

ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE
DE LA CASAMANCE MARITIME

par

B. MILLET⁽¹⁾, J.C. OLIVRY⁽¹⁾ et Y. LETROQUER⁽²⁾

(1) Hydrologues de l'ORSTOM en poste au Centre ORSTOM de Montpellier-
Miniparc n° 2 - 34100 - Montpellier - France.

(2) Technicien hydrologue de l'ORSTOM en poste au Centre ORSTOM de
Dakar-Hann.

R E S U M E

Présentation des résultats des mesures **courantomé-**triques effectuées entre Ziguinchor et **Sefa** : caractéristiques du champ de vitesse dans cet estuaire qui apparait exceptionnellement bien mélangé et calcul des variations longitudinales des volumes oscillants et "excursions" de marée. Les enregistrements du courantomètre **AANDERAA** sont dans l'optique du calcul d'un bilan **hydrique** et salin global de l'estuaire. Présentation enfin, de la problématique de l'élaboration en cours d'un **modèle** hydrodynamique bidimensionnel de propagation de marée dans l'estuaire.

A B S T R A C T

Hydrological features of the estuary : presentation of the velocity measurements made between Ziguinchor and **Sefa** : characteristics of the speed range in the estuary which appears as an exceptionally well mixed estuary, and calculation of the longitudinal variations of **oscillating** tidal volumes.

Presentation of some **considerations** about the **AANDERAA** recording **interpretation** in the perspective of the **evaluation** of a global hydrological and saline balance evaluation in the estuary.

Presentation, at last, of the management concerning the elaboration of a two-dimensional **tidal** circulation model in the estuary.

INTRODUCTION

Le programme pluridisciplinaire "Pêche et Environnement" développé depuis le début de l'année 1984 sur l'estuaire de la Casamance devait être accompagné d'une étude des caractéristiques hydralogiques (au sens large) de ce milieu.

Une précédente étude limnimétrique de propagation de marée a été effectuée entre 1968 et 1970 par M. BRUNET-MORET (Ingenieur hydrologue à l'ORSTOM). Cette étude de référence nécessitait d'être complétée par une étude du champ des vitesse de courant dans l'estuaire, afin de pouvoir étayer les études biologiques.

C'est ainsi qu'ont été envisagées les trois études suivantes qui se situent chacune à trois niveaux de réflexion différents. La première étude est Eondamentale et consiste à mesurer les vitesses du courant à travers plusieurs sections de l'estuaire et au cours de plusieurs cycles complets de marée. La seconde étude qui se place dans une logique purement hydrologique consiste à calculer un bilan hydrique et salin global de l'estuaire, à partir des enregistrements en continu d'un courantomètre immergé au niveau du pont de Ziguinchor. La troisième approche obéit à une logique déterministe et consiste à simuler les mécanismes de circulation et de dispersion dans l'estuaire entre Ziguinchor et Diana-Malari par l'élaboration d'un modèle hydrodynamique.

Cette note se propose de présenter les résultats de l'étude du champ des vitesses dans l'estuaire, de faire le point des problèmes rencontrés pour l'exploitation des enregistrements du courantomètre de Ziguinchor et de présenter la problématique du modèle hydrodynamique.

1. LES MESURES COURANTOLOGIQUES DANS L'ESTUAIRE

Ces mesures qui constituent un préliminaire indispensable, sont destinées à quantifier les vitesse d'écoulement de marée entre les sections 13 et 30 de l'estuaire, telles qu'elles ont été définies en avril 1984, et de juger de leurs répartitions longitudinales, latérales et verticales au cours de plusieurs cycles de marée. La figure 1 présente tout d'abord les résultats des quatre premières campagnes qui consistaient à suivre longitudinalement dans l'estuaire les vitesses maximales d'une même onde de marée, repérées successivement aux stations 13, 17, 19, 21, 25, 27 et 30. Une nette diminution des vitesses maximales apparaît entre les stations 21 et 25.

Les mesures ultérieures de vitesses, effectuées entre le 4/08/84 et le 6/08/85, sont destinées à mesurer d'une part la structure verticale du champ de courant dans l'estuaire ce qui est déterminant pour caractériser le type d'écoulement et à calculer, d'autre part, les volumes oscillants de marée à travers plusieurs sections de l'estuaire. C'est pourquoi les mesures ont été faites par la méthode de jaugeage par verticales indépendantes qui, en procédant par intégration en laissant descendre un courantomètre à vitesse constante sur toute la profondeur et sur plusieurs verticales préalablement matérialisées sur la section, permet de mesurer un flux à travers une section dont le niveau d'eau varie en cours de jaugeage ; de plus, trois mesures en point fixe de 30 seconde à une minute ont été réalisées à chaque passage sur chaque verticale, à 20 cm de la surface 3 mi-profondeur et à 30 cm du fond ,

Ces mesures ont été faites sur les sections 13, 21, 25 et 30 de l'estuaire avec 5, 7 et 11 verticales respectivement définies sur ces sections. L'ensemble de l'écoulement est ainsi jaugé pour les sections 13, 25 et 30 mais seulement la partie active du chenal pour la section 21. D'une façon générale, le calcul final du volume oscillant de marée est effectué à chaque fois sur la totalité de la section mouillée et une extrapolation spatiale des vitesses a donc été nécessaire pour la section 21 le 23/3/85 sur 300 mètres de platier en rive droite. Pour cette dernière section, un suivi plus précis des phénomènes de renverse de courant a été fait à partir de 2 verticales supplémentaires le 22/3/85 et de 6 verticales supplémentaires le 6/8/85.

La figure 2 présente trois exemples représentatifs des mesures de la structure verticale des vitesses de courant. La figure 2a concerne la verticale centrale de la section 13 ; les figures 2b et 2c concernent deux verticales situées respectivement au centre du chenal et en bordure du platier de rive droite de la section 25. On remarquera l'excellente homogénéité verticale du champ de vitesse, qui sera le cas pour toutes les observations effectuées à travers l'estuaire et ce qui n'était pas évident a priori, même pour un estuaire de relativement faible profondeur.

Ces observations du champ vertical des vitesses qui présentent des profils classiques de type logarithmique en l'absence totale de stratification sont déterminantes quant au choix du modèle hydrodynamique ultérieur. Cette homogénéité verticale s'oppose aux importantes hétérogénéités longitudinale (amont-aval) et latérale (chenal-platier) du champ de vitesse, qui accompagnent d'importants phénomènes d'ammortissement de l'onde de marée incidente dans cet estuaire à la topographie très irrégulière.

Le tableau 1 présente les résultats des calculs des volumes oscillants de flots (VF) et de jusant (VJ) ainsi que les "excursions" correspondantes effectués à partir des mesures de vitesse d'intégration sur verticales indépendantes. Le principe est le suivant : On calcule tout d'abord des "débits unitaires" instantanés, sur chaque verticale exprimés en $m^2 \cdot s$ - "en faisant le produit de la vitesse moyenne intégrée, par la profondeur. On trace, ensuite pour chaque verticale les variations de ces débits unitaires en fonction du temps, diagramme qui permet, par extrapolation graphique, de reconstituer une chronique continue de valeurs pour chaque verticale n'ayant été mesurée que par intermittance. Les variations du plan d'eau sont alors implicitement prises en compte. Puis on trace à partir de ces figures, les variations spatiales des "débits unitaires" sur toute la section pour une série d'instant t , en prenant simultanément sur toutes les verticales, les valeurs de ces débits unitaires aux instants t . On calcule alors les valeurs des débits ($m^3 \cdot s^{-1}$) par planimétrage des courbes obtenues. On trace les variations de ces débits en fonction du temps sur un cycle de marée et un nouveau planimétrage donne les volumes oscillants de flot et de jusant sur toute la section mouillée. Les figures 3a, 3b et 3c présentent respectivement trois exemples représentatifs des variations horaires du champ des vitesses moyennes sur la verticale, aux sections 13, 25 et 30 de l'estuaire. Les figures 4 et 5 présentent respectivement les variations longitudinales des volumes oscillants de flot et de jusant entre les sections 13 et 30 et des "excursions" de marée (en km) calculées en ramenant les valeurs des volumes oscillants à celles des sections mouillées mesurées simultanément sur les sections correspondantes. Tous ces résultats sont susceptibles d'être directement utilisés pour les études biologiques et l'ensemble des données disponibles dans le détail auprès des auteurs.

Tableau 1. - Résultats des campagnes de mesures courantométriques

Station	Date	Volumes oscillants		Durée		Excursions de marée	
		(10 ⁶ m ³)		(h.mn)		(km)	
		flot	jusant	flot	jusant	flot	jusant
Ziguinchor							
13	4/8/84	39,6	46,5	5.55	6.30	8	9,4
	10/8/84	51,6	50,5	6.15	6.15	10,4	10,2
	25/3/85	55	58,5	6.10	6.10	11	11,8
	26/3/85	55	53	6.20	6.00	11	10,7
	27/3/85	48	59	6.06	6.25	9,7	11,9
	11/6/85	49	52,5	5.55	6.15	9,9	10,6
	12/6/85	36,5	45	6.15	5.50	7,3	9,1
	01/8/85	68,5	46,5	7.05	5.40	13,8	9,4 (vent)
	02/8/85	68	48,5	6.55	5.50	13,7	9,8 (vent)
Goudomp							
21	23/3/85	22,8	26,8	5.45	6.25	4,6	5,4
Hamdalaye							
25	22/3/85	13	8,8	6.20	5.45	4,6	3,1
	14/6/85	7	14,3	5.50	6.55	2,5	5,1 (vent)
	15/6/85	13,4	13	6.05	6.45	4,8	4,6
	06/8/85	6,3	11,1	5.15	7.00	2,1	3,7 (vent)
Sefa							
30	17/6/85	3,7	3,7	5.55	6.55	4,7	4,7
	04/8.85	3,2	4,7	5.10	6.40	4,1	6,0

2. LA TENTATIVE DE BILAN HYDRIQUE A ZIGUINCHOR

La réflexion sur le régime hydrologique de l'estuaire en terme de bilan global a été l'origine de l'immersion d'un courantomètre enregistreur de type AANDERAA à 4 mètres de profondeur dans la partie la plus profonde du chenal de la section 13 de l'estuaire choisie comme l'exutoire de l'étude hydrologique. Sur les 438 journées d'immersion, l'appareil a fonctionné en continu pendant 7 périodes successives d'environ un mois, soit un total de 177 journées disponibles entre le 17/7/84 et le 28/19.85. Le bilan nécessite de longue chronique de flux que l'on cherchera par conséquent à calculer à partir des enregistrements ponctuels du courantomètre, en utilisant les résultats des campagnes d'étalonnage de débits effectuées sur la même section (cf tableau 1).

Le tableau 2 présente quelques exemples du type de formules de régression obtenues entre les enregistrements de vitesse (V) et les mesures de débits (Q) observés sur la section 13 et qui apparaissent rassurantes. Malheureusement deux problèmes se posent et qui interdisent pour le moment toute exploitation massive des enregistrements sans filtrage préalable. Tout d'abord les traitements systématiques effectués au COB de BREST mettent en évidence

une excursion résultante de courant nettement positive vers l'aval ce qui paraît immédiatement suspect vis à vis des observations de l'hypersalinisation de l'estuaire. Ce biais des enregistrements semble d'ailleurs confirmé quand on constate que la durée de jusant enregistrée au courantomètre est toujours supérieure à celle des mesures de débit et pouvant même la dépasser d'une heure et demi.

Tableau 2.- Quelques exemples de régression entre les enregistrements de vitesse de l'ANDERAA de Ziguinchor et les mesures de débit d'étalonnage.

Date	Marée	Nombre de valeurs	Coefficient de corrélation	Formule de régression
25/3/85	jusant	73	0,967	$Q = 4382.V + 81$
27/3/85	jusant	77	0,967	$Q = 4563.V - 117$
	flot	58	0,992	$Q = 5609.V - 84$
11/6/85	jusant	75	0,937	$Q = 5412.V - 367$
04/8.85	flot	56	0,925	$Q = 3498.V + 142$

D'autre part, il apparaît que les bonnes corrélations ne sont pas toujours obtenues sur durée totale du flot ou du jusant mais que l'on doit dans la majorité des cas amputer les séries des faibles valeurs de vitesse, ce qui revient à limiter les corrélations aux 3 ou 4 heures pendant lesquelles le régime de courant est bien établi.

Les enregistrements du courantomètre devront maintenant faire l'objet d'une analyse harmonique qui permettra de mettre en évidence l'existence éventuelle de phénomène dont la fréquence serait différente de celles, connues, des principales composantes de la marée à Ziguinchor. Deux principales hypothèses peuvent être émises pour expliquer ce comportement du courantomètre :

- Une anomalie hydraulique au niveau de la section de Ziguinchor du fait du resserrement très brutal de l'estuaire à ce niveau, ce qui rendrait asymétrique les écoulements de flot et de jusant. Cette asymétrie n'apparaît cependant pas sur les flux d'étalonnage observés.

- Un mauvais fonctionnement de l'appareil qui présenterait de grandes oscillations en régime de petites vitesses, c'est à dire aux périodes d'étales, ou bien des couples de torsion, ou blocages de la part du système de mouillage.

D'une manière générale, ces enregistrements sont conservés et devront donner des résultats représentatifs après un filtrage guidé par l'analyse harmonique des enregistrements, qui sera effectuée au Centre ORSTOM de Montpellier.

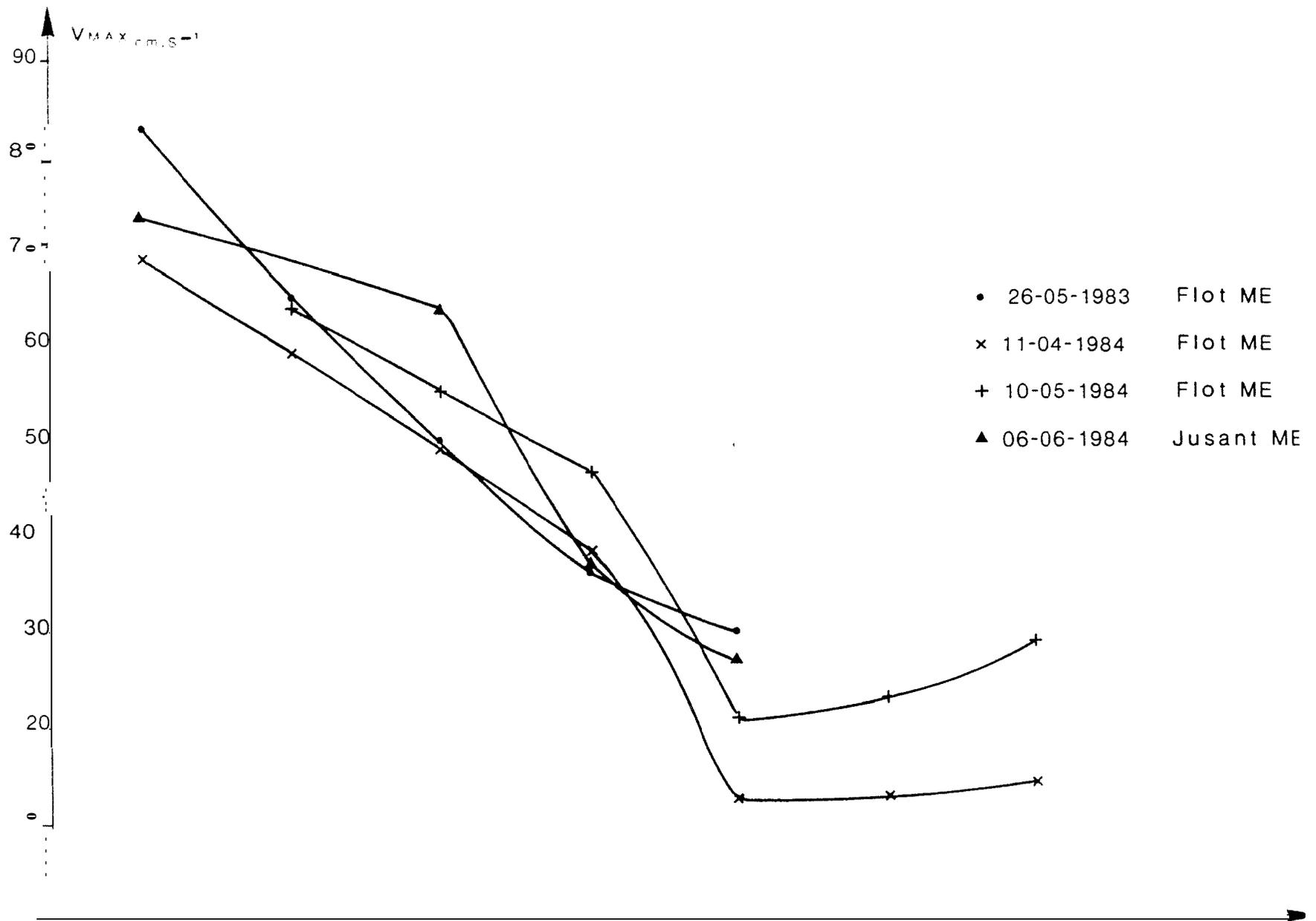
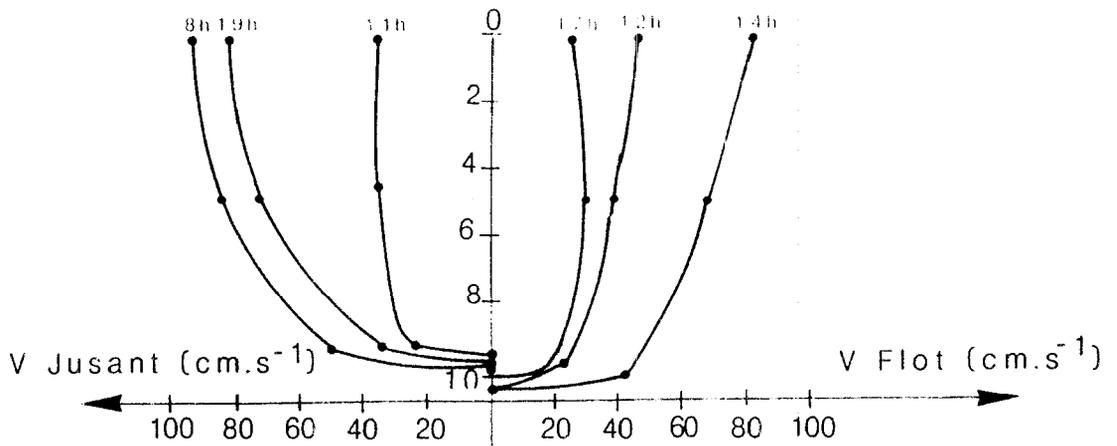
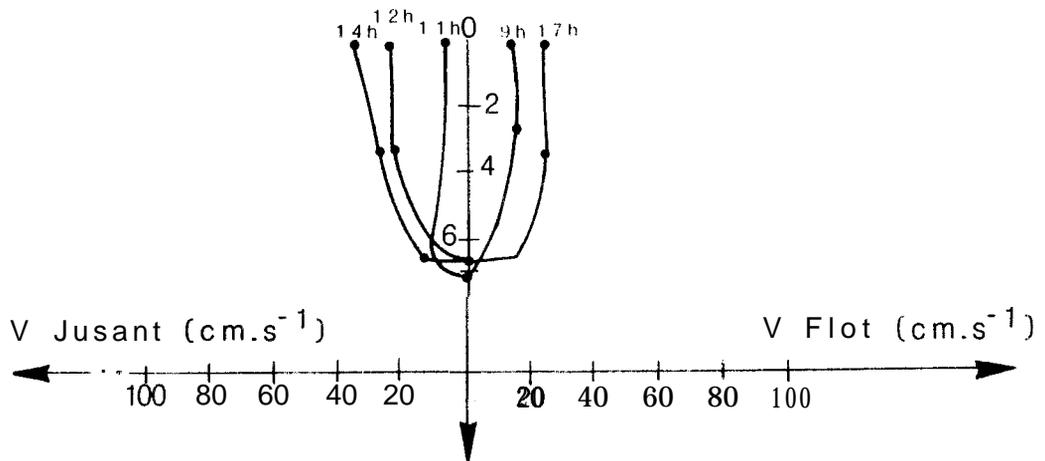


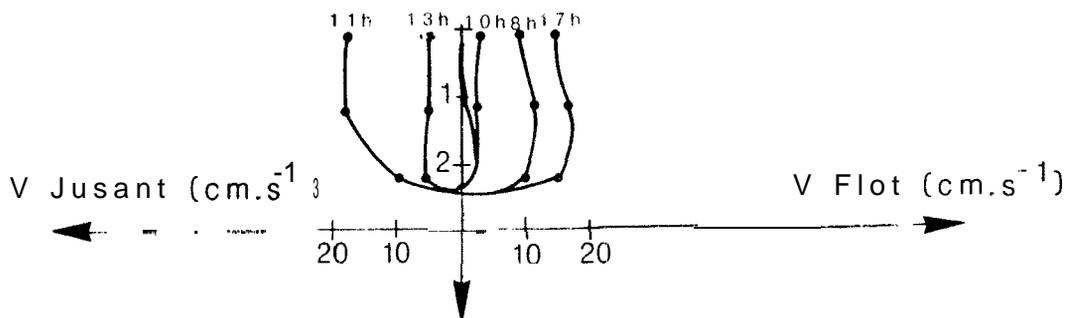
FIG. 1.- Variations longitudinales des vitesses maximales du courant de marée



STATION 13-ZIGUINCHOR-CENTRE DU CHENAL-25-03-1985



- STATION 25-CENTRE DU CHENAL- 22-03-1985



STATION 25- BORDURE DE PLATIER RD-22-03-1985

FIG.2.- Quelques exemples de la structure verticale du champ de vitesse.

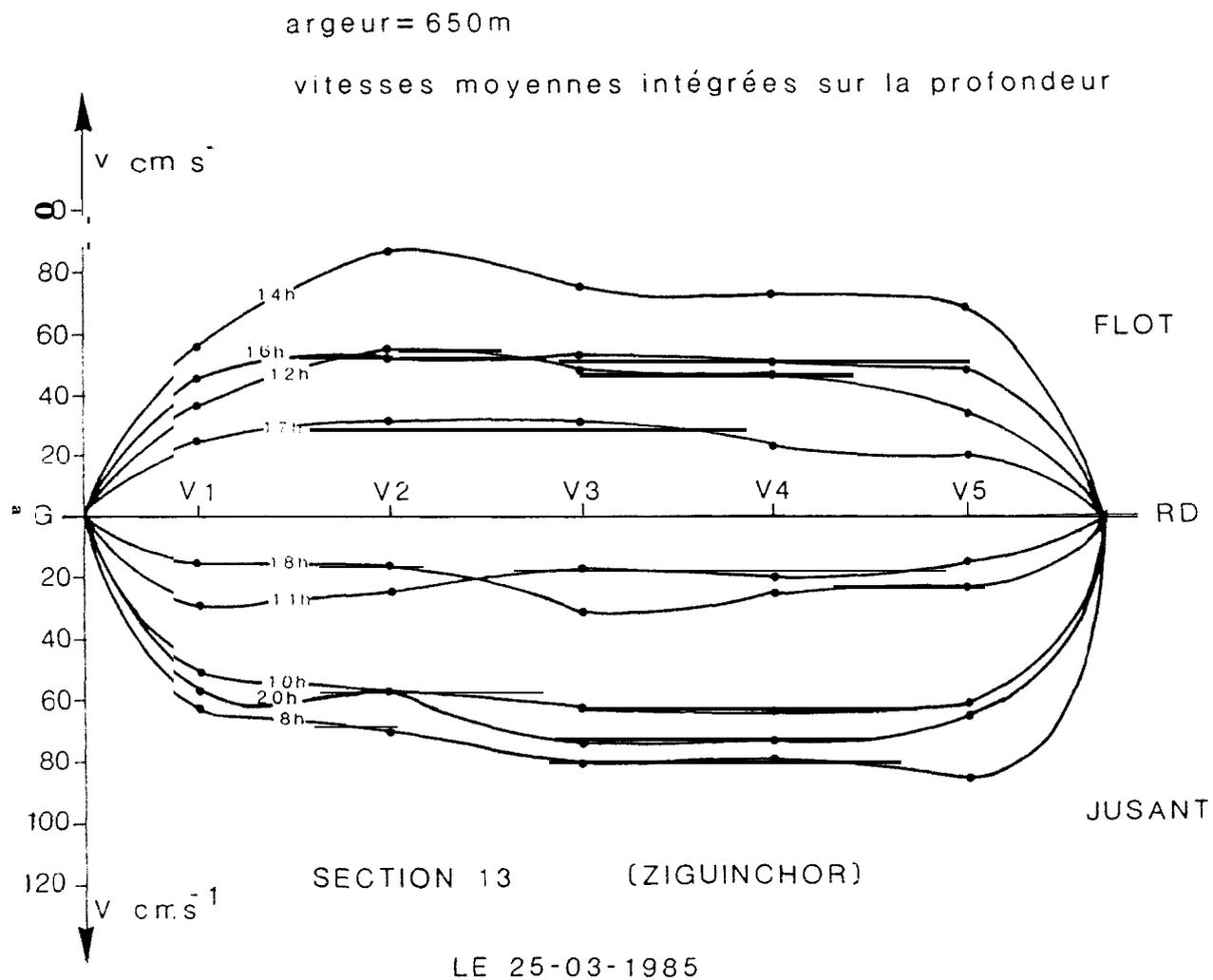


FIG. 3a.-Variations horaires du champ de vitesse

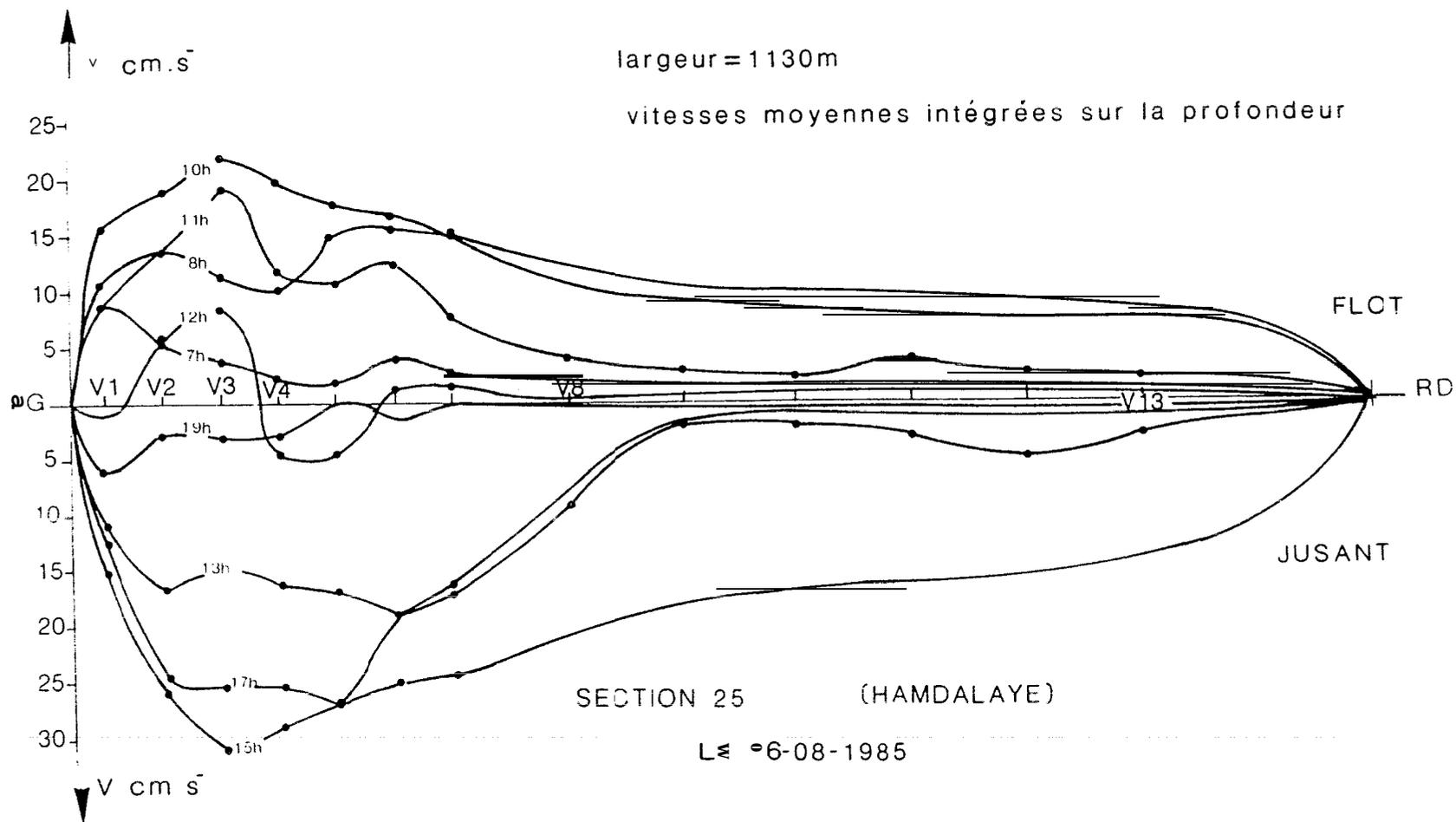


FIG. 3b.- Variations horaires du champ de vitesse

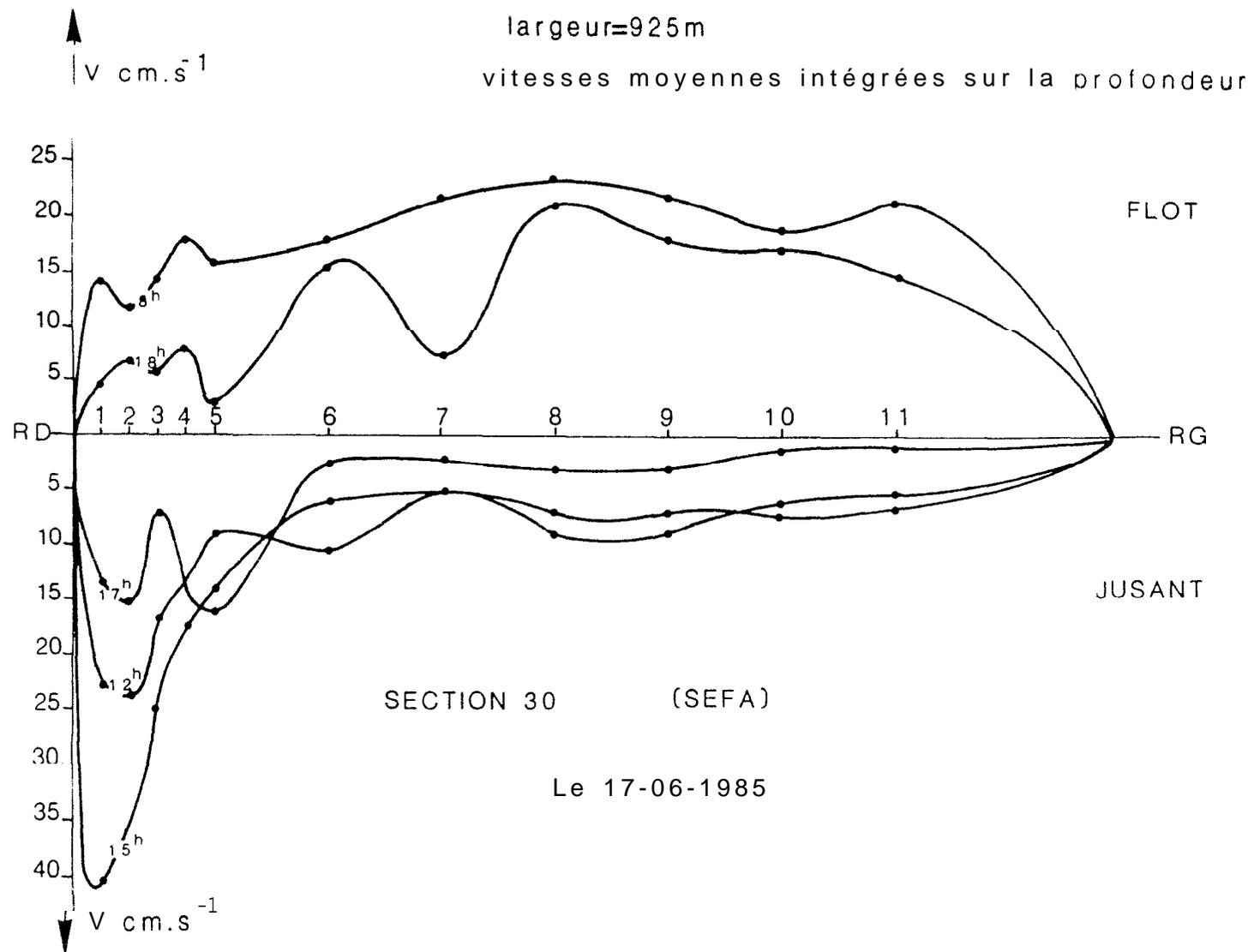


FIG. 3c.- Variations horaires du champ de vitesse.

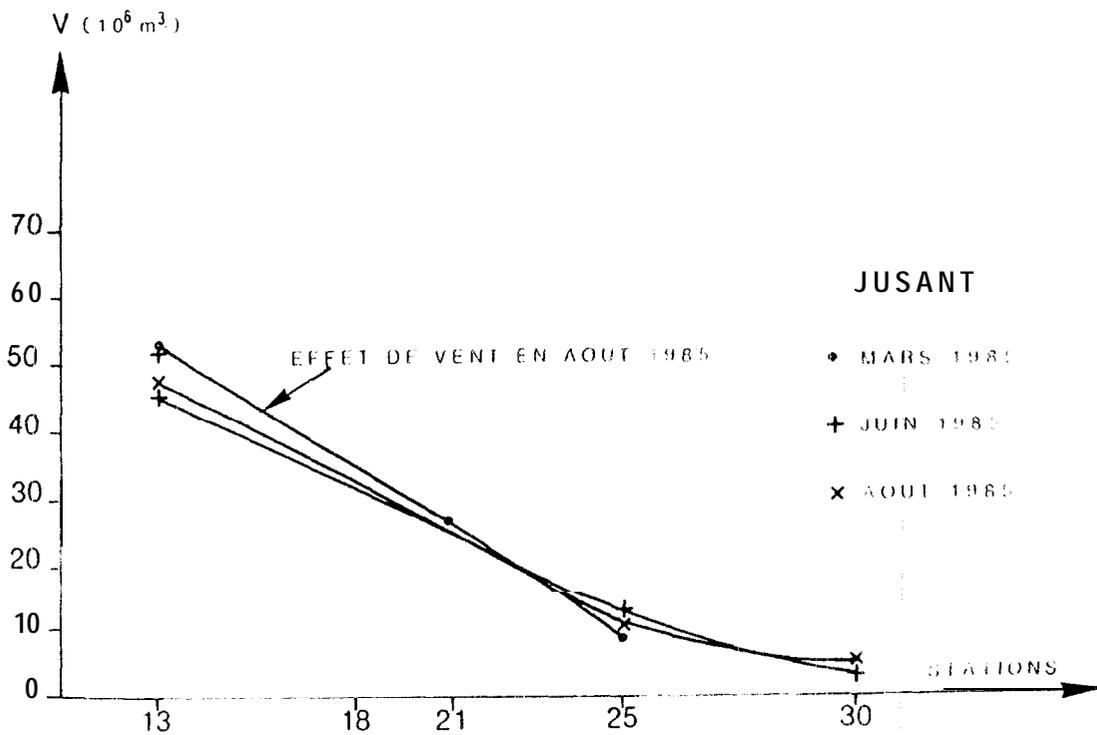
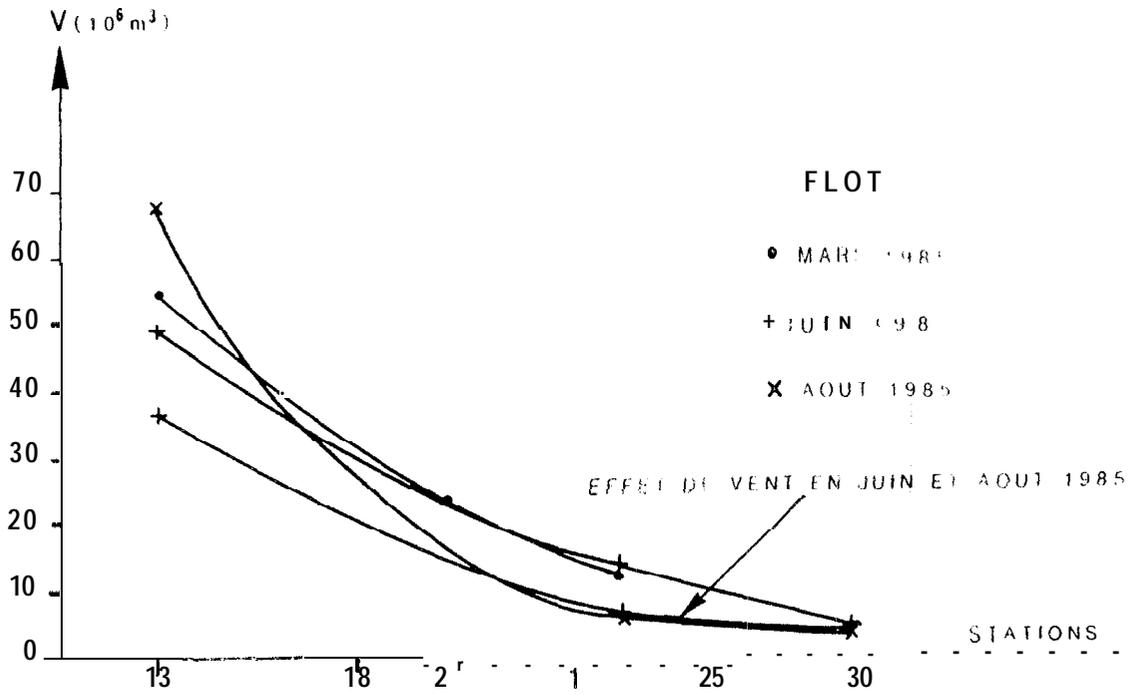


FIG. 4.- Variations longitudinales des volumes oscillants marée.

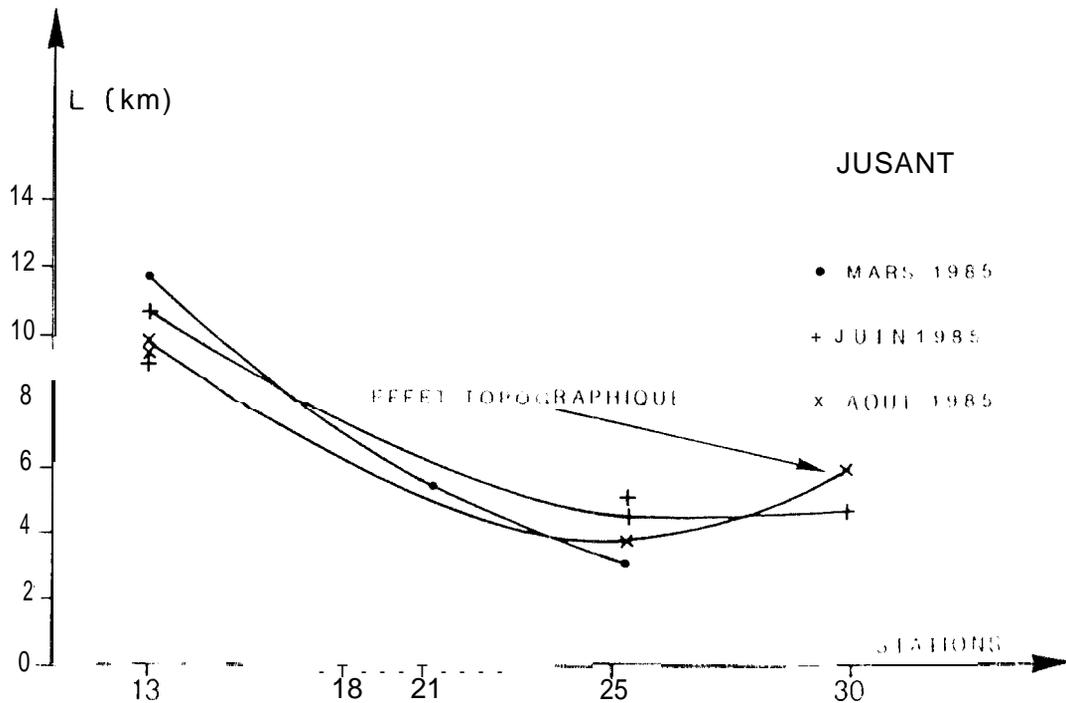
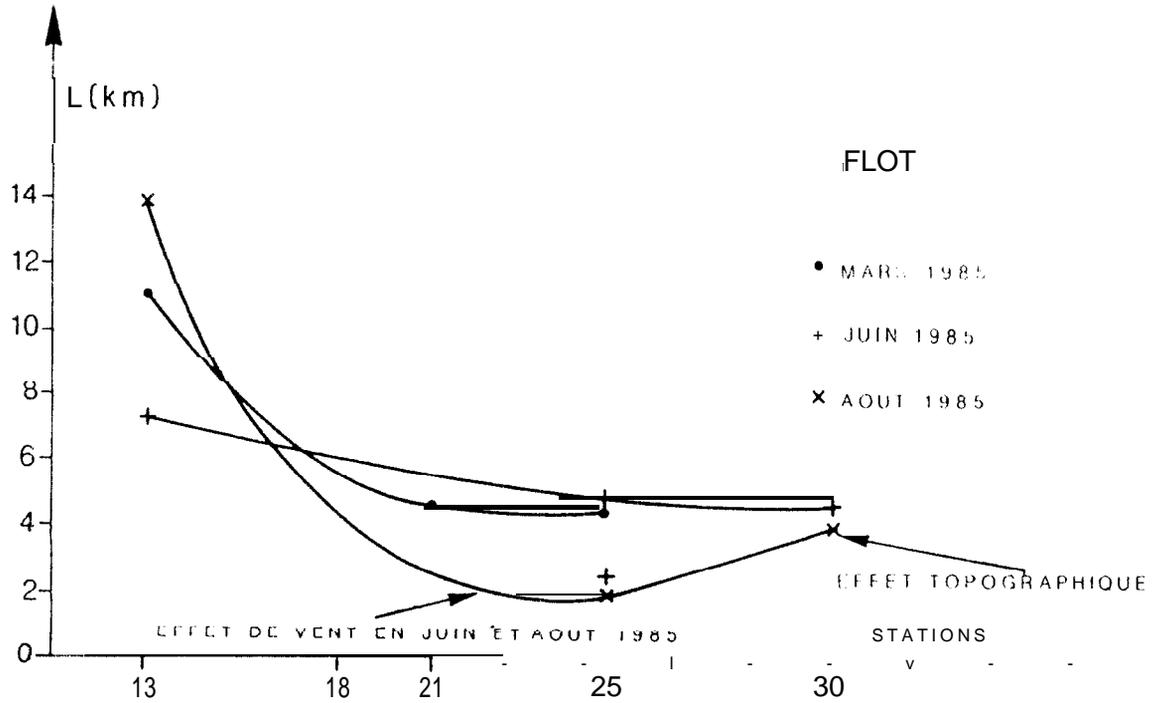


FIG. 5.- Variations longitudinales des excursions de marée

3. LA PERSPECTIVE D'UN MODELE
HYDRODYNAMIQUE DE CIRCULATION
DANS L'ESTUAIRE

Cette dernière étape, de loin la plus élaborée de cette étude **hydrologique**, consiste à préparer un modèle hydrodynamique de la propagation des marées à travers tout l'estuaire à l'amont de **Ziguinchor**. On prendra comme conditions aux limites un hydrogramme de flux continental, un forçage de marée à l'aval et d'éventuelles fonctions de transfert **latéral** au niveau des bolons tributaires ou des zones marginales de mangrove.

Cette approche hydrodynamique s'appuie sur une formulation mathématique qui reprend, en les adaptant à la nature littorale de l'estuaire, les équations fondamentales de l'écoulement des fluides réels, dans une représentation bidimensionnelle intégrée sur la profondeur (**équation** de St. VENANT). Un schéma numérique aux différences finies permet l'approximation des équations différentielles en utilisant un maillage régulier de 500 mètres de côté (du moins **jusqu'à SEFA**) et un pas de temps de l'ordre de quelques minutes seulement. Ce modèle est actuellement **en** cours de réalisation au Centre ORSTOM de Montpellier, Département "Ecosystèmes Aquatiques" (A. LAHOUD et B. MILLET).

L'approche ultérieure de la dispersion saline saisonnière dans l'estuaire nécessitera le couplage avec un modèle compartimenté de conception "**hydrologique**", fonctionnant à pas de temps long, à partir des champs de vitesse résiduelles issus du premier modèle.

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

BRUNET-MORET (Y.), 1970.- Etude hydrologique en Casamance. Rapport final. ORSTOM, Paris, 52 p.

DISCUSSION

- Q.- L'étude faite au niveau du fleuve sera-t-elle élargie aux différents bords tributaires ?
- R.- Non, seul le lit mineur (y compris Soungrougrou) sera considéré dans le maillage, dans un premier temps. A l'issue des premiers résultats, l'importance de certains tributaires sera mise en évidence et leur fonctionnement fera l'objet d'un traitement hydrologique complémentaire.
- Q.- Pour l'établissement d'un bilan hydrologique, a-t-on pris en compte l'apport des nappes phréatiques ?
- R.- Le bilan étant fait à l'aval, il prend en compte l'ensemble des échanges y compris celui des nappes dont l'importance est par ailleurs totalement inconnue. Il en est de même des surfaces évaporantes exondées.
- Q.- La vitesse moyenne pour une verticale correspond-elle à celle enregistrée à un point fixe ou bien s'agit-il de l'intégration du champ de vitesse ?
- R.- Lors des campagnes de mesure il s'agit d'une intégration verticale du champ de vitesse effectuée sur 7 ou 8 verticales par section. En ce qui concerne les enregistrements en continu à Ziguinchor, il s'agit d'une vitesse ponctuelle à 4 m de profondeur dans la partie la plus profonde du chenal.
- Q.- Le nombre de verticales est-il suffisant pour estimer correctement les écoulements résiduels dans le chenal et sur le platier ?
- R.- Il y a hétérogénéité spatiale, surtout pour les stations amont, entre les parties actives du chenal (zones les plus profondes) et les zones du platier qui peuvent être très étendues.
- Q.- Quelles sont les observations complémentaires de terrain prévues pour les besoins du modèle ?
- R.- Contrairement aux modèles hydrologiques, il n'est pas besoin de longues séries chronologiques. Sont indispensables : une bonne bathymétrie, des mesures limnimétriques de calage du modèle, qui soient impérativement synchrones sur quelques mois avec une batterie d'enregistreurs.