

OC cer 706

**MODELISATION NUMERIQUE  
DE LA CIRCULATION DE MAREE  
ET DE LA DISPERSION DU SEL  
DANS  
L'ESTUAIRE DU FLEUVE SENEGAL**

**Bertrand Millet**

---

**DOCUMENT DE TRAVAIL**

---

**CENTRE DE RECHERCHES OCEANOCRAI'HIQUES DE DAKAR-THIAROYE**

**JUIN 1991**

## AVANT PROPOS

Ce document de travail est proposé pour guider la compréhension du modèle numérique bidimensionnel vertical de circulation et de dispersion mis en place sur la partie estuarienne du Fleuve Sénégal.

Les enregistrements effectués sur le terrain pour définir le choix du modèle et permettre son calage et sa validation, ainsi que les formulations mathématiques et les caractéristiques numériques du modèle, sont ici présentés rapidement en tant qu'informations destinées aux éventuels utilisateurs du modèle.

Afin de mettre en oeuvre le modèle selon la notice proposée à la fin de ce document, l'utilisateur devra disposer du module exécutable SEN.EXE opérationnel sous le système d'exploitation MS/DOS, ainsi que des copies types des fichiers d'entrée SALINIT.TXT et MAREE.TXT et de sortie ELEV.TXT, VITU.TXT, VITW.TXT et SAL.TXT.

---

## SOMMAIRE

---

1

- INTRODUCTION **p: 3**
- CAMPAGNES D'ENREGISTREMENTS EN CONTINU **p: 4**
- CARACTERISTIQUES DU MODELE NUMERIQUE **p: 6**
- NOTICE D'UTILISATION DU MODELE **p: 8**
- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **p: 10**

## INTRODUCTION

Une étude pluridisciplinaire d'environnement est menée depuis le début de l'année 1988, sur la partie aval du Fleuve Sénégal, entre le barrage de Diama et l'embouchure du Fleuve.

Cette étude a pour objectif d'évaluer les nouvelles caractéristiques écologiques de cette partie aval du Fleuve, qui demeure la seule à conserver un type de fonctionnement estuarien, après la mise en service du barrage de Diama.

L'étude, à la fois physique et biologique, consiste en un couplage entre le comportement des peuplements phytoplanctoniques, et les variations des conditions physiques de l'environnement estuarien. C'est ainsi que l'évolution à différentes échelles d'espace et de temps, de la biomasse chlorophyllienne et de la diversité taxinomique du phytoplancton sera confrontée aux évolutions spatiales et temporelles de la circulation des eaux et des échanges entre les masses d'eau douce et marines.

L'accent est mis sur la reconnaissance et la quantification des différents types de processus physiques (advection longitudinale, diffusion turbulente verticale) et biologiques (succession autochtone d'espèces, séquences spécifiques allochtone), impliqués dans le nouveau fonctionnement de cet écosystème perturbé, et susceptibles d'en décrire la forte variabilité.

C'autre part, la mise en place d'une modélisation numérique de la propagation de marée et de la dispersion du sel dans cette partie "estuarienne" du Fleuve, doit enfin permettre de généraliser dans l'espace et le temps les résultats et les concepts issus du couplage entre les observations instantanées phytoplanctoniques et hydroclimatiques.

L'étude est menée dans le cadre des activités de Recherche du Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye entre avril 1988 et septembre 1991, et a bénéficié d'un financement du Ministère français de la Recherche, d'un financement du Ministère français de l'Environnement et d'une contribution de l'UR 2D de l'ORSTOM.

La partie biologique de l'étude est menée par Philippe Cecchi et Daniel Corbin. Les résultats des premières campagnes de mesures sont publiées **SOUS** la forme d'un Document d'Archives du CRODT (Corbin et Cecchi 1991). L'ensemble des résultats et interprétations seront publiés en octobre 1991 dans le cadre du mémoire de thèse de Philippe Cecchi, présenté devant l'Université de Montpellier.

Les mesures physiques ainsi que le travail de modélisation numérique sont présentés dans ce rapport qui comporte trois parties : les résultats de deux campagnes d'enregistrements en continu, puis les caractéristiques du modèle numérique suivies de la notice d'utilisation du modèle.

## CAMPAGNES D'ENREGISTREMENTS EN CONTINU

Deux campagnes d'enregistrements en continu sur une colonne d'eau des principaux paramètres physiques de l'environnement estuarien sont effectuées en janvier et mai 1990, dans le triple objectif suivant :

- compléter les campagnes de mesures hydroclimatiques instantanées effectuées longitudinalement dans l'estuaire (Corbin et Cecchi 1991).
- préciser la nature et l'ampleur des processus physiques impliqués dans le contrôle à très petite échelle d'espace (quelques mètres) et de temps (quelques heures) du développement des organismes phytoplanctoniques.
- permettre le calage et la validation du modèle numérique, en vitesses de courant et en salinité.

Chaque campagne consiste en un mouillage de trois courantomètres Anderaa, placés en sub-surface à l'amont immédiat du Pont Faidherbe à Saint-Louis, répartis à des profondeurs différentes (sub-surface, mi-profondeur et proximité du fond) sur trois colonnes placées au centre du chenal et séparées d'une cinquantaine de mètres (Fig. 1).

La première campagne se déroule du 22 janvier 1990 à 9 heures jusqu'au 26 janvier 1990 à 13 heures, et correspond à une période marquée par une exceptionnelle hétérogénéité dans le système. En effet, un lâcher du barrage de Diama de 600 mètres-cube par seconde, ayant eu lieu entre le 21 janvier à 21 heures et le 22 janvier à 8 heures, provoque la circulation advective vers l'aval d'une grande lentille d'eau douce, fortement contrastée par rapport à la salinité d'étiage de l'estuaire. Le démarrage des enregistrements coïncide avec l'arrivée à Saint-Louis du front salé associé à cette lentille d'eau douce. En outre, parallèlement à cette hétérogénéité saline, une forte baisse du niveau de la mer perturbe la propagation de la marée dans l'estuaire, en confinant le milieu, en annulant pratiquement les oscillations de courant à proximité du fond, et en favorisant par conséquent le phénomène de stratification verticale du champ de courant. Ces discontinuités dynamique et saline caractérisent un type de fonctionnement stratifié, essentiellement "estuarien", qui contrôle désormais le régime de l'estuaire après la construction du barrage de Diama.

La deuxième campagne se déroule du 21 mai 1990 à 14 heures jusqu'au 25 mai 1990 à 13 heures, et correspond au contraire à une période de grande homogénéisation du système qui retrouve alors le type de fonctionnement "lagunaire" qui caractérisait les longues périodes d'étiage avant la construction du barrage de Diama.

Les figures 2, 3 et 4 présentent respectivement les séries d'enregistrements de la vitesse du courant de marée, de la température et de la salinité au cours de cette campagne de mai 1990, illustrant l'homogénéité stable de la colonne d'eau.

La figure 5 présente la série d'enregistrements de la vitesse du courant de marée au cours de la campagne de janvier 1990, illustrant la forte stratification du courant sur la colonne d'eau, surtout dans la première moitié de la campagne qui correspond à un minimum exceptionnel du niveau marin.

La figure 6 présente la série d'enregistrements de la température au cours de la campagne de janvier 1990, illustrant l'importance du rythme nyctéméral qui s'impose à la surface de la colonne d'eau. D'autre part, l'apport d'eau douce provoque, surtout au début de la série, une stratification thermique entrecoupée temporairement d'événements périodes d'homogénéisation de la colonne d'eau. Le cycle de cette rapide homogénéisation qui n'affecte pas encore le fond, se superpose parfaitement avec le cycle du courant de jusant (Fig. 5), ce qui traduit un phénomène de déplacement advectif horizontal et oscillant d'un front salé, situé à cette époque immédiatement à l'amont de Saint-Louis, à l'issue du lâcher de Diama du 21 Janvier. Enfin, la superposition avec la Figure 5 renseigne également sur l'existence de plus courtes périodes (inférieure à l'heure) pendant lesquelles la température de la couche intermédiaire décroche légèrement de celle du fond pour se rapprocher de la valeur de surface, qui se superposent parfaitement avec les périodes d'inversion du champ de courant sur la colonne d'eau, traduisant ainsi un phénomène de diffusion turbulente verticale. À noter toutefois que ces processus de diffusion turbulente verticale, d'origine essentiellement dynamique, semblent soumis au contrôle secondaire de la stratification thermique nyctémérale qui favorise ou limite la propagation le long de la colonne d'eau, de la diffusion turbulente potentiellement induite par les événements inversés. En effet, la diffusion verticale apparaît être chaque fois de plus grande amplitude lorsqu'elle survient au cours des périodes nocturnes.

La figure 7 présente la série d'enregistrements de la salinité au cours de la campagne de janvier 1990. Comme pour la température (Fig. 6) un cycle d'homogénéisation de la colonne d'eau se superpose avec le cycle de jusant, traduisant le déplacement advectif horizontal du front salé, et les courtes périodes de décrochement de la salinité intermédiaire par rapport à celle du fond se superposent avec les périodes d'inversion de courant, traduisant la diffusion turbulente verticale. En outre, l'évolution parallèle de la pente des enregistrements de surface et de fond traduit une influence de la dispersion longitudinale de la salinité, sous l'effet de la marée.

Ces deux campagnes d'enregistrements illustrent la variabilité, saisonnière et horaire, du nouveau régime hydroclimatique de l'estuaire : forçage dynamique oscillant du courant de marée, forçage thermique nyctéméral, perturbations thermiques et halines provoquées par le déplacement des lentilles d'eau douce, processus advectifs horizontaux et processus diffusifs verticaux. À chaque lâcher du barrage de Diama, l'environnement estuarien retrace, à plus haute fréquence, l'histoire complète d'un étiage, alors qu'elle était unique avant la construction du barrage.

## CARACTERISTIQUES DU MODELE NUMERIQUE

Un modèle numérique bidimensionnel vertical de circulation de marée et de dispersion du sel, a été mis en place sur le milieu d'étude entre Diamas et Candiole. Ce modèle repose sur une résolution numérique des équations fondamentales de la dynamique des fluides visqueux, et reproduit à un pas de temps égal à deux minutes, les champs d'élévations, les composantes horizontale et verticale de la vitesse du courant selon l'axe principal de l'estuaire et moyennées sur la largeur, ainsi que la salinité de l'eau, en fonction des conditions initiales de salinité dans l'estuaire, du forçage de marée à l'aval, du débit d'eau douce à l'amont, qui auront été préalablement choisis.

Le modèle retenu est un modèle classique, conçu initialement par Hamilton (1975) sur le Canal de Rotterdam (Pays-Bas), puis utilisé par de Borne de Grandpré (1979) et du Penhoat (1979) sur l'estuaire de la Gironde, puis encore amélioré par Salomon (1981) sur l'estuaire de la Seine.

Le modèle utilise une discrétisation spatiale longitudinale du milieu constituée d'une série de 20 sections transversales rectangulaires, réparties entre Diamas et Candiole vers l'aval selon un pas d'espace constant de deux kilomètres (Fig. 8), et décrivant ainsi une série de 19 compartiments au niveau desquels les valeurs d'élévation, de vitesses et de salinité sont calculées par le modèle. L'aire de chaque section rectangulaire considérée par le modèle est calculée de façon à conserver une stricte équivalence avec l'aire de la section réelle.

Verticalement, le modèle prévoit une discrétisation constituée d'un découpage des sections rectangulaires équivalentes en cinq niveaux de 1 mètre d'épaisseur chacun, depuis la section 1 jusqu'à la section 11, et en quatre niveaux de 1 mètre chacun depuis la section 12 jusqu'à la section 20. A chacun de ces niveaux, correspond le calcul d'une salinité, d'une vitesse horizontale et d'une vitesse verticale.

L'information morphologique et bathymétrique sur l'estuaire, nécessaire à cette discrétisation spatiale du modèle, est issue de trois sources différentes : l'Atlas Nautique du Fleuve Sénégal (Beziukov, 1971), la carte bathymétrique du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine disponible à la Capitainerie du Port de Saint-Louis (Fig. 9), et une série de relevés effectués au sondeur acoustique le 19 décembre 1989 entre Saint-Louis et Candiole. Cette discrétisation spatiale qui repose sur un calcul de sections rectangulaires équivalentes conduit à une schématisation de l'estuaire qui conserve des caractéristiques d'écoulement équivalentes à celles de l'estuaire réel, mais avec des profondeurs différentes des mesures observées. Il faudra tenir compte de ce décalage géométrique du modèle par

rapport à la morphologie réelle de l'estuaire, dans toutes les interprétations des résultats.

Le forçage du modèle ne prend en compte que le débit des lâchers du barrage de Diama, à l'amont, et le marégramme de Candiole à l'aval. La vitesse du vent n'est pas introduite dans le modèle. Pour la mise en oeuvre du modèle, une station marégraphique a par conséquent été installée à proximité du phare de Candiole par le Service Régional de l'Hydraulique de Saint-Louis. Cette station a été intégrée dans le Réseau Hydrographique National, et continue donc d'être surveillée. Les marégrammes du pôle de Saint-Louis ont également été rendus disponibles par le même Service, pendant la durée de l'étude. Les enregistrements marégraphiques effectués à Diama proviennent de la station CHLOE, provisoirement installée par l'ORSTOM à l'aval du barrage dans le cadre de la convention avec l'OMVS, mais démontée depuis avril 1990. Les figures 10 et 11 présentent respectivement les enregistrements marégraphiques de Saint-Louis et de Candiole disponibles pendant la durée de l'étude.

La formulation mathématique des équations est présentée en Figure 12. Les simulations de calage du modèle ont conduit à retenir la paramétrisation suivante :

- coefficient de frottement :  $k = 2.5 \cdot 10^{-3}$  SI.
- coefficient de diffusivité horizontale :  $K_h = 1.2 \cdot 10^3$  SI
- coefficient de viscosité verticale :  $1.5 \cdot 10^{-3} < \nu_z < 6 \cdot 10^{-3}$
- coefficient de diffusivité verticale :  $0.3 \cdot 10^{-4} < K_z < 1 \cdot 10^{-4}$

La grille de calcul numérique est présentée en Figure 13. Le modèle fonctionne avec un pas d'espace horizontal de 2 kilomètres, un pas d'espace vertical de 1 mètre et un pas de temps constant de 2 minutes. L'approximation des équations est faite par la méthode des différences finies. Les dérivées spatiales sont centrées, à l'exception des termes non linéaires d'advection en sel qui sont décentrés (upstream) vers l'amont au jusant, et vers l'aval au flot. Les dérivées temporelles sont traitées explicitement, à l'exception des termes de viscosité et de diffusivité qui sont traités implicitement pour des raisons de stabilité numérique.

Les résultats du calage et de la validation du modèle sont présentés sur la figure 14. Le calage du modèle est effectué à partir des élévations de marée observées à Saint-Louis et à Diama au cours de la période du 9 au 12 février 1990. La validation du modèle est effectuée à partir des élévations de marée observées à Diama, et des débits oscillants de marée calculés à Saint-Louis à partir des enregistrements des courantomètres Aanderaa, au cours de la période du 24 au 26 janvier 1990.

Un exemple de la validation du modèle en salinité est présenté sur la figure 15 qui correspond à la période du 23 au 26 janvier 1990 à Saint-Louis pendant laquelle le déplacement advectif d'une lentille d'eau douce, en provenance du lâcher de Diama du 21 janvier, provoque une forte stratification de la colonne d'eau et une variation cyclique prononcée de la



salinité de la couche intermédiaire. Le modèle ne donne pas une reproduction parfaite des valeurs de salinité dans une situation aussi évolutive et contrastée, mais reproduit assez bien le cycle de variation de la salinité intermédiaire, oscillante en fonction du déplacement du front salé sous l'effet de la marée. D'autre part, sur le fond, la salinité semble bien reproduite, alors qu'en surface, le modèle qui intègre la salinité sur le premier mètre de la section rectangulaire équivalente de la section de Saint-Louis, s'avère incapable de reproduire la salinité de la lentille dessalée prélevée manuellement dans les 20 premiers centimètres de la colonne d'eau réelle. Enfin, cette expérience montre que le modèle ne donne des résultats exploitables qu'au bout d'une période de stabilisation numérique voisine de 24 heures.

#### NOTICE D'UTILISATION DU MODELE

La mise en oeuvre du modèle nécessite l'installation au préalable du module exécutable SEN.EXE qui fonctionne sous le système d'exploitation MS/DOS. D'autre part, ce module exige la constitution parallèle de deux fichiers d'entrée correspondants aux valeurs des salinités initiales de l'estuaire et au murégramme de Candiole, et qui devront respectivement porter les noms de SALINIT.TXT et de MAREE.TXT, ainsi que les formats décrits dans ce qui suit.

##### *Fichier de salinité initiale : SALINIT.TXT*

La figure 16 présente un exemple de la façon dont il faut préparer le fichier des salinités initiales. Les valeurs de salinité sont lues en format FORTRAN réel et doivent obligatoirement être écrites avec un point décimal et être espacées par un blanc.

Chaque ligne correspond à une section définie sur l'estuaire (Fig. 8). La première ligne 1 correspond au barrage de Diama et doit être toujours nulle. La dernière ligne 20 correspond à la salinité de la section 19, située à 2 kilomètres à l'amont de Candiole.

Chaque colonne correspond à une valeur de salinité. Le modèle est conçu avec des sections rectangulaires équivalentes découpées avec un maximum de 5 niveaux de 1 mètre de profondeur chacun. Les 5 valeurs observées de salinité initiale, rapportées à l'échelle des sections rectangulaires équivalentes, sont reportées sur les colonnes 2 (surface), 3, 4, 5 et 6 (fond). La colonne 1 correspond à une extrapolation obligatoire de la salinité de surface qui figure en colonne 2. Les colonnes 7 et 8 correspondent à une extrapolation obligatoire de la salinité de fond qui figure en colonne 6.

*Fichier du signal marégraphique aval : MAREE.TXT*

La figure 17 présente un exemple de la façon dont il faut préparer le fichier du signal de marée qui correspond au forçage aval du modèle.

Chaque valeur correspond à une élévation de marée, exprimée en centimètre par rapport au niveau moyen de la mûée au cours de la période considérée, et provenant de la lecture directe d'un marégramme de la station de Candiole, effectuée avec un pas de temps de 1 heure. Chaque ligne du fichier correspond par conséquent à une valeur horaire de l'élévation de la mûée et doit comporter obligatoirement un point décimal. Les valeurs correspondant à une période de flot sont positives et les valeurs de jusant sont négatives.

La première ligne doit correspondre à l'élévation de marée au temps "To+1 heure" après le démarrage de la simulation. La valeur de l'élévation à To sera demandée à l'écran par le modèle, après son lancement.

*Démarrage du modèle : SEN.EXE*

Il faut taper "SEN" pour lancer le modèle.

Cinq questions apparaissent successivement à l'écran pour déterminer les caractéristiques de la simulation. Chaque valeur réponse doit être exprimée dans l'unité indiquée et comporter obligatoirement un point décimal.

La première question demande la valeur de l'élévation initiale (en mètre). Cette valeur correspond à l'élévation lue sur le marégramme de Candiole au temps To du démarrage de la simulation.

La seconde question demande la valeur de la salinité (en pour-mille) observée au temps To de la simulation sur la section de Candiole.

La troisième question demande la valeur du débit moyen (en mètre-cube par seconde) du lâcher au barrage de Diamas au cours de la période simulée. Cette valeur demeure constante pendant toute la simulation. Si le barrage est fermée, cette valeur est nulle.

La quatrième question demande la valeur (en heure) de la durée totale de la simulation.

La cinquième question demande la valeur (en heure) de la fréquence avec laquelle les résultats intermédiaires d'élévations, de vitesses et de salinités seront saisis sur leurs fichiers de sortie correspondants.

*Fichiers de sorties*

Les élévations de marée sortent sur le fichier ELEV.TXT dont la figure 18 présente un exemple. La ligne 1 correspond au compartiment situé immédiatement à l'aval du barrage de

Diamas, et la ligne 19, au compartiment situé immédiatement à l'amont de Candiole.

Les vitesses horizontales sortent sur le fichier VITU.TXT dont la figure 19 présente un exemple. La numérotation des lignes est identique à celle des élévations.

Les vitesses verticales sortent sur le fichier VITW.TXT dont la figure 20 présente un exemple. La numérotation des lignes ne dépasse pas 18 car les vitesses verticales ne sont pas calculées par le modèle au niveau du dernier compartiment situé à l'amont de Candiole.

Les salinités sortent sur le fichier SAL.TXT dont la figure 21 présente un exemple.

L'exploitation graphique de ces fichiers de résultats en caractères ASCII est immédiate et peut être envisagée à partir d'une programmation ou de l'utilisation d'un logiciel classique (diagramme de série temporelle, isocontours...).

Un exemple de programmation graphique FORTRAN utilisant la bibliothèque de routines PLOT88 pour représenter le champ des vecteurs vitesses dans l'estuaire est proposé sur le fichier CHAMP.FOR. Les fichiers d'entrée de ce programme s'intitulent VIT et WIT, qui correspondent respectivement aux sorties des fichiers VITU.TXT et VITW.TXT au pas de temps 24 heures de simulation (Fig.19 et 20). La figure 22 présente le diagramme de tracé correspondant à l'utilisation de ces deux fichiers par le module exécutable CHAMP.EXE.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

Beziukov, K.I. 1971. Atlas Nautique du Fleuve Sénégal. Tome I. Embouchure-Port de Boghé. IGN, Paris.

Corbin, C., et P. Cecchi. 1991. Hydroclimat de l'estuaire du Fleuve Sénégal. Document d'Archive du CRODT n°185.

De Borne de Grandpré, C. 1979. Modèle bidimensionnel en temps réel de la circulation verticale estuarienne. Application à la Gironde. Oceanol. Acta. 2:61-68.

Du Penhoat, Y., et J.C. Salomon. 1979. Simulation numérique du bouchon vaseux en estuaire. Application à la Gironde. Oceanol. Acta. 2:253-260.

Hamilton, P. 1975. A numerical model of vertical circulation of tidal estuaries and its application to the Rotterdam Waterways. Geophys. J. R. Astron. Soc. 40:1-21.

Salomon, J.C. 1981. Modeling turbidity maximum in the Seine estuary. p. 285-317. In J.C.J. Nihoul (ed.), Ecohydrodynamics. Elsevier.

FIGURE 2

ENREGISTREMENTS COURANTOGRAPHIQUES A SAINT-LOUIS  
IMMERSION DU 21 AU 25 MAI 1990  
— SURFACE / \*\*\*\* FOND

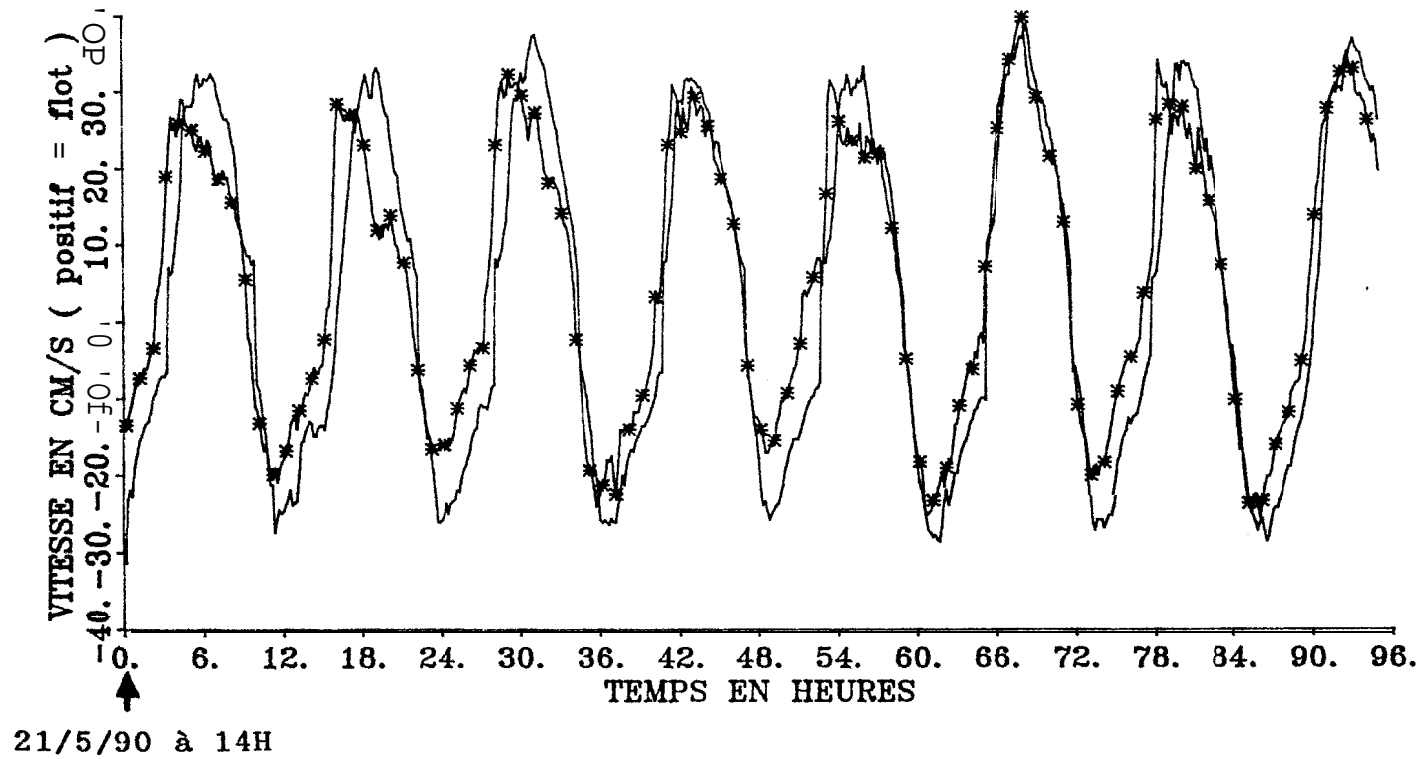


FIGURE 3

ENREGISTREMENTS COURANTOGRAPHIQUES A SAINT-LOUIS

IMMERSION DU 21 AU 25 MAI 1990

— SURFACE / ---- MILIEU / \*\*\*\* FOND

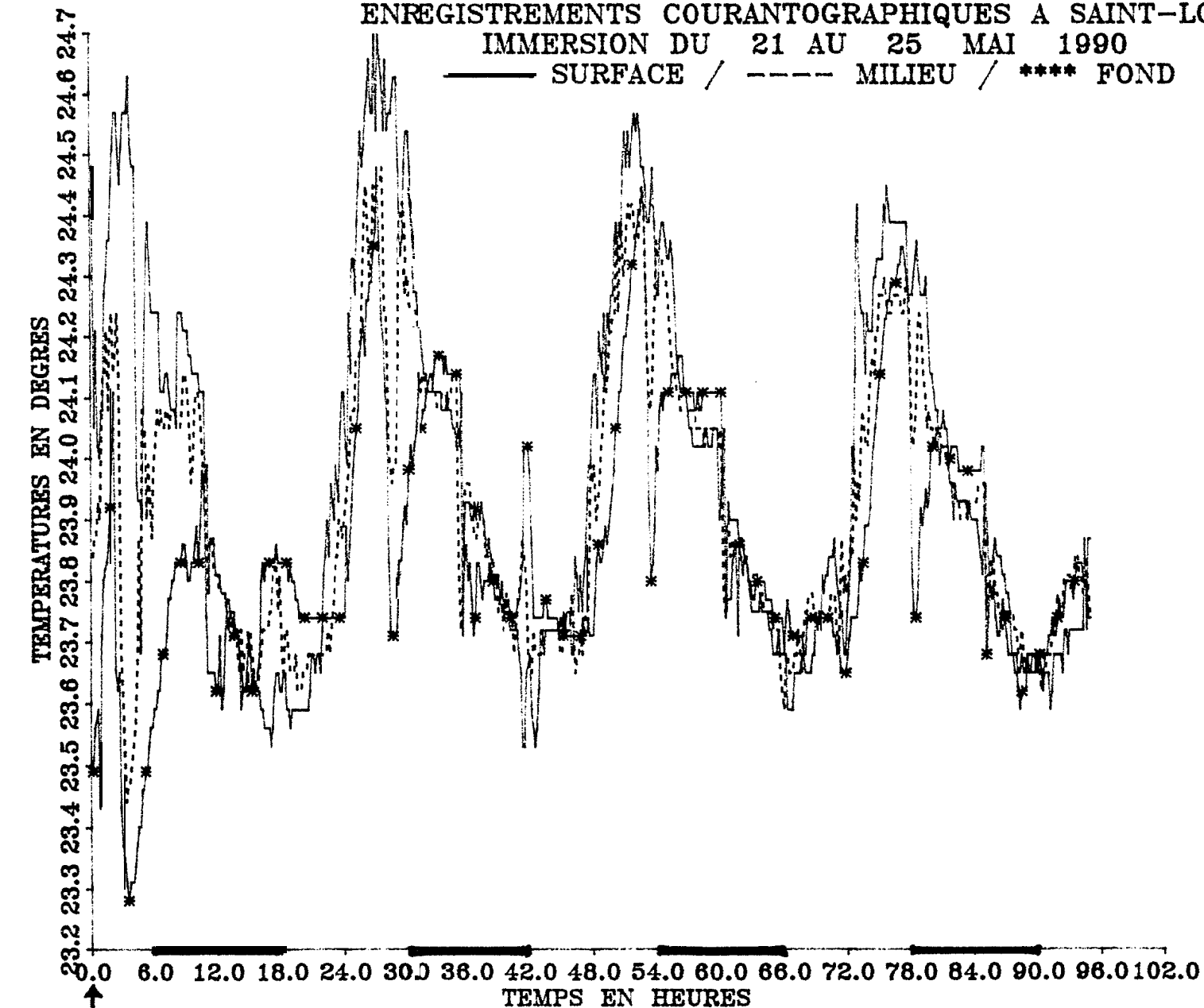


FIGURE 4

ENREGISTREMENTS COURANTOGRAPHIQUES A SAINT-LOUIS

IMMERSION DU 21 AU 25 MAI 1990

— SURFACE / ---- MILIEU / \*\*\*\* FOND

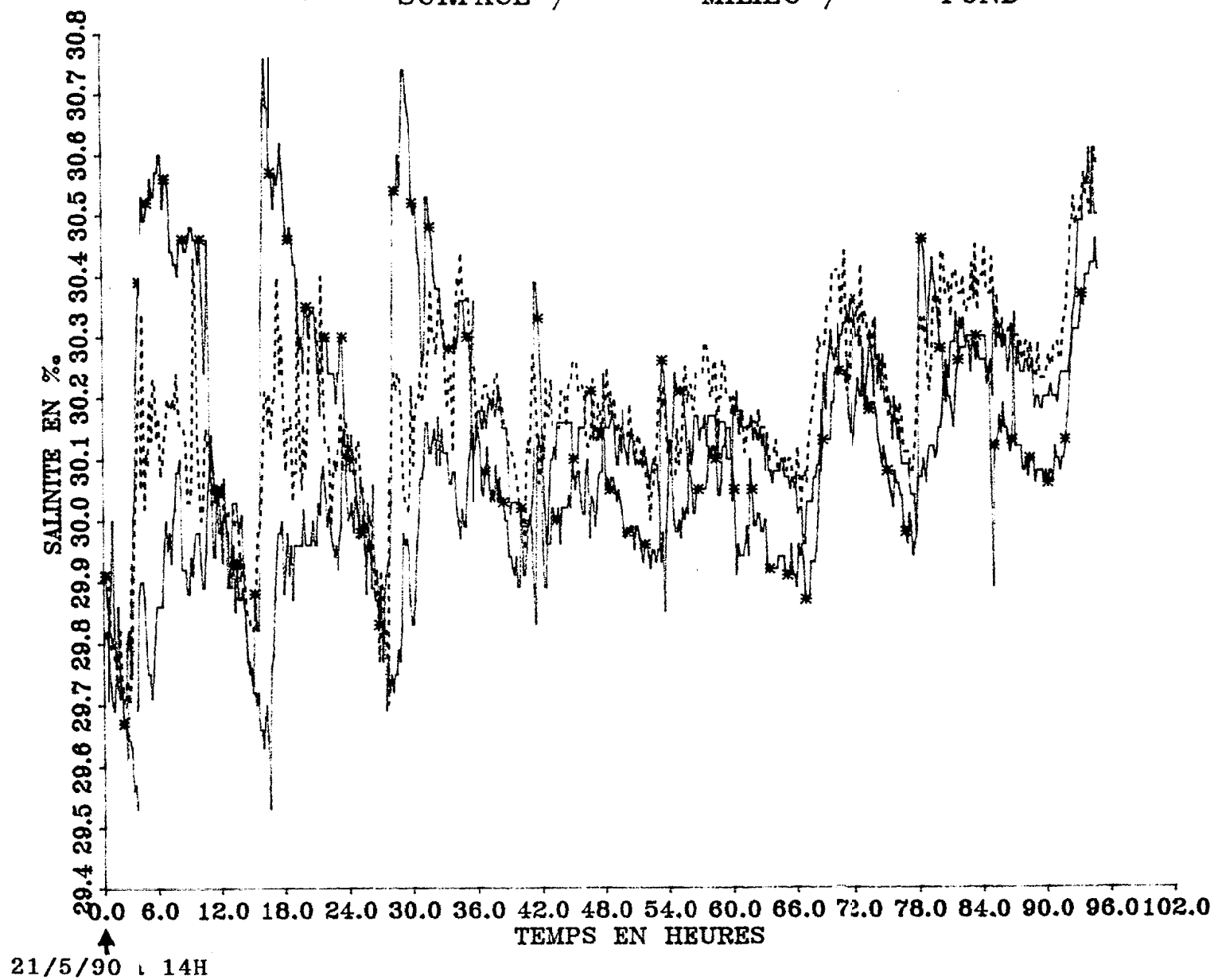


FIGURE 5  
ENREGISTREMENTS COURANTOGRAPHIQUES A SAINT-LOUIS  
IMMERSION DU 22 AU 26 JANVIER 1990  
— SURFACE / \*\*\*\* FOND

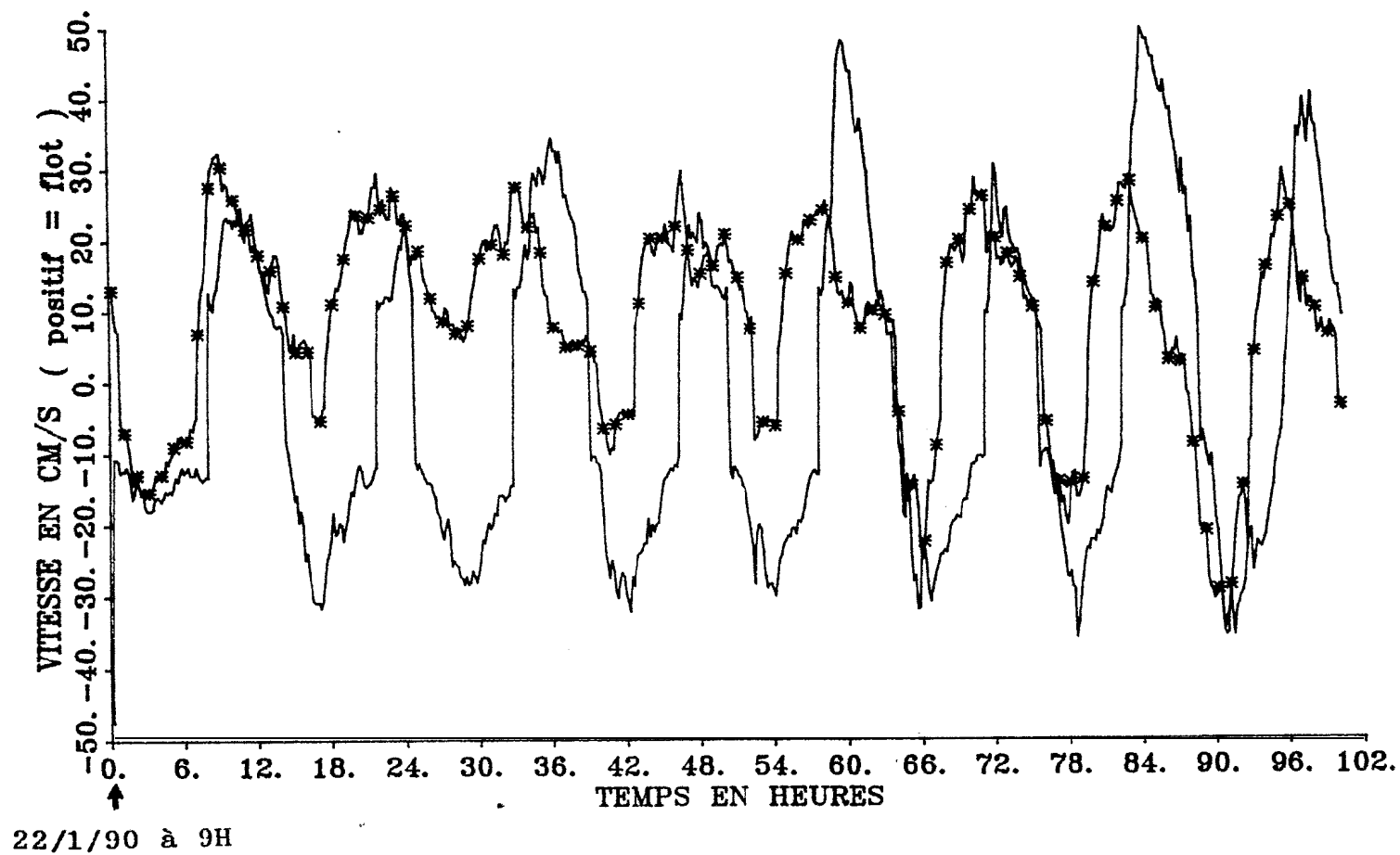


FIGURE 6

ENREGISTREMENTS COURANTOGRAPHIQUES A SAINT-LOUIS  
IMMERSION DU 22 AU 26 JANVIER 1990

—— SURFACE / ---- MILIEU / \*\*\*\* FOND

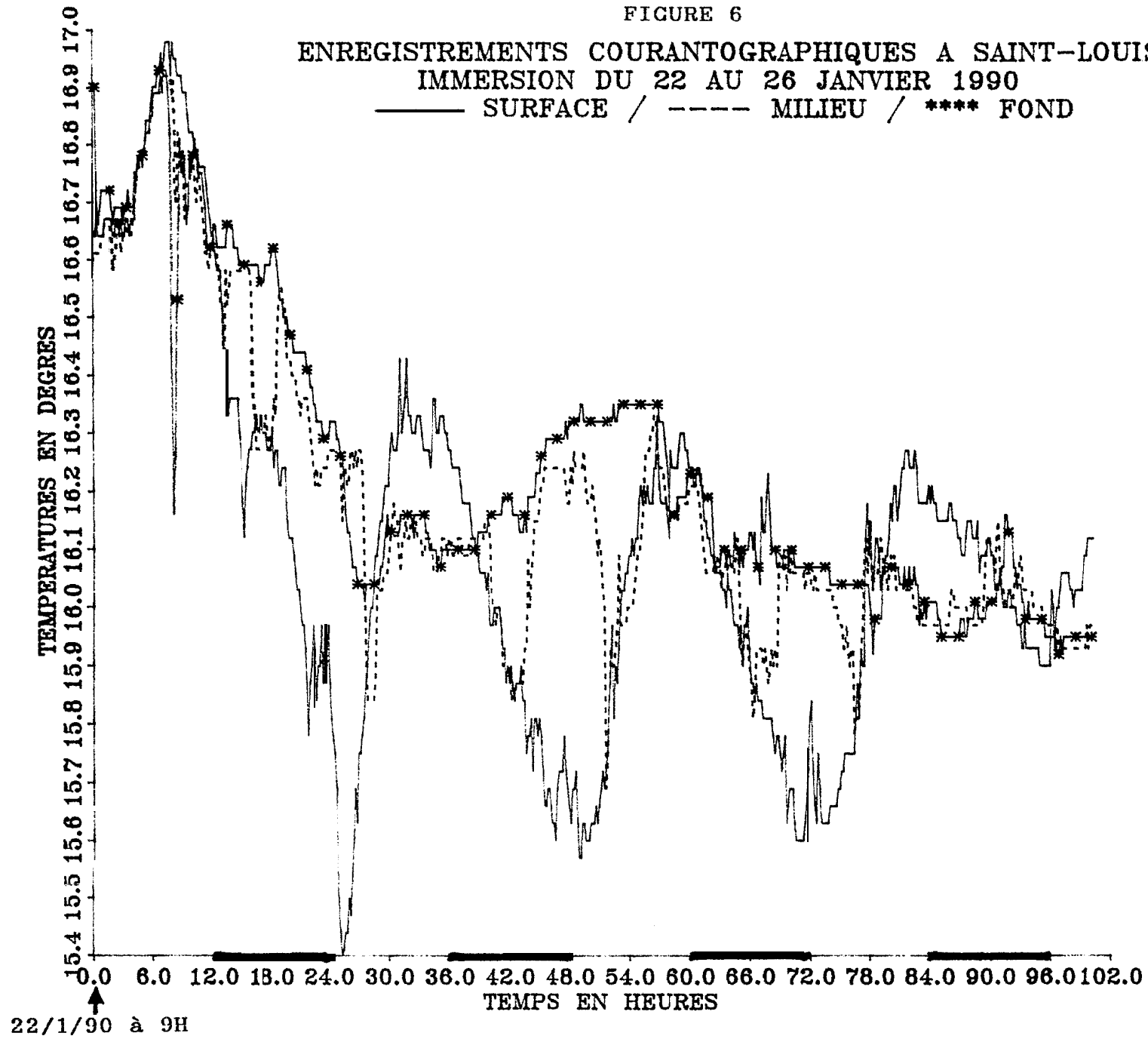




FIGURE 7

ENREGISTREMENTS COURANTOGRAPHIQUES A SAINT-LOUIS  
IMMERSION DU 22 AU 26 JANVIER 1990

—— SURFACE / ---- MILIEU / \*\*\*\* FOND

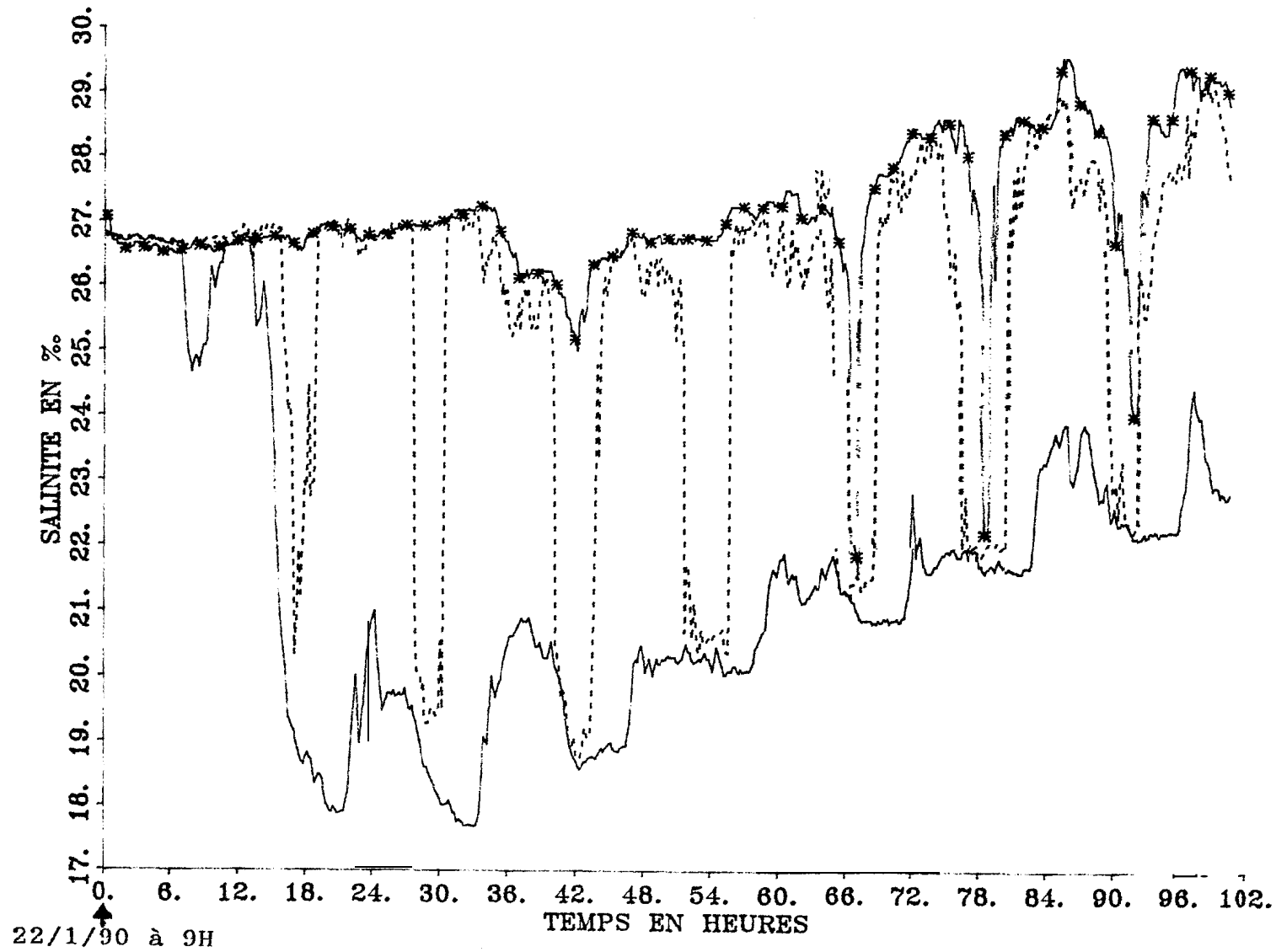
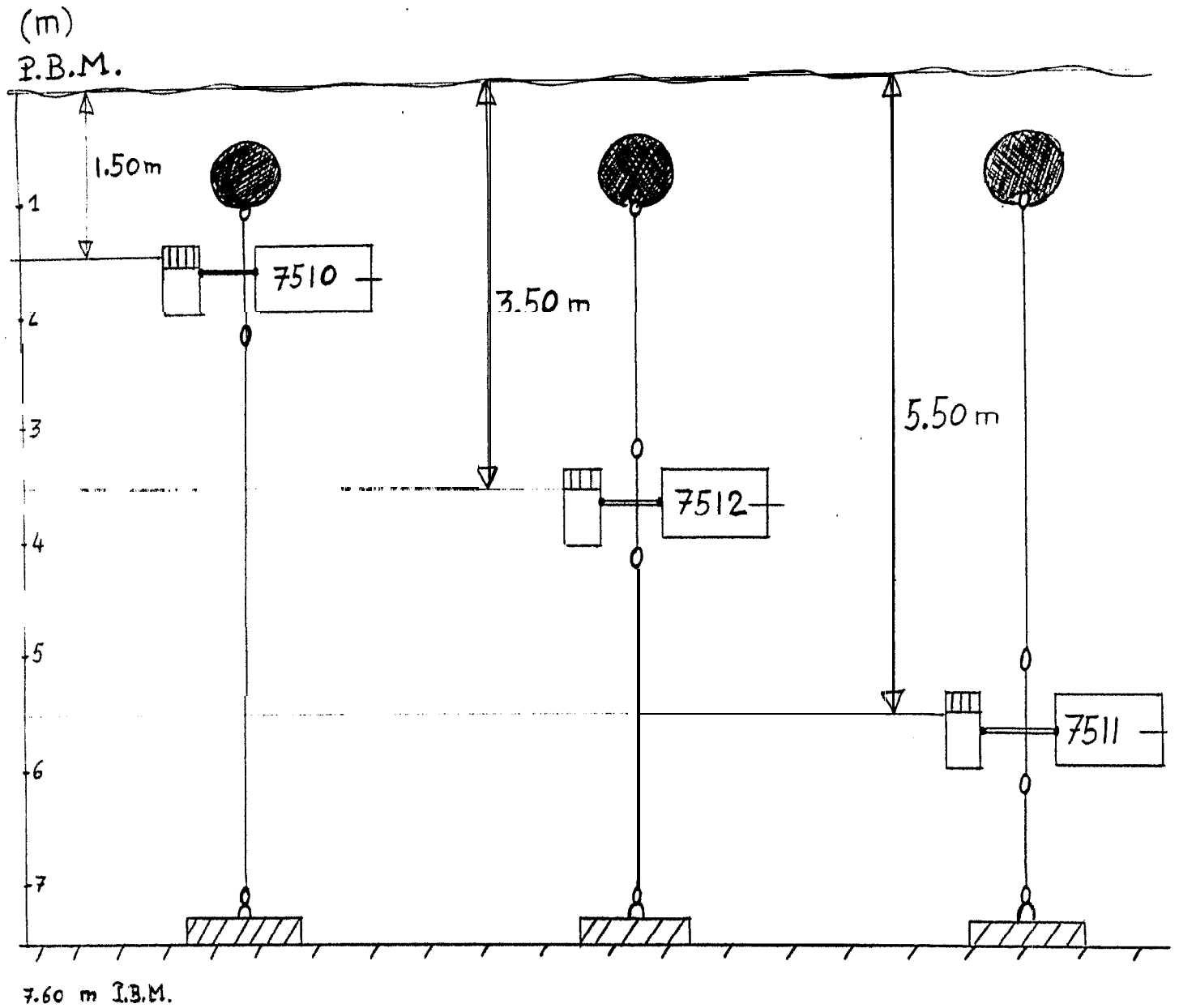


FIGURE 1

**MOUILLAGE COURANTOCRAIPHIQUE  
A SAINT-LOUIS**



DEUX CAMPAGNES D'ENREGISTREMENTS :

PERIODE DU 22 JANVIER 1990 à 9 HEURES  
AU 26 JANVIER 1990 à 13 HEURES

PERIODE DU 21 MAI 1990 à 14 HEURES  
AU 25 MAI 1990 à 13 HEURES

FIGURE 8

MORPHOLOGIE DES SECTIONS RECTANGULAIRES EQUIVALENTES

SECTION	LARGEUR (m)	PROFONDEUR (m)
1	200	4.4
2	200	4.4
3	300	4.4
4	300	4.1
5	300	4.3
6	300	3.9
7	250	4.4
8	200	4.4
9	200	4.4
10	250	4.4
11	360	4.4
12	390	3.7
13	300	4.2
14	345	3.7
15	480	3.4
16	420	3.4
17	450	3.4
18	420	3.4
19	420	3.3
20	300	3.3

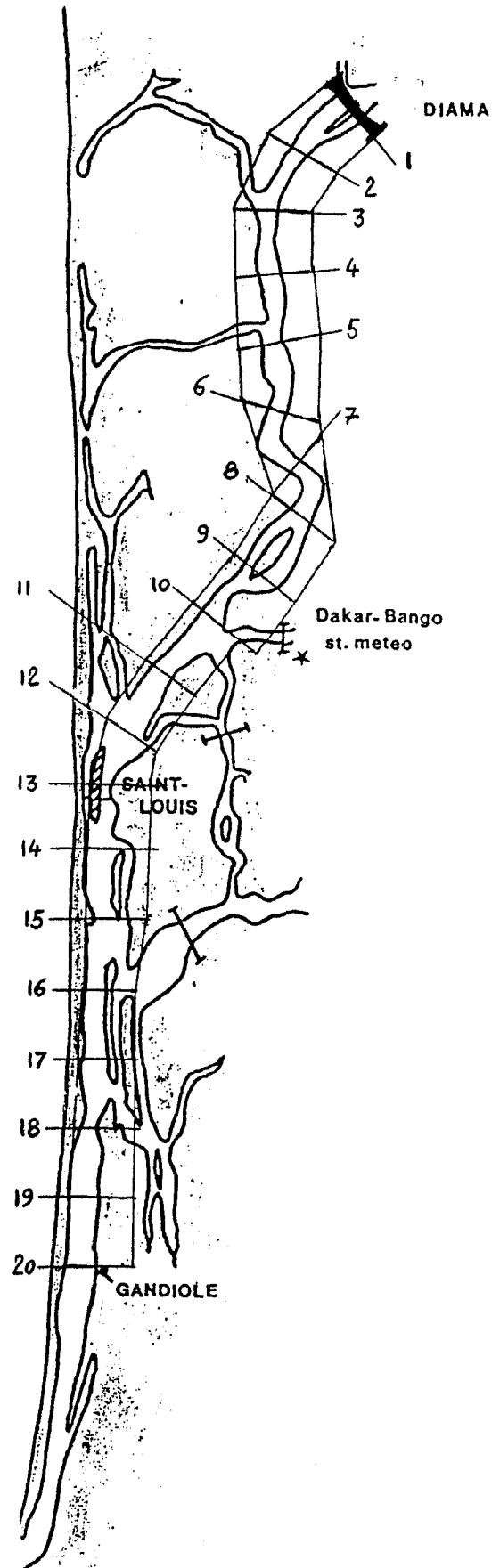
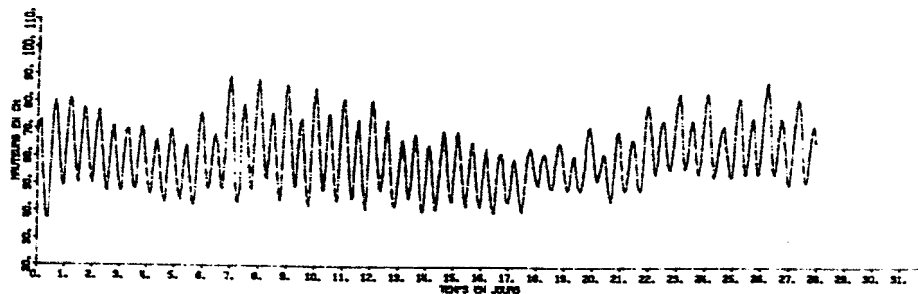


FIGURE 9

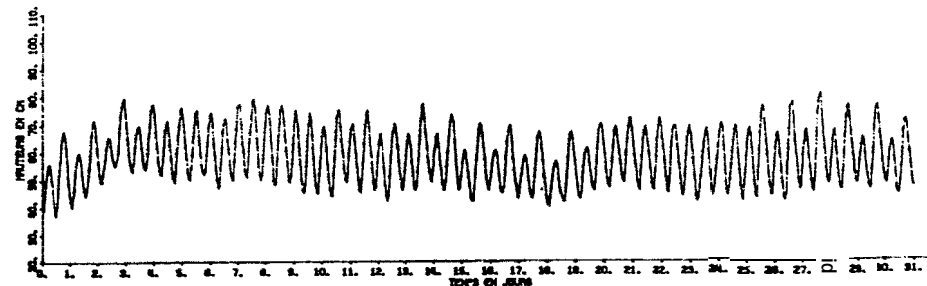
FIGURE 10

# MAREGRAPHIE A SAINT-LOUIS ENTRE DECEMBRE 1989 ET MAI 1990

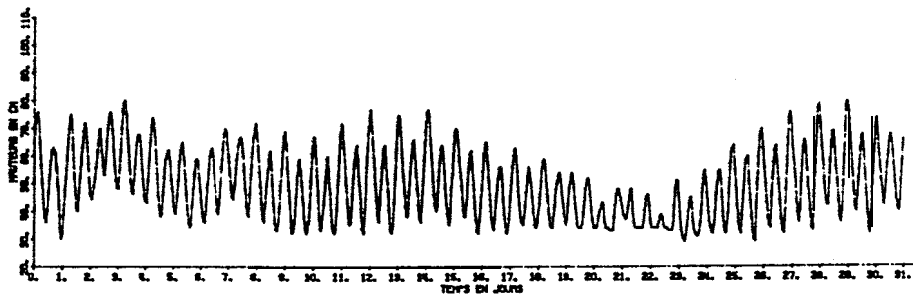
MAREGRAPHIE A SAINT-LOUIS - FEVRIER 1990



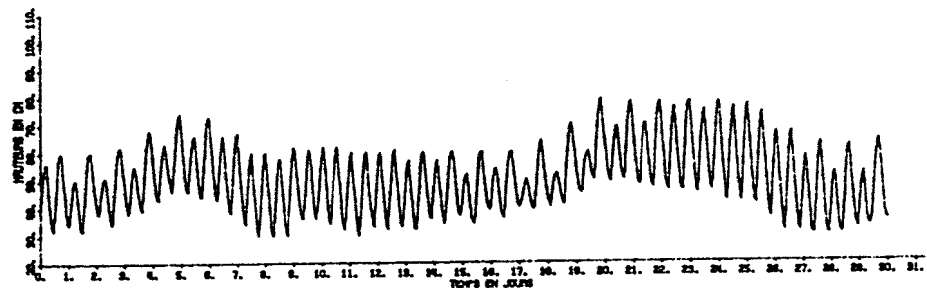
MAREGRAPHIE A SAINT-LOUIS - MAI 1990



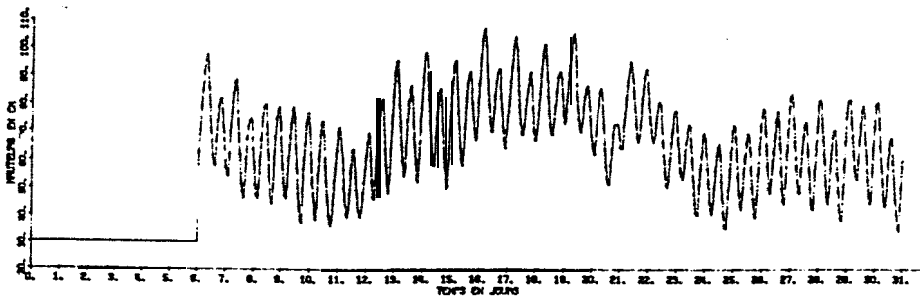
MAREGRAPHIE A SAINT-LOUIS - JANVIER 1990



MAREGRAPHIE A SAINT-LOUIS - AVRIL 1990



MAREGRAPHIE A SAINT-LOUIS - DECEMBRE 1989



MAREGRAPHIE A SAINT-LOUIS - MARS 1990

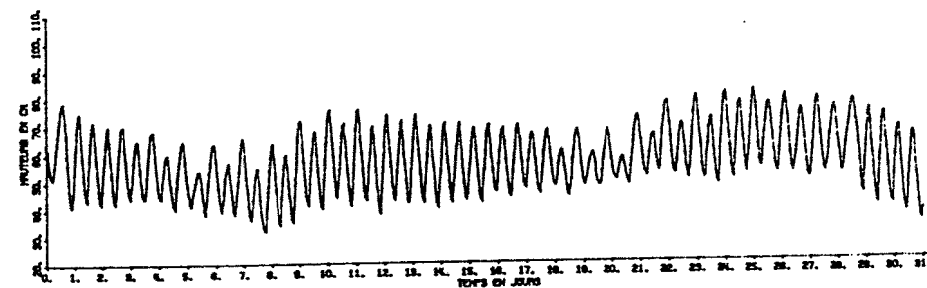
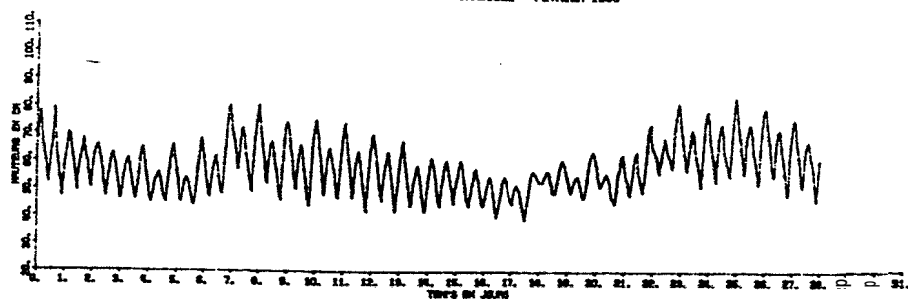


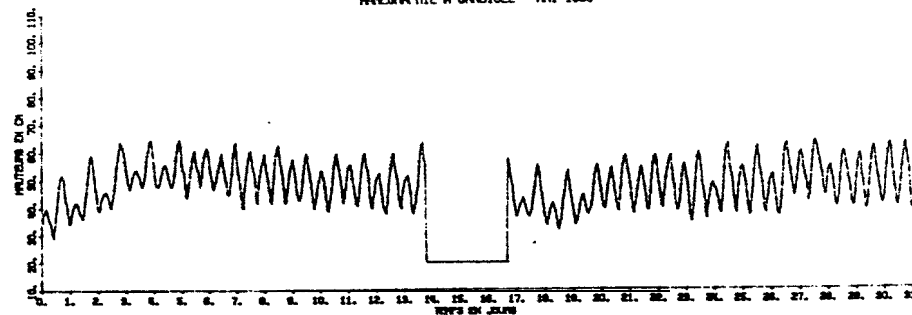
FIGURE 11

# MAREGRAPHIE A CANDIOLE ENTRE DECEMBRE 1989 ET MAI 1990

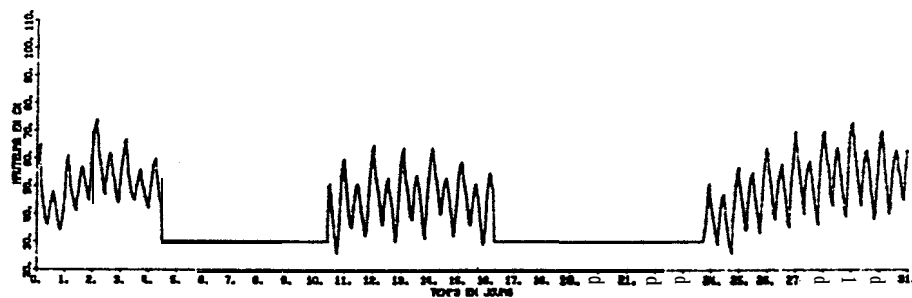
MAREGRAPHIE A CANDIOLE - FEVRIER 1990



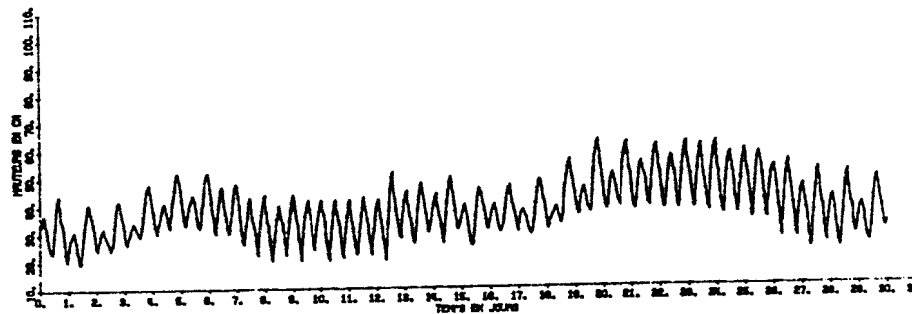
MAREGRAPHIE A CANDIOLE - MAI 1990



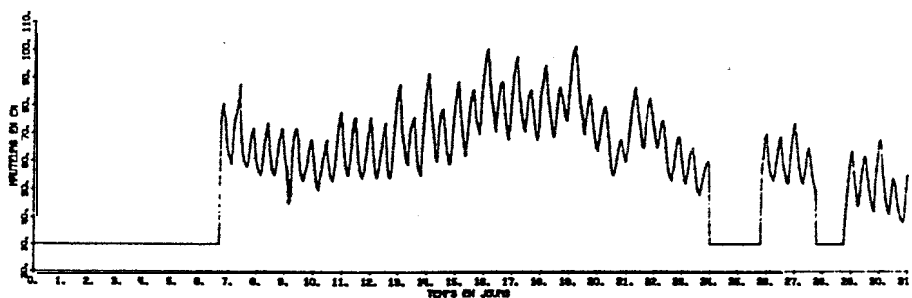
MAREGRAPHIE A CANDIOLE - JANVIER 1990



MAREGRAPHIE A CANDIOLE - AVRIL 1990



MAREGRAPHIE A CANDIOLE - DECEMBRE 1989



MAREGRAPHIE A CANDIOLE - MARS 1990

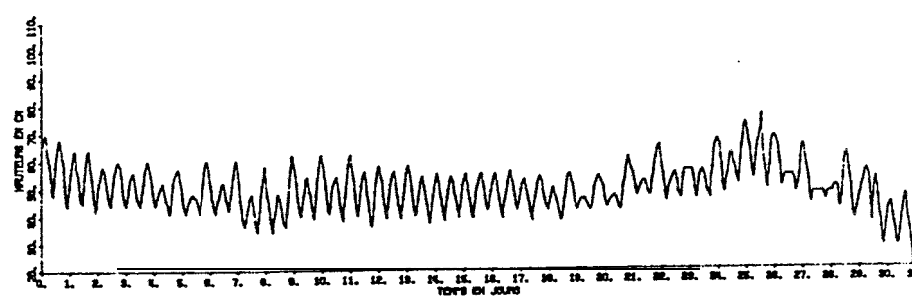


FIGURE 12

MODELISATION NUMERIQUE DE					
CIRCULATION DE MAREE ET DE DISPERSION SALINE DANS					
L'ESTUAIRE DU FLEUVE SENEGAL					

### FORMULATION MATHEMATIQUE: - DU MODELE

$$\frac{\partial (BU)}{\partial x} + B \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial (\zeta)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial \int_{-h}^{\zeta} B U dz}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} + g \frac{\bar{\rho}}{\rho} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{(\zeta - z)}{\rho} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} - \frac{\partial \left( N_z \frac{\partial U}{\partial z} \right)}{\partial z}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + W \frac{\partial S}{\partial z} - \frac{1}{B} \frac{\partial \left( B K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left( K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right)}{\partial z} = 0$$

$$N_z = HU \sqrt{k} \left( N_1 f(z) \right) (1 + 7 Ri)^{-0.25}$$

$$K_z = HU \sqrt{k} \left( K_1 f(z) \right) (10 + Ri) K_2$$

$$f(z) = \sqrt{\frac{z+h}{H}} \left( 1 - \left( \frac{z+h}{H} \right)^3 \right)$$

avec :

- $U, W$  : les composantes horizontale et verticale de la vitesse
- $B$  : la largeur des sections de l'estuaire
- $\zeta$  : l'élévation en surface
- $H$  : la profondeur totale de la section équivalente
- $\rho$  : la densité
- $\bar{\rho}$  : la densité moyennée sur la profondeur
- $S$  : la salinité
- $N_z$  : coefficient de viscosité turbulente verticale
- $K_x, K_z$  : coefficients de diffusivité turbulente horizontale et verticale
- $k$  : coefficient de frottement
- $Ri$  : nombre de Richardson

$N_1, K_1$  et  $K_2$  sont des constantes déterminées lors de l'étalonnage.

FIGURE 13

# RESOLUTION NUMERIQUE DES EQUATIONS

APPROXIMATION PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES.

- DERIVEES SPATIALES CENTREES,
- TERME D'ADVECTION HORIZONTAL EN SEL DECENTRE VERS L'AMONT AU JUSANT ET VERS L'AVANT AU FLOT.
- TRAITEMENTS EXPLICITES A L'EXCEPTION DES TERMES DE VISCOSITE ET DE DIFFUSIVITE TRAITES IMPLICITEMENT.

## GRILLE DE CALCUL DU MODELE

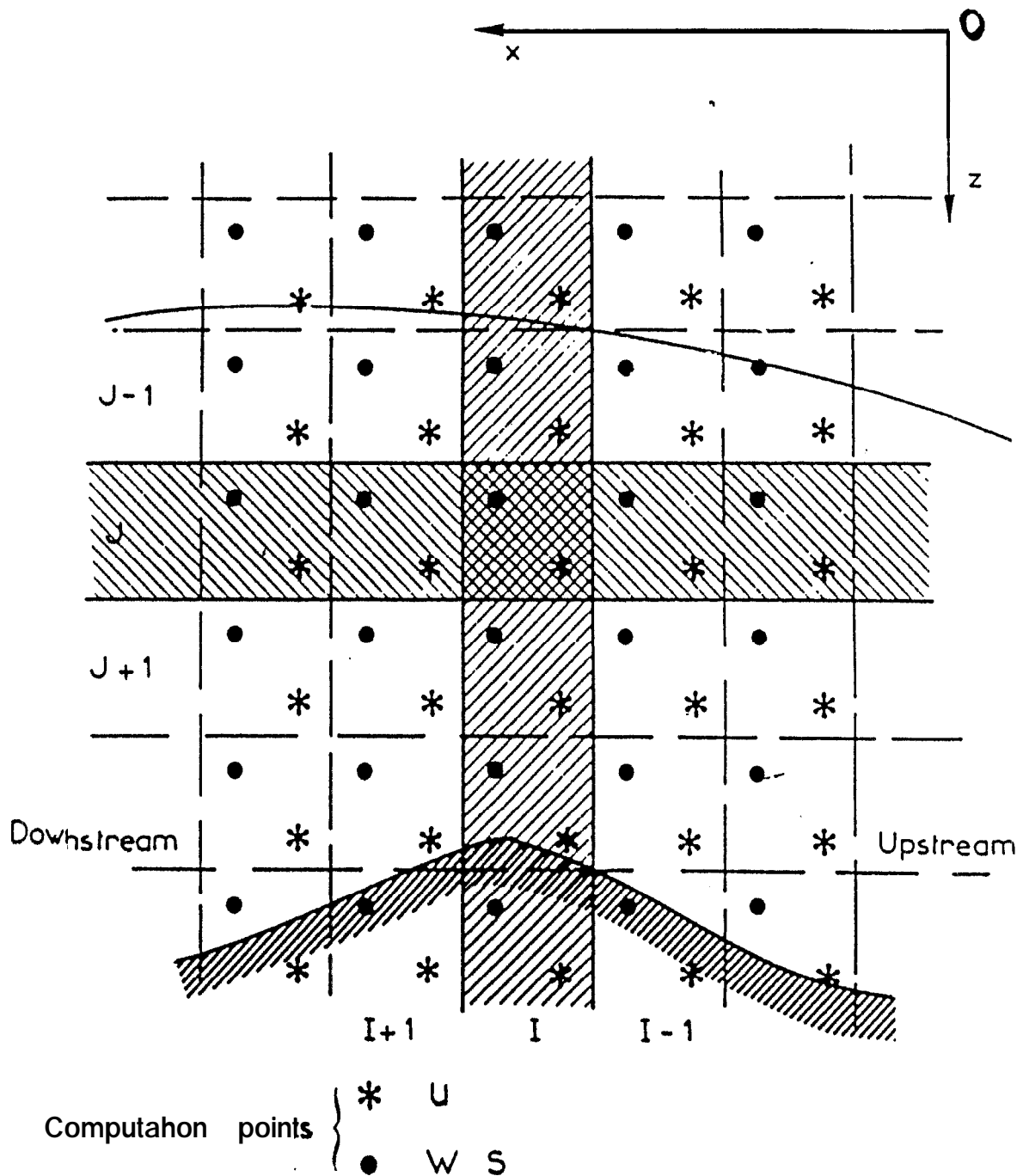


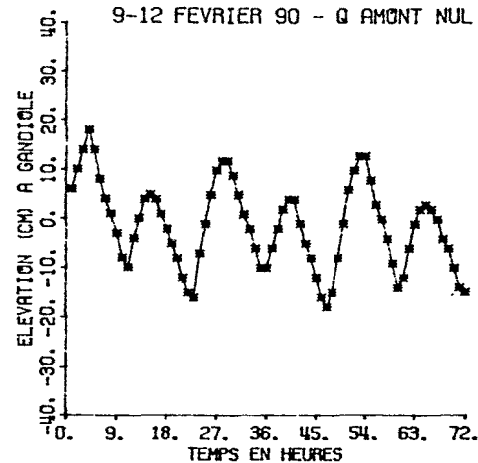


FIGURE 14

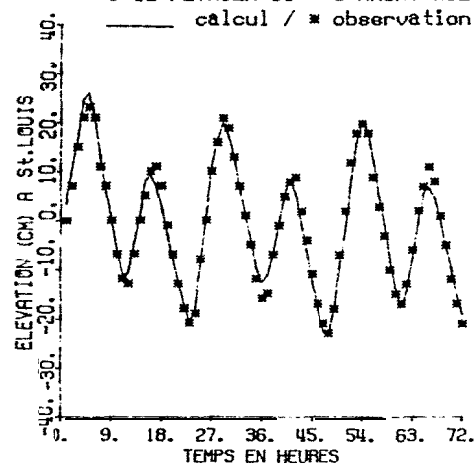
# CALAGE DU MODELE

PERIODE DU 9 AU 12-2-1990

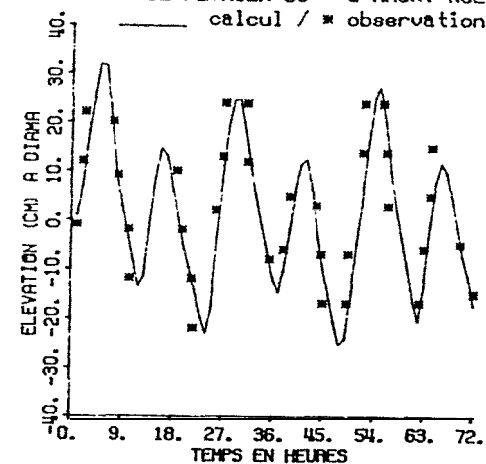
CALAGE DU MODELE 2D DU FLEUVE SENEGAL  
9-12 FEVRIER 90 - Q AMONT NUL



CALAGE DU MODELE 2D DU FLEUVE SENEGAL  
9-12 FEVRIER 90 - Q AMONT NUL



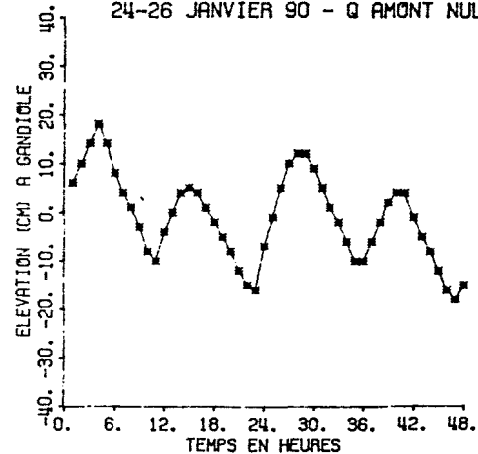
CALAGE DU MODELE 2D DU FLEUVE SENEGAL  
9-12 FEVRIER 90 - Q AMONT NUL



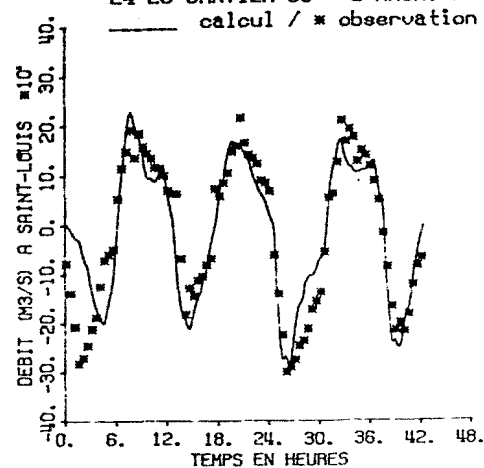
# VALIDATION DU MODELE

PERIODE DU 24 AU 26-1-1990

VALIDATION DU MODELE 2D DU FLEUVE SENEGAL  
24-26 JANVIER 90 - Q AMONT NUL



VALIDATION DU MODELE 2D DU FLEUVE SENEGAL  
24-26 JANVIER 90 - Q AMONT NUL



VALIDATION DU MODELE 2D DU FLEUVE SENEGAL  
24-26 JANVIER 90 - Q AMONT NUL

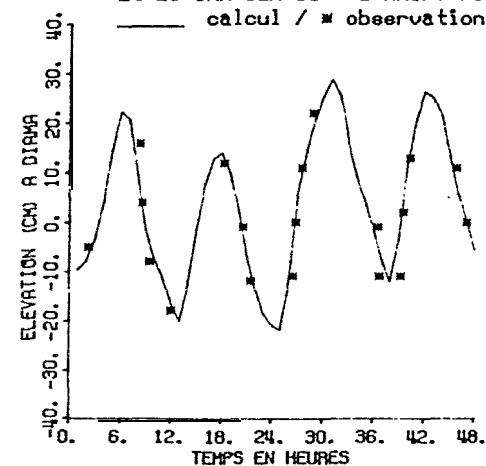


FIGURE 15

VALIDATION DU MODÈLE 2D DU FLEUVE SENEGAL  
PÉRIODE DU 23 AU 26 JANVIER 1990

VALEURS OBSERVEES : MILIEU ——— / FOND \*\*\*\*\*  
VALEURS CALCULEES : MILIEU - - - - - / FOND -o-o-o-o-

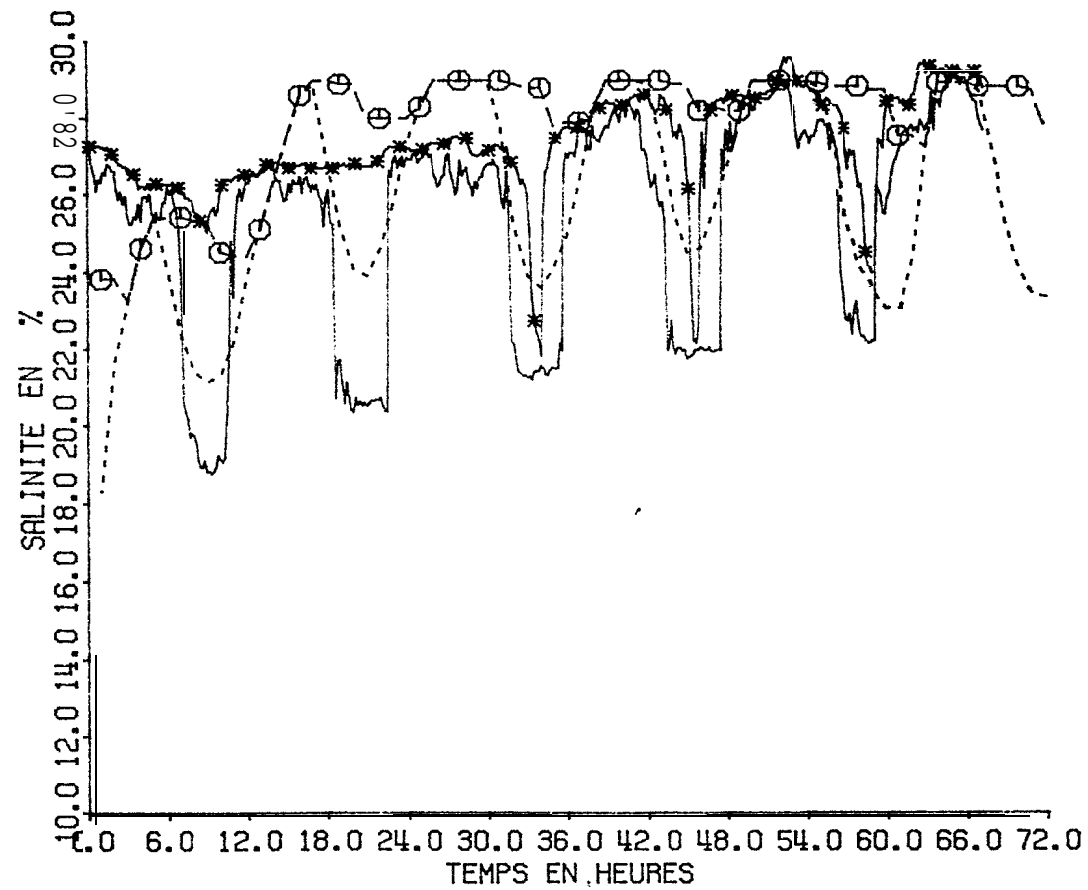


FIGURE 16

FICHER : SALINIT.TXT



	SURFACE				FOND			
								
AMONT →	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	28.	28.	28.	28.	28.	28.	28.	28.
	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1
	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2
	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3
	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4
	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5
	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6
	28.7	28.7	28.7	28.7	28.7	28.7	28.7	28.7
	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8
	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9
	29.	29.	29.	29.	29.	29.	29.	29.
	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3
	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6
	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8
	30.	30.	30.	30.	30.	30.	30.	30.
	31.	31.	31.	31.	31.	31.	31.	31.
	32.	32.	32.	32.	32.	32.	32.	32.
	33.	33.	33.	33.	33.	33.	33.	33.
AVAL →	33.	33.	33.	33.	33.	33.	33.	33.

FIGURE 17

FICHER : MAREE.TXT

6.  
10.  
14.  
18.  
14.  
8.  
4.  
1.  
-3.  
-8.  
-10.  
-4.  
0.  
4.  
3.  
4.  
1.  
-3.  
-3.  
-8.  
-12.  
-13.  
-16.  
-7.  
-1.  
5.  
10.  
12.  
11.  
9.  
5.  
1.  
-2.  
-6.  
-10.  
-9.  
-6.  
-2.  
2.  
4.  
4.  
-1.  
-5.  
-8.  
-12.  
-16.  
-13.  
-15.  
-8.  
-1.  
6.  
10.  
13.  
12.  
8.  
3.  
0.  
-4.  
-9.  
-14.  
-12.  
-6.  
-1.  
2.

**FIGURE 1 8**  
**FICHER : ELEV.TXT**

ELEVATIONS A : 23.0 HEURES

19	-21.92	<b>AVAL</b>
18	-21.71	
17	-21.17	
16	-20.69	
15	-20.21	
14	-19.83	
13	-19.61	
12	-19.43	
11	-19.30	
10	-19.17	
9	-18.98	
8	-18.70	
7	-18.38	
6	-18.14	
5	-17.88	
4	-17.66	
3	-17.49	
2	-17.33	
1	-17.18	<b>AMONT</b>

ELEVATIONS A : 24.0 HEURES

19	-9.59
18	-10.51
17	-12.08
16	-13.40
15	-14.73
14	-15.83
13	-17.10
12	-18.45
11	-19.61
10	-20.43
9	-21.12
8	-21.54
7	-21.72
6	-21.75
5	-21.71
4	-21.66
3	-21.62
2	-21.58
1	-21.54

ELEVATIONS A : 25.0 HEURES

19	-1.37
18	-1.63
17	-3.13
16	-4.43
15	-5.77
14	-6.83
13	-7.85
12	-8.84
11	-9.51
10	-10.15
9	-11.23
8	-12.75
7	-14.22
6	-15.31
5	-16.24
4	-16.98
3	-17.58
2	-18.07
1	-18.73

FIGURE 19

FICHER : VITU.TXT

	SURFACE				FOND
	VITESSES HORIZONTALES A				: 23. HEURES
					AVAL
19	9.48	9.18	8.02		
18	8.68	8.36	7.79		
17	7.82	8.01	7.07		
16	8.00	8.20	7.26		
15	6.56	6.78	6.06		
14	7.40	7.89	7.53	6.93	
13	7.10	7.66	7.28	6.77	
12	5.69	6.17	5.93	5.52	
11	5.01	5.51	5.12	4.66	
10	6.60	7.18	6.85	6.41	
9	7.77	8.37	8.01	7.49	
8	7.17	7.77	7.42	6.98	
7	4.95	5.52	5.34	5.07	
6	3.98	4.44	4.28	4.00	
5	2.81	3.26	3.18	3.00	
4	2.15	2.56	2.57	2.46	
3	1.20	1.58	1.67	1.65	
2	1.02	1.38	1.48	1.47	
1	.32	.62	.75	.80	AMONT

	VITESSES HORIZONTALES A				: 24.0 HEURES
19	-15.41	-14.91	-14.52		
18	-13.13	-12.75	-11.91		
17	-10.09	-9.80	-9.07		
16	-8.56	-8.33	-7.74		
15	-8.60	-5.39	-5.05		
14	-4.98	-4.83	-4.74	-4.44	
13	-3.69	-3.49	-3.50	-3.21	
12	-1.75	-1.50	-1.48	-1.40	
11	-1.09	.26	.23	.26	
10	1.67	2.06	1.93	1.83	
9	2.97	3.40	3.18	3.01	
8	3.02	3.47	3.24	3.11	
7	2.08	2.49	2.42	2.34	
6	1.67	1.99	1.90	1.78	
5	1.14	1.45	1.40	1.32	
4	.79	1.07	1.08	1.04	
3	.31	.58	.65	.65	
2	.20	.46	.53	.55	
1	-.07	.15	.26	.31	

	VITESSES HORIZONTALES A				: 25.0 HEURES
19	-22.95	-22.13	-21.26		
18	-20.83	-20.37	-19.50		
17	-18.17	-17.75	-16.94		
16	-17.98	-17.57	-16.77		
15	-14.59	-14.20	-13.49		
14	-16.83	-16.63	-16.22	-15.32	
13	-16.13	-15.93	-15.54	-14.81	
12	-13.12	-12.94	-12.59	-11.89	
11	-11.41	-11.20	-10.85	-10.25	
10	-15.30	-15.10	-14.71	-14.03	
9	-18.04	-17.84	-17.43	-16.68	
8	-17.03	-16.84	-16.44	-15.71	
7	-12.79	-12.62	-12.27	-11.65	
6	-10.65	-10.53	-10.25	-9.71	
5	-8.38	-8.24	-7.94	-7.44	
4	-7.13	-7.01	-6.76	-6.37	
3	-5.23	-5.10	-4.89	-4.58	
2	-5.55	-5.44	-5.23	-4.90	
1	-3.11	-2.98	-2.83	-2.65	

FIGURE 20

FICHER : VITW.TXT

	SURFACE				FOND	
	VIT. VERTICALES *10-3 CM/S				A :	23.0 HEURES
						AVAL
18	-8.84	-8.34	-5.03	-1.13		
17	-8.58	-7.90	-4.73	-1.06		
16	-7.58	-7.42	-4.54	-1.03		
15	-7.74	-7.01	-4.22	-1.96		
14	-4.36	-5.67	-5.28	-2.08		
13	-5.84	-6.45	-6.56	-3.75		
12	-8.07	-7.43	-5.67	-2.25		
11	-4.63	-4.91	-4.74	-3.06	-1.77	
10	-2.82	-4.20	-5.10	-3.61	-1.95	
9	-5.14	-6.16	-6.67	-4.55	-1.19	
8	-7.43	-7.57	-7.25	-4.77	-1.26	
7	-7.16	-6.79	-6.03	-3.87	-1.03	
6	-5.27	-5.06	-4.32	-1.97	.00	
5	-3.00	-3.19	-3.11	-1.91	-1.40	
4	-2.33	-2.55	-2.53	-1.35	-1.11	
3	-1.36	-1.60	-1.65	-1.12	-1.30	
2	-.24	-.72	-1.07	-.80	-.22	
1	-.41	-.68	-.79	-.57	-.16	AMONT

VIT. VERTICALES \*10-3 CM/S A : 24.0 HEURES

18	12.33	11.73	7.61	1.96		
17	10.07	9.27	5.90	1.50		
16	7.18	7.06	4.63	1.19		
15	5.60	5.04	3.24	1.85		
14	2.39	2.94	2.77	1.11		
13	2.20	2.29	2.35	1.32		
12	1.19	.93	.70	.23		
11	-.52	-.71	-.75	-.52	-1.19	
10	-.90	-1.46	-1.80	-1.30	-3.9	
9	-2.21	-2.71	-2.93	-2.04	.55	
8	-3.41	-3.53	-3.40	-2.29	.63	
7	-3.28	-3.19	-2.87	-1.87	-5.2	
6	-2.38	-2.33	-1.99	-.91	.00	
5	-1.33	-1.47	-1.43	-.88	-1.19	
4	-.96	-1.11	-1.11	-.60	-1.05	
3	-.46	-.63	-.69	-.48	-1.13	
2	.00	-.25	-.41	-.32	.09	
1	-.06	-.22	-.31	-.23	-.27	

VIT. VERTICALES \*10-3 CM/S A : 25.0 HEURES

18	20.46	19.79	13.22	3.55		
17	19.19	17.97	11.83	3.16		
16	16.20	16.17	10.91	2.91		
15	16.34	14.87	9.63	2.55		
14	9.44	11.80	11.15	4.46		
13	12.44	13.23	13.71	8.00		
12	17.26	15.34	11.72	4.69		
11	9.73	9.89	9.83	6.57	1.73	
10	6.25	8.61	10.64	7.68	2.05	
9	11.21	12.83	14.11	9.86	2.65	
8	16.50	16.20	15.63	10.42	2.79	
7	16.73	15.12	13.32	8.52	2.26	
6	12.81	11.69	9.97	4.58	.00	
5	8.02	7.79	7.38	4.51	.95	
4	6.81	6.63	6.30	3.32	.27	
3	4.94	4.77	4.51	2.95	.77	
2	1.90	2.76	3.48	2.49	.65	
1	2.83	2.69	2.53	1.66	.43	

## SURFACE

FOND

SALINITES A : 23.0 HEURES

FIGURE '21

FICHER : SAL.TXT

19	22.10	24.07	24.89	25.95		
18	30.21	32.77	32.77	32.77		
17	30.26	32.58	32.56	32.57		
16	29.93	32.23	32.23	32.23		
15	30.37	32.29	32.29	32.29		
14	29.50	31.79	31.79	31.79		
13	29.40	32.35	32.33	32.34		
12	30.40	32.42	32.42	32.42		
11	30.05	32.37	32.37	32.37	32.37	
10	29.16	32.01	32.01	32.01	32.01	
9	28.85	32.14	32.12	32.13	32.13	
8	29.20	32.58	32.58	32.58	32.58	
7	30.19	32.55	32.55	32.55	32.55	
6	30.83	32.30	32.54	32.80	32.88	
5	30.28	31.31	31.58	31.77	31.82	
4	29.99	30.66	30.91	31.03	31.10	
3	29.79	30.14	30.29	30.37	30.40	
2	29.58	29.89	30.04	30.12	30.14	
1	29.27	29.38	29.42	29.45	29.45	AMONT

SALINITES A : 24.0 HEURES

19	29.62	30.27	31.78	32.92		
18	32.41	32.56	32.74	32.78		
17	32.11	32.40	32.56	32.58		
16	31.62	32.06	32.20	32.22		
15	31.66	32.13	32.24	32.28		
14	30.84	31.64	31.73	31.77		
13	30.82	32.29	32.35	32.38		
12	31.46	32.31	32.36	32.41		
11	31.11	32.27	32.30	32.35	32.36	
10	30.31	31.92	31.94	31.98	31.98	
9	30.04	32.17	32.16	32.19	32.19	
8	30.39	32.68	32.67	32.69	32.69	
7	31.14	32.51	32.52	32.56	32.56	
6	31.40	32.25	32.50	32.75	32.84	
5	30.64	31.27	31.54	31.73	31.80	
4	30.23	30.63	30.87	31.02	31.08	
3	29.91	30.12	30.27	30.36	30.39	
2	29.69	29.87	30.02	30.10	30.13	
1	29.31	29.36	29.42	29.44	29.45	

SALINITES A : 25.0 HEURES

19	29.62	30.35	31.83	32.92		
18	33.00	33.00	33.00	33.00		
17	33.00	32.99	32.98	32.98		
16	33.00	33.00	33.00	33.00		
15	33.00	32.99	32.99	32.99		
14	32.93	32.93	32.93	32.93		
13	33.00	33.00	32.99	32.99		
12	33.00	32.98	32.98	32.98		
11	32.68	32.68	32.68	32.68	32.68	
10	32.32	32.32	32.32	32.32	32.32	
9	32.46	32.46	32.46	32.46	32.46	
8	32.84	32.84	32.84	32.84	32.84	
7	32.74	32.74	32.74	32.74	32.74	
6	32.48	32.48	32.48	32.48	32.48	
5	31.41	31.41	31.41	31.41	31.41	
4	30.77	30.77	30.77	30.77	30.77	
3	30.21	30.21	30.21	30.21	30.21	
2	29.95	29.95	29.95	29.95	29.95	
1	29.42	29.42	29.42	29.42	29.42	



FIGURE 22

CHRMF IIE VITESSE DANS LE FLEUVE SENEGAL

LACHER AMONT = 0 M3/S

CAS TYPOLOGIQUE - RENVERSE DE MAREE

horizontalement: 1cm = 7 cm/s

verticalement: 1cm = 2 E-2 cm/s

DIAMA

SAINT-LOUIS

GANDIOLE

