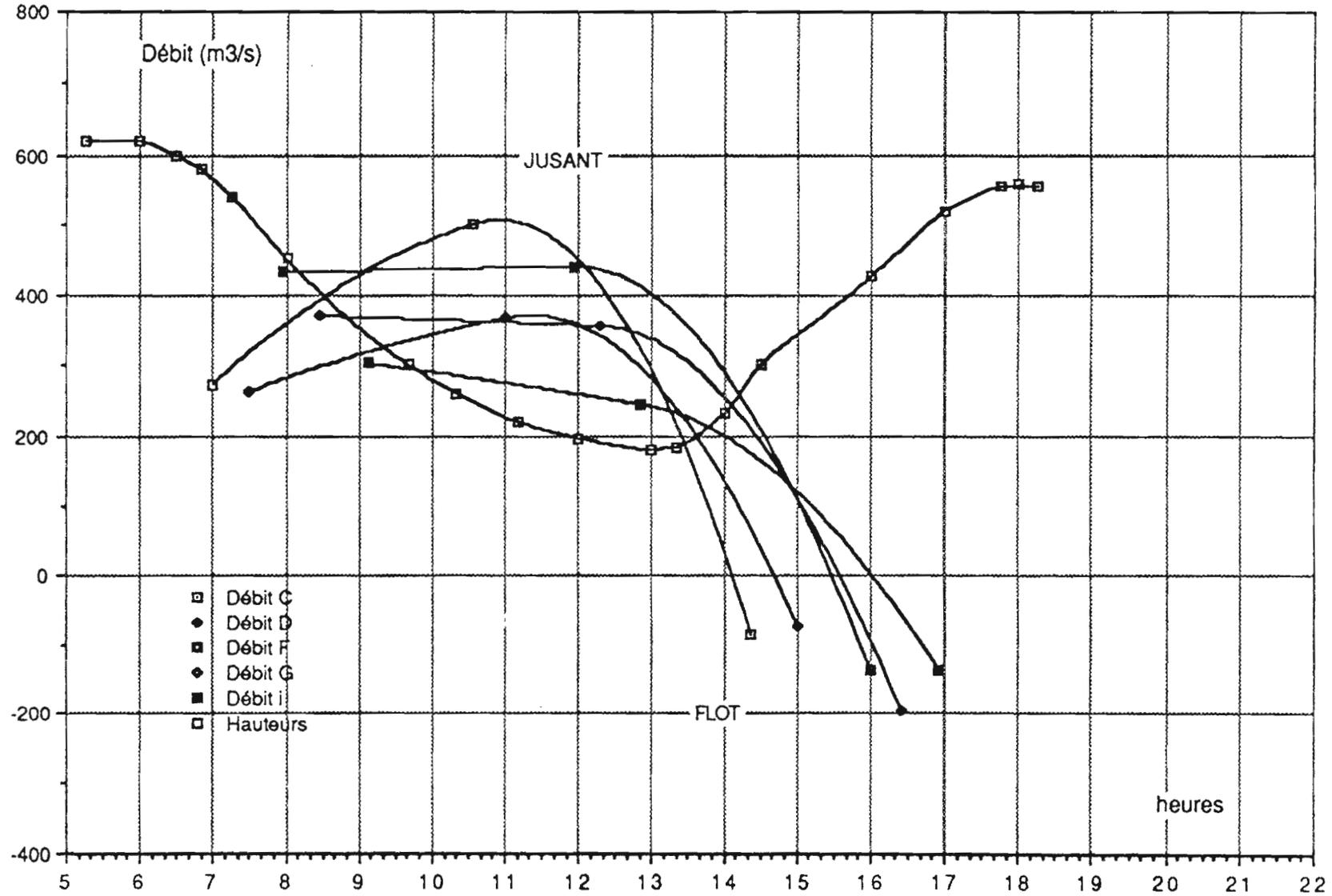


FIG 7 : Hauteurs en "D" et débits aux sections

3 mai 88



ce jusant aux sections amont ("i"), dûs à la contribution fluviale plus importante.

Les valeurs remarquables des débits oscillants (maximum) sont de l'ordre de 500 m³/s à l'embouchure, et diminuent de moitié à la section "i", en amont.

- Campagne d'octobre 88:

La section "C" a été suivie le 26 octobre sur un cycle de marée complet (fig 8). La valeur maximale du débit de flot (- 800 m³/s) se situe environ une heure trente avant l'étale de haute mer, et ce débit s'annule une heure après la pleine mer. En jusant, le débit maximum est du même ordre de grandeur qu'en flot, mais de durée plus longue, situé entre deux et trois heures avant la basse mer. Le débit s'annule une heure après la basse mer. La forme et les durées de flot et de jusant sont de type "océanique", proches de la sinusoïde des marées.

La section "F", a été suivie sur un demi-cycle de marée, pendant le flot du 25 octobre (fig 9). La valeur la plus élevée du débit de flot (- 600 m³/s), se produit 30 minutes avant la haute mer, et l'étale de haute mer (débit nul), une heure trente après l'établissement de la cote maximale (3,26 m).

La section "G" , suivie le 27 octobre (fig 10), a un caractère fluvial plus marqué, avec une importance du jusant sur le flot dû à sa position plus amont. Les maxima sont de l'ordre de 400 m³/s. Celui du flot a lieu une heure trente environ avant la haute mer. Celui du jusant dure trois heures et précède d'une heure la basse mer. Les points de débit nul se situent une heure après la haute mer et une heure trente après la basse mer, comme observé en 1983.

Trois remarques s'imposent:

- La propagation de l'onde de marée, qui affecte les hauteurs, se déplace dans l'estuaire et plus en amont, sans grande déformation et sans perte notable d'amplitude, sur les 20 km qui sépare la section "G" de l'embouchure.

- Les sinusoïdes des débits oscillants se déforment plus rapidement vers l'amont, et les amplitudes sont divisées par deux entre les sections "C" et "G".

- Pour une section, les maxima de débits en flot et en jusant sont identiques, en valeur absolues et instantanées. C'est

FIG 8 : Hauteurs et Débits: section "C"

26 oct 88

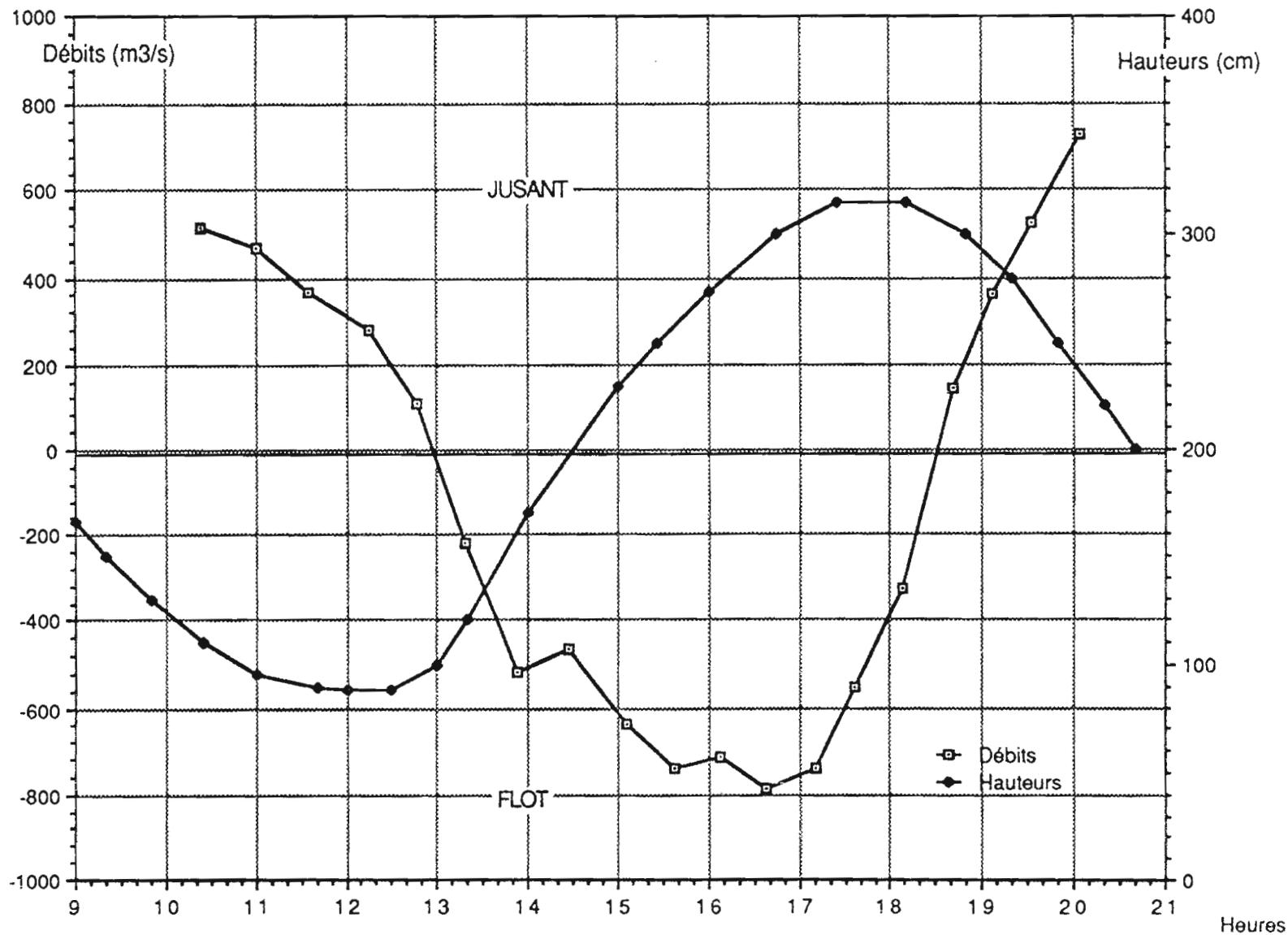
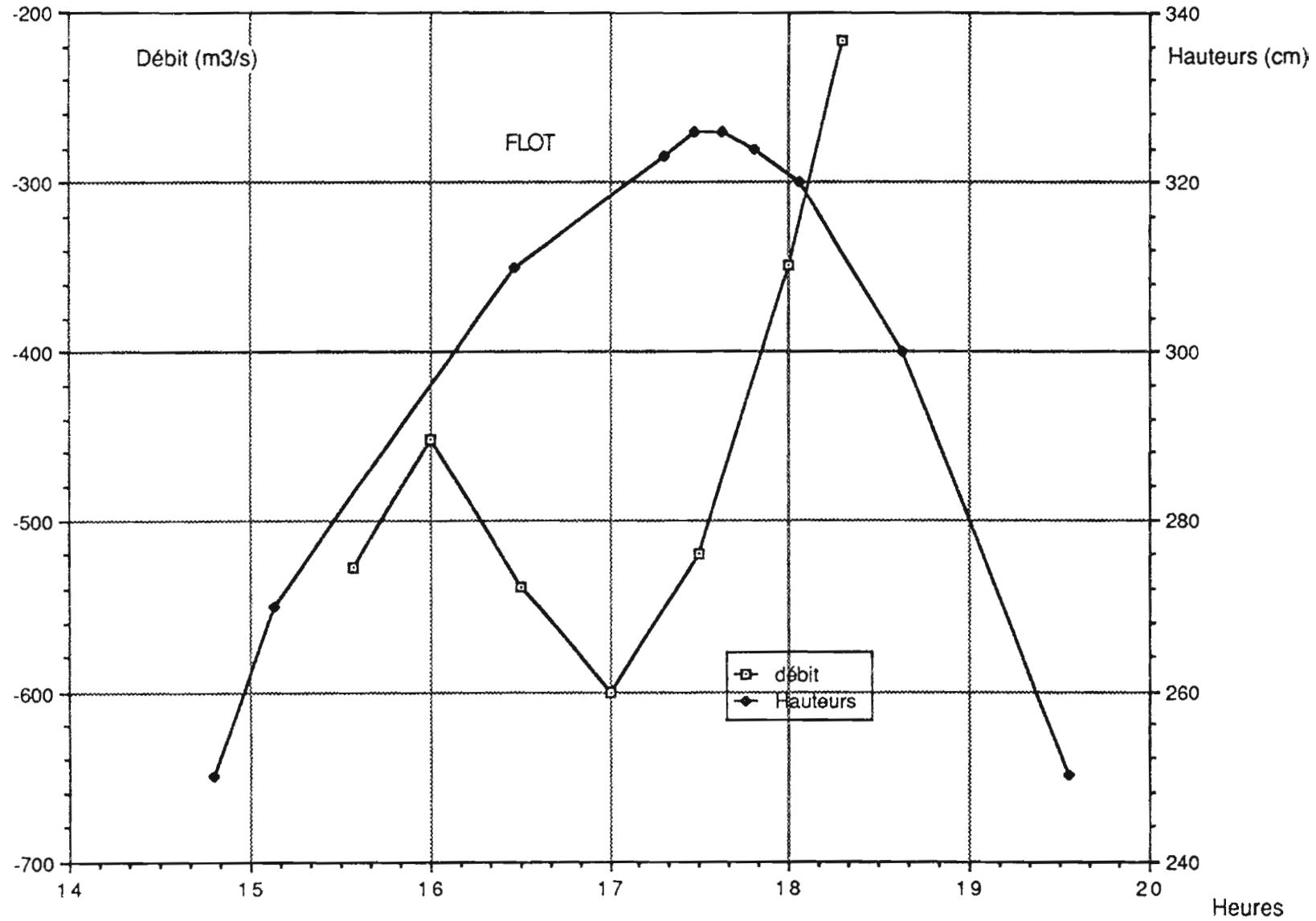


FIG 9 : Hauteurs et Débits: section "F"

25 oct 88



simplement la durée du jusant qui augmente vers les sections amont.

9) Volumes oscillants:

La campagne d'octobre 88 permet d'estimer les volumes oscillants aux sections "C" et "G", par planimétrage de la courbe des débits. Nous les comparerons aux valeurs de 83.

Section	Vflot	Vjusant	ΔV	Vj/Vf
Unités	10^6 m^3	10^6 m^3	10^6 m^3	
en 83: (mortes eaux, puis vives eaux)				
"A"	9,10	10,6	1,50	1,16
"D"	4,46	6,00	1,54	1,35
"G"	4,14	6,00	1,86	1,45
"A"	13,8	16,3	2,5	1,18
"D"	7,50	9,70	2,20	1,29
"G"	5,53	8,34	2,81	1,51
en 88:(vives eaux)				
"C"	10,7	11,6	0,9	1,08
"G"	5,72	7,16	1,44	1,25

Depuis 83, la section "A" a disparue, et l'estuaire s'est raccourci de 4 km. Les volumes de flot observés en 88 sont du même ordre de grandeur qu'en 1983, tandis que ceux de jusant ont sensiblement diminués, comme l'indique le rapport Vj/Vf, alors que le débit propre du fleuve à la station de Petit-Saut est très proche de celui mesuré en 1983.

10) Dérives moyennes et résultantes:

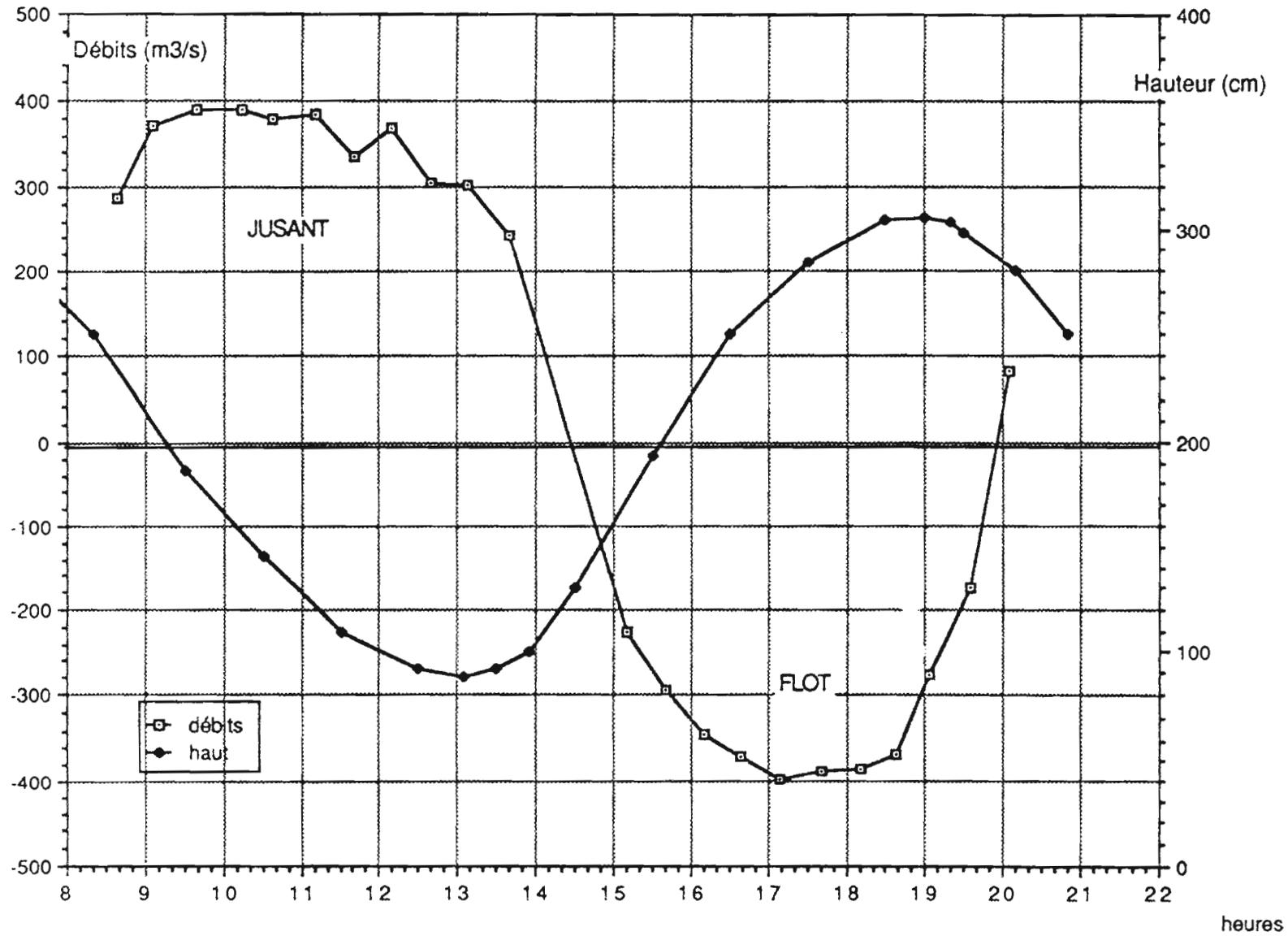
Ces valeurs sont obtenues en divisant le volume oscillant mesuré à une section, par sa surface mouillée.

A la section "C", on obtient 9 100 mètres en flot, et 9 800 m en jusant.

A la section "G", on obtient 9 900 mètres en flot, et 12 300 m en jusant.

FIG 10 : Hauteurs et Débits: section "G"

27 oct 88



La dérive résultante est obtenue par différence des deux:

soit 700 m pour "C" et 2 400 m pour "G", moitié des valeurs mesurées en 83, dans les mêmes conditions de vives eaux.

A cette époque, le temps de séjour dans l'estuaire d'une particule, entre la pointe Combi et l'embouchure (30 km), était estimé à une semaine. On peut s'attendre à ce que ce temps soit doublé dans les conditions actuelles d'une hydrodynamique de cycle de "dévasement". Il semble donc que l'influence marine, soit plus marquée à cette période.

IV-PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

1) Analyse statistique de mesures chimiques de l'étiage 88:

Une étude statistique par analyse factorielle des correspondances (fig 11), a été pratiquée sur toutes les données de Conductivité, de Silice(Si) et de Matière en suspension (MES). Chaque prélèvement a été codé sur quatre caractères alphanumériques:

1^{er} caractère: section de mesure (entre C et H).

2^e et 3^e caractère: heure marée ronde du prélèvement (de 00 à 12).

4^e caractère: quart d'heure de mesure dans l'heure ronde (A=0-15 mn, B=15-30 mn, C=30-45, D=45-60).

Commentaire:

Les deux premiers axes factoriels expliquent 97,3 % de la variance du nuage de points. Le premier axe représente en quelque sorte les échantillons de conductivité croissante (de droite à gauche). Il permet aussi de situer les prélèvements autour de deux pôles:

-Conductivité forte aux sections C et D, proches de l'embouchure, une heure avant ou après la pleine mer. On notera la distribution dans un ordre décroissant de CF (conductivité de fond), CM (mi-profondeur), et CS (surface), qui rendent bien compte de la distribution du coin salé dans l'estuaire, avec les valeurs de salinité élevées au fond et inférieures en surface.

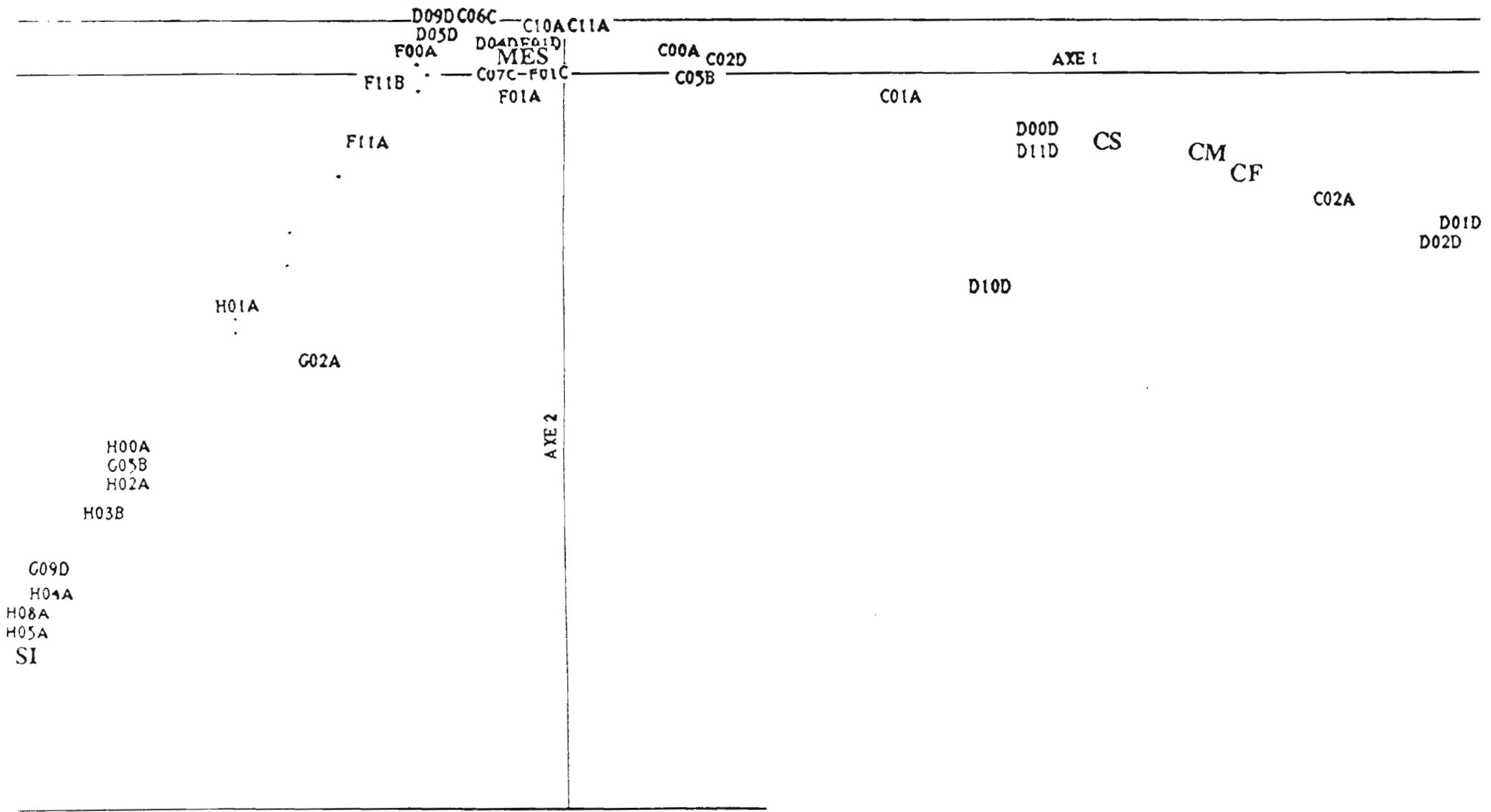


Figure 11: Analyse factorielle des correspondances sur les paramètres MES, Si et Conductivité, dans l'estuaire du Sine-Sarrouy (octobre 1988).

-MES (sections de C à F, toutes heures confondues). Ce sont tous les prélèvements traduisant la zone de mélange (situé non loin de l'intersection des deux axes) et de remise en suspension importante des vases d'embouchure.

Le second axe oppose les eaux chargées, issues du mélange, aux eaux proches du pôle Silice. On distinguera ici les eaux d'estuaires, des eaux peu touchées par le coin salé, où la silice n'est pas encore diluée par les eaux marines. La section H peut être considérée comme représentative des eaux fluviales pendant 8 heures sur les 12 d'un cycle de marée.

Sur la base de cette première analyse, on peut réaliser une classification sommaire des eaux de l'estuaire en trois catégories:

1- sections "C" à "F", représentatives de la zone de mélange, sous influence marine forte, avec remise en suspension des vases d'embouchure et propagation du biseau salé.

2 - section "G", domaine de transition, sous influence marine réelle, mais faible.

3 - section "H", domaine fluvial très faiblement touché par les eaux saumâtres, 3 à 4 heures par cycle au plus, avec des quantités minimales de sels.

La limite de la remontée saline, dans les conditions expérimentales de l'étiage 88, se situe vers la section "H", c'est à dire à environ 23 km de l'embouchure.

2) Mesures de conductivité:

2.1 Conductivité en fonction du temps:

Ces mesures ont été conduites à un pas de temps d'une demi-heure, en étiage 88. Elles permettent de réaliser un graphe de l'évolution de la conductivité en fonction du temps, pour chaque section (fig 12 à 18), de "C" à "I". Les valeurs de conductivité sont exprimées en milliSiemens par cm. En "H" et "I", on observe les valeurs habituelles de conductivité des eaux de fleuve, comprises entre 25 et 35 μ Siemens/cm.

2.2 Evolution de la conductivité en fonction de la distance

Ces mêmes données traduites en fonction de la distance à l'embouchure (fig 19), montrent la disparition du coin salé à 20 km de l'embouchure actuelle, c'est à dire entre les sections G et H.

2.3 Modélisation: relation conductivité - NaCl

Dans les eaux naturelles saumâtres, on sait que 95 % de la teneur ionique globale expliquant la conductivité électrique de l'eau est due à la présence des ions Na^+ et Cl^- . Pour quelques échantillons d'eau, nous avons pratiqué, pour étalonnage, le dosage des ions Sodium et Chlore.

En étiage d'octobre 88, on obtient la relation suivante (fig 20):

$$\{\text{NaCl}\} = 0,548 \times \{\text{Cv}\} - 0,142 \quad 48 \text{ valeurs, } r = 0,99 \quad (1)$$

En décembre 87, une relation voisine est obtenue (fig 21):

$$\{\text{NaCl}\} = 0,682 \times \{\text{Cv}\} - 0,399 \quad 66 \text{ valeurs, } r = 0,99 \quad (2)$$

Ces relations seront respectivement utilisées pour traduire la conductivité en teneur de NaCl, pour chacune des campagnes. La différence entre les deux pentes ne s'explique que par une variation de la constante de cellule, lors de la mesure de la conductivité. Pour éviter toute dérive trop importante dans ces étalonnages, ceux-ci sont répétés à chaque campagne de mesure.

2.4 Relation Cl^- / somme des ions Na^+ Cl^-

Les deux campagnes de décembre 87 et d'octobre 88, nous ont permis de retenir deux corrélations entre Cl^- et la somme des ions Na^+ et Cl^- . Ces relations de bonne qualité, permettent de simplifier la procédure d'étalonnage, liant la conductivité et NaCl, en diminuant le nombre d'analyses de laboratoire (fig 22).

ESTUAIRE DU SINNAMARY

SECTION C / VERTICALE (2)

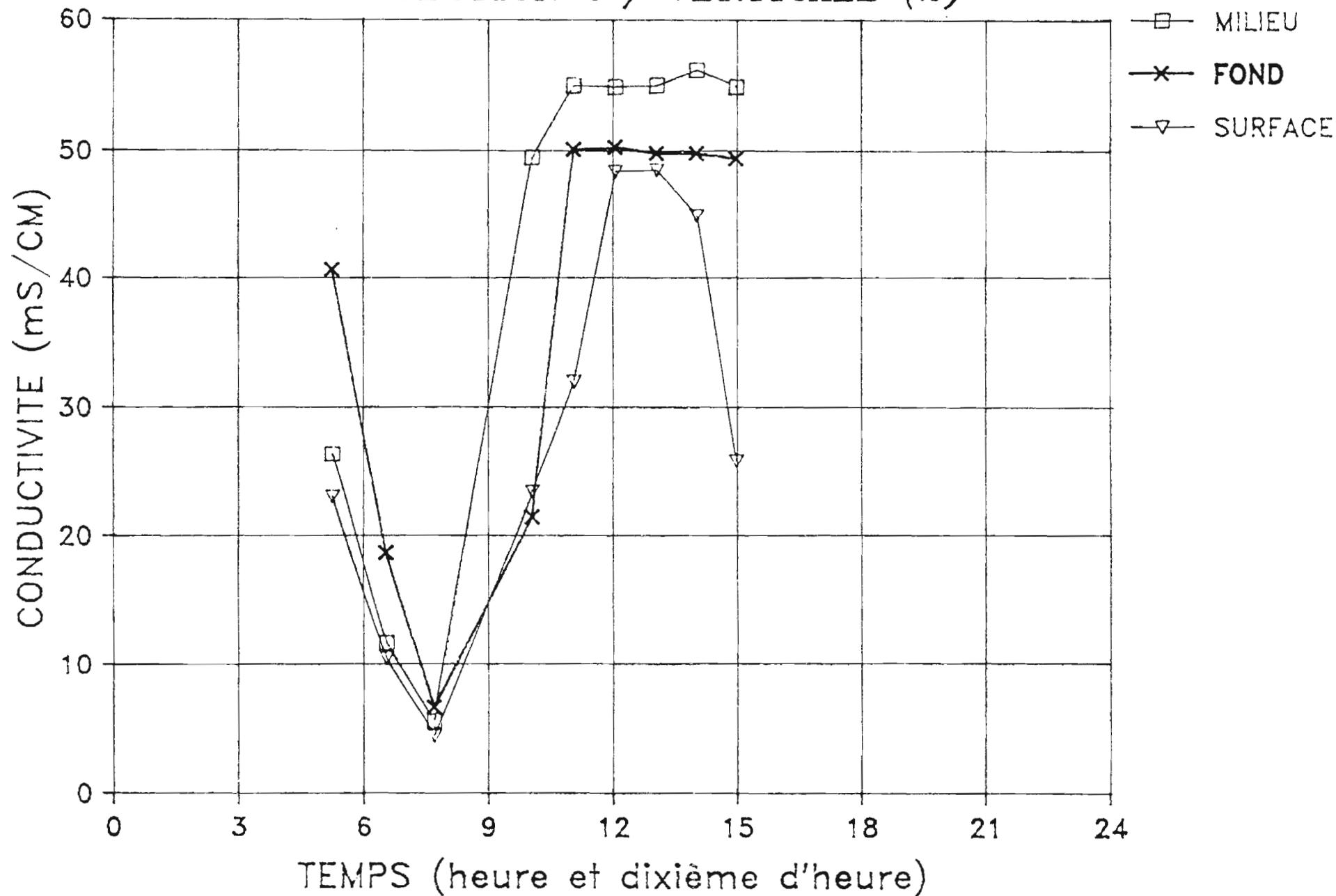


FIG12. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond. Section C, verticale 2 - oct 88 -

ESTUAIRE DU SINNAMARY

SECTION D / VERTICALE 2

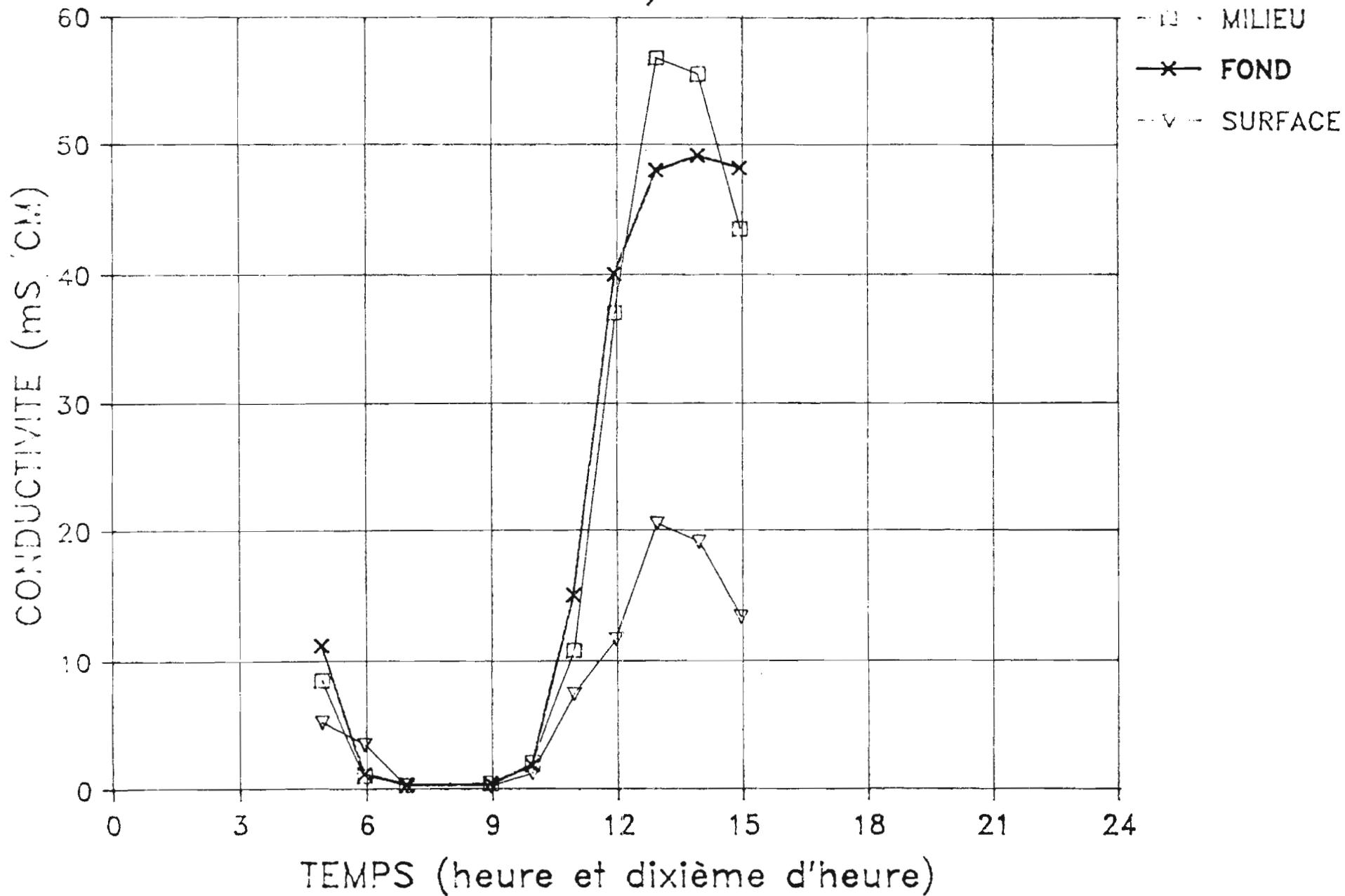


FIG13. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond. Section D, verticale 2 - oct 88 -

ESTUAIRE DU SINNAMARY

SECTION E / VERTICALE 2

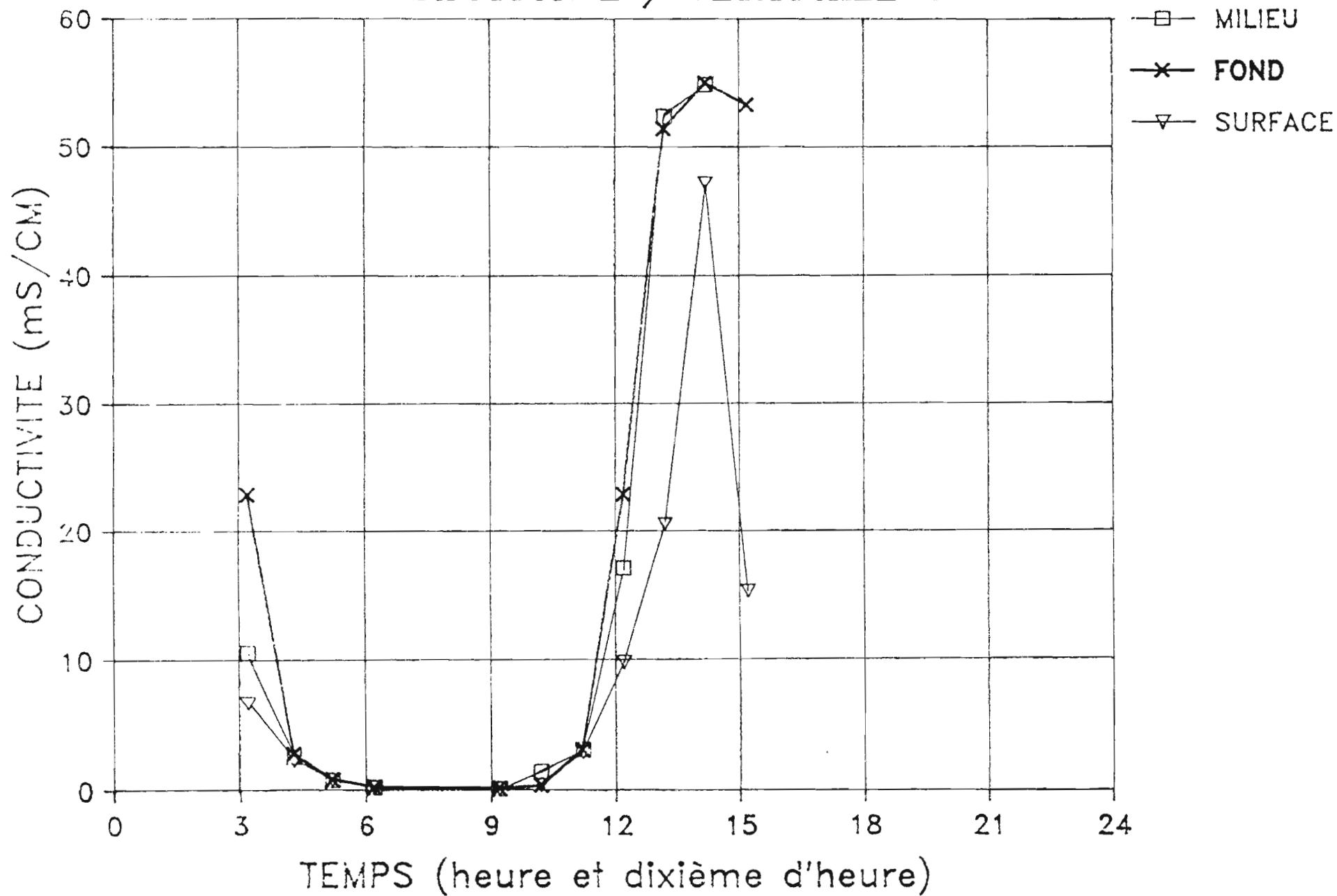


FIG14. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond. Section E, verticale 2 - oct 88 -

ESTUAIRE DU SINNAMARY

SECTION F / VERTICALE 2

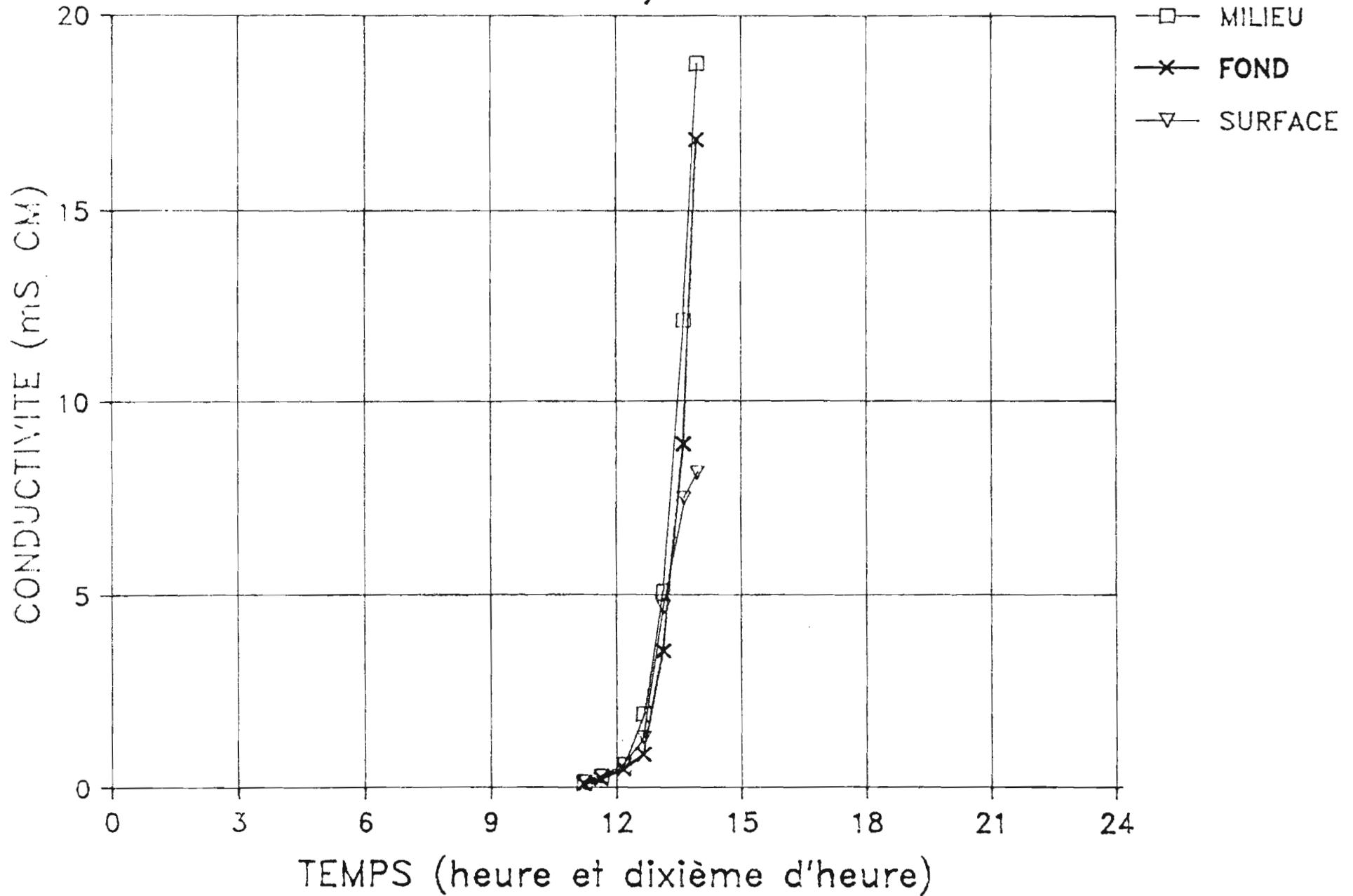


FIG15. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond. Section F, verticale 2 - oct 88 -

ESTUAIRE DU SINNAMARY

SECTION G / VERTICALE 2

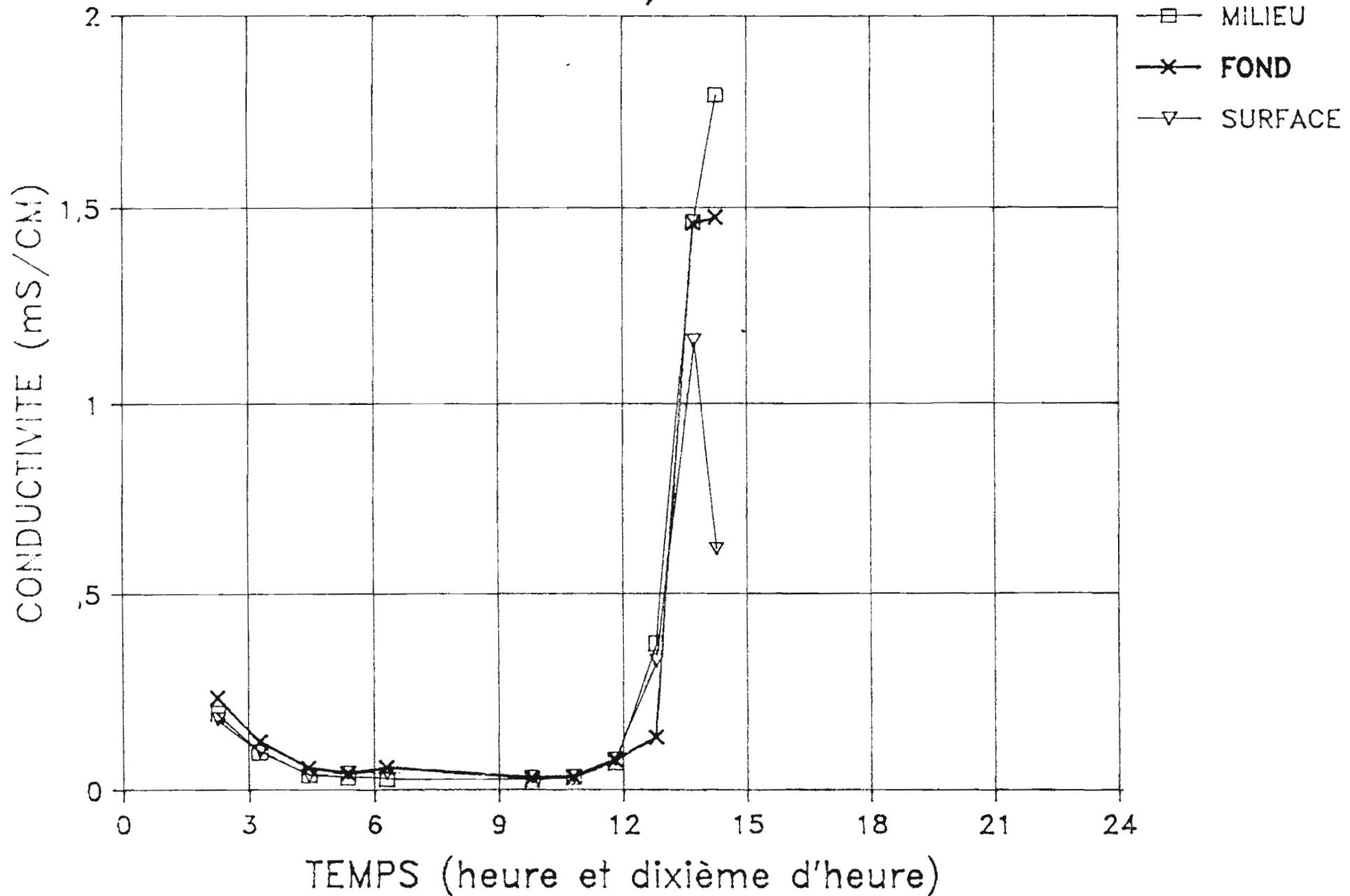


FIG16. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond. Section G, verticale 2 - oct 88 -

ESTUAIRE DU SINNAMARY

SECTION H / VERTICALE 2

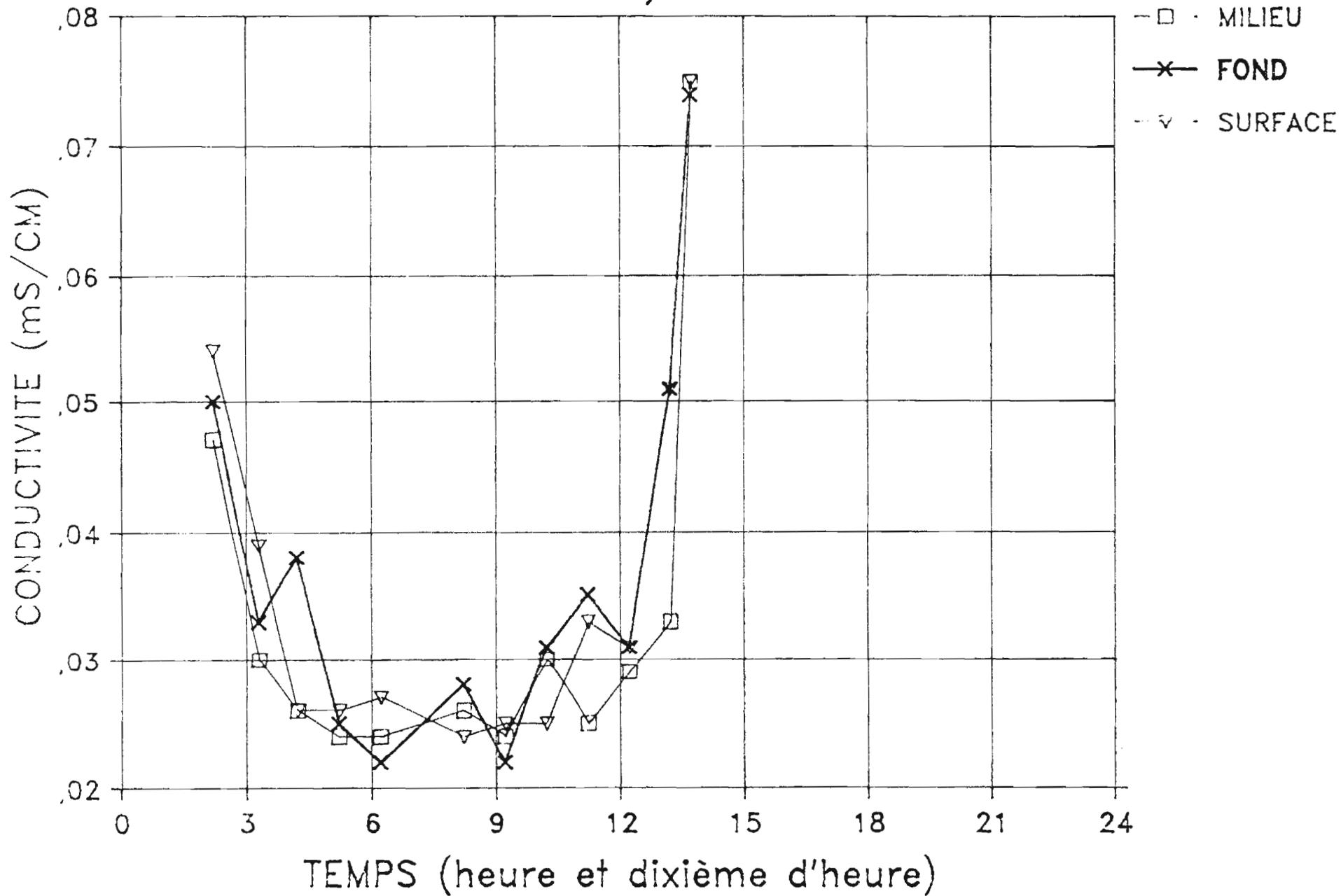


FIG17. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond. Section H, verticale 2 - oct 88 -

ESTUAIRE DU SINNAMARY

SECTION I / VERTICALE 2

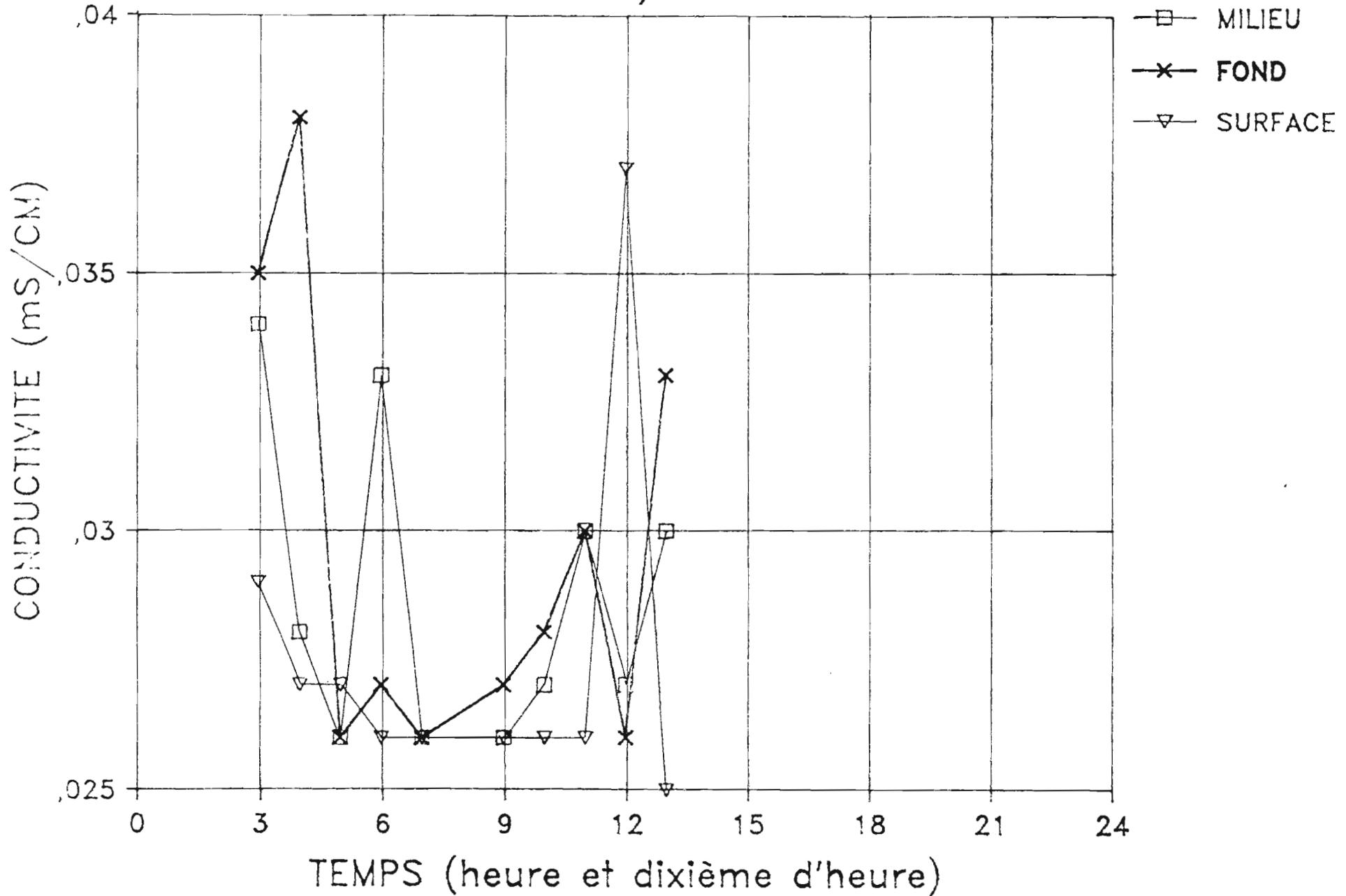


FIG18. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond. Section i, verticale 2 - oct 88 -

FIG 20 : Relation conductivité / NaCl

Oct 1988

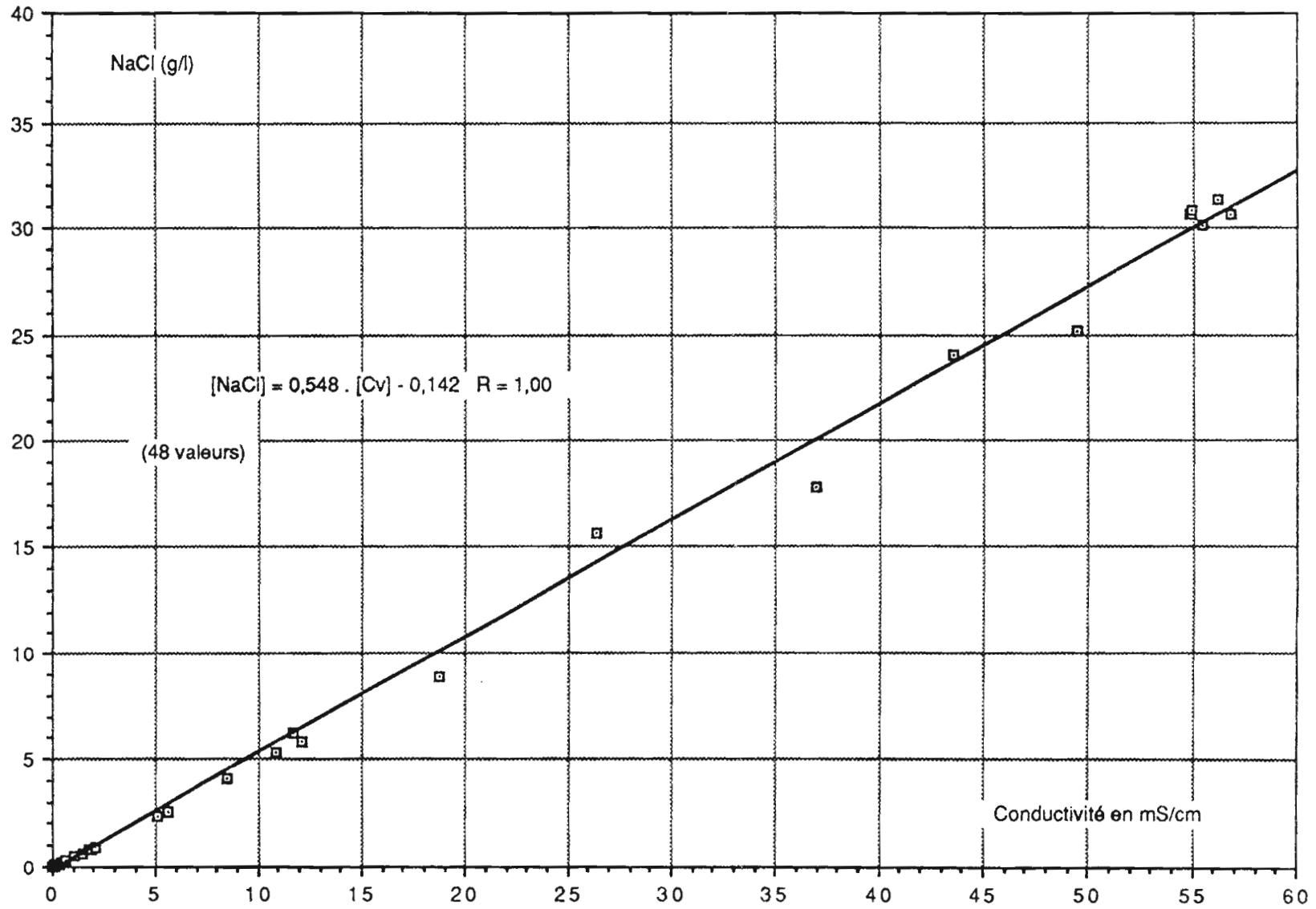
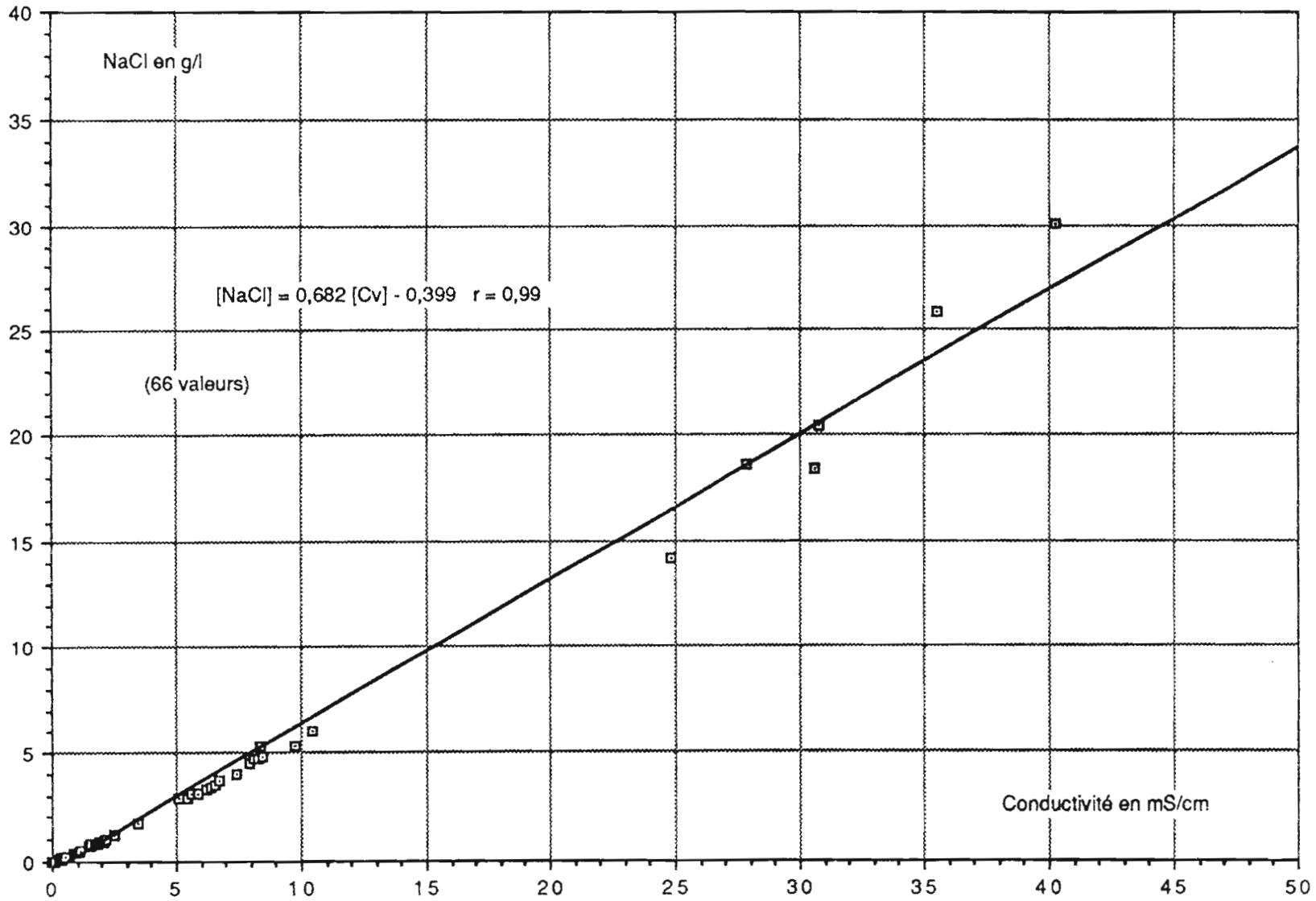


FIG 21 : Relation Conductivité / NaCl

Déc 1987



Il est obtenu:

Campagne de décembre 87,

$$\{\text{NaCl}\} = 1,57 \times \{\text{Cl}\} - 5,61 \quad 33 \text{ valeurs} \quad (3)$$

Campagne d'octobre 88,

$$\{\text{NaCl}\} = 1,50 \times \{\text{Cl}\} - 13,5 \quad 41 \text{ valeurs} \quad (4)$$

Ces relations permettent d'exploiter les données du 3 mai 88, dont les analyses ont porté sur la conductivité et le Chlore, sous forme ionique. On obtient la quantité de NaCl présent dans ces eaux par une relation déduite des équations (3) et (4), recalculée sur tous les points:

$$\{\text{NaCl}\} = 1,52 \times \{\text{Cl}\} + 31,7 \quad r = 1 \quad 74 \text{ valeurs} \quad (5)$$

A des fins de vérification, les valeurs de NaCl obtenues sont corrélées à la conductivité mesurée en mai 88 et donnant la relation déduite (fig 23):

$$\{\text{NaCl}\} = 0,672 \times \{\text{Cv}\} - 0,063 \quad 75 \text{ valeurs} \quad (6)$$

Cette relation est cohérente avec les résultats expérimentaux utilisés pour construire les équations (1) et (2)

3. Evolution de la salinité en fonction de la distance à l'embouchure:

Afin de visualiser l'évolution des concentrations dans l'estuaire du Sinnamary, il est construit un graphe, pour chaque campagne, toutes heures confondues, de la quantité de NaCl déduite et mesurée (fig 24, 25 et 26):

Dans tous les cas, le coin salé s'atténue fortement à partir de la section "G", où les valeurs sont toujours inférieures à 1 g/l. A partir de la section "H", on peut considérer que l'on a des eaux purement fluviales dans 80 % des mesures. Rappelons que la fourchette des débits pour ces trois campagnes, à la station de Petit Saut, est de 130 à 90 m³/s, c'est à dire d'un ordre de grandeur du débit réservé prévu par le projet.

FIG 22 a : Relation entre Cl⁻ et la somme Na + Cl

16 et 17 déc 1987

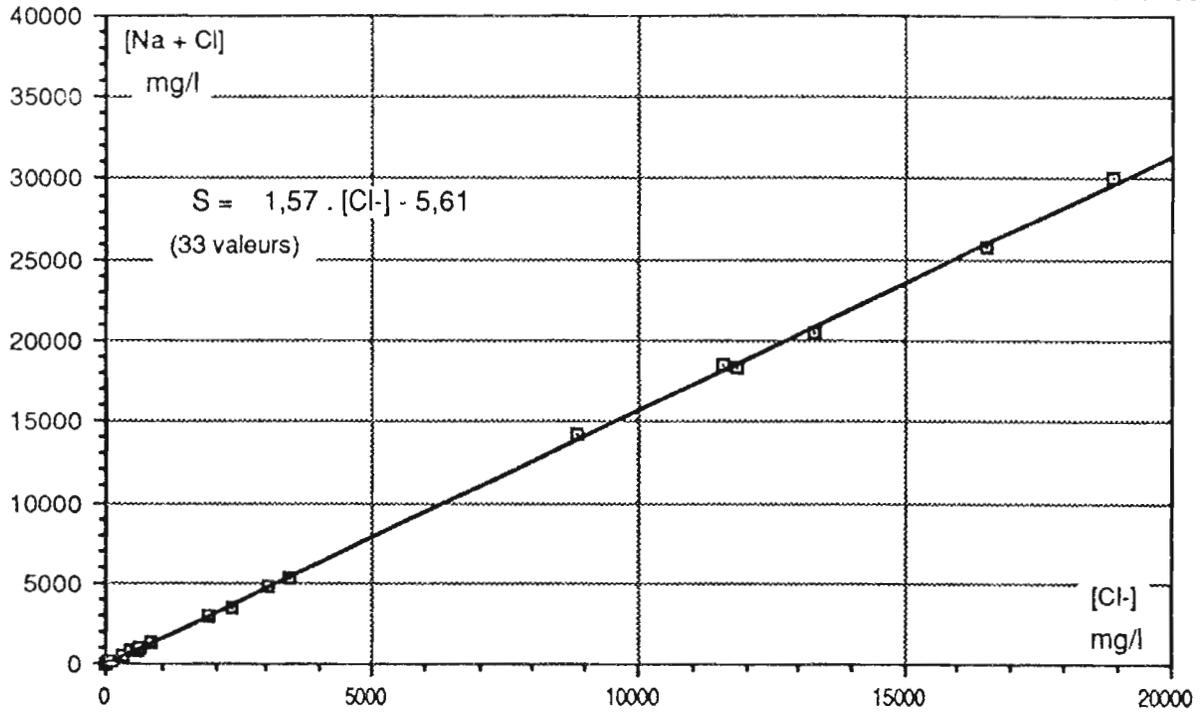


FIG 22 b : Relation entre Cl⁻ et la somme Na + Cl

Oct 1988

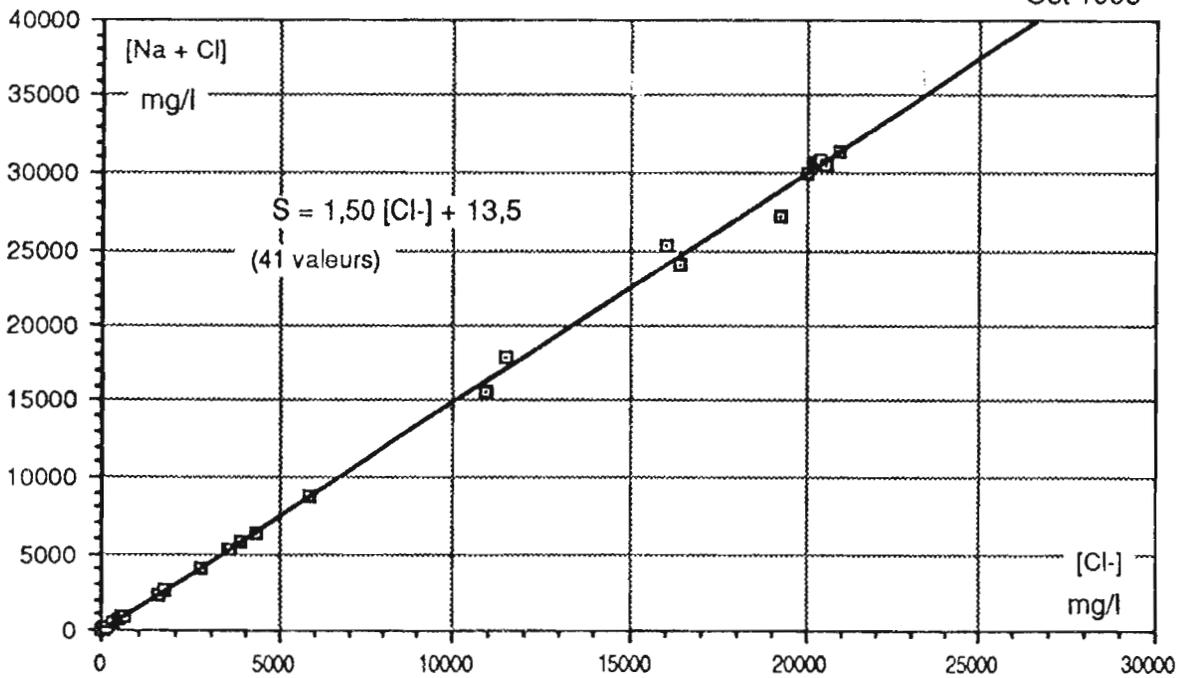


FIG 23 : Relation déduite Cv/NaCl

Mai 88

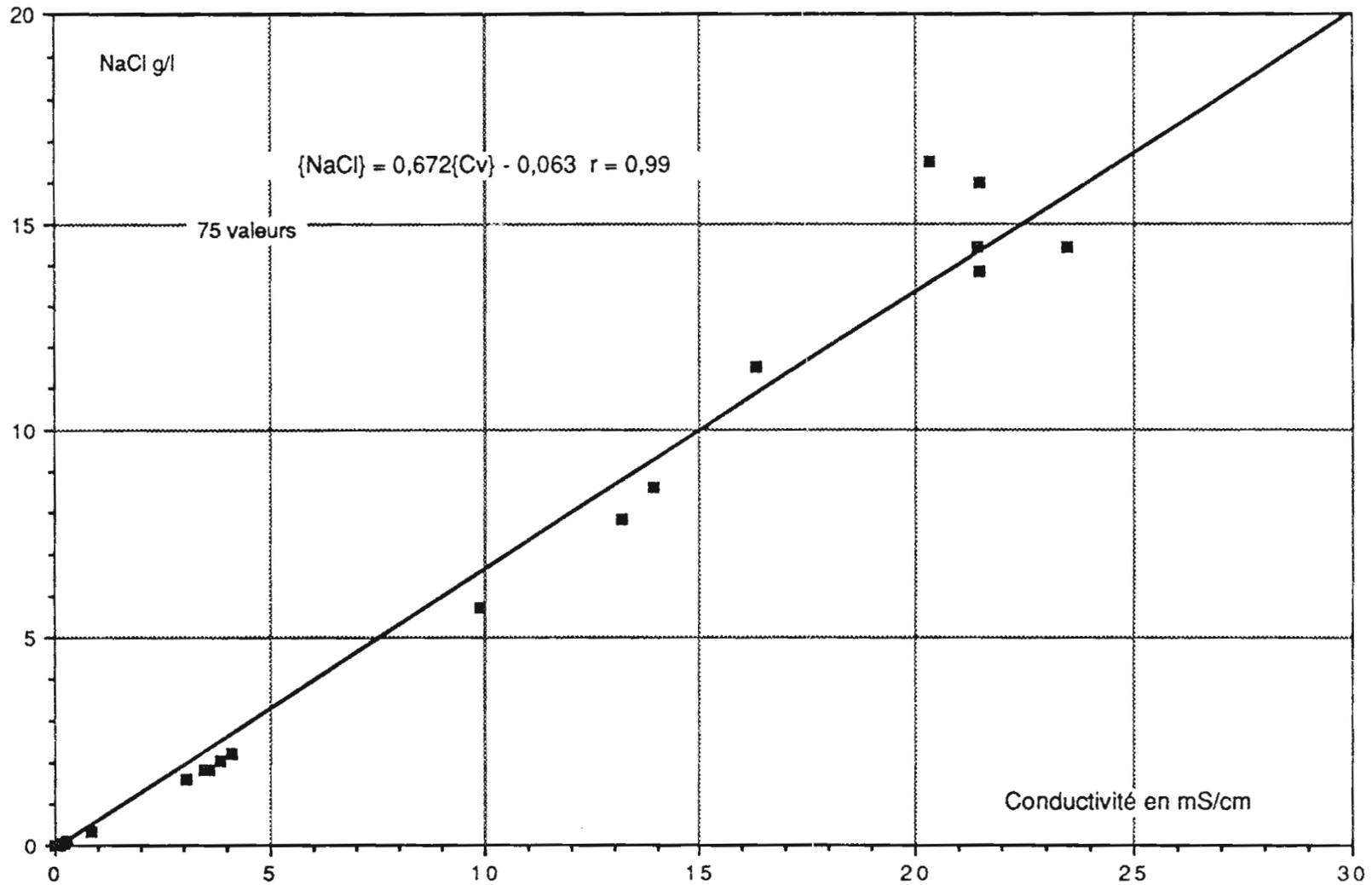


FIG 24 : Salinité et distance à l'embouchure

Déc 87

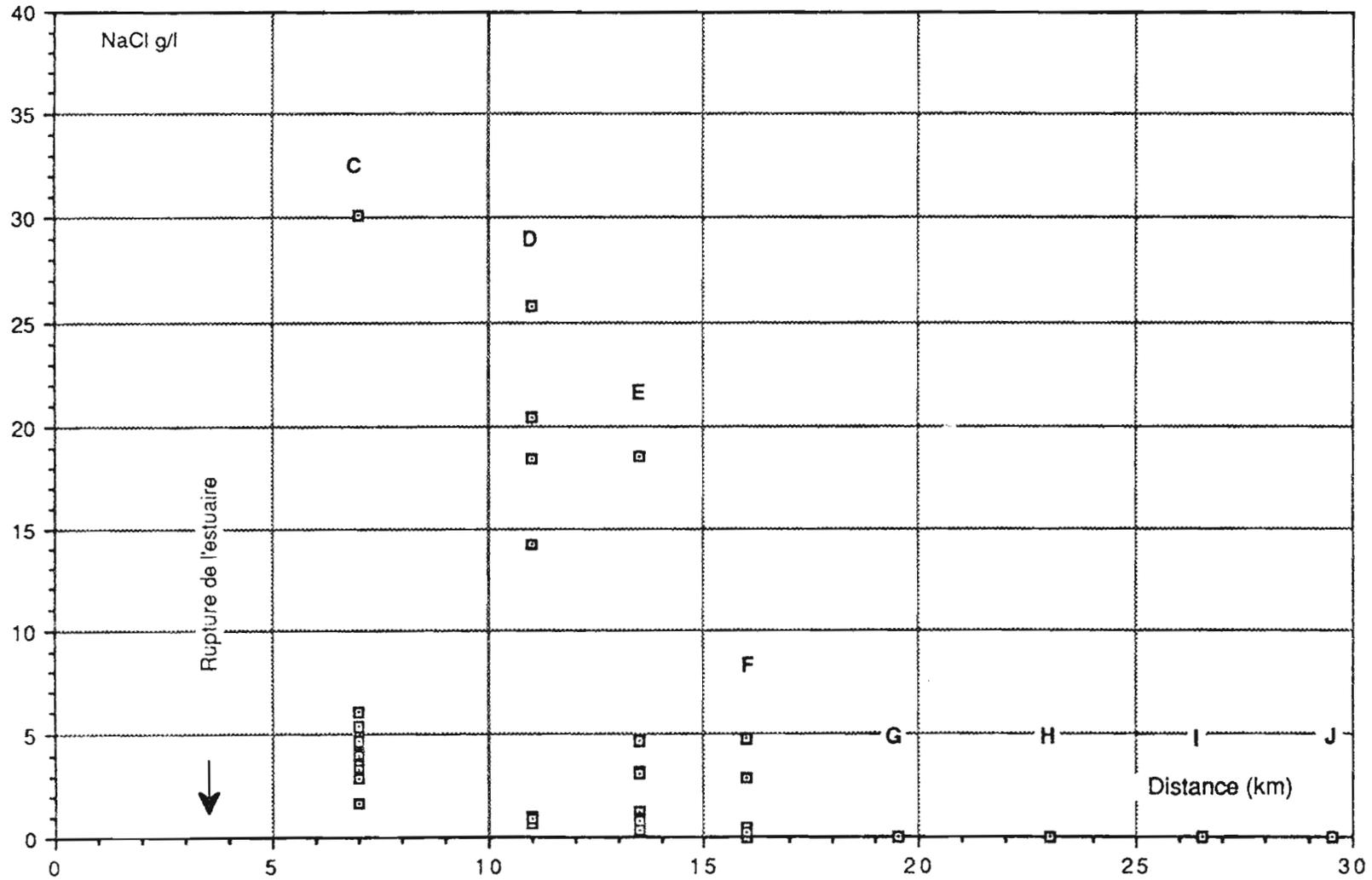


FIG 25 : Salinité et distance à l'embouchure

Mai 88

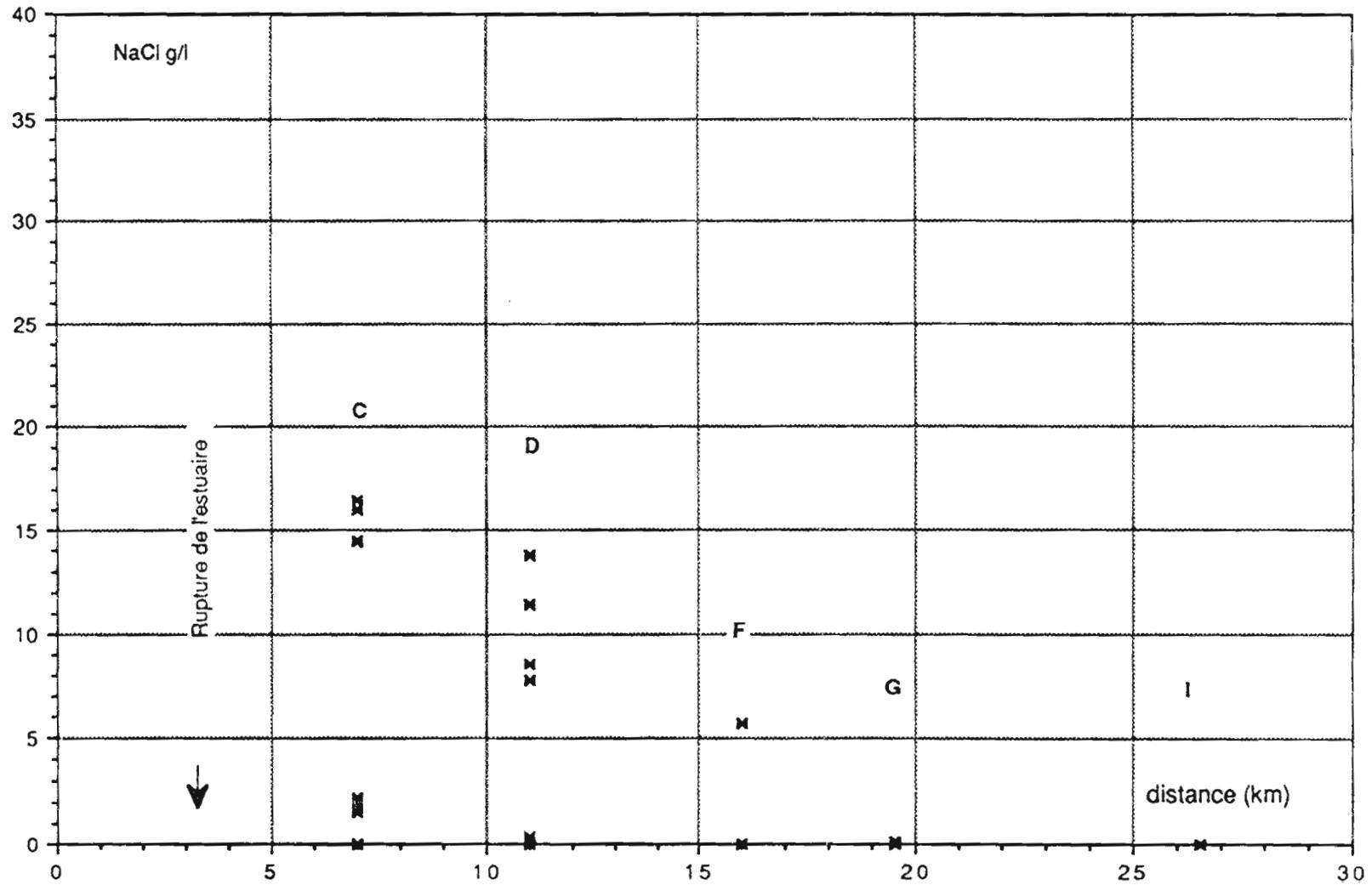
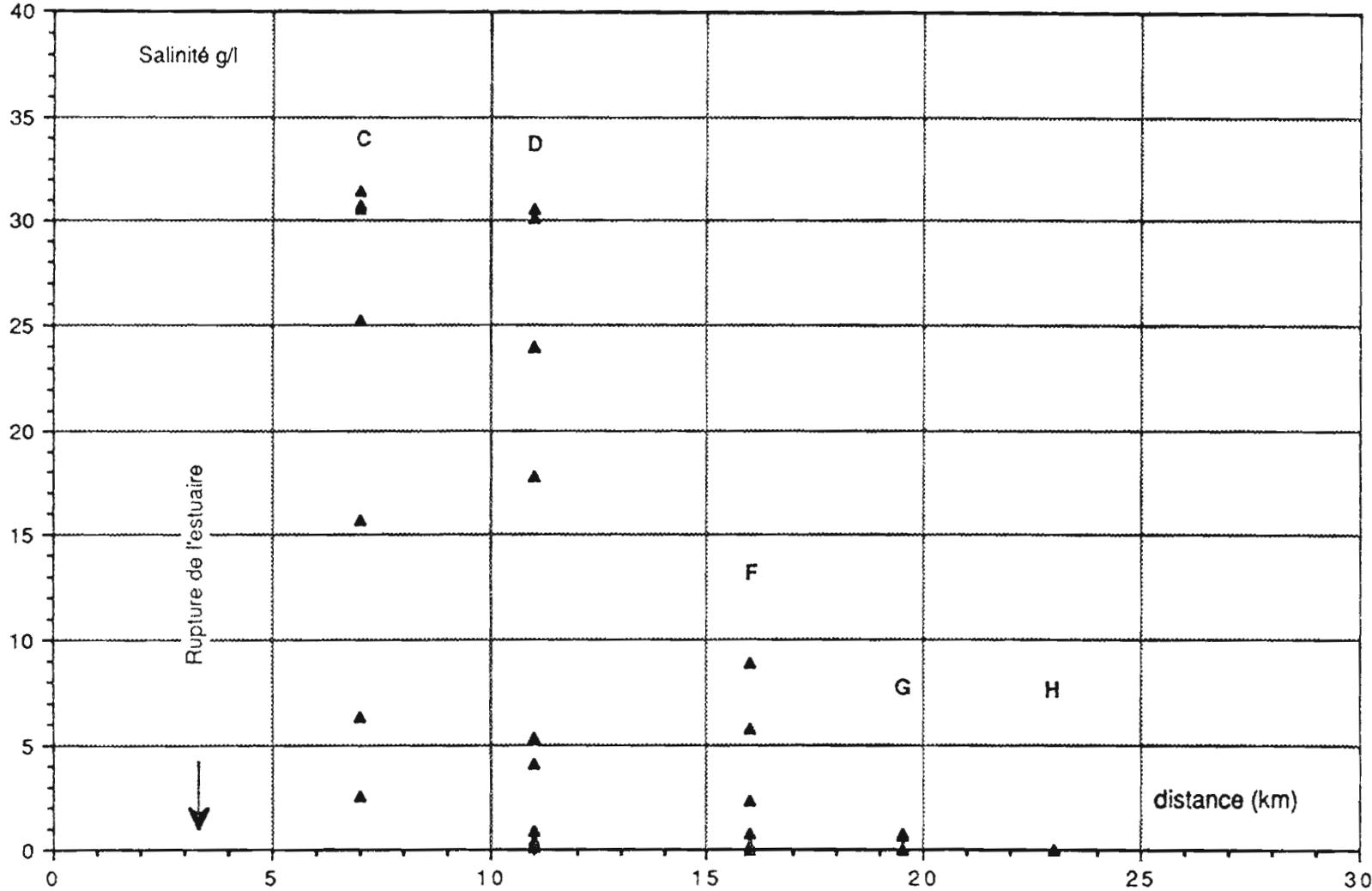


FIG 26 : Salinité et distance à l'embouchure

Octobre 88



Dans tous les cas également, on constate que la section "D" est fréquentée à marée basse, par au moins une valeur inférieure à 1 g/l.

Les valeurs globalement inférieures enregistrées en mai 88 sont probablement dues aux conditions expérimentales qui n'ont pas permis de mesurer le maximum de flot situé vers 20 heures. Un effet de dilution par les précipitations est à écarter, puisque celles - ci sont demeurées très faibles fin avril et début mai.

***Conclusion:**

La confrontation de ces résultats avec les mesures de la campagne de 1983 montre bien une remonté de l'influence marine vers l'amont depuis l'ouverture de la brèche de mars 1987. Avant la rupture de la rive droite, le contact eaux fluviales - eaux saumâtres (fixé à 10 mg/l de NaCl), oscillait entre les sections "E" et "G", pour tous les coefficients de marée (LOINTIER, 1984). Les teneurs en NaCl, au pont de Sinnamary, étaient de l'ordre de 1 g/l. Depuis, nos mesures montrent qu'à cet endroit, situé entre les sections "E" et "F", la valeur maximale a augmentée d'un facteur 10. De même, la limite de l'extension maximale du biseau salé est repoussée de la section "G" vers la section "H", c'est à dire de 4 km vers l'amont, valeur comparable au déplacement vers l'amont de l'embouchure du Sinnamary.

Si l'on admet une certaine linéarité dans la relation liant le déplacement de l'embouchure et la progression du biseau salé vers l'amont, il faudrait que l'embouchure remonte de 7 km pour que la prise d'eau douce de la pointe COMBI alimentant la ville de Sinnamary soit touchée par la remonté saline. Cette limite correspond à une ouverture au niveau de la section "D", près du canal PHILLIPPON. Bien que cette situation ne semble pas évoluer dans ce sens - le banc de Kourou aura sans doute atteint la zone avant son ouverture complète - rappelons que la situation a été observée au début de ce siècle (YAYER, 1937) et que le cordon sableux de la route de l'anse (section "D") était la ligne de rivage de l'époque.

4) Matières en suspension:

Les matières en suspension ont été mesurées aux sections "C", "D", "F", "G", "H", durant la campagne d'octobre 88. Comme la plupart des éléments analysés, autres que la conductivité, ceux-ci proviennent d'un prélèvement de deux litres effectué à mi-profondeur de la verticale numéro 2, au milieu de la section de mesure. Les échantillons ont été filtrés à $0,8\mu\text{m}$.

SECTION "C":

Les quantités de MES varient à cette section, entre 200 et 1200 mg/l, pendant un cycle de marée complet. La superposition des données aux graphes des débits oscillants, montre une évolution parfaitement centrée sur le maximum des débits (fig 27), confirmant le mécanisme de remise en suspension des vases d'embouchure par les courants de flot, et dans une moindre mesure, par les courants de jusant (cf points de 11h30 et 20 heures). Il faut cependant remarquer, à ce niveau de l'estuaire, que les valeurs sont faibles, devant certaines quantités mesurées à d'autres embouchures et qui atteignent parfois 40 g/l (L.C.H.F., 1965, 1967, BELLESORT et al., 1968).

Afin de présenter ces résultats sous un aspect descriptif et homogène pour toutes les sections, nous avons choisi de faire figurer sur le même graphique, l'évolution conjointe de la salinité (fig 28). On y remarque la correspondance des variations de salinité et de turbidité pendant la fin du jusant et le début du flot jusqu'à son maximum. Ensuite, les deux variables se dissocient, et la salinité demeure à 30 g/l, pendant que les courants s'annulent, et que le jusant s'installe, entraînant une chute des teneurs en MES à 100 mg/l.

SECTION "D":

L'amplitude des variations du "signal" MES est réduite de moitié, par rapport à la section précédente (fig 29), et présente des valeurs proches de zéro. Une comparaison avec les hauteurs (et les débits mesurés en C et F), montre que ces faibles valeurs de MES se situent à la fin du jusant et durent environ 4 heures. Le "pic" de MES se situe, à la différence de la section précédente, une heure après la marée haute, c'est à dire, à la seconde partie de flot, voire jusqu'à la

FIG 27 : SECTION C : Débits et MES

Date: 26/10/88

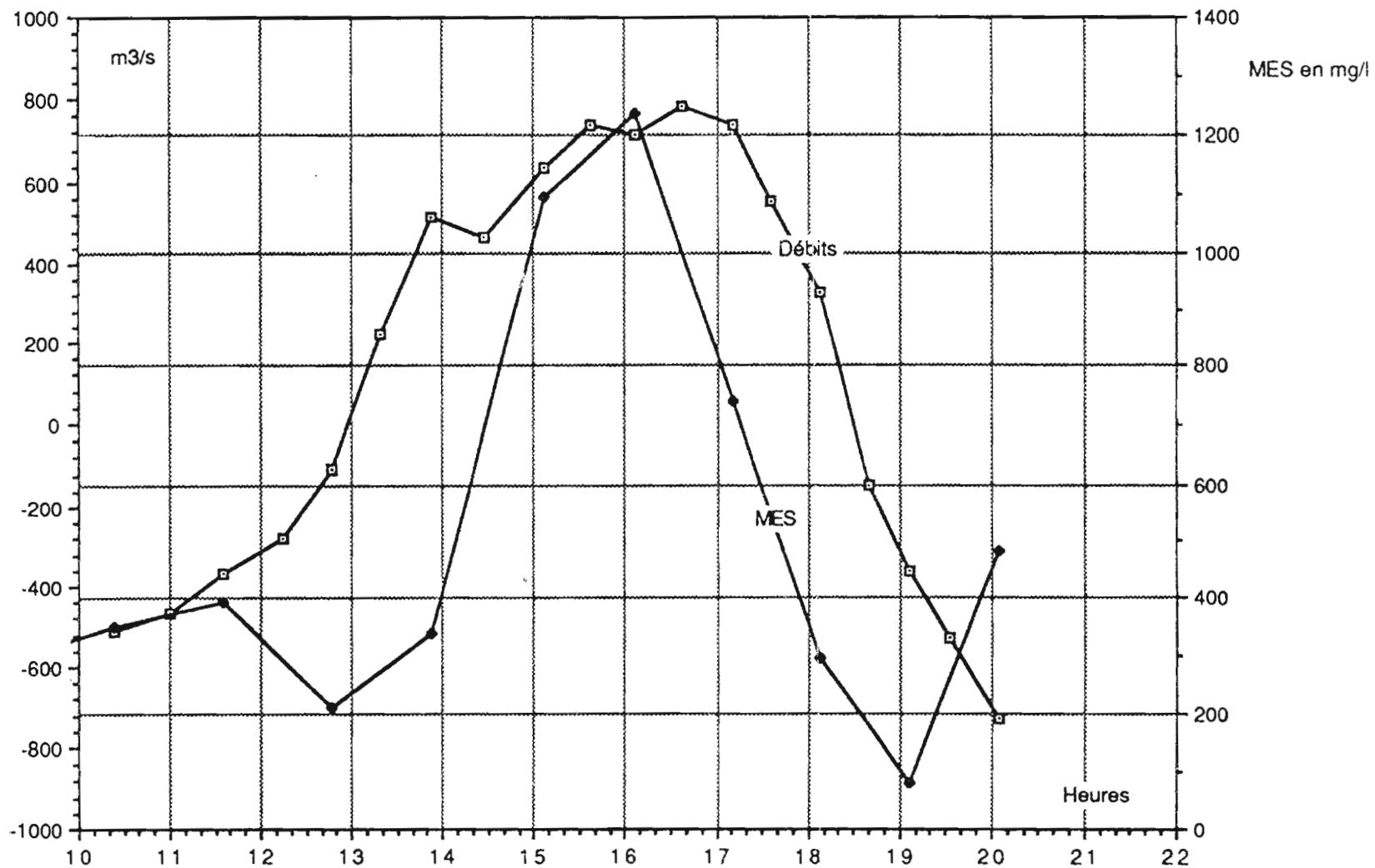
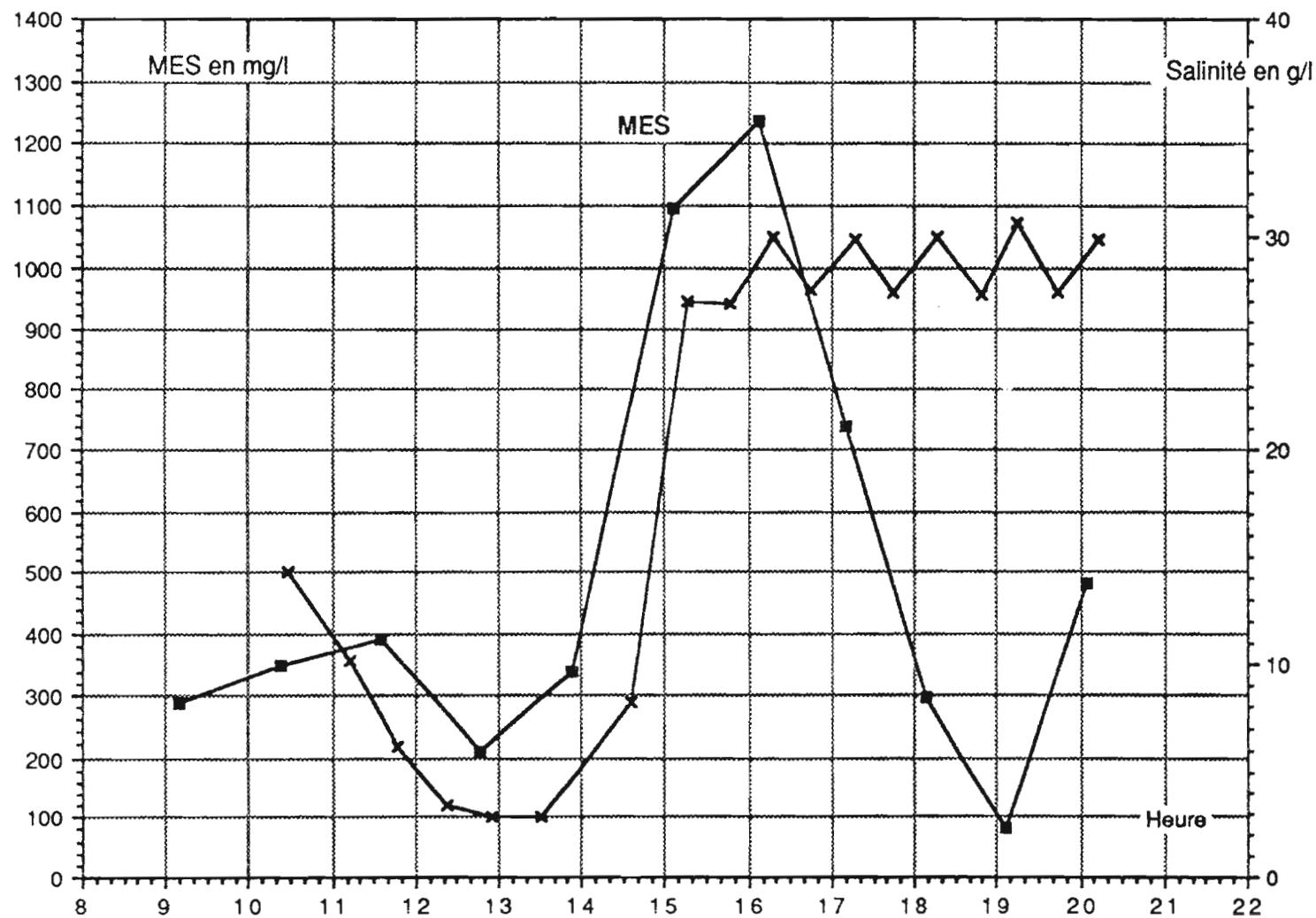


FIG 28 : Section C - MES et salinité -

26 oct 88



renverse. Cette section accuse donc un déphasage, entre le mécanisme dynamique des courants de marée et l'évolution des MES.

L'évolution de la salinité se corrèle grossièrement à la variable MES, mais les deux maxima (33 g/l le matin et 11 g/l le soir) ne sont pas ceux attendus: en effet, la marée du matin est plus faible (3,10 m) que la marée du soir (3,30 m). Sans présumer d'une explication à ce phénomène, il faut rappeler l'hétérogénéité radiométrique constatée sur les documents SPOT, dans cette partie de l'estuaire (cf § n°8), où l'on observe une "segmentation transversale" des turbidités de surface qui s'accroît vers l'amont. La section "D" serait donc le siège de brassage des eaux océaniques et fluviales

SECTION "F":

A cette section de l'estuaire, on constate encore une évolution des MES fortement dépendante de la courbe des débits. Les valeurs mesurées ont oscillé entre 90 mg/l et 650 mg/l. Le maximum enregistré se produit à la fin du flot, lorsque les débits décroissent vers le point de débit nul correspondant à l'étale des courants. Sur cette partie de cycle qui a été analysée, on retrouve les aspects décrits en section "D".

La comparaison avec la courbe de salinité (fig 30) montre l'augmentation des valeurs vers la fin du flot. Celles-ci ont globalement chuté, sur le cycle complet, d'un facteur 3, alors que les teneurs en MES sont du même ordre de grandeur qu'en "D".

SECTION "G":

Dans cette partie médiane de l'estuaire, on a un exemple identique à ce qui a été observé sur le Kourou (ROCHE M.A., 1976): les débits de jusant font augmenter la teneur en MES, dans une proportion légèrement inférieure à celles du flot (fig 31). On observe ainsi deux maxima des valeurs de matières en suspension par cycle de marée. Les déphasages sont l'ordre de deux heures après les maxima de courants.

A l'inverse, la courbe de salinité demeure inférieure à 0,1 g/l pendant tout le jusant et une grande partie du flot. Le "pic" de salinité apparaît peu de temps après l'étale des courants (fig 32) de flot. On observe un seul maximum de salinité par cycle de marée.

FIG 29 : Section D - MES et salinité -

26 oct 88

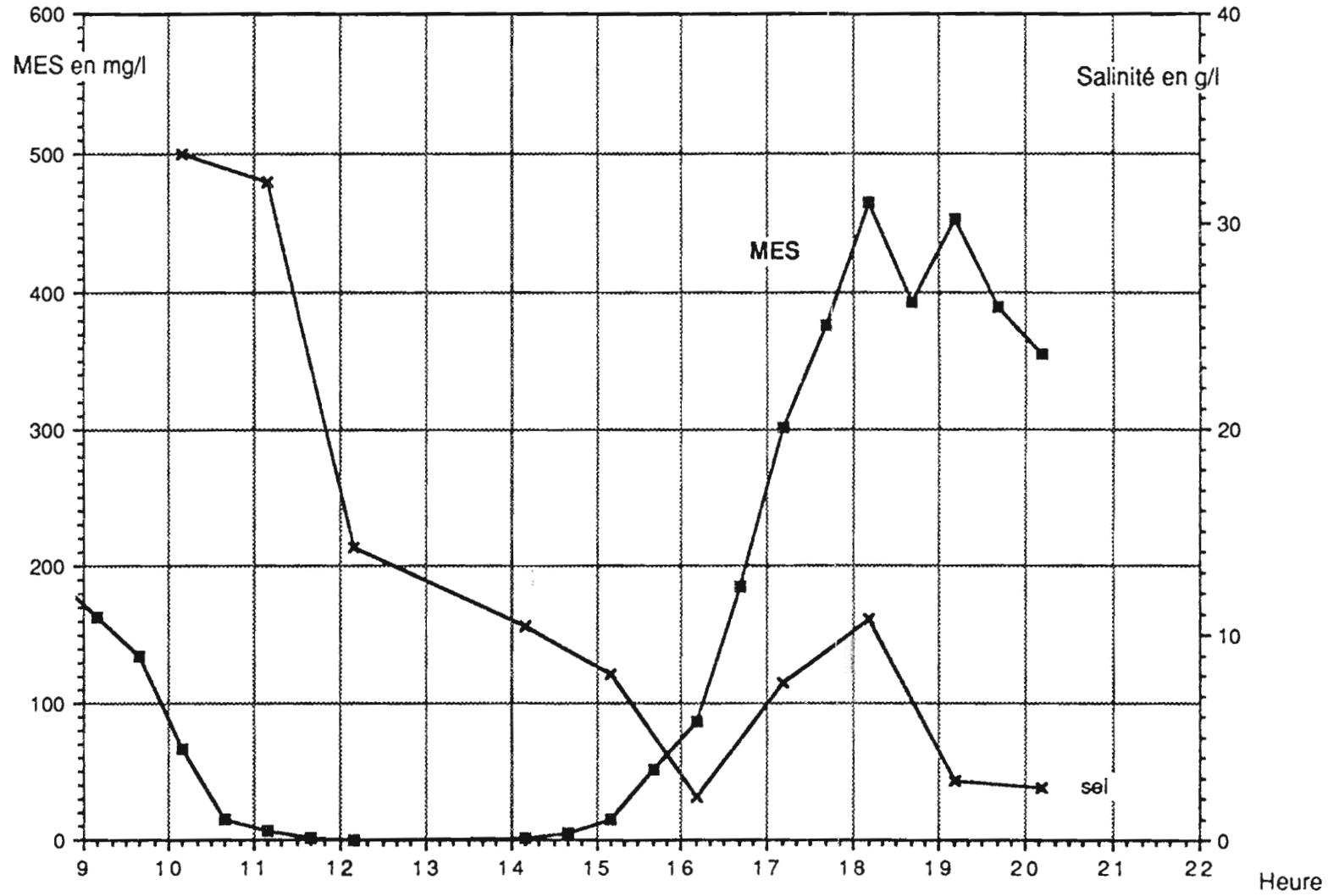


FIG 30 : Section F - MES et salinité -

25 oct 88

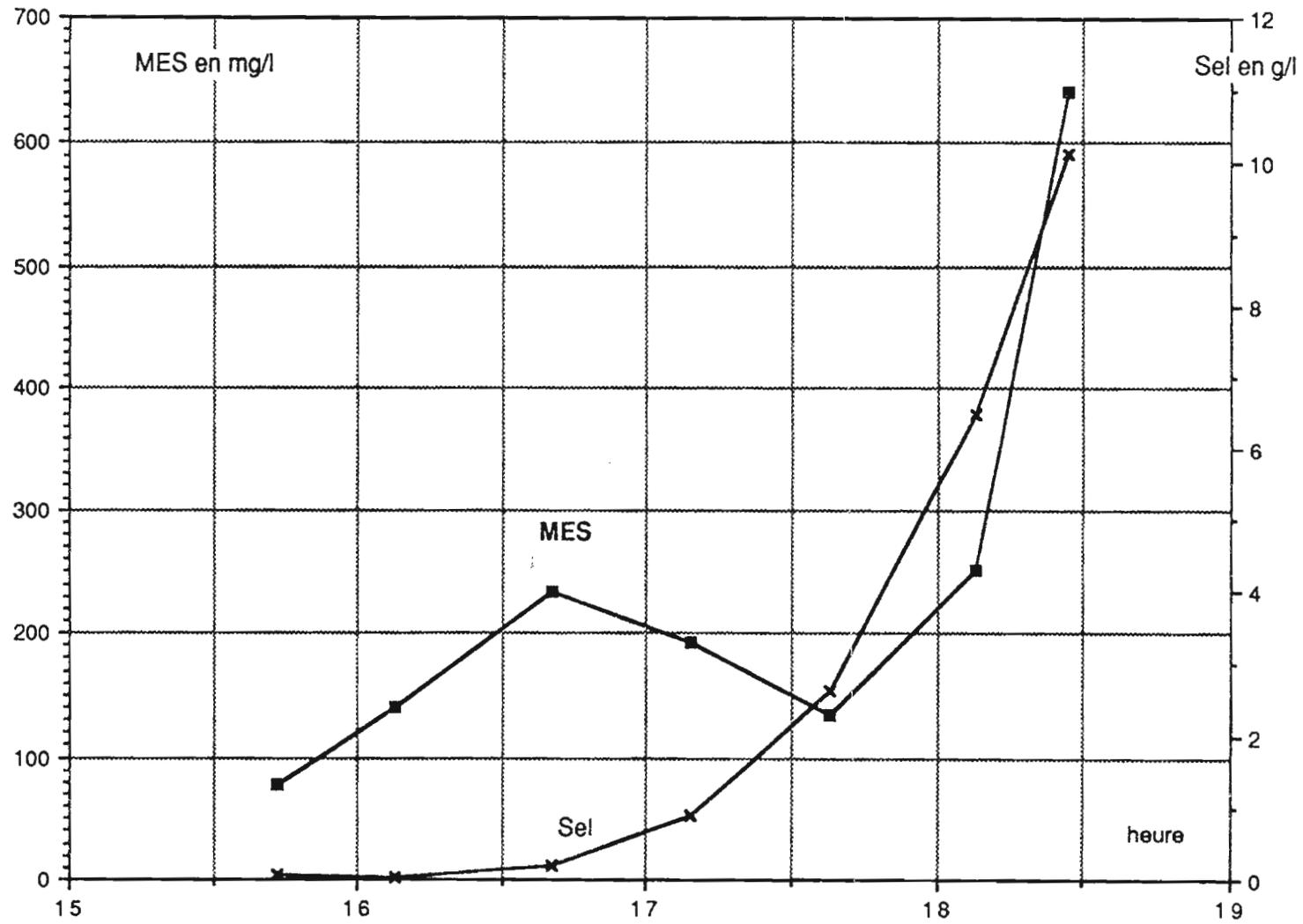
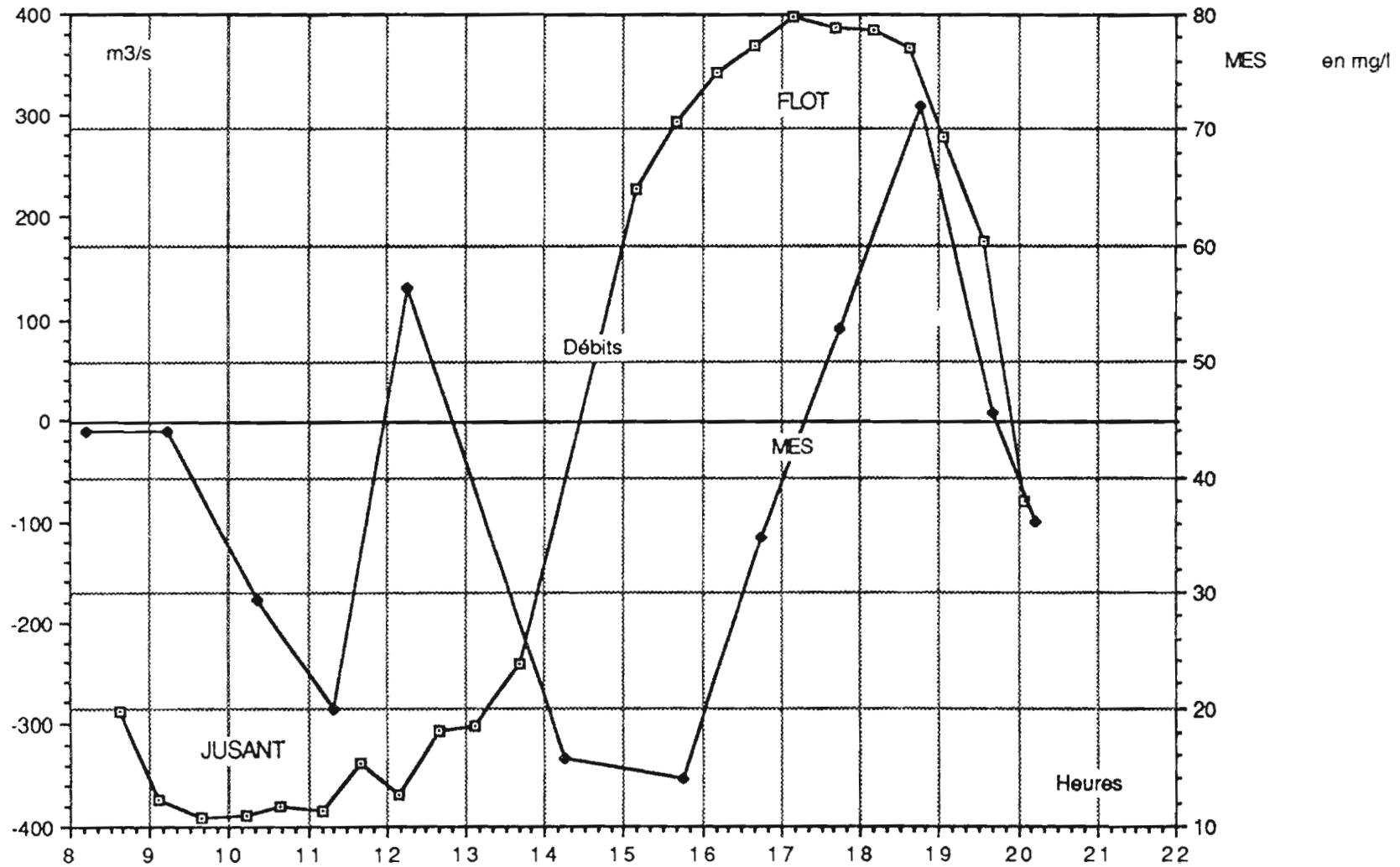


FIG 31 : SECTION G - Débits et MES -

Date: 27/10/88



Les déphasages sont de l'ordre de 3 heures après le maximum de courant.

Enfin, les teneurs en NaCl et en MES ont chuté d'un facteur 10 par rapport à la section "F".

SECTION "H":

Dans cette partie où les mesures chimiques démontrent un caractère fluvial des eaux, on constate encore une légère augmentation des paramètres salinité et MES à la fin du flot (fig 33). Nous sommes à la limite de l'influence des effets océaniques pour les caractères chimiques, tandis qu'il existe encore un marnage de l'ordre du mètre.

La salinité a chuté globalement d'un facteur 10, par rapport à la section "G", tandis que les teneurs en MES n'ont diminué que d'un facteur deux.

5) Mesures de pH et de température:

La campagne de décembre 87 a donné l'occasion de faire deux profils, de l'embouchure à la section "i", pour ces paramètres mesurés à la sonde portable "Horiba". Compte tenu de la précision des mesures de pH sur le terrain, des barres d'erreurs ont été portées sur les graphiques (+ ou - 0,2 unités pH).

Le pH des eaux marines est compris entre 7 et 8, en général. C'est ce qui a été mesuré au voisinage de l'embouchure les 16 et 17 décembre. Un prélèvement d'eau a été réalisé à chaque point de mesure de pH. Ceci permet de comparer ces valeurs à la salinité (fig 34 et 35). On remarquera la "stabilisation" des valeurs de pH à 5 - 5,5, à partir des concentrations en sels comprises entre 1 et 3 g/l. L'acidité des eaux fluviales se traduit donc encore dans les zones de brassage, alors que les eaux ont déjà un caractère saumâtre.

Les profils de température (fig 36 et 37) montrent une décroissance vers l'amont de l'ordre de 1 à 2 degrés, avec une variation importante constatée le 16 décembre uniquement, entre 10 et 15 km de l'embouchure, au niveau de la ville de Sinnamary. La température des eaux de l'embouchure est de l'ordre de 28 - 29 degrés, tandis que celle du fleuve est à 27 °C.

FIG 32 : Section G - MES et salinité -

27 oct 88

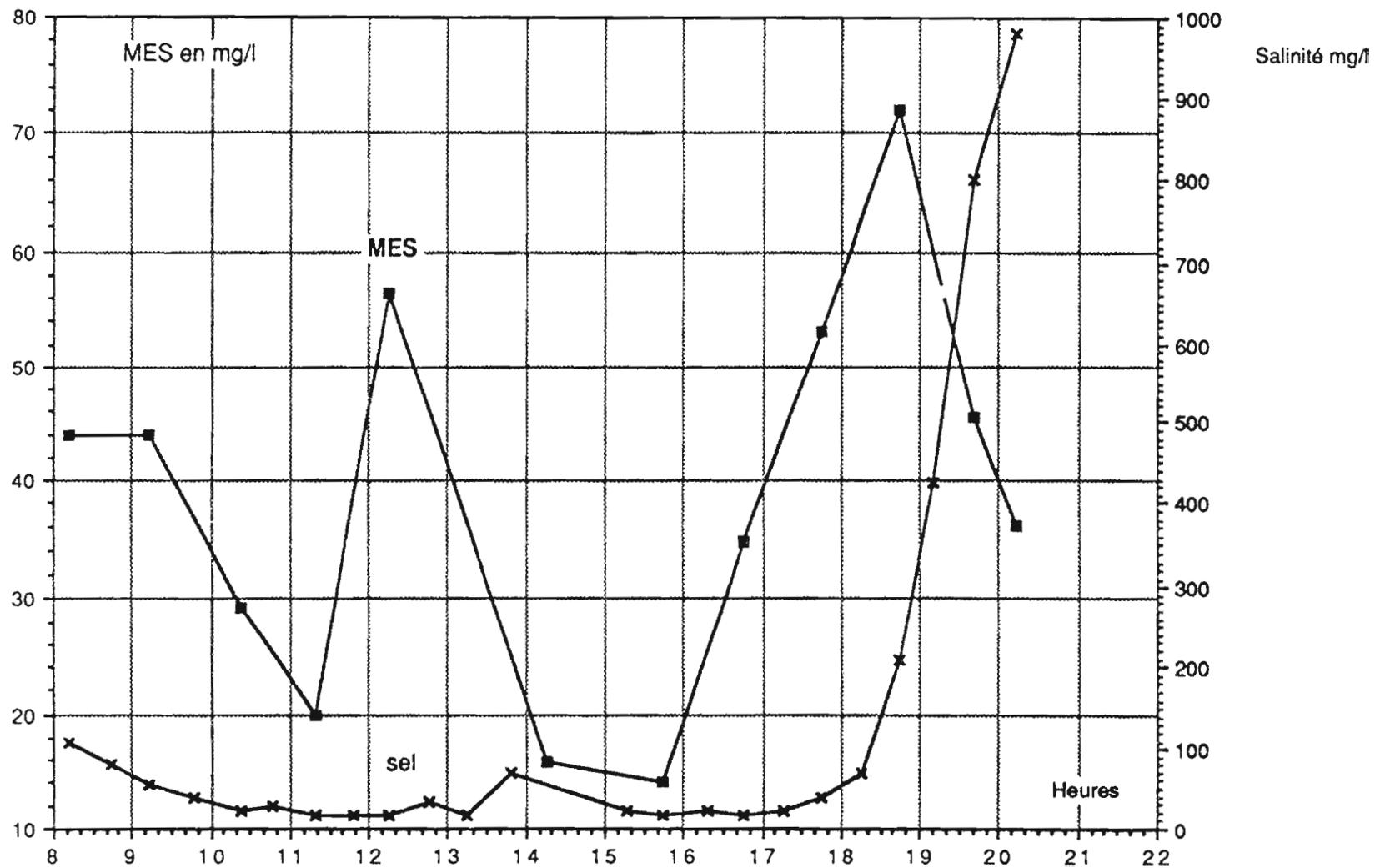


FIG 33 : Section H - MES et salinité -

27 oct 88

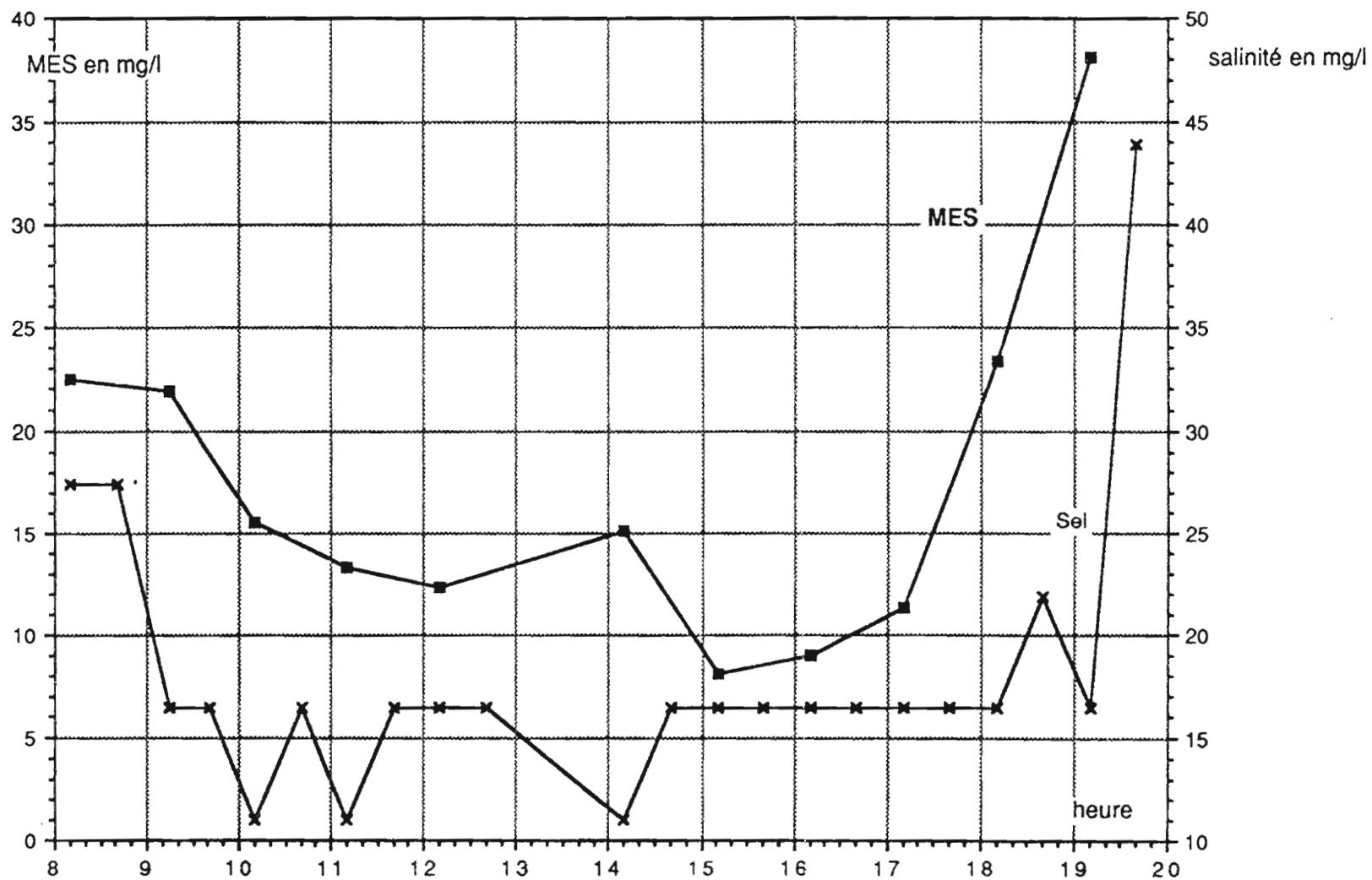


FIG 34 : Salinité et pH

16 déc 87

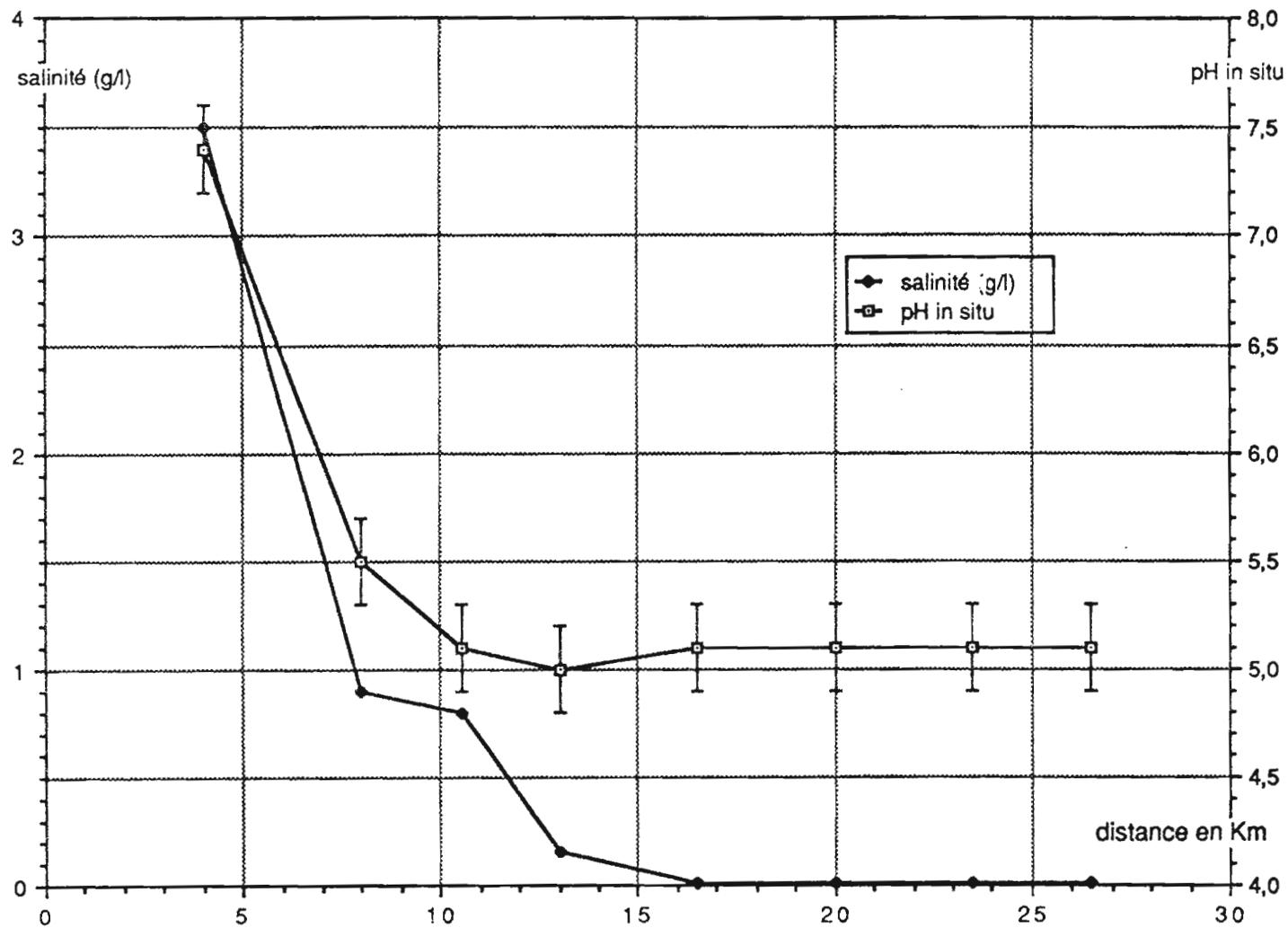


FIG 35 : Salinité et pH

17 déc 87

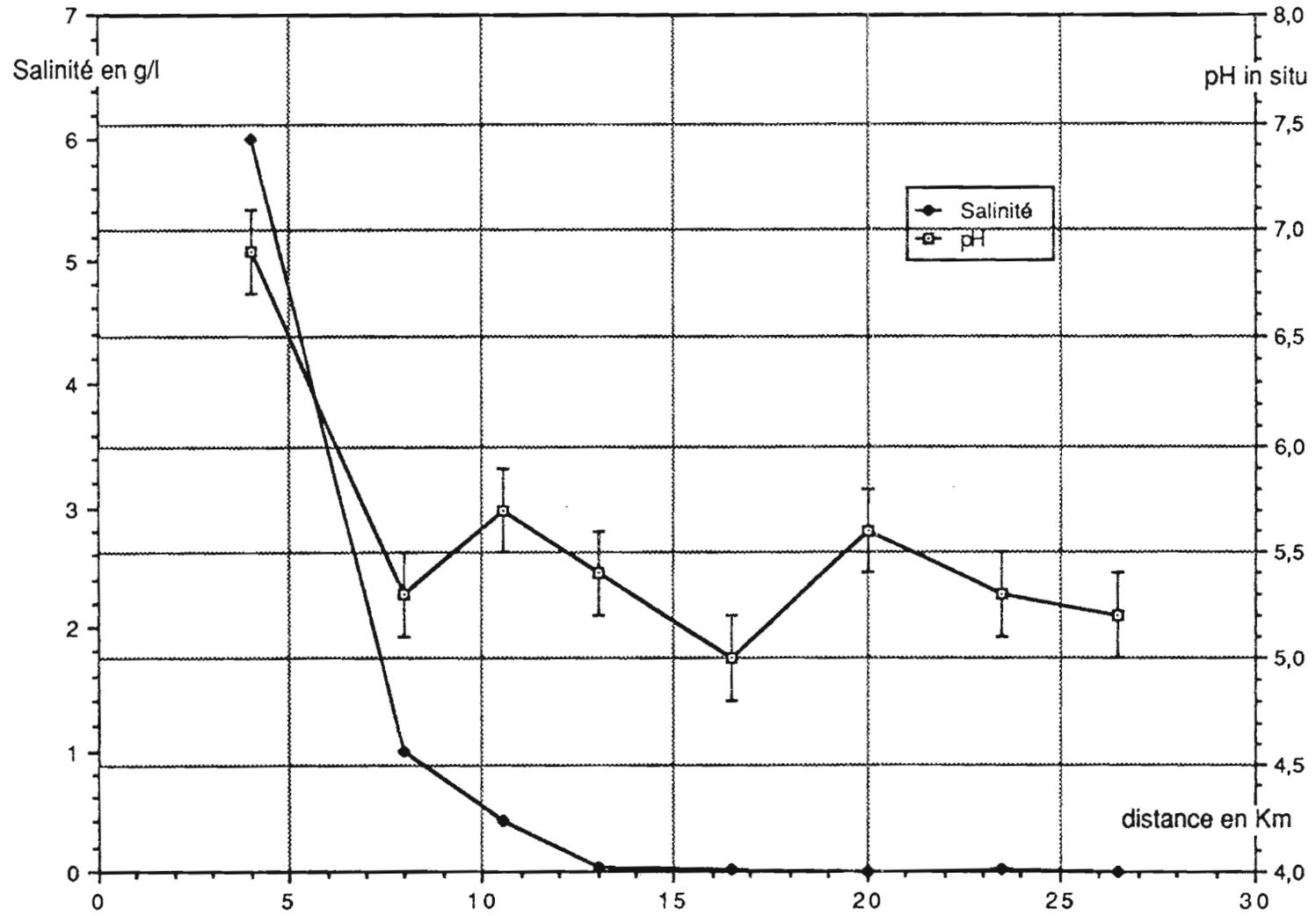
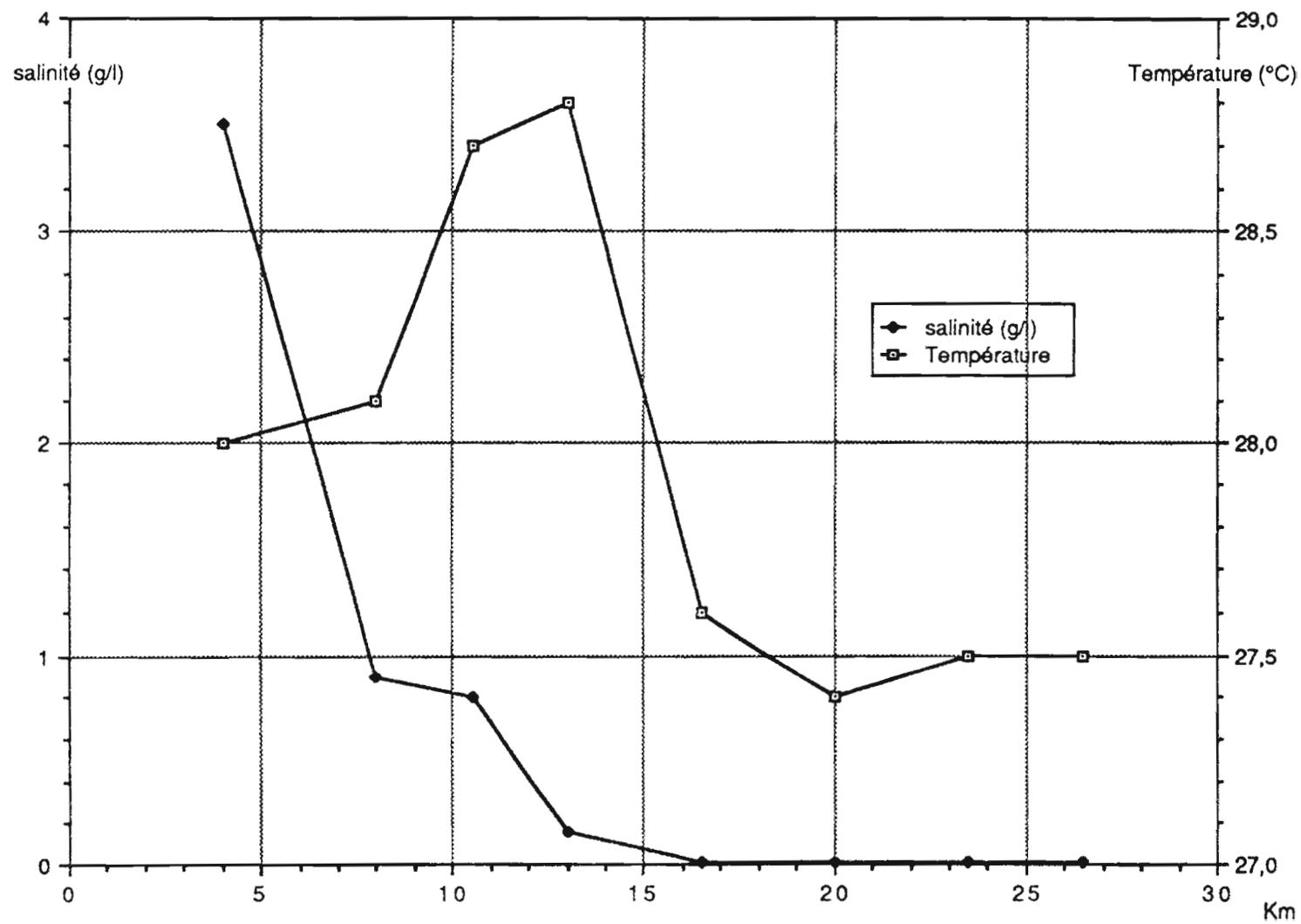


FIG 36 : Salinité et température

16 déc 87



6) Mesures de la SILICE:

Les mesures ont été réalisées durant la campagne d'octobre 88.

Ce paramètre évolue en fonction de la salinité, et traduit une dilution des eaux douces chargées en silice, dans les eaux océaniques à faible teneur en silice (figures n° 38).

On peut mettre en évidence à l'aide de ce paramètre, trois zones distinctes de l'estuaire:

-le premier domaine est à influence marine dominante, les teneurs en silice ne dépassent pas 5 mg/l. C'est le cas des sections "C" et "D", pendant la plus grande partie du cycle de marée. Ce domaine s'étend entre l'embouchure et 12 km, en amont.

-Le second domaine est constitué d'eaux dont les teneurs en silice varient entre 8 et 10 mg/l c'est un milieu qu'on peut qualifier "d'intermédiaire", où la remontée du biseau salé se fait ressentir temporairement au cours du cycle de marée (la concentration maximale admissible de 350 mg/l en sodium-chlorures n'est dépassée que pendant au plus un quart d'heure). Il s'agit des sections "C" et "D", en fin de jusant, et surtout des sections "F" et "G". Ce domaine serait compris entre les kilomètres "10" et "22" de l'estuaire.

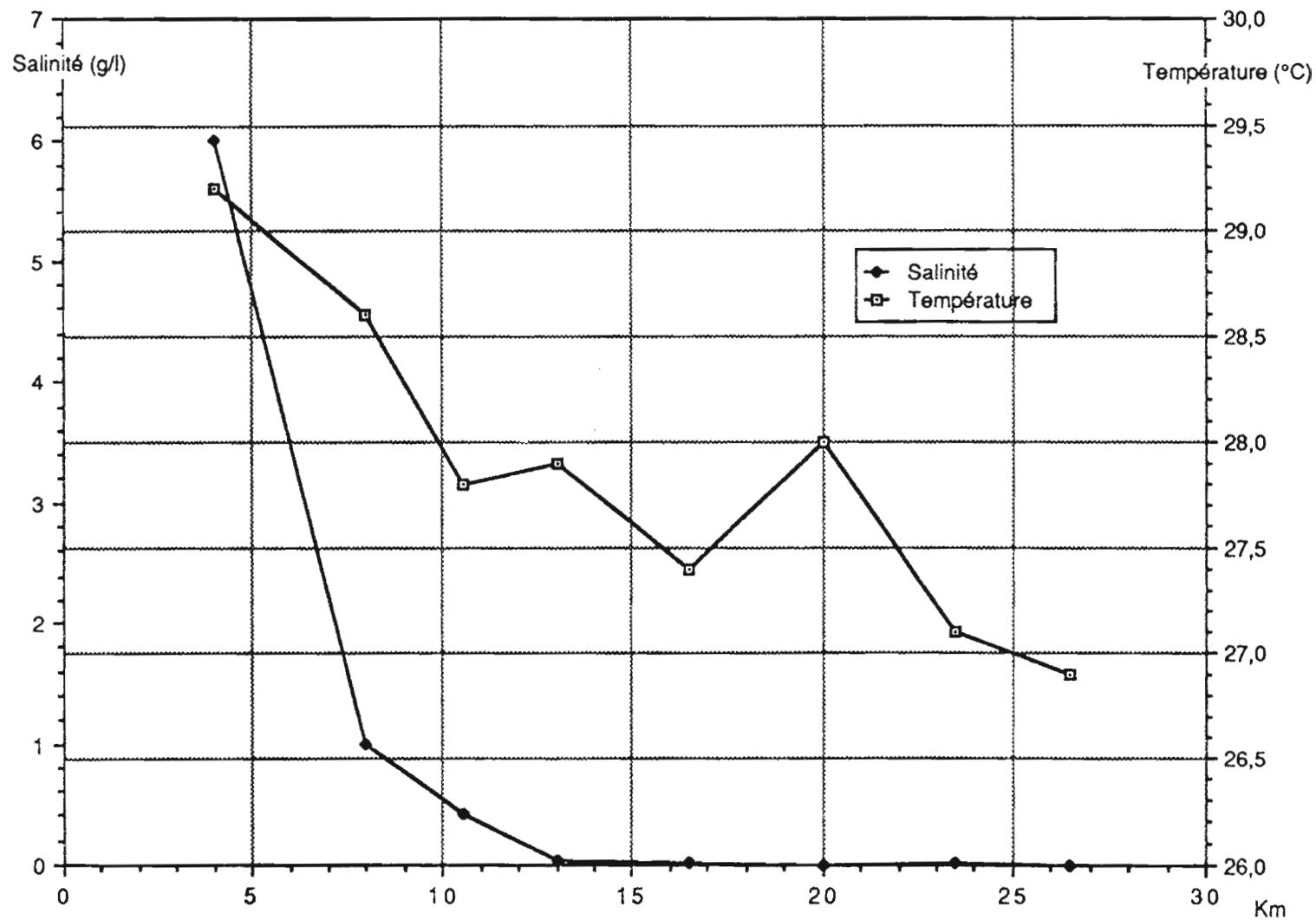
-Le troisième se définit par des teneurs en silice comprises entre 10 et 12 mg/l. Cette zone est à influence fluviale dominante. C'est le cas observé à la section "H", à partir du kilomètre "23".

Tout comme ROCHE M.A.(1977), dans son étude sur l'estuaire du Kourou, RAY S.B. (1984), dans l'estuaire de la rivière Mahanadi, aux Indes, constate également ce phénomène de dilution de la silice dans les eaux marines. Cet auteur signale de plus, des écarts à la courbe théorique de dilution, qui semblent montrer la présence dans l'estuaire d'organismes (diatomées), consommant de la silice.

NOGUES J.L. (1984), a étudié la distribution du phytoplancton dans les eaux estuariennes du Sinnamary. Ses résultats mettent en évidence la décroissance de la concentration en phytoplancton de l'aval vers l'amont, et la prédominance des organismes de type diatomées.

FIG 37 : Salinité et température

17 déc 87



Nous pouvons ainsi supposer que le phytoplancton est un élément important de la qualité des eaux estuariennes de Guyane. Il serait sans doute intéressant d'étudier de plus près les cycles biochimiques des éléments et en particulier celui de la silice.

7) Mesures d'OXYGENE dissous:

Une première série de mesures "in situ", a été effectuée de l'aval vers l'amont, en décembre 87, à la sonde portable Horiba, afin d'obtenir un profil général instantané, au mi-jusant.

Pendant la campagne d'octobre 88, ces mesures ont été réalisées au pas de temps d'une demi-heure, aux sections "D" et "H". Le protocole a permis de faire une mesure de surface (20 cm) et une mesure à 1,50 m de profondeur.

La teneur en oxygène dissous dans l'eau dépend de la température du milieu et de la concentration en Chlorures. Il était nécessaire pour comparer toutes ces valeurs entre elles, de les exprimer en pourcentage par rapport à la saturation et donc de tenir compte de l'effet des deux paramètres. La température variant peu, comme nous l'avons vu précédemment (3 degrés au maximum), celle-ci a été considérée comme constante pendant le temps des mesures. La forte baisse de la valeur de saturation par la présence des chlorures venant des eaux marines oblige à tenir compte de ce facteur. La relation (9) est déduite des abaques de correction pour l'ion chlore, en utilisant la relation (5) liant Cl^- et $NaCl$. Vu la précision de ces mesures, on assimile la concentration en $NaCl$ à la salinité S , elle même obtenue à partir des mesures de conductivité qui a été échantillonnée systématiquement (fig 39):

$$DO_{sat} = - 0,042 S + 7,56 \quad \text{avec } S, \text{ salinité en g/l, et DO en ppm. (9)}$$

En décembre 87, on constate que les eaux marines sont oxygénées à 95-98 %, et que le profil "instantané" dans l'estuaire indique une décroissance vers l'amont (fig 40 et 41). Les eaux fluviales ont une oxygénation oscillant entre 80 et 85 %. Le 16 décembre 87, on retrouve l'anomalie positive, aux parages de la

ESTUAIRE DU SINNAMARY

SILICE-SEL (SECTION C,D,E,F,G,H)

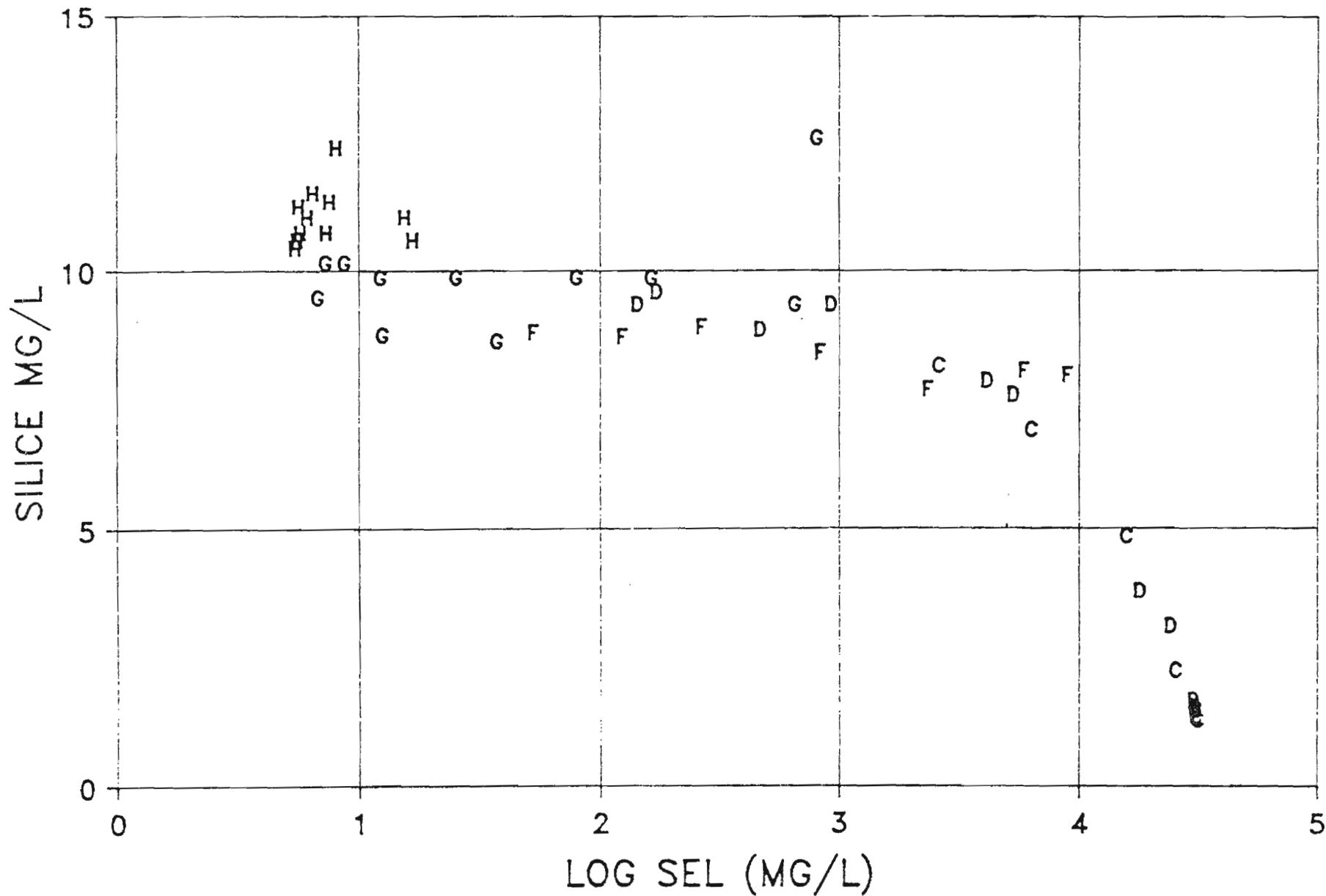


FIG 38. Relation silice - log(salinité) pour les sections "C" à "H".

FIG 39 : Saturation en O2 dissous en fonction de la salinité

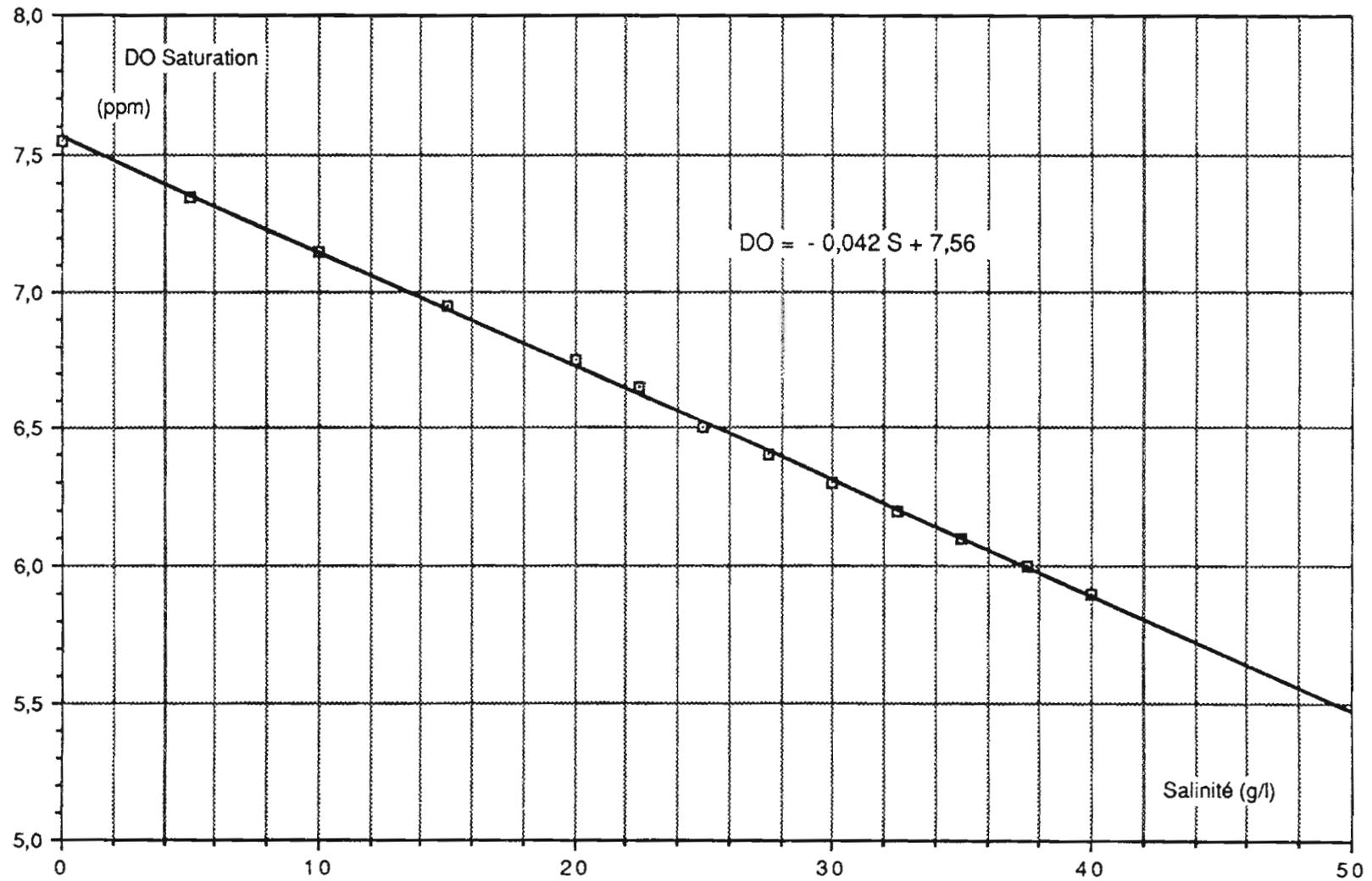


FIG 40 : Oxygène dissous et salinité

16 déc 1987

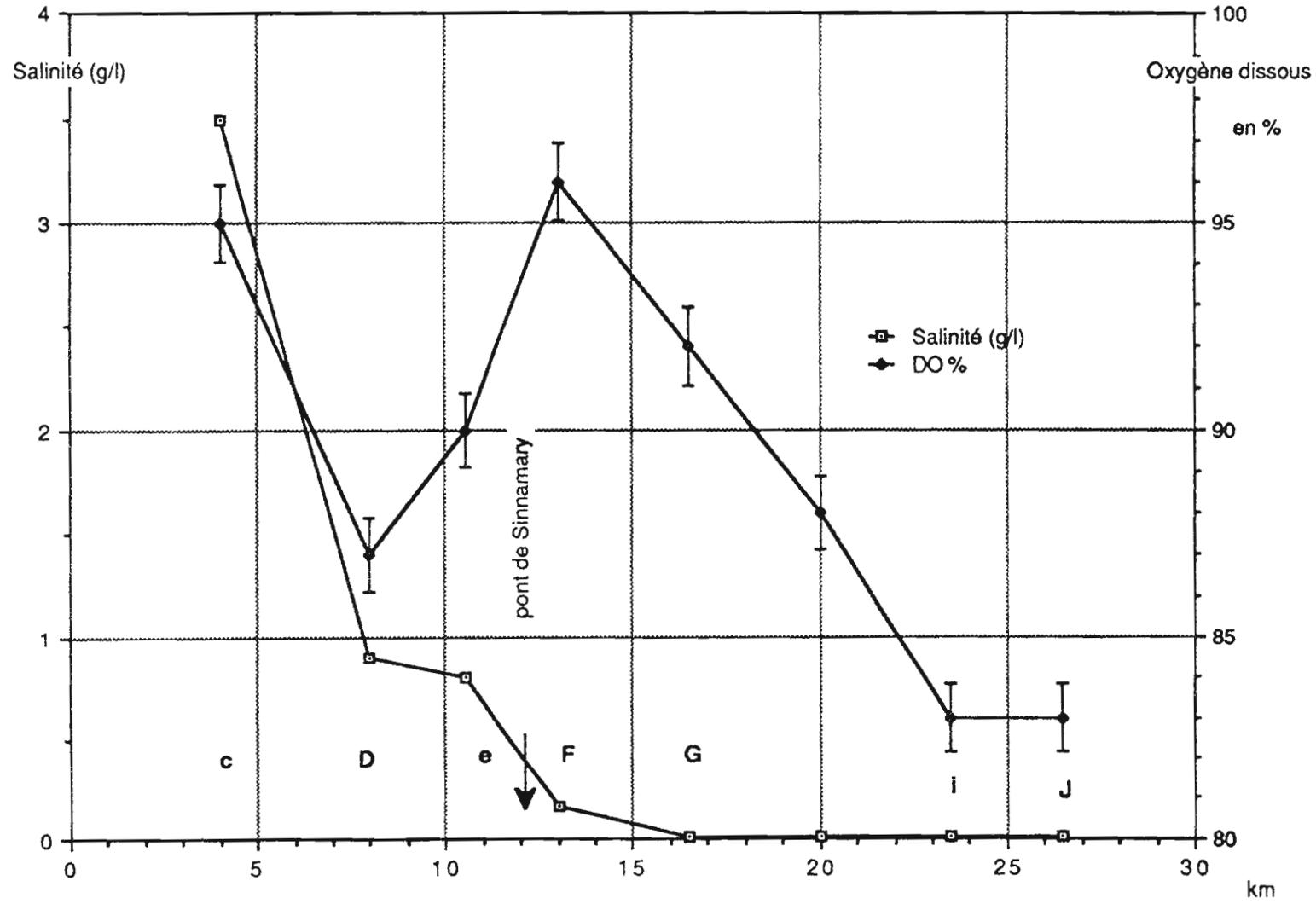
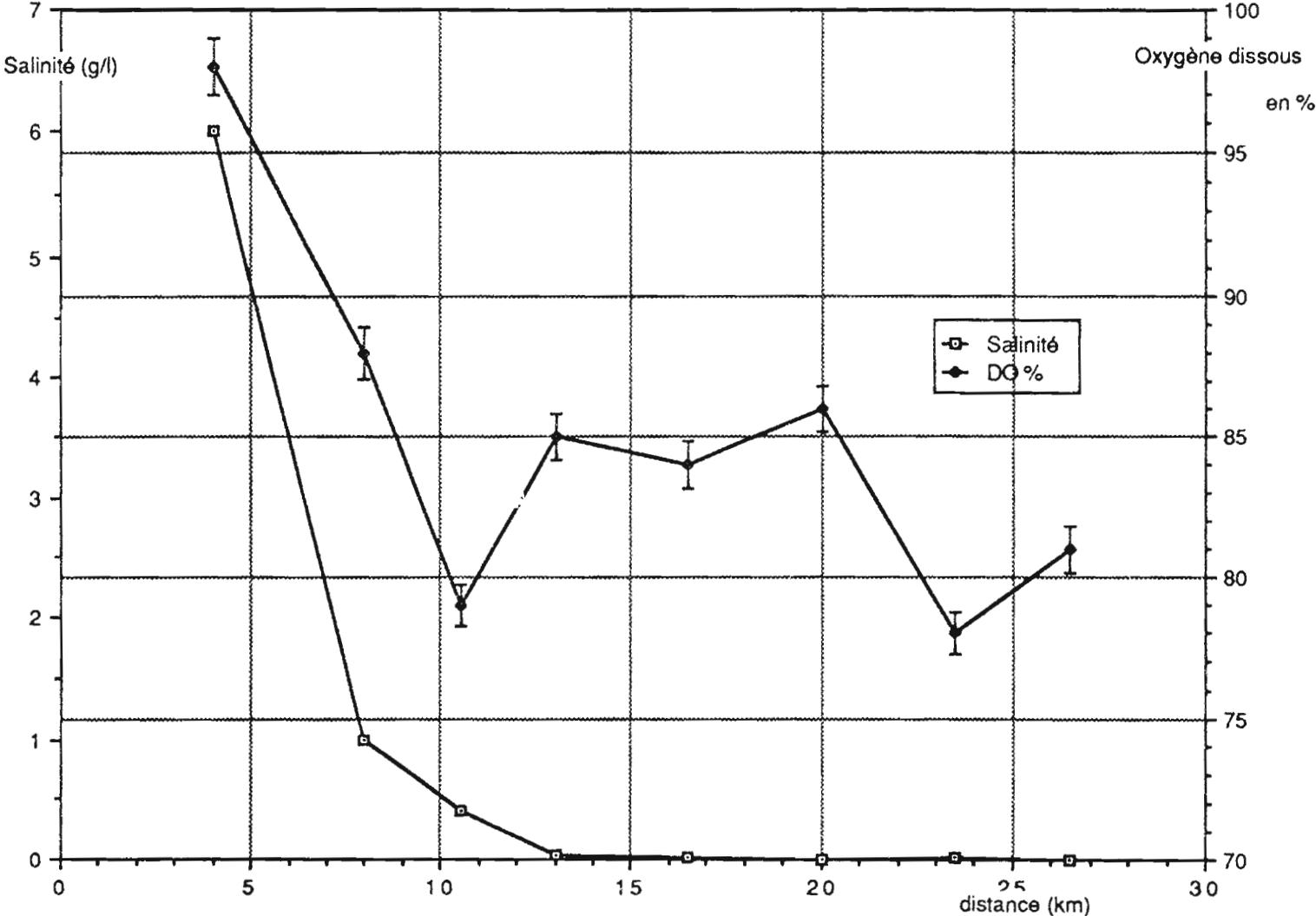


FIG 41 : Oxygène dissous et salinité

17 déc 1987



ville de Sinnamary, également constatée sur les courbes de pH et de température.

En octobre 88 (fig 42 et 43), l'oxygène dissous semble traduire l'hétérogénéité des masses d'eaux durant le cycle de marée. A la section "D", les valeurs de DO en jusant sont de l'ordre de 80%, puis l'arrivée du flot fait nettement se disjoindre la courbe à 1,50 m, de celle de surface dont les valeurs diminuent jusqu'à 70 %, pour remonter ensuite. Rappelons que la salinité décroît de 33 à 5 g/l pendant ces mesures sur la journée.

La section "H", purement fluviale comme nous l'avons vu, présente des valeurs de DO autour de 80 % également, et accuse une chute à 70 %, au moment de l'étale des courants et de la renverse. La courbe de surface se disjoint de celle à 1,50 m.

Dans l'ensemble, on observe une certaine "stabilité" des valeurs à 80% de DO pendant les régimes permanents d'écoulements, caractérisés par une oxygénation légèrement supérieure en surface. En régime de renverse et au moment de l'arrivée du flot, l'oxygénation à 1,50 m augmente, tandis que celle de surface diminue.

Par ailleurs, nous retrouvons des résultats similaires à ceux obtenus par ETCHEBER H. (1986) dans un autre milieu: l'estuaire de la Gironde qui présente une évolution des teneurs en DO comprises entre 80 et 90 % de la saturation, avec la même instabilité dans cette fourchette.

8) Aspect qualitatif de la distribution des eaux de surface de l'estuaire du Sinnamary, en étiage (SPOT, oct 1986).

Les mesures de terrain (LOINTIER M. 1984) dans cet estuaire montrent que l'opacité est élevée, avec une disparition du disque de SECCHI entre 0,5 et 1,2 mètres. Les profondeurs mesurées étant supérieures à 1 mètre dans tous les cas, on ne peut pas attribuer les variations de la radiométrie enregistrée aux variations bathymétriques, surtout avec les canaux utilisés dans le rouge et le proche-infrarouge, dont la "profondeur" d'investigation est de l'ordre du cm ou moins, en milieu aquatique. Par ailleurs, les concentrations en chlorophylle "a" sont faibles et du même ordre de grandeur, de l'embouchure à la pointe Combi, et comprises entre

FIG 42 : Oxygène dissous : section "D"

26 oct 88

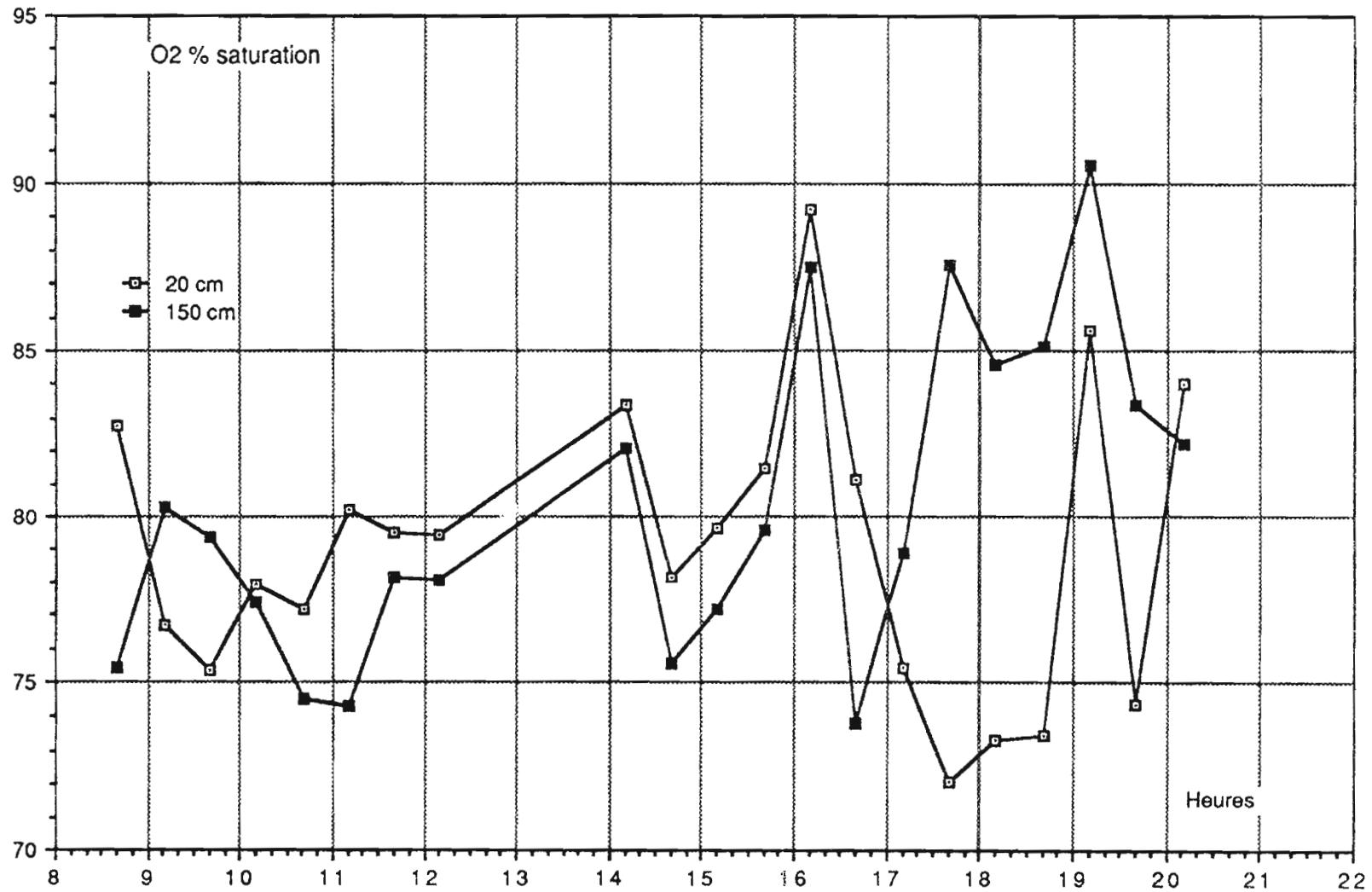
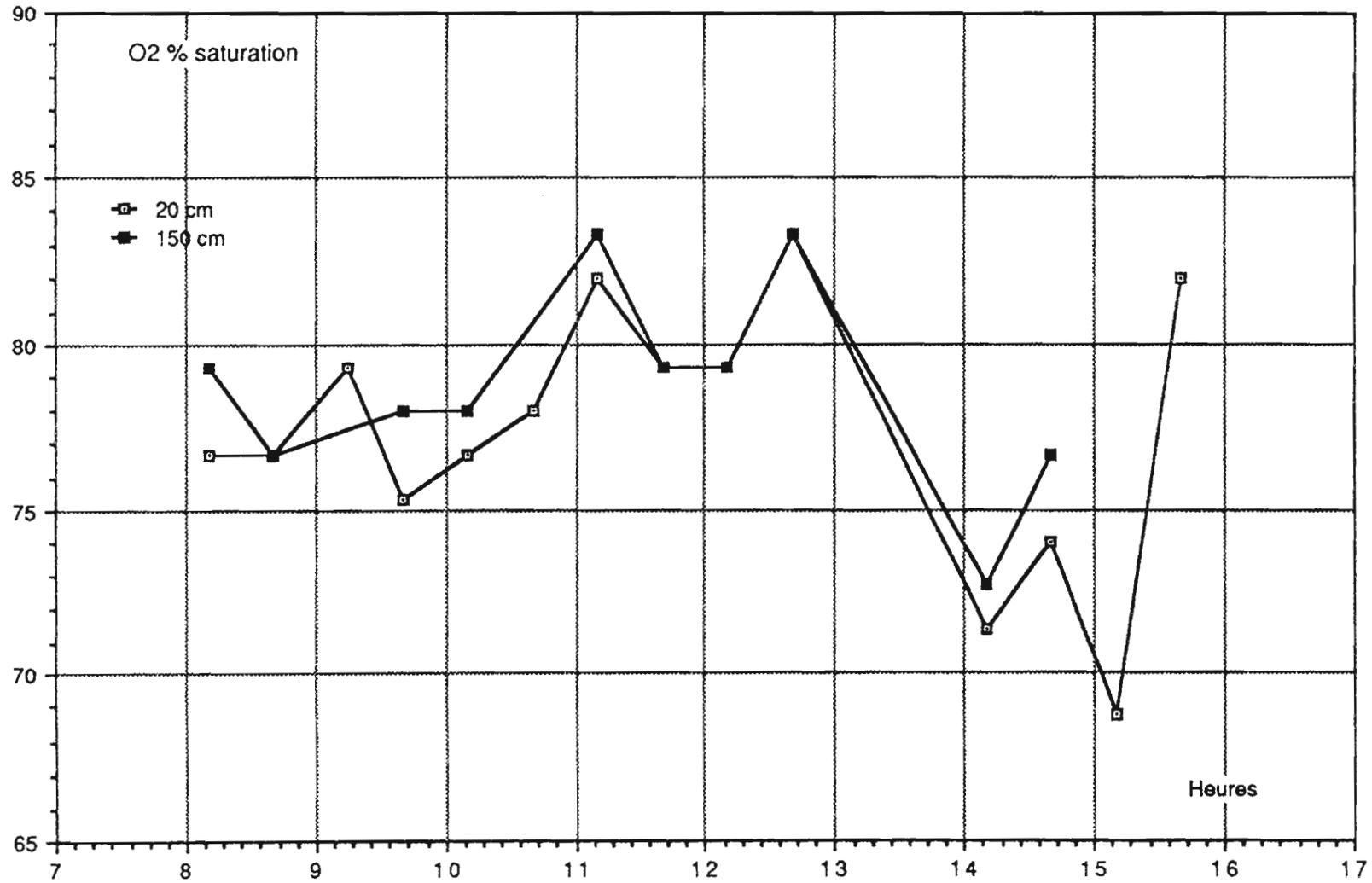


FIG 43 : Oxygène dissous: section "H"

28 oct 88



0,16 et 0,76 mg/m³ (NOGUES, 1984). En regard des teneurs en matières en suspension, beaucoup plus importantes, il semble réaliste d'attribuer les écarts radiométriques constatés, à des variations de la turbidité de surface.

L'index de Brillance ($\sqrt{Cx^2 + Cy^2}$), calculé sur la zone d'estuaire (Document n°4, résolution 40 m), dans les bandes SPOT 2 et 3, permet de classer les pixels selon une échelle de valeurs croissante du bleu vers le rouge. Cet index montre ainsi, qualitativement, la distribution des masses d'eaux de surface. Au niveau de la section "B", les radiométries calculées sont les plus faibles. Ceci traduit une remise en suspension des vases, plus importante par petits fonds (entre 1,5 et 2 mètres). A ce niveau, on remarque le gradient transversal élevé dans cette partie de l'estuaire, qui fait place à un gradient "longitudinal" vers la section "C", mettant en évidence des "segmentations" qui augmentent, vers l'amont, en s'allongeant.

L'utilisation des données de télédétection dans le domaine estuarien date des premières images obtenues avec les satellites LANDSAT, lancés dès 1973. Ces milieux sont souvent assez étendus et présentent un grand nombre de pixels, rendant significatifs les traitements statistiques. De plus, les canaux généralement employés par les capteurs rendent bien compte des variations de la qualité des eaux. Néanmoins, il s'agit d'un milieu qui se transforme rapidement (à l'échelle de l'heure), et on doit se contenter pour l'instant, d'interpréter des données qui traduisent une situation relevant de "l'instantané photographique" de phénomènes de surface. Ceci explique pourquoi il est si difficile d'obtenir un étalonnage des valeurs radiométriques en relation avec un paramètre comme la turbidité, par exemple, nécessitant des mesures de terrain au moment du passage du satellite (LOINTIER M., 1989).

Enfin, il ne fait aucun doute que l'utilisation des données satellites pour la connaissance de la qualité des eaux s'affranchira bientôt des problèmes évoqués plus haut, par la multiplication des mises en orbite des satellites civils d'observation de la terre (cf ERS1), et par l'amélioration des capteurs, notamment avec l'utilisation des données "radar".



DOCUMENT N°4

Traitement spécifique des radiométries SPOT, sur l'estuaire et le fleuve Sinnamary. Un index de brillance entre les canaux 2 et 3 renseigne sur la distribution des turbidités des eaux de surface. Les réflectances élevées apparaissent en bleu, et décroissent jusqu'à leur minimum codé en rouge. On remarquera un gradient transversal fort dans la partie aval de l'estuaire, qui fait place à un gradient longitudinal au niveau du rétrécissement de l'estuaire, mettant en évidence des "segmentations" qui augmentent vers l'amont. © CNES 86

V) MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DU BISEAU SALE.(HUMBEL, H.X.)

Le développement de l'informatique permet aujourd'hui de résoudre des équations de plus en plus complexes. Ces équations traduisent la réalité physique des phénomènes étudiés, et peuvent servir de base à l'élaboration de modèles.

Dans tout ce qui suit nous nous sommes essentiellement inspirés des travaux de Dyer (1972) et de Ippen (1966).

L'équation physique (établie sur un volume d'eau élémentaire) qui régit le transport du sel est la suivante:

$$\partial C(M,t) / \partial t = - \overset{-->}{\text{div}} \{ \overset{-->}{U}(M,t) \cdot C(M,t) \} + \text{div} \{ K(M,t) \cdot \overset{--->}{\text{grad}} C(M,t) \}$$

avec :

- M : le point de coordonnées x, y, z.
- C(M,t) : la fonction concentration en sels à l'abscisse x, et au temps t.
- $\overset{-->}{U}(M,t)$: le vecteur vitesse du courant.
- K(M,t) : le coefficient de dispersion.
- $\overset{--->}{\text{grad}}$: l'opérateur mathématique gradient.
- div : l'opérateur mathématique divergence.

Si on développe chacun des termes on aboutit à :

$$\begin{aligned} \partial C(M,t) / \partial t = & - \partial (U_x(M, t).C(M,t)) / \partial x + \partial (K(M, t) \cdot \partial C(M,t) / \partial x) / \partial x \\ & - \partial (U_y(M, t).C(M,t)) / \partial y + \partial (K(M, t) \cdot \partial C(M,t) / \partial y) / \partial y \\ & - \partial (U_z(M, t).C(M,t)) / \partial z + \partial (K(M, t) \cdot \partial C(M,t) / \partial z) / \partial z \end{aligned}$$

Résoudre une telle équation ne présente pas de difficultés au sens mathématique du terme. Mais la grande hétérogénéité du milieu étudié nous oblige à négliger certains termes de l'équation.

On peut ainsi éliminer les composantes latérales et verticales du vecteur vitesse du courant que nous supposerons négligeables.

Nous allons de plus supposer négligeable les gradients latéraux et verticaux de concentration par souci de simplification et par le fait qu'il est difficile avec le peu d'observations dont on dispose, d'évaluer ces gradients. Pour limiter les incertitudes qui entraînent cette simplification, nous calerons et appliquerons ce modèle aux observations effectuées au milieu de l'estuaire, à mi-profondeur.

$$\begin{aligned} \partial C(M,t)/\partial t = & - \partial (U_x(M, t).C(M,t)) / \partial x + \partial (K(M, t) . \partial C(M,t) / \partial x) / \partial x \\ & - \partial (U_y(M, t).C(M,t)) / \partial y + \partial (K(M, t) . \partial C(M,t) / \partial y) / \partial y \\ & - \partial (U_z(M, t).C(M,t)) / \partial z + \partial (K(M, t) . \partial C(M,t) / \partial z) / \partial z \end{aligned}$$

L'équation devient alors:

$$\partial C(M,t)/\partial t = - \partial (U_x(M, t).C(M,t)) / \partial x + \partial (K(M, t) . \partial C(M,t) / \partial x) / \partial x$$

soit en développant chacun des termes,

$$\begin{aligned} \partial C(M,t)/\partial t = & - C(M,t) . \partial U_x(M, t) / \partial x - U_x(M, t) . \partial C(M,t) / \partial x \\ & + \partial C(M,t) / \partial x . \partial K(M, t) / \partial x + K(M, t) . \partial^2 C(M,t) / \partial x^2 \end{aligned}$$

Nous allons à nouveau opérer des simplifications en supposant négligeable le gradient longitudinal de vitesse, ainsi que le gradient du coefficient de dispersion.

On aboutit finalement à l'équation suivante:

$\partial C(M,t) / \partial t = K(M,t) . \partial^2 C(M,t) / \partial x^2 - V(M,t) . \partial C(M,t) / \partial x$
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> terme dispersif terme advectif </div>

1) Résolution de l'équation

Cette équation différentielle est de type parabolique. Pour la résoudre nous allons utiliser une méthode explicite établie à partir de la méthode des différences finies, décrite dans NOUGIER (1985).

Nous allons commenter brièvement cette méthode. On suppose la concentration peut être connue en tout point de l'espace étudié ($x_0 < x < x_f$), et quelque soit t . On repère la variable x par l'indice i ($0 < i < M$), et la variable t par l'indice k ($0 < k < N$). On écrit l'équation différentielle sous forme discrétisée à l'aide des différences centrées sur x et t .

On obtient ainsi $c(x_i, t_{k+1})$ comme combinaison linéaire de $c(x_{i-1}, t_k)$, $c(x_i, t_k)$ et $c(x_{i+1}, t_k)$.

Le choix du pas de résolution, en abscisse et en temps, est dicté par des problèmes de stabilité des solutions. Il faut que :

$$\left[(2 \cdot K(M, t) \cdot \Delta t) / (\Delta x)^2 \right] \leq 1$$

Il sera d' un kilomètre pour l'abscisse et du dixième d'heure pour le pas de temps.

$c(t_N, x_0)$					$c(t_N, x_M)$
:					:
$c(t_k, x_0)$					$c(t_k, x_M)$
:					:
$c(t_1, x_0)$					$c(t_1, x_M)$
$c(t_0, x_0)$	$c(t_0, x_1)$..	$c(t_0, x_i)$..	$c(t_0, x_M)$

Il faut, pour commencer le calcul, imposer des conditions initiales (à $t=t_0$), et des conditions aux limites (en $x=x_0$ et en $x=x_M$). Nous allons maintenant discuter du choix de ces conditions.

- conditions initiales :

à $t = t_0$ fixé (par exemple $t_0 = 0$), et $x = x_i$ (i variant de 1 à M)

on a $c(t_0, x) = C_0 \cdot e^{-cs \cdot x}$

Cette fonction traduit le fait que la salinité diminue exponentiellement lorsque l'on remonte vers l'amont. Le paramètre "cs" est déterminé de manière simple, par calage sur la distribution initiale de salinité observée lors de la campagne de mesures d'octobre 1988 (pris ici égal à 0,65).

- **conditions aux limites** : en $x = x_0$ fixé (par exemple $x_0 = 0$), et $x = x_N$ fixé (par exemple 30 km), et pour $t = t_j$ (j variant de 1 à N)

on a

$c(t, x_0) = 35 \text{ g/l}$	salinité de l'eau de mer
$c(t, x_N) = 0,005 \text{ g/l}$	salinité de l'eau douce

Les conditions aux limites et initiales étant définies, il nous faut alors évaluer les paramètres du modèle: **la vitesse du courant et le coefficient de dispersion.**

La maille d'observations (environ 4 km x 30 minutes) étant plus grande que celle du calcul (1 km x 6 minutes) il est nécessaire de définir des fonctions mathématiques simulant l'évolution spatio-temporelle de ces paramètres.

En ce qui concerne la composante longitudinale du vecteur vitesse du courant, nous avons choisi une fonction de type sinusoïde exponentiellement décroissante :

$$V(x, t) = V_0 \cdot e^{-cv \cdot x} \cdot \sin(w \cdot t) - VF$$

Les paramètres de cette fonction ont été déterminé par calage sur les mesures de vitesse effectuées lors de la campagne de mesures d'octobre 1988 (sur les sections de mesure).

V_0 est la vitesse maximale observée au cours du flot (prise ici égale à $1,1 \text{ m.s}^{-1}$).

w est la pulsation de l'onde de marée.

VF est la composante fluviale de la vitesse du courant (prise ici égale à $0,15 \text{ m.s}^{-1}$)

cv est le coefficient d'atténuation de la composante océanique de la vitesse du courant (pris ici égal à 0,04).

Pour le coefficient de dispersion, nous avons choisi une fonction de type sinusoïde exponentiellement décroissante :

$$K(x, t) = K_0 \cdot e^{-ck \cdot x} \cdot |\sin(w \cdot t)|$$

Ces paramètres ont été évalués par calage sur quelques valeurs remarquables de la salinité observée au cours de la campagne d'octobre 1988.

K_0 est le coefficient de dispersion maximal (pris ici égal à 3).

ck le coefficient d'atténuation de la dispersion (pris ici égal à 0,04).

w est la pulsation de l'onde de marée.

2) Résultats

Le faisceau de courbes observé sur la figure n° 44, simule l'évolution de la concentration en sels au cours d'un cycle de marée. On constate une évolution de la concavité avec le temps: concave à marée basse et convexe à marée haute.

Le manque d'observations ne nous permet pas d'évaluer de manière quantitative la précision et la fiabilité de ce modèle. Nous nous contenterons de constatations qualitatives, à l'aide de la figure n° 45. Sur cette figure, nous avons placé les deux courbes d'extension maximale et minimale du biseau salé. Les observations sur le terrain (aux points kilométriques 4, 8, 13, et 16 km) sont également visualisées. Les points expérimentaux s'alignent correctement sur les courbes théoriques.

Notons que le modèle place la limite du coin salé (20 km) avec une bonne précision.

Au cours de la mise au point, nous avons constaté l'extrême sensibilité du modèle aux faibles variations du terme advectif. En effet, pour de faibles variations des composantes de la vitesse du courant, l'extension du biseau salé peut être modifiée considérablement.

SIMULATION REMONTEE SALINE EN ESTUAIRE

EVOLUTION SPATIALE DE LA SALINITE

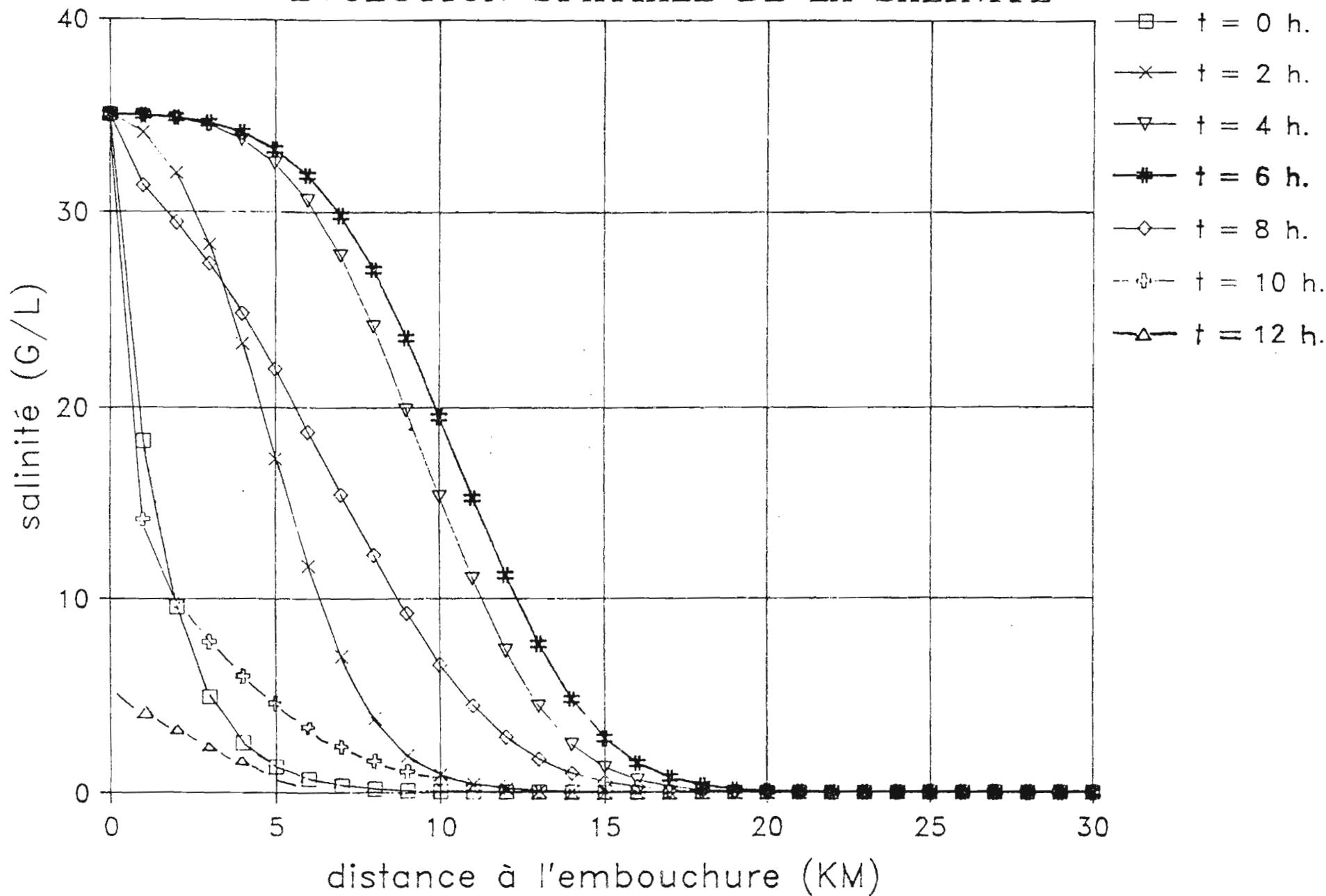


FIG 44: Simulation de la remontée saline dans l'estuaire. Evolution de la salinité en fonction de la distance à l'embouchure

SIMULATION REMONTEE SALINE EN ESTUAIRE

EXTENSION MAXIMALE ET MINIMALE

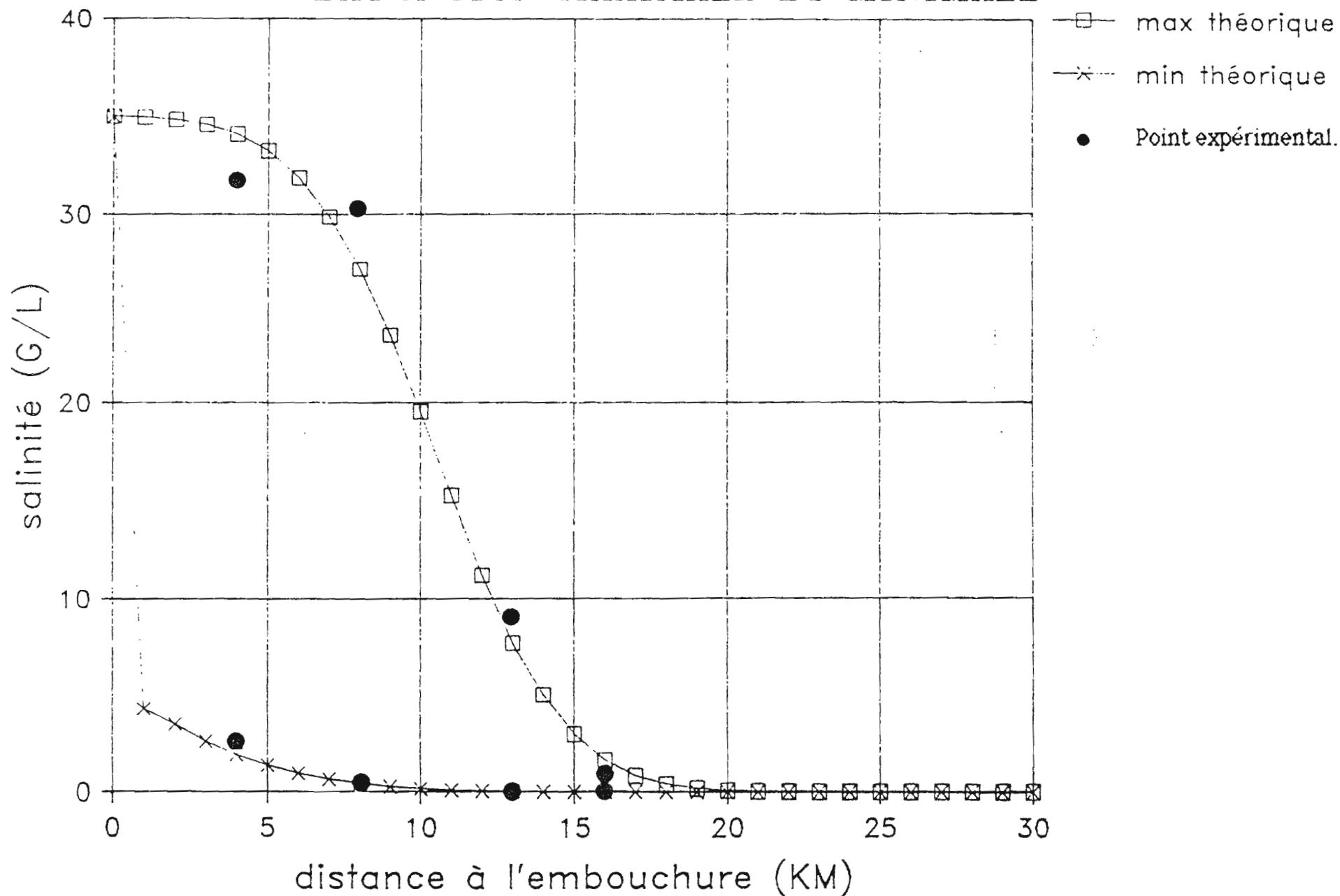


FIG 45: Simulation de la remontée saline dans l'estuaire. Comparaison des courbes théoriques et des points expérimentaux.

3) Commentaires

Ce modèle a été établi à partir d'une équation qui représente la réalité physique du phénomène de remontée saline. Cette équation a été simplifiée (élimination des termes les moins significatifs), non pas en raison de difficultés mathématiques de résolution, mais pour des raisons liées au manque d'observations et à la grande hétérogénéité dynamique et physico-chimique des eaux de l'estuaire.

Les courbes théoriques, sont analogues à celles obtenues par SAVENIJE (1986), pour simuler la remontée saline dans les estuaires de la Gambie et quatre estuaires du Mozambique.

CONCLUSIONS

On connaît mieux désormais l'incidence de la dynamique des bancs de vase sur les estuaires. Celui du Sinnamary fait partie des cas à forte déflexion vers l'ouest, et on y observe, depuis 1983, date des premières études, une régression généralisée de la ligne de rivage. Les cartes anciennes montrent aussi que l'embouchure peut remonter jusqu'au Canal Phillippon, au niveau du cordon sableux de la route l'Anse. Sans pouvoir prédire une telle évolution à court terme, il est important de noter cet élément qui met bien en évidence l'absence de stabilité d'un banc de vase "émergé" et recouvert de palétuviers. Cet ensemble est toujours fragile, soumis en priorité, aux conditions océaniques, qui sont capables de faire disparaître deux kilomètres de mangrove en dix ans et d'ouvrir une brèche dans l'estuaire, en rive droite. Les photos aériennes et l'utilisation des données satellite permettent maintenant de réaliser des évaluations quantitatives précises de ces phénomènes.

Les études hydrologiques et hydrochimiques des autres estuaires, tout comme le Sinnamary, font apparaître des caractéristiques communes à tous ces systèmes:

- La limite du front salé est très voisine du lieu où disparaissent les teneurs significatives en MES. Ces deux "fronts" sont donc très proches dans l'espace.

- Les eaux de rivière au pH acide, et à très faible minéralisation contrastent avec les eaux marines au pH voisin 8, contribuant à former un milieu tamponné dans l'estuaire.

- l'extension du coin salé dépend du rapport - volume apporté par la rivière pendant un demi-cycle divisé par le volume d'un flot. Ce rapport est de 20 % pour le Sinnamary en étiage.

Les mesures en estuaire et en rivière font l'objet d'une méthodologie qui est désormais au point, permettant de faire en même temps les mesures de vitesse et les prélèvements nécessaires aux analyses chimiques.

Trois séries de mesures ont été analysées dans ce rapport: décembre 87, mai 88 et octobre 88. Ces périodes auraient dû être représentatives de trois conditions climatiques distinctes:

-Une campagne de fin de saison sèche avec le passage de la ZIC vers le sud, en décembre.

-Une campagne en saison des pluies, avec une activité maximale de la ZIC, lors de sa remontée vers le nord.

-Une campagne en étiage (pendant les vives eaux de syzygie), en octobre.

La climatologie de l'année 88 a été éloignée de la moyenne et la pluviométrie déficitaire. C'est pour cette raison que les conditions hydrologiques des trois campagnes sont proches, avec des débits observés à la station de Petit-Saut, compris entre 90 et 130 m³/s. On peut considérer ces trois études comme complémentaires, puisqu'elles se rapprochent des conditions d'étiage avec des marées moyennes et de vives-eaux.

Les vitesses mesurées sont semblables à celles observées en 1983. Les vitesses maximales dépassent rarement 1 m/s et l'hydrodynamique n'a pas subi de transformations.

L'analyse des débits oscillants conduit à plusieurs remarques:

- La sinusoïde des débits oscillants s'atténue plus rapidement vers l'amont que ne l'est celle des hauteurs d'eau. L'amplitude de variation des débits est divisée par deux, entre les sections "C" et "G", c'est à dire sur une distance de 13 km.

- Pour une même section, les maxima de débits de flot et de jusant sont identiques, en valeur absolues et instantanées. C'est simplement la durée du jusant qui augmente vers les sections amont.

- Les volumes de flot observés en 88 sont du même ordre de grandeur qu'en 1983, tandis que ceux de jusant ont sensiblement diminués, comme l'indique le rapport V_j/V_f .

La dérive résultante obtenue est de 700 m pour la section "C" et 2 400 m pour "G", moitié des valeurs mesurées en 83, dans les mêmes conditions de vives eaux.

En 1983, le temps de séjour dans l'estuaire d'une particule, entre la pointe Combi et l'embouchure (30 km), était estimé à une semaine. On peut s'attendre à ce que ce temps soit doublé dans les

conditions actuelles d'une hydrodynamique de cycle de "dévasement". Il semble donc que l'influence marine soit plus marquée, au moins pendant cette période.

La mesure de la conductivité, traduite en salinité, indique pour chaque campagne, la distribution des eaux saumâtres et leur limite maximale vers l'amont. Il est observé que dans tous les cas, le coin salé s'atténue fortement à partir de la section "G" (20 km), où les valeurs sont toujours inférieures à 1 g/l. A partir de la section "H" (23 km), on peut considérer que l'on a des eaux purement fluviales dans 80 % des mesures. La confrontation de ces résultats avec les mesures de la campagne de 1983 montre bien une remontée de l'influence marine vers l'amont depuis l'ouverture de la brèche de mars 1987. Avant la rupture de la rive droite, le contact eaux fluviales - eaux saumâtres (fixé à 10 mg/l de NaCl), oscillait entre les sections "E" et "G", pour tous les coefficients de marée. Les teneurs en NaCl, au pont de Sinnamary, étaient de l'ordre de 1 g/l. Depuis, les mesures montrent qu'à cet endroit, situé entre les sections "E" et "F", la valeur maximale a augmentée d'un facteur 10. De même, la limite de l'extension maximale du biseau salé est repoussée de la section "G" vers la section "H", c'est à dire de 4 km vers l'amont, valeur comparable au déplacement vers l'amont de l'embouchure du Sinnamary.

Si l'on admet une certaine linéarité dans la relation liant le déplacement de l'embouchure et la progression du biseau salé vers l'amont, il faudrait que l'embouchure remonte de 7 km pour que la prise d'eau douce de la pointe COMBI alimentant la ville de Sinnamary soit touchée par la remontée saline. Cette limite correspondrait à une ouverture hypothétique au niveau de la section "D", près du canal Phillippon.

L'analyse statistique des mesures chimiques, complétée par l'étude de la Silice, nous suggère une partition de l'estuaire en trois domaines:

-le premier est à influence marine dominante, les teneurs en silice ne dépassent pas 5 mg/l. C'est le cas des sections "C" et "D",

pendant la plus grande partie du cycle de marée. Ce domaine s'étendrait entre l'embouchure et 12 km, en amont.

-La seconde partie est constituée d'eaux dont les teneurs en silice varient entre 8 et 10 mg/l. C'est un milieu que l'on peut qualifier "d'intermédiaire", où la remontée du biseau salé se fait ressentir temporairement au cours du cycle de la marée. Il s'agit surtout des sections "F" et "G". Cette zone de brassage des eaux serait comprise entre les kilomètres "10" et "22" de l'estuaire.

-Le troisième se définit par des teneurs en silice comprises entre 10 et 12 mg/l. Cette zone est à influence fluviale dominante. C'est le cas observé à la section "H", à partir du kilomètre "23".

Enfin, critère plus délicat à mesurer sur le terrain, mais déterminant pour l'évaluation des qualités biologiques des eaux, l'oxygène dissous montre des pourcentages par rapport à la saturation, élevés en mer (95 à 98 %), et un peu plus bas, dès les premiers kilomètres d'estuaire (80 à 85%), et pouvant chuter à 70 - 75%, lors des étales de courants.

Cadrées dans les investigations nécessaires à l'étude d'impact sur l'environnement de l'ouvrage hydroélectrique de Petit Saut, ces mesures et leur interprétation apportent de nombreux éléments de connaissance nécessaires à évaluer les effets d'un tel aménagement, tout en contribuant à la mise au point et à l'utilisation de techniques nouvelles. Située dans un milieu en croissance permanente, la zone d'estuaire doit faire l'objet d'une attention toute aussi soutenue que le suivi des transformations des zones forestières inhabitées, situées en amont de l'ouvrage.

BIBLIOGRAPHIE

- Bellesort, B. & Martin, J.M. 1968 - Etude préliminaire sur la sédimentation dans l'estuaire du Mahury. L.C.H.F. 10 p.
- Dyer K.R. ,1972: Estuaries: A Physical Introduction. Editor: J. Wiley. 140 p.
- Eisma D.,1988. Dispersal of Amazon Supplied particulate matter. Chapman Conference on the fate of particulate and dissolved components within the Amazon Dispersal System: River and Ocean. AGU. Charleston. Wild Dunes.
- Etcheber H., 1986, Biogéochimie de la matière organique en milieu estuarien: comportement, bilan, propriétés. Cas de la Gironde. Mémoire de l'institut de géologie du Bassin d'Aquitaine, Univ. Bordeaux I. 379 pp.
- Fritsch, J.M. 1982. Données hydrologiques pour l'aménagement de Petit Saut sur le Sinnamary. Etude d'impact de l'aménagement du barrage de Petit Saut. Rapport EDF. Centre ORSTOM. Cayenne.
- Fritsch, J.M. 1984. Les transports solides. Etude d'impact de l'aménagement du barrage de Petit Saut. Rapport EDF. Centre ORSTOM. Cayenne.
- Fritsch, J.M. 1985. Les étiages du Sinnamary. Etude d'impact de l'aménagement du barrage de Petit Saut. Rapport EDF. Centre ORSTOM. Cayenne.
- Francis Boeuf C., 1947. Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire Ann. Inst. Océano., Vol 23. 350 p

- Froidefond, J.M., Prost, M.T. & Griboulard R.,1985.** Etude sur l'évolution morpho-sédimentaire des littoraux argileux sous climat équatorial: l'exemple du littoral guyanais. Rapport Cordet- IGBA. Ministère de la Recherche et de la Technologie.Paris. Université de Bordeaux-I. Talence. 189 p.
- Humbel, H. X. 1989.** Qualité et dynamique des eaux fluviales de Guyane. Rapport de stage, ORSTOM Cayenne, 40 p.
- Ippen A.T., 1966:** Estuary and coastline hydrodynamics. Editor: A.T. Ippen. Engineering Societies Monographs. McGraw-Hill Book Company. 744 p.
- Jouanneau, J.M. & Pujos, M. 1987.** Suspended matter and bottom deposits in the Mahury estuarine system (French Guiana): environmental consequences. Netherlands Journal of Sea Research 21(3): 191-202.
- Lafond, L.R., 1967.** Etudes littorales et estuariennes en zone intertropicale humide. Thèse ès-Sciences. 3 tomes. Paris.
- L.C.H.F.,1965.** Etude sédimentologique en Guyane. Rapport sur le Mahury. ORSTOM. Cayenne.
- L.C.H.F.-C.N.R.S. 1967.** Mission d'étude à Kourou. Rapport général. CNRS.
- Lointier, M. 1984.** Dynamique des eaux et de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary. Rapport EDF. ORSTOM Cayenne.
- Lointier, M.,1986.** Hydrodynamique et morphologie de l'estuaire du fleuve Sinnamary (Guyane Française). Le littoral guyanais: fragilité de l'environnement. Nature Guyanaise. Sepanrit. Sepanguy. 37-44.
- Lointier, M. 1987-1988.** Annuaire Hydrologique. ORSTOM. Cayenne.
- Lointier, M. & Prost, M.T.,1988.** Coastal sedimentation and local rivers supply in French Guiana: comparisons with the Amazon. Chapman Conference on the fate of particulate and dissolved components within the Amazon Dispersal System: River and Ocean. AGU. Charleston. Wild Dunes.

- Lointier, M. & Prost, M.T., 1988.** Environnement côtier des Guyanes. Rapport intermédiaire au Conseil Régional.
- Lointier, M. & Roche M.A., 1988.** Salinités et suspensions des estuaires de Guyane. Méthodes et résultats. IV^e Journées Hydrologiques de Montpellier.
- Lointier, M., 1989.** Estuaries and river studies in French Guiana, using SPOT and LANDSAT data. Poster. IAHS Third scientific assembly - May 89 Baltimore, USA. Traduction en français dans les 3^e journées ORSTOM - SEMINFOR.
- Noguès, J.L., 1984.** Etude de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary. Dynamique, hydrochimie, phytoplancton. Mémoire de DEA, Univ. de Provence, Saint - Charles et ORSTOM Cayenne, 45 pp.
- Nougier, J.P., 1985:** Méthodes de calcul numérique. Systèmes d'équations. Approximation par collocation. Moindres carrés, lissage. Dérivées - Racines d'équations. Diagonalisation de matrices. Intégrales - Equations différentielles. Equations aux dérivées partielles. Méthode des éléments finis. Méthodes de Monte-Carlo. Editeur: Masson. 2^{ième} édition. 325 pp.
- Prost, M.T. 1985.** Quelques problèmes relatifs à l'évolution côtière en Guyane. In, Etude de l'évolution morpho-sédimentaire des littoraux argileux sous climat équatorial: l'exemple du littoral guyanais. Rapport Cordet: 1-62. Ministère de la Recherche et de la Technologie. Paris. Université de Bordeaux-I IGBA. 189 pp.
- Prost, M.T., 1986.** Morphologie et dynamique côtières dans la région de Mana. In: Le littoral guyanais: fragilité de l'environnement. Nature Guyanaise. Sepanrit. Sepanguy. 31-36.
- Prost, M.T., 1986.** Aspects of the morpho-sedimentary evolution of French Guiana's coastline. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, vol. 4, 191-218. J. Rabassa Ed. A.A. Balkema Publ. Rotterdam.
- Prost, M.T., 1988.** Shoreline changes in French Guiana. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, vol 5. J.Rabassa Ed. A.A.Balkema Publ. Rotterdam.
- Prost, M.T. & Lointier, M. 1987.** Sedimentology and stratigraphy of the Holocene formations of the French Guiana's coastal plain. ABEQUA. Publ. avulsa 2: 55-83. São Paulo. Brésil.

- Prost, MT., 1989.** Changes in coastal sedimentary environments and remote sensing data in French Guiana. Internat. Symp. on Global Changes in South America during the Quaternary. São Paulo, Mai 1989.
- Ray S.B., Mohanti M. & Somayajulu B.L.K.,1984.** Suspended matter, major cations and dissolved silicon in the estuarine water of the Mahanadi river, India. Journal of hydrology, vol. 69, 183 - 196.
- Roche, M.A., Dubreuil P. & M. Hoepffner, 1974.** Dynamique des eaux, des sels et des sédiments en suspension des estuaires du Mahury et de l'Approuague. ORSTOM Cayenne, 80pp.
- Roche, M.A., 1977.** L'estuaire du Kourou en Guyane Française: possibilités d'alimentation en eau d'une usine de pâte de bois et risques de pollution par rejets industriels dans l'estuaire. Rapport. ORSTOM. 80 p.
- Savenije H.H.G., 1986:** A one-dimensional model for salinity intrusion in alluvial estuaries. Journal of Hydrology, vol. 85. Editors: L.R. Beard, G.H. Davis, J.S.G. McCulloch, J.E. Nash, and W.H. van der Molen. 183-196. 87-109.
- Wadworth A. & Petit M. 1987.** SPOT, un satellite pour l'océanographie? CNES. SPOT 1, utilisation des images, bilan, résultats.
- Yayer. 1937.** Compte-rendu de la mission pour l'établissement de la carte S.H.O.M. n° 5884 (région de Sinnamary).

ANNEXES

ANNEXE I

LISTE DES FIGURES

1. Carte de situation - position des sections de mesure sur le Sinnamary pour toutes les campagnes de mesures depuis 1983.

HAUTEURS

2. Limnigramme du 3 mai 88 - Section "D"

3. Limnigramme du 25 au 27 oct 88 - Section "D"

VITESSES

4 Exemple de dépouillement d'une verticale montrant certaines particularités du flot en estuaire. Les vitesses sont plus élevées à mi-profondeur.

5. Evolution des vitesses de Fond, Milieu et Surface, pendant un cycle de marée - Section "C" - Verticales n° 2 et 3 - 26 oct 88

6. Evolution des vitesses de Fond, Milieu et Surface, pendant un cycle de marée - Section "G" - Verticales n° 2 et 3 - 27 oct 88

DEBITS

7. Evolution des débits de jusant en fonction du temps - comparaison avec le limnigramme de la section "D" - 3 mai 88

8. Evolution des débits en fonction du temps - 26 oct 88 Section "C".

9. Evolution des débits en fonction du temps - 25 oct 88 Section "F".

10. Evolution des débits en fonction du temps - 27 oct 88 Section "G".

MESURES CHIMIQUES

11. Analyse factorielle des correspondances sur les paramètres conductivité, MES et Silice - Campagne d'octobre 88.

CONDUCTIVITE

12. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond.

Section C, verticale 2 - oct 88 -

13. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond.

Section D, verticale 2 - oct 88 -

14. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond.

Section E, verticale 2 - oct 88 -

15. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond.

Section F, verticale 2 - oct 88 -

16. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond.

Section G, verticale 2 - oct 88 -

17. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond.

Section H, verticale 2 - oct 88 -

18. Evolution de la conductivité en fonction du temps. Surface, milieu et fond.

Section i, verticale 2 - oct 88 -

19. Evolution de la Conductivité en fonction de la distance - Surface milieu et fond - Verticale 2 (centrale) - oct 88 -

RELATIONS CONDUCTIVITE ET NaCl

20. Relation entre la conductivité et la concentration en NaCl. - oct 88 -

21. Relation entre la conductivité et la concentration en NaCl. - déc 87 -

RELATION ENTRE Cl⁻ ET NaCl

22. Relations entre Cl⁻ et NaCl - déc 87 et oct 88

23. Relation déduite des mesures de Cl⁻, entre la concentration en NaCl et la conductivité - mai 88 -

SALINITE EN FONCTION DE LA DISTANCE

24. Evolution de la concentration en {NaCl} en fonction de la distance à l'embouchure - déc 87 -

25. Evolution de la concentration en {NaCl} en fonction de la distance à l'embouchure - mai 88 -

26. Evolution de la concentration en {NaCl} en fonction de la distance à l'embouchure - oct 88 -

MATIERES EN SUSPENSION (MES)

27. Evolution des débits et des MES en fonction du temps.
Section "C" - 26 oct 88

28. Evolution des MES et de la salinité en fonction du temps.
Section "C" - 26 oct 88

29. Evolution des MES et de la salinité en fonction du temps.
Section "D" - 26 oct 88

30. Evolution des MES et de la salinité en fonction du temps.
Section "F" - 25 oct 88

31. Evolution des débits et des MES en fonction du temps.
Section "G" - 27 oct 88

32. Evolution des MES et de la salinité en fonction du temps.
Section "G" - 27 oct 88

33. Evolution des MES et de la salinité en fonction du temps.
Section "H" - 27 oct 88

pH

34. Salinité et pH du 16 déc 87 en fonction de la distance à l'embouchure.

35. Salinité et pH du 17 déc 87 en fonction de la distance à l'embouchure.

TEMPERATURE

36. Evolution de la température et de la salinité dans l'estuaire du Sinnamary - 16 déc 87.

37. Evolution de la température et de la salinité dans l'estuaire du Sinnamary - 17 déc 87.

SILICE

38. Relation entre le logarithme de la concentration en {NaCl} et la Silice - oct 88 - toutes sections.

OXYGENE DISSOUS

39. Saturation en Oxygène dissous (ppm), en fonction de la salinité (g/l).

40. Profil d' Oxygène dissous en fonction de la distance à l'embouchure - comparaison avec la salinité - 16 déc 88 -

41. Profil d' Oxygène dissous en fonction de la distance à l'embouchure - comparaison avec la salinité - 17 déc 88 -

42. Evolution en fonction du temps, du pourcentage en O2 dissous par rapport à la saturation - En surface et à 1,50 m de profondeur - Section D, oct 88 -

43. Evolution en fonction du temps, du pourcentage en O2 dissous par rapport à la saturation - En surface et à 1,50 m de profondeur - Section H, oct 88 -

MODELISATION

44. Simulation de la remonté saline dans l'estuaire du Sinnamary. Evolution de la salinité en fonction de la distance à l'embouchure au pas de deux heures.

45. Simulation de la remonté saline dans l'estuaire du Sinnamary. Comparaison des courbes théoriques et expérimentales.

ANNEXE II
TABLEAUX DE DONNEES

MESURES		HYDROMETRIQUES : VERTICALES:														
		HAUTE MER : 5,22 heures				26:10:00				1 (RIVE DROITE)		2 (MILIEU)		3 (RIVE GAUCHE)		
TEMPS : HEURE ET DIXIEME D'HEURE		QL :	DEBIT LINEAIRE				V: VITESSE				S: SURFACE		M: MILIEU		F: FONC	
TEMPS	DEBIT (M3/S)	QL(1) (M2/S)	V(1)F (M/S)	V(1)M (M/S)	V(1)S (M/S)	QL(2) (M2/S)	V(2)F (M/S)	V(2)M (M/S)	V(2)S (M/S)	QL(3) (M2/S)	V(3)F (M/S)	V(3)M (M/S)	V(3)S (M/S)			
10,36	-513,1	-2,196	-,384	-,937	-1,212											
10,47						-1,124	-,433	-,699	-,735	-,622	-,438	-,622	-,746			
10,58																
11	-469,1	-2,18	-,388	-1,005	-1,208	-,864	-,352	-,595	-,735	-,538	-,42	-,51	-,65			
11,12																
11,22																
11,58	-367,6	-1,593	-,316	-,676	-1,03	-,835	-,285	-,6	-,73	-,403	-,325	-,465	-,498			
11,72																
11,82																
12,25	-279,6	-1,269	-,217	-,505	-,826	-,603	-,235	-,393	-,481	-,278	-,136	-,262	-,369			
12,33																
12,42																
12,77	-104,6	-,513	-,037	-,185	-,427	-,205	-,042	-,127	-,172	-,084	-,051	-,055	-,072			
12,87																
13,3	220,1	,515	,033	,235	,171	,572	,24	,303	,153	,602	,343	,433	,285			
13,47																
13,53																
13,87	515,2	1,795	,361	,734	,341	1,259	,132	,645	,367	,91	,433	,438	,382			
13,93																
14,05																
14,45	464	1,228	,208	,33	,435	1,481	,289	,622	,556	,908	,177	,532	,079			
14,52																
14,63																
15,1	637,1	1,528	,46	,528	,302	1,995	,348	,784	,229	1,43	,433	,712	,051			
15,22																
15,32																
15,63	738,5	1,963	,253	,604	,396	2,184	,438	,816	,217	1,579	,469	,69	,038			
15,72																
15,82																
16,12	713,6	2,011	,24	,577	,433	2,107	,303	,676	,207	1,419	,28	,595	,147			
16,2																
16,33																
16,62	785,9	2,498	,285	,622	,57	1,994	,24	,6	,469	1,558	,217	,672	,334			
16,68																
16,8																
17,17	738,3	2,287	,28	,586	,439	1,867	,244	,501	,565	1,526	,181	,572	,486			
17,25																
17,35																
17,6	553,1	1,873	,271	,456	,492	1,431	,19	,465	,373	,964	,149	,366	,288			
17,68																
17,8																
18,13	325,6	1,308	,204	,334	,313	,742	,087	,244	,169	,453	,163	,055	,046			
18,22																
18,32																
18,67	-145,3	-,347	-,042	-,069	-,15	-,376	-,163	-,051	-,16	-,392	-,064	-,06	-,51			
18,78																
18,88																
19,1	-362,9	-,925	-,078	-,213	-,346	-1,019	-,19	-,24	-,602	-,954	-,141	-,267	-,73			
19,18																
19,28																
19,55	-528,2	-,872	-,055	-,221	-,679	-1,751	-,253	-,465	-1,019	-1,484	-,231	-,438	-1,043			
19,68																
19,78																
20,07	-729,1	-2,17	-,28	-,6	-1,023	-2,097	-,276	-,586	-1,163	-1,384	-,258	-,474	-1,253			
20,15																
20,25																

Tableau n° 1:

SECTION "C": valeurs des vitesses de FLOT et de JUSANT du 26 octobre 1988

nb: les temps sont exprimés en centièmes d'heures et le jusant est affecté du signe négatif.

MESURES		HYDROMETRIQUES :		VERTICALES:		SECTION F MER : 4,5 heures 25:10:88		<1> RIVE DROITE		<2> MILIEU		<3> RIVE GAUCHE							
TEMPS:	HEURE ET DIXIEME D'HEURE	QL :				DEBIT LINEAIRE				V: VITESSE				S: SURFACE		M: MILIEU		F: FOND	
TEMPS	DEBIT (M ³ /S)	QL<1> (M ² /S)	V<1>F (M/S)	V<1>M (M/S)	V<1>S (M/S)	QL<2> (M ² /S)	V<2>F (M/S)	V<2>M (M/S)	V<2>S (M/S)	QL<3> (M ² /S)	V<3>F (M/S)	V<3>M (M/S)	V<3>S (M/S)						
15,57	527,5	2,143	,213	,311	,32	3,957	,379	,622	,681	5,434	,249	,762	,86						
15,63																			
15,77																			
16	452,4	3,191	,397	,528	,466	3,701	,338	,519	,658	3,081	,433	,42	,271						
16,07																			
16,18																			
16,5	539,3	3,39	,352	,627	,46	1,59	,172	,204	,363	6,448	,522	,771	,686						
16,58																			
16,77																			
17	600,2	3,725	,352	,636	,525	5,044	,545	,712	,768	4,474	,127	,681	,625						
17,08																			
17,22																			
17,5	520	2,757	,402	,406	,388	4,807	,379	,676	,595	3,967	,451	,645	,335						
17,6																			
17,72																			
17,97	347,6	2,615	,348	,465	,108	3,32	,352	,519	,345	1,809	,433	,221	,182						
18,07																			
18,18																			
18,3	216,1	2,074	,316	,357	,024	1,3	,076	,289	,024	1,329	,244	,24	,099						
18,38																			
18,5																			

Tableau n° 2:
SECTION "F": valeurs des vitesses de FLOT mesurées le 25 octobre
1988.

MESURES		HAUTE MER : 5,95 heures				SECTION G			MER : 27:10:00								
HYDROMETRIQUES :		VERTICALES :				(1) RIVE DROITE	(2) MILIEU	(3) RIVE GAUCHE									
TEMPS :	HEURE ET DIXIEME D'HEURE	QL :				DEBIT LINEAIRE			V : VITESSE			S : SURFACE		M : MILIEU		F : FONC	
TEMPS	DEBIT (M3/S)	QL(1) (M2/S)	U(1)F (M/S)	U(1)M (M/S)	U(1)S (M/S)	QL(2) (M2/S)	U(2)F (M/S)	U(2)M (M/S)	U(2)S (M/S)	QL(3) (M2/S)	U(3)F (M/S)	U(3)M (M/S)	U(3)S (M/S)				
8,08		-1,346	-,091	-,19	-,185												
8,17						-1,03	-,113	-,154	-,22								
8,25	-287,5	-3,124	-,24	-,465	-,524	-3,233	-,258	-,532	-,586	-1,47	-,113	-,244	-,304				
8,33																	
8,42																	
8,9																	
9,1	-372,6	-4,872	-,545	-,753	-,663	-3,811	-,226	-,6	-,699	-2,687	-,285	-,469	-,496				
9,2																	
9,3																	
9,45	-389,9	-4,976	-,447	-,829	-,737	-3,991	-,406	-,694	-,701	-3,001	-,429	-,537	-,58				
9,73																	
9,80																	
10,22	-368,8	-5,232	-,577	-,883	-,801	-4,212	-,123	-,681	-,783	-3,254	-,458	-,595	-,623				
10,3																	
10,45																	
10,63	-379,6	-4,804	-,537	-,784	-,689					-2,793	-,267	-,51	-,658				
10,72						-4,244	-,501	-,766	-,826								
10,80										-2,911	-,316	-,572	-,655				
11,17	-384,3	-4,964	-,357	-,865	-,893	-4,107	-,123	-,69	-,797	-3,008	-,402	-,581	-,609				
11,27																	
11,37																	
11,67	-337,4	-5,226	-,424	-,883	-,94	-3,117	-,109	-,618	-,824	-2,208	-,276	-,438	-,526				
11,75																	
11,85																	
12,15	-368,9	-4,981	-,591	-,879	-,872	-4,04	-,361	-,802	-,765	-2,597	-,393	-,55	-,521				
12,23																	
12,33																	
12,67	-305,7	-4,217	-,307	-,658	-,871	-3,07	-,496	-,627	-,65	-2,297	-,105	-,46	-,517				
12,75																	
12,83																	
13,17	-302,7	-4,303	-,375	-,73	-,779	-3,074	-,311	-,586	-,669	-2,125	-,284	-,456	-,507				
13,18																	
13,27																	
13,67	-242,5	-3,583	-,311	-,631	-,628	-2,427	-,19	-,465	-,566	-1,598	-,185	-,343	-,399				
13,77																	
13,85																	
14,6		-,896	-,1	-,159	-,111	-,476	-,123	-,051	-,094	1,053	,1	,226	,135				
14,7																	
14,80																	
15,17	226,2	2,479	,249	,397	,326	2,148	,258	,352	,413	2,418	,221	,492	,508				
15,23																	
15,33																	
15,67	294,2	3,116	,253	,482	,509	3,371	,397	,545	,658	2,773	,258	,487	,589				
15,73																	
15,80																	
16,17	343,4	4,155	,37	,622	,527	3,618	,289	,541	,614	3	,244	,465	,636				
16,23																	
16,33																	
16,65	369,6	4,169	,397	,627	,466	4,093	,352	,532	,779	3,357	,235	,545	,632				
16,72																	
16,80																	
17,15	397,4	4,377	,482	,622	,416	4,721	,348	,69	,752	3,448	,204	,55	,608				
17,23																	
17,3																	
17,67	385,8	4,161	,379	,595	,412	4,184	,226	,64	,73	3,762	,307	,595	,607				
17,73																	
17,85																	
18,17	385,3	4,149	,307	,609	,453	4,455	,338	,685	,715	3,534	,199	,568	,542				
18,23																	
18,35																	
18,62	366,5	3,816	,388	,541	,326	4,332	,334	,654	,6	3,411	,311	,528	,437				
18,7																	
18,8																	
19,05	277,7	2,78	,262	,388	,225	3,216	,19	,447	,435	2,746	,244	,433	,394				
19,13																	
19,25																	
19,67	174,5	2,003	,19	,276	,191	2,165	,262	,352	,235	1,36	,105	,249	,116				
19,65																	
19,75																	
20,08	-80,99	-,671	-,109	-,1	0	-,332	-,055	-,037	-,07	-,424	-,064	-,078	0				
20,17																	
20,28																	

Tableau n° 3:

SECTION "G": valeurs des vitesses de FLOT et de JUSANT du 27 octobre 1988

nb: les temps sont exprimés en centièmes d'heures et le jusant est affecté du

ESTUAIRE DU SINNAHARY VERTICALE (2)														OCTOBRE 1988		MIDILIEU	
MESURES		CHIMIQUES			FOND		SURFACE										
TEMPS:		HEURE ET DIXIEME D'HEURE			CV 1		CONDUCTIVITE		SEL : CONCENTRATION EN (Na+ + Cl-)								
DISTANCE	SECTION	CV(20M)	CV(20F)	CV(20S)	SEL	SEL	TEMPS	TEMPS	SILICE	M.E.S	Na+	Cl-	O2 DIS.	O2 DIS.			
(KM)		RS/CM	RS/CM	RS/CM	MG/L	G/L	KEEL	(CM-O)	MG/L	MG/L	MG/L	MG/L	SURFACE	1,50			
							HEURE	HEURE					% SATUR	% SATUR			
13,00	F	1,13	1,24	1,31	52,73	0,05	15,72	11,22	8,25	77,10	19,00	33,73					
13,00	F	1,30	1,40	1,42	122,76	0,12	16,13	11,63	8,17	159,70	42,00	80,76	72,76				
13,00	F	1,40	1,49	1,52	243,06	0,26	16,47	12,17	8,36	232,40	90,00	173,06					
13,00	F	1,50	1,87	1,90	826,70	0,83	17,15	12,65	7,87	191,60	280,00	546,70					
13,00	F	5,08	3,54	4,70	2326,50	2,33	17,63	13,13	7,16	134,00	800,00	1524,50					
13,00	F	12,13	8,91	7,56	5934,00	5,83	18,13	13,63	7,53	250,30	2000,00	3834,00					
13,00	F	18,75	16,80	16,19	8587,50	8,86	18,45	13,95	7,44	440,50	3000,00	5887,50					
4,00	C	26,36	40,60	42,94	15669,64	15,67	10,48	5,26	4,30	350,50	4600,00	10369,64					
4,00	C	18,99	22,94	17,76			11,20										
4,00	C	11,69	18,63	10,45	6277,75	6,28	11,77	6,55	6,39	1392,40	2000,00	4277,75					
4,00	C	6,40	10,99	6,03			12,39										
4,00	C	5,58	6,62	4,40	2586,25	2,59	12,92	7,70	7,62	210,90	900,00	1686,25					
4,00	C	5,49	4,53	4,30			13,50										
4,00	C	15,35	16,57	16,51			14,58										
4,00	C	49,47	21,39	23,36	25214,63	25,21	15,28	10,06	1,61	1095,90	9200,00	16014,63					
4,00	C	49,40	33,25	24,05			15,78										
4,00	C	54,97	50,08	32,00	30637,40	30,64	16,28	11,06	1,90	1237,40	10400,00	20237,40					
4,00	C	50,56	50,46	43,63			16,75										
4,00	C	54,86	50,24	48,10	30641,65	30,84	17,28	12,06	1,79	737,30	10400,00	20441,65					
4,00	C	50,44	50,44	48,15			17,75										
4,00	C	54,97	49,79	48,49	30760,80	30,76	18,28	13,06	1,73	235,50	10400,00	20360,80					
4,00	C	50,12	49,59	48,74			18,83										
4,00	C	56,13	49,79	44,84	31339,29	31,34	19,25	14,03	1,70	81,30	10400,00	20339,29					
4,00	C	50,24	49,79	31,36			19,72										
4,00	C	54,86	49,36	25,81	30595,37	30,60	20,40	14,98	1,87	482,20	10400,00	20195,37					
8,00	D	23,50	39,90	13,70			8,67										
8,00	D	20,20	40,10				9,17						82,76	75,44			
8,00	D	16,70	29,70				9,67						76,69	80,27			
8,00	D	8,46	11,26	5,24	4106,65	4,11	10,17	4,95	7,33	499,40	1400,00	2706,65	77,32	77,34			
8,00	D	2,14	2,90	1,98			10,67						77,15	74,53			
8,00	D	1,05	1,21	3,53	464,19	0,46	11,17	5,95	8,31	479,90	160,00	304,19	80,19	74,28			
8,00	D	1,56	1,81				11,67						79,48	78,14			
8,00	D	1,35	1,57	1,35	142,15	0,14	12,17	6,95	8,80	213,80	50,00	92,15	79,42	78,09			
8,00	D	1,49	1,45	1,26	170,88	0,17	14,17	8,95	9,05	150,70	60,00	110,88	83,37	82,10			
8,00	D	1,85	1,55	1,50			14,77						78,13	75,56			
8,00	D	2,12	1,90	1,28	919,95	0,92	15,17	9,95	8,80	1211	320,00	599,95	79,46	77,18			
8,00	D	6,45	6,62	3,16			15,67						81,43	79,56			
8,00	D	10,84	15,05	7,41	5279,00	5,28	16,17	10,95	7,06	32,20	1800,00	3479,00	83,27	87,49			
8,00	D	27,83	24,15	7,18			16,67						81,03	73,85			
8,00	D	37,00	40,04	11,76	17832,20	17,83	17,17	11,95	3,17	115,80	6400,00	11432,20	75,40	78,90			
8,00	D	46,10	47,10	15,40			17,67						72,11	67,57			
8,00	D	56,78	48,05	20,53	30554,78	30,55	18,17	12,95	1,94	161,70	10000,00	20554,78	73,30	84,60			
8,00	D	48,20	49,30	21,10			18,67						73,44	85,12			
8,00	D	55,46	49,17	19,12	30055,22	30,06	19,17	13,95	1,05	43,30	10000,00	20055,22	95,60	90,55			
8,00	D	47,70	45,20	13,40			19,67						74,41	63,43			
8,00	D	43,52	48,20	13,40	23993,52	23,99	20,17	14,95	2,47	38,40	7600,00	16393,52	84,06	82,21			
16,00	0	1,20	1,24	1,19	73,30	0,08	8,21	2,26	9,32	44,00	28,00	51,30					
16,00	0	1,15	1,16	1,13			8,75	2,80									
16,00	0	1,10	1,13	1,10	37,24	0,04	9,21	3,26	8,08	44,00	14,00	23,24					
16,00	0	1,07	1,07	1,06			9,75	3,80									
16,00	0	1,04	1,06	1,04	12,46	0,01	10,37	4,42	8,20	29,40	5,00	7,46					
16,00	0	1,05	1,05	1,04			10,78	4,83									
16,00	0	1,05	1,04	1,05	12,23	0,01	11,32	5,37	9,32	20,00	3,60	8,65					
16,00	0	1,03	1,05	1,05			11,80	5,85									
16,00	0	1,04	1,06	1,04	7,25	0,01	12,25	6,30	9,60	56,50	3,10	4,15					
16,00	0	1,03	1,03	1,04			12,75	6,80									
16,00	0	1,13	1,03	1,03			13,25	7,28									
16,00	0	1,04	1,03	1,04			13,80	7,85									
16,00	0	1,03	1,03	1,04			14,30	8,33									
16,00	0	1,03	1,03	1,04	6,73	0,01	14,75	8,80	8,93	14,00	3,00	3,73					
16,00	0	1,04	1,04	1,04			15,25	9,30									
16,00	0	1,03	1,03	1,04			15,75	9,80									
16,00	0	1,03	1,03	1,04	8,68	0,01	16,30	10,35	9,60	34,80	3,60	5,08					
16,00	0	1,04	1,03	1,05			16,75	10,80									
16,00	0	1,07	1,08	1,09	25,12	0,03	17,27	11,32									
16,00	0	1,15	1,15	1,15			17,75	11,80	9,32	52,90	9,50	15,42					
16,00	0	1,38	1,17	1,33	162,50	0,16	18,27	12,32	9,32	72,10	58,00	100,50					
16,00	0	1,78	1,67	1,67			18,75	12,80									
16,00	0	1,46	1,46	1,16	648,37	0,65	19,68	13,73	8,80	45,50	210,00	423,37	74,70	79,34			
16,00	0	1,79	1,48	1,62	602,50	0,60	20,22	14,27	12,08	36,20	270,00	532,50	76,70	76,70			
20,00	H	1,05	1,05	1,05	15,41	0,02	8,17	2,22	10,49	22,40	6,00	9,41					
20,00	H	1,05	1,04	1,04			8,67						74,70	79,34			
20,00	H	1,03	1,03	1,04	8,04	0,01	9,25	3,30	11,88	21,90	3,50	4,54					
20,00	H	1,03	1,03	1,03			9,67						75,37	78,02			
20,00	H	1,03	1,04	1,03	6,10	0,01	10,17	4,22	10,49	15,50	2,80	3,30	76,69	78,02			
20,00	H	1,03	1,03	1,02			10,67						78,02				
20,00	H	1,02	1,03	1,03	5,72	0,01	11,17	5,22	10,18	13,30	2,60	3,12	81,98	83,31			
20,00	H	1,03	1,02	1,03			11,67						79,34	73,34			
20,00	H	1,03	1,02	1,03	5,55	0,01	12,17	6,22	10,03	12,30	2,60	2,95	73,34	83,31			
20,00	H	1,03	1,03	1,03			12,67						83,31	83,31			
20,00	H	1,03	1,03	1,02	6,45	0,01	14,17	8,22	10,98	15,10	2,30	3,55	71,40	72,73			
20,00	H	1,02	1,02	1,03	5,44	0,01	14,67						74,05	76,69			
20,00	H	1,02	1,02	1,03			15,17	9,22	9,88	8,10	2,60	2,64					
20,00	H	1,03	1,03	1,03			15,67						81,98				
20,00	H	1,03	1,03	1,03	7,31	0,01	16,17	10,22	10,18	9,00	3,30	4,01					
20,00	H	1,03	1,03	1,03			16,67										
20,00	H	1,03	1,04	1,03	5,62	0,01	17,17	11,22	10,71	11,30	2,60	3,02					
20,00	H	1,03	1,03	1,03			17,67										
20,00	H	1,03	1,03	1,03	7,56	0,01	18,17	12,22	10,81	23,30	3,30	4,28					
20,00	H	1,04	1,04	1,03			18,67										
20,00	H	1,03	1,05	1,05	16,65	0,02	19,17	13,22	10,03	38,10	6,60	10,05					
20,00	H	1,08	1,07	1,09			19,67	13,72									
23,00	I	1,03	1,04	1,03			8,92	2,97									
23,00	I	1,03	1,04	1,03			9,42	3,47									
23,00	I	1,03	1,03	1,03			9,92	3,97									
23,00	I	1,03	1,03	1,03			10,42	4,47									
23,00	I	1,03	1,03	1,03			10,92	4,97									
23,00	I	1,03	1,03	1,03			11,42	5,47									
23,00	I	1,03	1,03	1,03			11,92	5,97</									