

**QUALITE ET DYNAMIQUE
DES EAUX FLUVIALES
DE
GUYANE FRANCAISE**

H.X. HUMBEL

**VOLONTAIRE A L'AIDE TECHNIQUE
EN GUYANE FRANCAISE
DE JUIN 1988 A SEPTEMBRE 1989**

SOMMAIRE

I) CHIMIE DES EAUX FLUVIALES DE GUYANE FRANCAISE .. 1

- Etude de la variabilité temporo-spatiale des eaux fluviales de Guyane.

II) INTRUSION SALINE EN MILIEU ESTUARIEN 8

- Effets sur la qualité physico-chimique des eaux estuariennes.
- Modélisation appliquée à l'estuaire du Sinnamary.

III) PROPAGATION SPATIO-TEMPORELLE D'UN POLLUANT EN MILIEU ESTUARIEN 17

- Modélisation appliquée à l'estuaire du Sinnamary.

IV) ANALYSE SPECTRALE 22

- Etude des fluctuations climatiques des débits.
- Elimination de la composante océanique dans une série limnigraphique.

V) OUTILS INFORMATIQUES 26

- ADDAD.
- HYDROM.
- POLLUANT
- SALT
- SPECTRE
- FOURIER

AVANT PROPOS

Ce rapport concrétise 16 mois passés en Guyane Française, au cours desquels j'ai pu découvrir la complexité du milieu fluvial guyanais.

La qualité physico-chimique des eaux fluviales guyanaises est encore mal connue, et les fleuves passent pour être parmi les moins pollués du monde.

Mais le développement économique et démographique du Département, va un jour ou l'autre, amener dans ces eaux, des pollutions d'origines diverses, en quantités plus ou moins importantes. Ces rejets polluants peuvent, à plus ou moins long terme, apporter des modifications sensibles sur la qualité des eaux.

Il m'a semblé intéressant de me pencher sur ces problèmes au moment où la protection de l'environnement fait la une des journaux, et devient une préoccupation mondiale.

Cette étude traite donc essentiellement de la qualité des eaux fluviales de Guyane. Dans le premier chapitre nous aborderons le problème de la variabilité de la qualité physico-chimique des eaux du Département. Puis dans le second chapitre, nous nous intéresserons à la remontée du biseau salé dans les eaux estuariennes. La propagation d'un polluant en milieu estuarien sera traitée dans le troisième chapitre. Dans le quatrième chapitre nous évoquerons les possibilités de l'analyse spectrale en hydrologie. Enfin dans le cinquième et dernier chapitre, nous détaillerons quelques outils informatiques et leurs applications en hydrologie.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel du Centre O.R.S.T.O.M de Cayenne, et plus particulièrement les techniciens et hydrologues de la section hydrologique, pour leur aide et leur gentillesse.

I.) CHIMIE DES EAUX FLUVIALES DE GUYANE FRANCAISE

a) OBJECTIFS

Il s'agit d'étudier la variabilité spatio-temporelle de la qualité physico-chimiques des eaux fluviales de Guyane Française.

b) DONNEES

Nous disposons de prélèvements ponctuels instantanés effectués sur l'ensemble du territoire d'octobre 1960 à juin 1961. Au cours de cette période 76 prélèvements ont été effectués, et les 14 paramètres suivants ont été analysés au laboratoire de chimie du Centre O.R.S.T.O.M de Bondy: pH, résistivité, M.E.S, résidu sec, Na^+ , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , O_2 , CO_2 , SiO_2 , Fer, et matières organiques. Les emplacements des différents points de prélèvements peuvent être visualisés sur la figure n°1.

c) METHODES STATISTIQUES D'INTERPRETATION

La quantité importante de variables (14), et d'observations (76), à traiter nous poussent à utiliser des méthodes statistiques descriptives multivariées. Ces méthodes sont inspirées des travaux de Benzécri (1978).

- **L'analyse factorielle des correspondances (A.F.C)**, est une analyse en composantes principales après transformation des variables. Elle permet de représenter sur un même graphique la projection des variables et des points de prélèvements, sur les axes principaux d'inertie du nuage de points. Cette méthode permet de mettre en évidence différents types d'eaux de surface selon leurs caractéristiques physico-chimiques.

- **La classification ascendante hiérarchique (C.A.H)**, permet de regrouper dans l'espace des paramètres physico-chimiques, des points de prélèvements dont les caractéristiques sont proches. Pour cela on calcule les distances qui séparent les points de prélèvements, et un critère d'agrégation permet leur regroupement en classes.

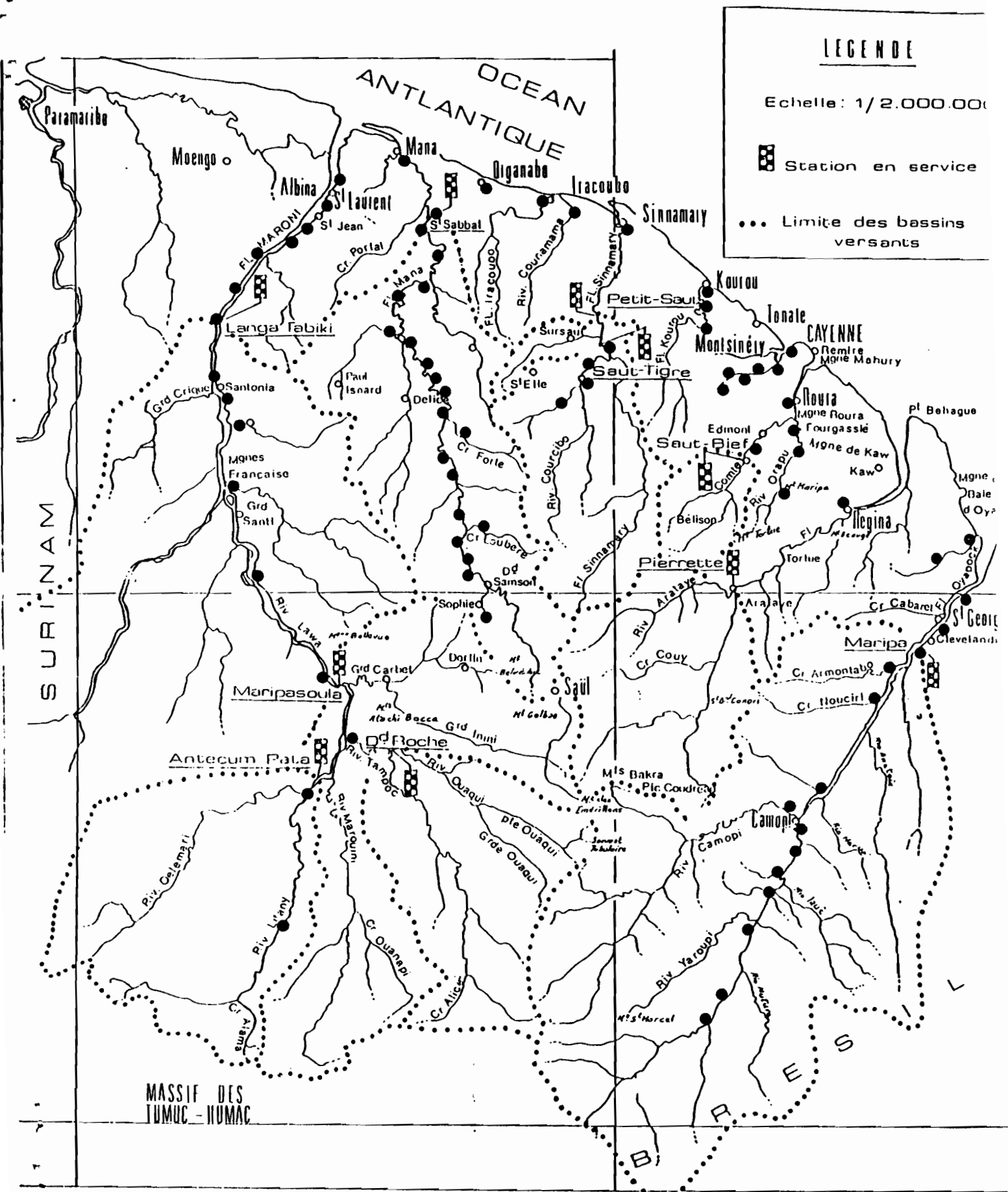


Fig 1 - Localisation des différents points de ...

1 --AXE HORIZONTAL (1)--AXE VERTICAL (2)--TITRE:A.F.C. : (FLEUVES DE GUYANE)

NOMBRE DE POINTS : 90

[illegible]

NOMBRE DE POINTS SUPERPOSES : 28

40H5 (39H5)	CA (K)	27H5 (24H5)	30H5 (24H5)	32H5 (19H5)	36H5 (15H5)	51H5 (24H5)	46H5 (15H5)	25H2 (21H1)	16H2 (07H1)
41S0 (19H2)	76H3 (19H2)	42S0 (33H2)	43S0 (20H2)	44H4 (31H2)	42S0 (09H1)	70S0 (09H1)	PH (23H2)	PG (11H1)	G2 (09H1)
03H1 (01H1)	05H1 (01H1)	59H6 (14H1)	58H6 (15H6)	70H3 (21H1)	67H1 (09H1)	51L (36H3)	58H5 (10H1)		

FIN NORMALE DU PROGRAMME ANCORR

d) INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS

Il convient d'abord de rappeler que les données disponibles sont des mesures ponctuelles instantanées effectuées à des dates différentes (aussi bien en saison sèche, qu'en saison des pluies). Elles sont réparties sur l'ensemble du réseau hydrographique guyanais. Cette étude va donc intégrer à la fois des variabilités saisonnières et des variabilités d'espace. Il peut être donc difficile de préciser les causes exactes de variabilité de la qualité des eaux.

- L'A.F.C représentée sur les deux premiers axes factoriels (76 % de la variance expliquée du nuage de points) peut être visualisée sur la figure n°2.

Le premier axe fait une distinction au niveau des teneurs en M.E.S : les eaux très chargées en M.E.S (2 points de prélèvements ont des concentrations supérieures à 100 mg/l), et les eaux à plus faible turbidité (les 74 autres points de prélèvements ont une concentration inférieure à 100 mg/l). Cette forte teneur en M.E.S résulte sans doute des phénomènes de floculation et de mise en suspension des vases en milieu estuarien.

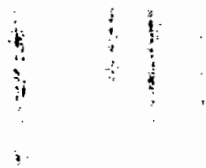
Le second axe rassemble d'un côté les paramètres Na^+ , Cl^- , résidu sec, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , et de l'autre côté les paramètres résistivité, silice, Fer, O_2 , matières organiques, pH, et CO_2 .

Il apparaît ainsi deux pôles physico-chimiques: le pôle sodium-chlorures et le pôle résistivité-silice.

Le pôle sodium-chlorure rassemble les eaux de la zone côtière, marquées par le biseau salé, et à un niveau moindre les prélèvements effectués au plus fort de la saison des pluies au mois de mai

Le pôle résistivité-silice regroupe les prélèvements d'eau douce continentale, non influencée par le biseau salé, faiblement minéralisée, riche en fer, O_2 et en matières organiques.

On peut de manière schématique représenter cette A.F.C selon:



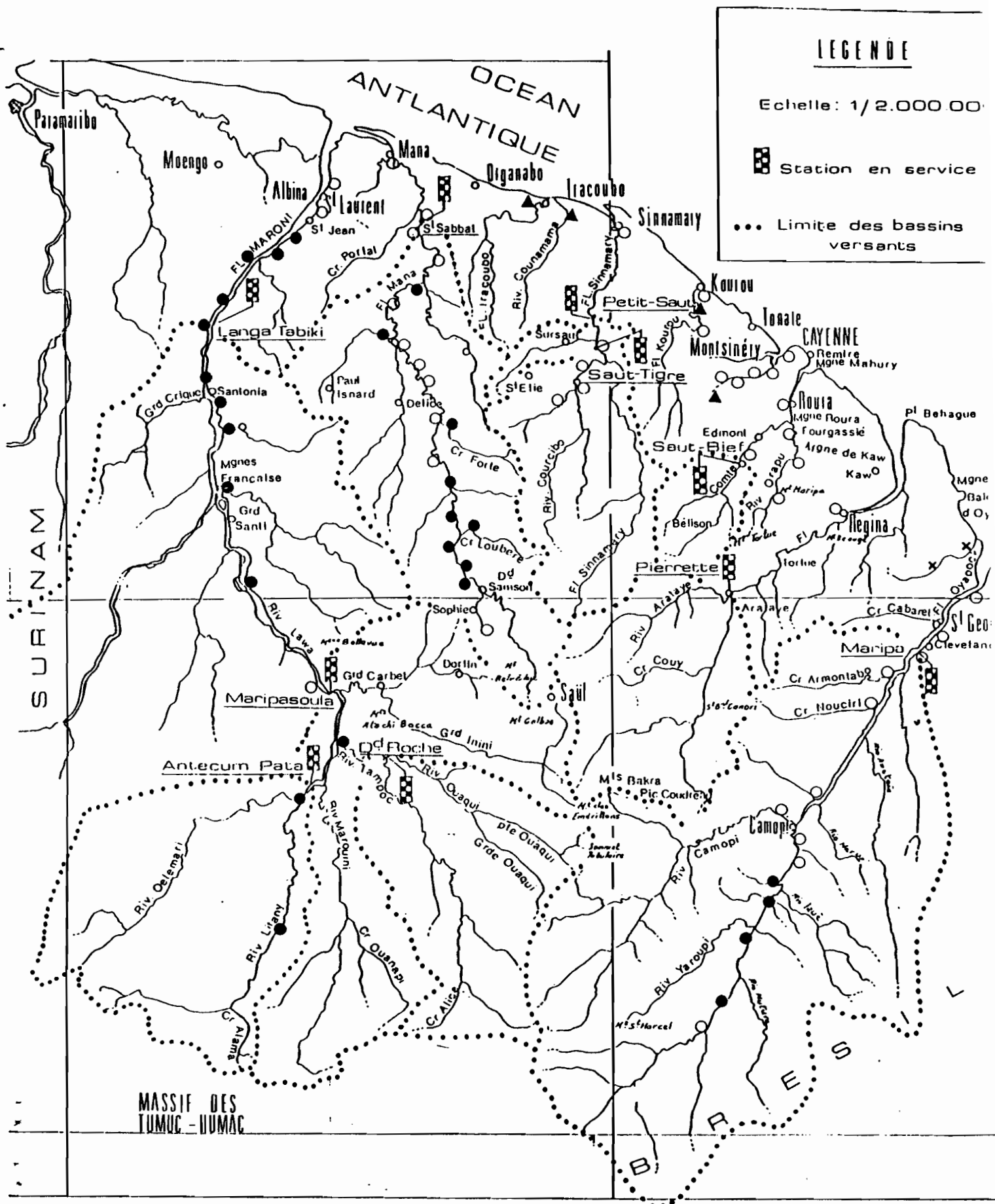
Na⁺, Cl⁻ Résidu sec, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺	M.E.S
Résistivité, silice Fe, O₂, M.O, pH, CO₂	

- La C.A.H permet d'effectuer des regroupements en classes des points de prélèvements dont les caractéristiques physico-chimiques sont proches. Ce regroupement est établi dans l'espace des paramètres, il permet de préciser le regroupement observé graphiquement sur les deux axes principaux de l'A.F.C. Au cours de ce regroupement la C.A.H établit une hiérarchie représentée sous forme arborescente. Au sein de chaque classe, nous avons calculé les teneurs moyennes. Il est également possible de représenter sur les axes principaux de l'A.F.C les classes de la hiérarchie, sous forme d'ellipsoïde d'inertie.

Les résultats (figure n°3) mettent en évidence les faits suivants.

- Un premier niveau de hiérarchie est établi sur la teneur en M.E.S. D'un côté des eaux très chargées en M.E.S (moyenne proche de 1 g/l) dans les zones de mélange des eaux douces et marines <groupe 1> , de l'autre des eaux moins chargées (moyenne autour de 20 mg/l) <groupe 2>.

- Un second niveau de hiérarchie établit une classification au sein de ces eaux moins chargées . Il est établi à partir des teneurs en sodium et chlorures. D'une part les eaux marquées par le biseau salé du littoral guyanais où la teneur moyenne en sodium (40 mg/l) et en chlorures (80 mg/l) fournit une part importante du résidu sec (teneur moyenne proche de 200 mg/l) <groupe 2.1>. Ces eaux sont aussi relativement concentrées en magnésium (teneur moyenne proche de 7 mg/l). D'autre part, les eaux douces continentales, relativement moins concentrées en sodium (teneur moyenne de 3 mg/l), chlorures (5 mg/l), et magnésium (2 mg/l) <groupe

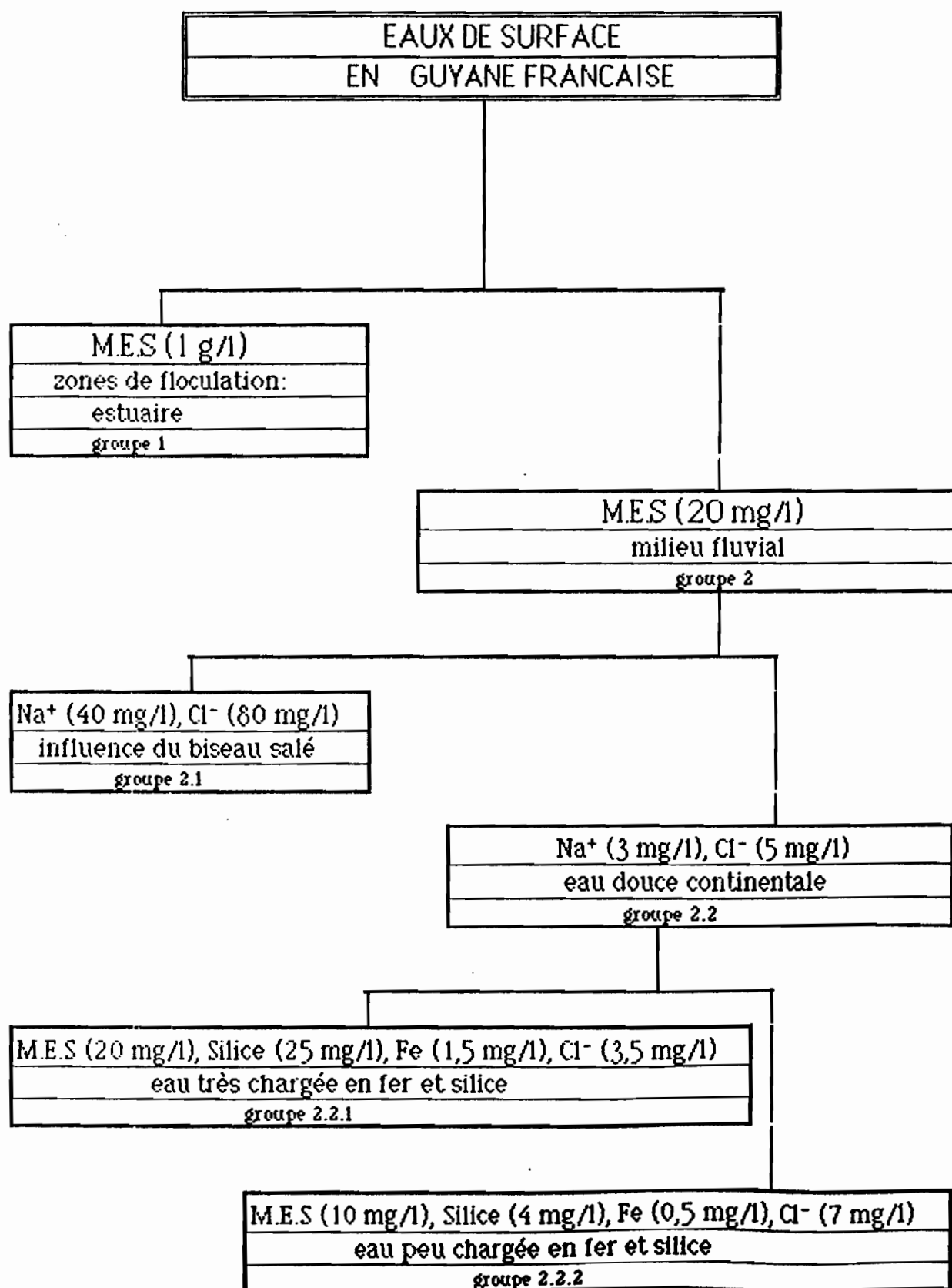


Groupe 1. ×

Groupe 2.2.1. ●

Groupe 2.1. ▲

Groupe 2.2.2. ○



2.2>. Le résidu sec est également plus faible (teneur moyenne proche de 45 mg/l).

-Un dernier niveau de hiérarchie concernant ces eaux douces continentales est établi à partir des teneurs en M.E.S, silice, fer, et chlorures. On distingue d'une part les eaux relativement plus concentrées en M.E.S (teneur moyenne de 20 mg/l), silice (25 mg/l), fer (1,5 mg/l) et contenant relativement moins de chlorures (teneur moyenne proche de 3,5 mg/l) <groupe 2.2.1>, et d'autre part des eaux moins concentrées en M.E.S (teneur moyenne de 10 mg/l), silice (4 mg/l), fer (0,5 mg/l), mais relativement plus concentrées en chlorures (teneur moyenne de 7 mg/l) <groupe 2.2.2>.

On peut également schématiser cette C.A.H de la façon suivante (tableau I)

e) MODELISATION

- La teneur en sodium semble varier linéairement en fonction de la teneur en chlorures. Le modèle d'ajustement est le suivant:

$$\text{Na}^+ = 0,5 \text{ Cl}^- + 0,1$$

avec

Na⁺, la concentration en sodium exprimée en g/l.

Cl⁻, la concentration en chlorures exprimée en g/l.

Ce modèle a un coefficient de corrélation de 0,97 et il est significatif à 0,01 %.

On retrouve ici, les résultats observés par Grimaldi (1988), à savoir une bonne corrélation entre les ions sodium et chlorures, qui traduit une origine commune : les précipitations. Ces ions participent au cycle biochimique de la végétation. Ils se concentrent dans les eaux de nappes par évaporation.

- Le résidu sec varie linéairement en fonction de la teneur en sodium. Le modèle d'ajustement est le suivant:

$$\text{Résidu sec} = 4,9 \text{ Na}^+ + 32,5$$

avec

résidu sec, exprimé en g/l.

Na⁺, la concentration en sodium exprimée en g/l.

Ce modèle a un coefficient de corrélation de 0,88 est il est significatif à 0,01 %.

Comme précédemment, la bonne qualité de cette régression traduit le fait que le sodium (comme les chlorures et la silice), est un cation majeur pour la physico-chimie des eaux fluviales de Guyane.

1) CONCLUSION

Le fer et la silice semble donc jouer un rôle important dans la physico-chimie des eaux de surface de Guyane Française.

Cette analyse a mis en évidence, d'une part les influences océaniques sur la chimie des eaux des fleuves guyanais. Cette influence se traduit par des eaux chargées en sodium et chlorures, appauvries en silice. Ces eaux impropres à la consommation (concentration maximale admissible de potabilité, en NaCl : 350 mg/l) remontent en général jusqu'à environ 30 km en amont de l'embouchure à marée haute.

D'autre part, au sein des eaux douces continentales, on peut distinguer 2 types d'eaux qui se distinguent essentiellement par leurs teneurs en fer, silice, M.E.S, et chlorures.

Mais il est difficile à ce niveau de l'analyse de faire la part entre la variabilité climatique ou la variabilité d'espace. En effet il n'est apparu aucun regroupement de points de mesure selon leurs caractéristiques climatiques ou par la nature géochimique des terrains traversés.

Nous pouvons tout de même émettre quelques hypothèses :

- La première famille d'eau peut être caractérisée par leur relative richesse en matières en suspension, fer, silice, et par leur relative pauvreté en chlorures. Il s'agit sans doute là d'eaux issues du *ruissellement superficiel*.

En effet, Fritsch J.M.(1981), a mis en évidence dans ses travaux, la mobilisation de la silice dans les eaux de crues, l'érosion chimique devenant alors quantitativement aussi importante que le transport de matériaux solides. Pour cet auteur la silice est issue des dissolutions minérales.

De plus Erhart (1973), qui parle d'évacuation maximale de la silice dans l'altération latéritique des régions tropicales humides, évoque le rôle et la présence de fer dans les eaux riches en silice. Mais pour cet auteur, la silice est essentiellement d'origine biologique (organismes siliceux présents dans les eaux du fleuve).

-L'autre famille d'eau est au contraire caractérisée par de faibles teneurs en matières en suspension, fer, silice, et une teneur plus forte en chlorures. Il s'agit probablement d'eaux de *nappes*.

En effet on retrouve pour cette famille, les résultats observés par Grimaldi (1988), sur les eaux de nappes des bassins versants d'ECEREX: une teneur plus faible en silice, mais plus concentrées, par évaporation, en chlorures. Le sodium étant lui préférentiellement adsorbé sur les argiles.

Quoiqu'il en soit, ce résultat met en évidence des eaux de qualité chimique, fort différentes. La mise en place récente du programme P.I.R.A.T, en Guyane, devrait apporter des connaissances supplémentaires sur la dynamique de transfert des éléments particuliers et dissous, et l'origine des divers éléments. On devrait également pouvoir valider les hypothèses formulées précédemment.

Si ces hypothèses sont vérifiées, on peut déjà prévoir des flux de matériaux très différents en saison des pluies et en saison sèche, notamment en ce qui concerne l'exportation du fer, et de la silice.

Notons pour finir que la teneur en fer des eaux fluviales de Guyane est en moyenne environ 5 fois plus forte que la concentration maximale admissible pour la consommation humaine (0,2 mg/l).

II) INTRUSION SALINE EN MILIEU ESTUARIEN

LES EFFETS SUR LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX ESTUARIENNES

MODELISATION APPLIQUEE A L'ESTUAIRE DU SINNAMARY

a) INTRODUCTION

L'estuaire assure l'interface entre les eaux continentales et les eaux océaniques. De nombreuses études ont montré que le milieu estuarien est complexe, et que son fonctionnement est celui d'un régulateur de flux de matériaux dissous et particulaires.

Il est important de bien appréhender les phénomènes de remontée du biseau salé en estuaire pour de multiples raisons: des raisons scientifiques liées à la compréhension de la dynamique de transport des éléments particuliers et dissous du fleuve vers l'océan, des raisons économiques liées à la consommation et à l'utilisation de l'eau.

b) OBJECTIF

Nous allons essayer d'une part de mettre en évidence les effets de la remontée du biseau salé sur la qualité chimique des eaux estuariennes.

Il s'agit, d'autre part de simuler la remontée saline en milieu estuarien par un modèle simple, calé sur des mesures de terrain. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'extension temporo-spatiale du biseau salé.

c) LES EFFETS DE LA REMONTÉE DU BISEAU SALÉ SUR LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX ESTUARIENNES.

1. Les données.

Nous disposons pour cette étude des données de trois campagnes de prélèvements effectuées sur trois sites différents:

- **La rivière des Cascades (le 05/10/1988)** : de 8 h. à 16 h. nous avons prélevé un échantillon d'eau au pont, tout les quart d'heures. Sur ces

échantillons nous avons mesuré in situ à l'aide de la sonde Horiba les paramètres température, pH, oxygène dissous, et conductivité.

- **L'estuaire de la rivière de Cayenne** (le 10 et 11 /10/1988) : de 16 h. à 4 h. nous avons également prélevé un échantillon d'eau à quelques encablures du pont du Larivot. Les paramètres précédemment cités ont été mesuré in situ à l'aide de la sonde Horiba.

- **L'estuaire du Sinnamary** (le 25, 26, 27 /10/1988) : de 8 h. à 20 h. nous avons effectué des prélèvements sur tout l'estuaire du Sinnamary (de l'embouchure à 30 km en amont). En plus des paramètres déjà évoqués, des mesures de silice, de M.E.S, et des mesures hydrométriques de vitesse ont été faites. Une partie des analyses ont été effectuée in situ (avec la sonde Horiba), l'autre partie au laboratoire des moyens analytiques du Centre ORSTOM de Cayenne. Cette campagne de prélèvement a fait l'objet de rapports dans le cadre d'une convention avec l'E.D.F. Lointier (1984), et Lointier (1989).

2. Commentaires.

Nous allons maintenant nous attarder sur chacun des paramètres mesurés, afin de mettre en évidence l'effet de la remontée du sel sur le comportement chimique des eaux de l'estuaire.

Pour ce qui concerne la méthodologie des mesures chimiques et hydrométriques en estuaire, on peut se référer à Lointier et al. (1988).

- La conductivité :

Ce paramètre nous indique la teneur en sels de l'eau. Son évolution au cours du temps (figures n° 4 et 5) semble se traduire par une sinusoïde plus ou moins déformée. La dispersion des points met en évidence la présence de strates d'eau de conductivité différentes.

Les relations conductivité-vitesse se traduisent par des hystérésis (figure n° 6). Il apparaît ainsi que pour des vitesses de jusant et de flot égales en valeur absolue, la salinité est plus forte au jusant.

- La température :

Ce paramètre met en évidence le mélange des eaux océaniques plus chaudes que les eaux fluviales (figures n° 7 et 8). Il traduit une grande hétérogénéité de température des masses d'eaux. Mais l'effet diurne-nocturne semble également important comme on peut le constater dans la rivière de Cayenne (refroidissement important des eaux vers 4 heures du matin, alors qu'on est proche de l'étale de marée haute).

ESTUAIRE DE LA RIVIERE DE CAYENNE

EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE

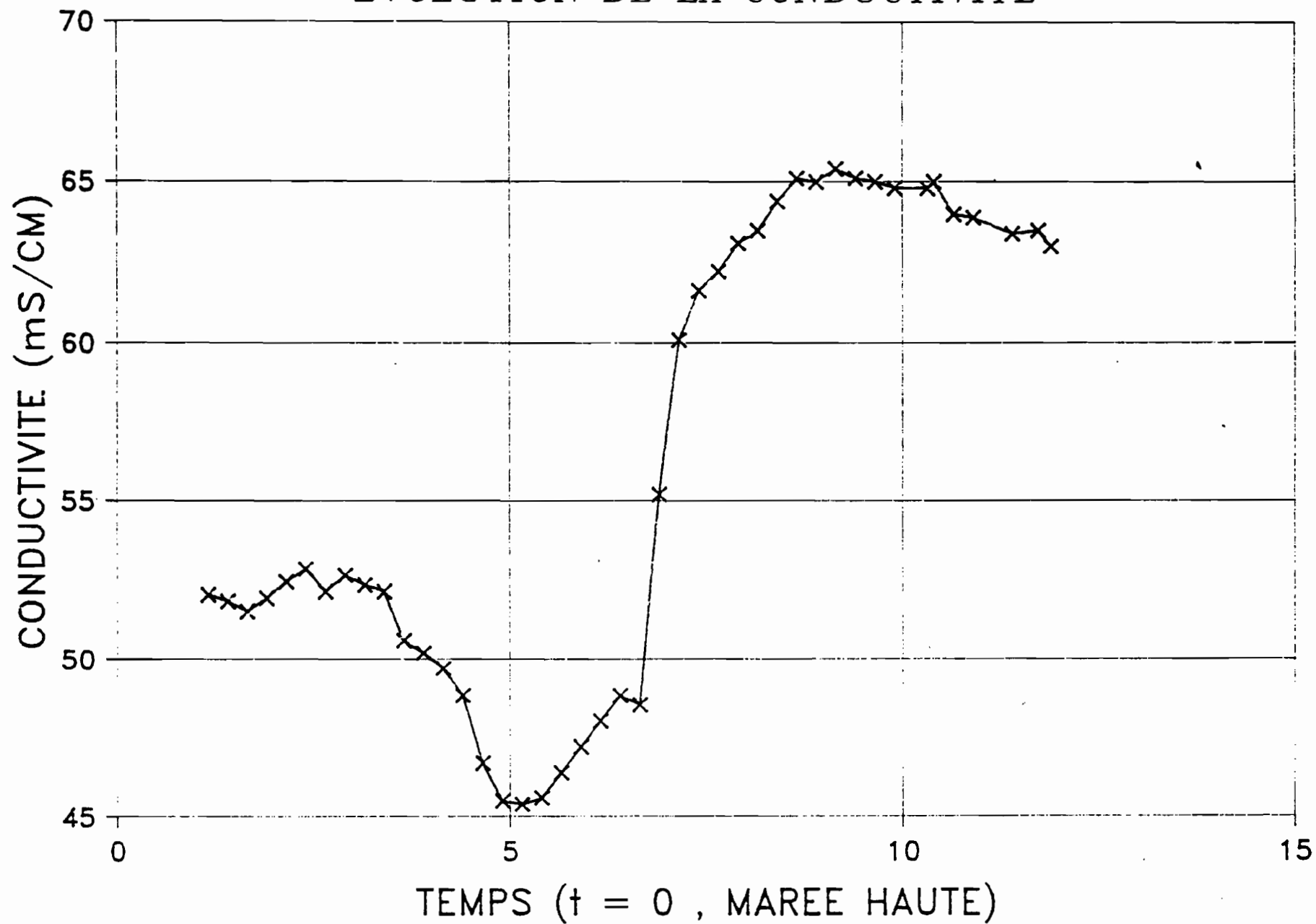


Fig. 4 - Evolution de la conductivité au cours d'un cycle de marée.
Rivière de Cayenne.

RIVIERE DES CASCADES

EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE

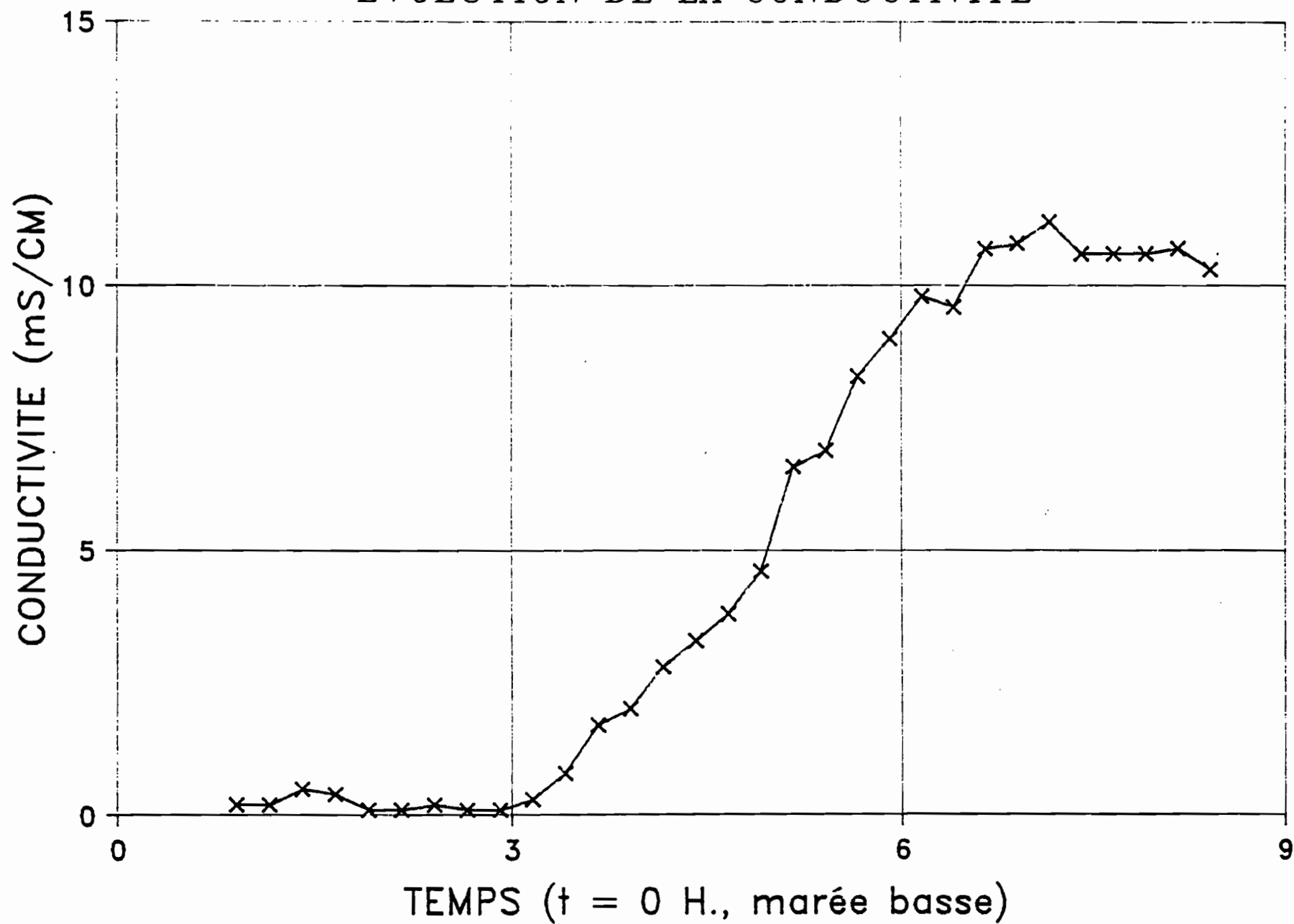


Fig. 5 : Evolution de la conductivité au cours d'un cycle de marée.
Rivière des Cascades.

SECTION C / VERTICALE 2

CONDUCTIVITE-VITESSE-TEMPS

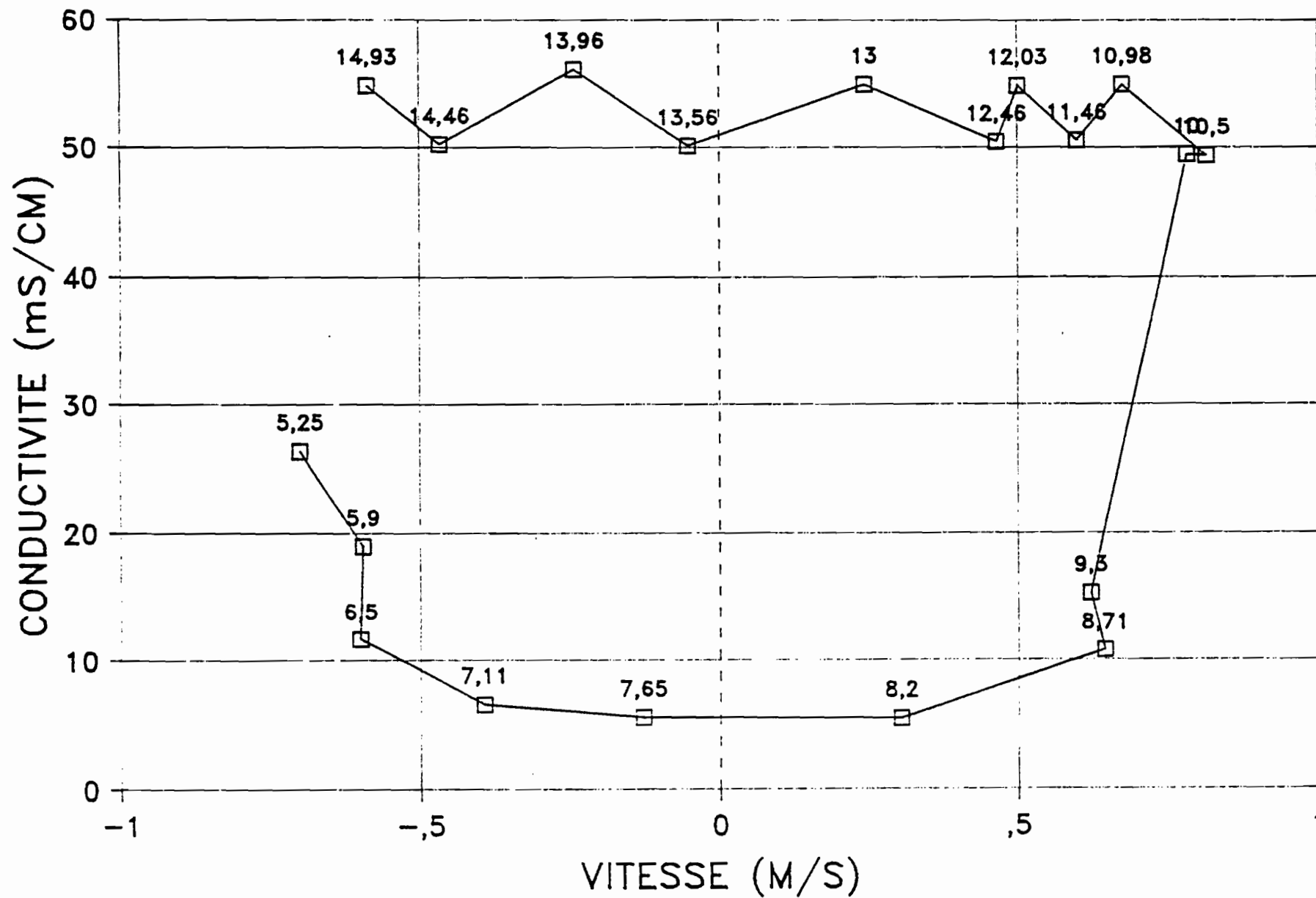


Fig. 6 : Relation conductivité-vitesse, au cours d'un cycle de marée Estuaire du Sinnamary

ESTUAIRE DE LA RIVIERE DE CAYENNE

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE

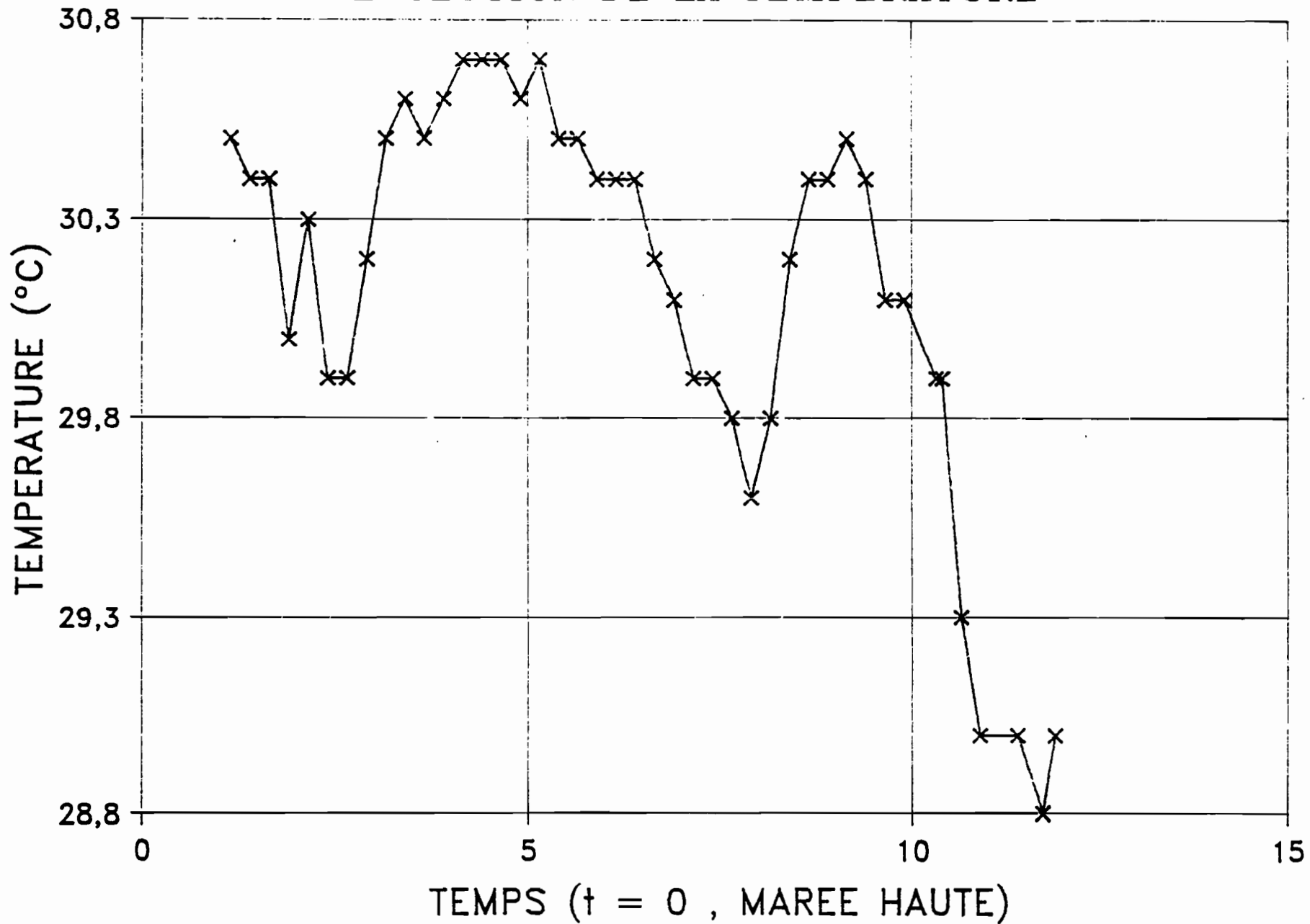


Fig. 7 : Evolution de la température au cours d'un cycle de marée.
Rivière de Cayenne.

RIVIERE DES CASCADES

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE

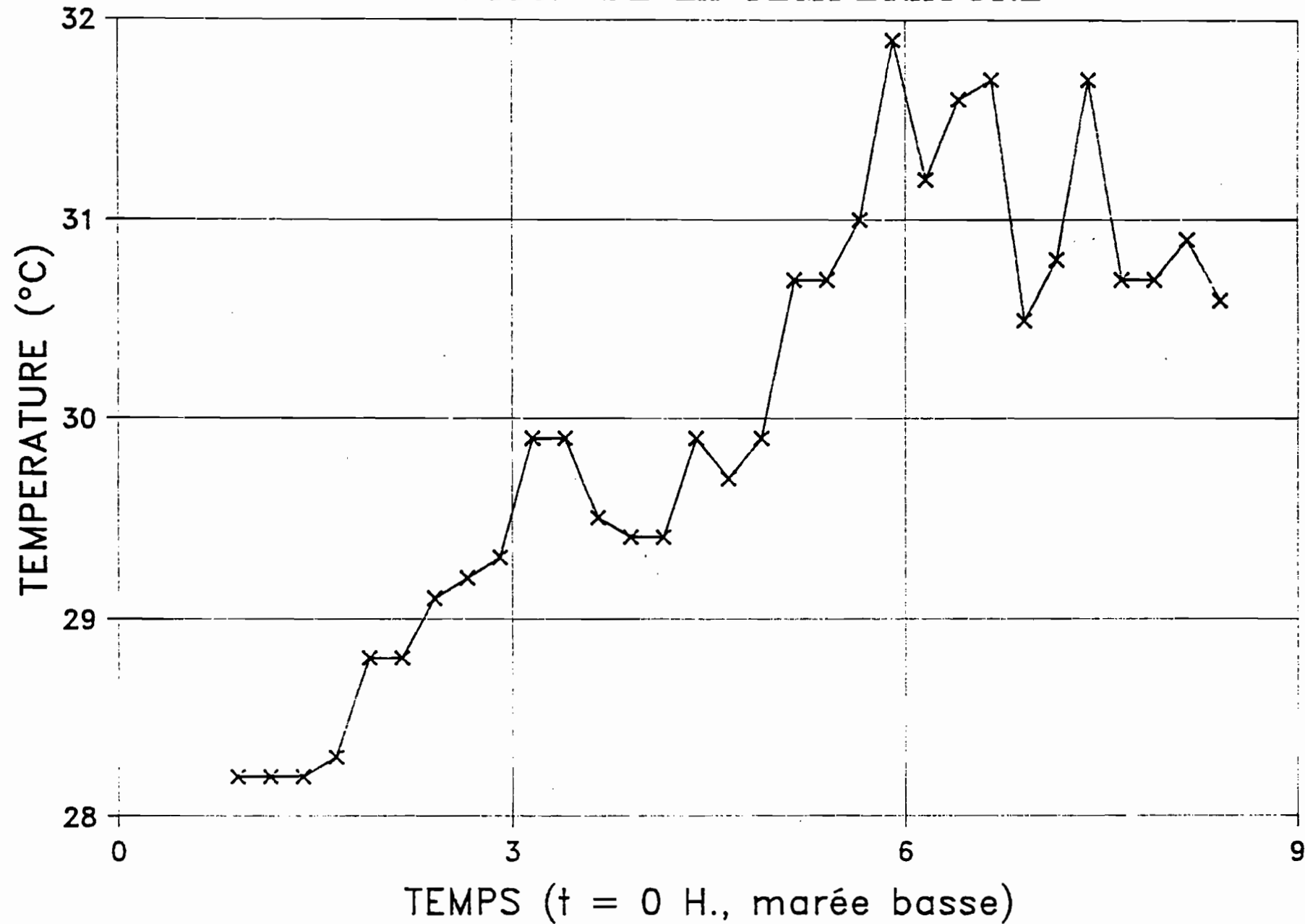


Fig. 8 : Evolution de la température au cours d'un cycle de marée.
Rivière des Cascades.

- *Le pH:*

On est là encore en présence de fluctuations de type sinusoïdale (figures n° 9 et 10). Ce paramètre traduit la pénétration des eaux marines basiques dans les eaux douces légèrement acides du milieu fluvial guyanais. Notons que pour ce paramètre, on ne retrouve plus la grande hétérogénéité des masses d'eaux observée pour les paramètres précédemment évoqués.

- *L'oxygène dissous:*

Ce paramètre semble traduire une grande hétérogénéité des masses d'eaux dans leurs teneurs en oxygène dissous (figures n° 11 et 12). Mais nous retrouvons ici les résultats obtenus par Etcheber (1986) dans l'estuaire de la Gironde: à savoir des teneurs très dispersées, évoluant entre 80 et 90 % de la saturation. Les eaux océaniques étant plus oxygénées que les eaux fluviales, on constate une évolution sinusoïdale de la teneur en oxygène dissous: des maxima de l'ordre de 90 % à marée haute, et des minima de l'ordre de 80 % à marée basse.

- *La silice:*

Ce paramètre semble évoluer linéairement en fonction de la salinité, et traduire une dilution des eaux douces chargées en silice, dans les eaux océaniques à faible teneur en silice (figures n° 13 et 14).

On peut mettre en évidence à l'aide de ce paramètre, trois zones bien distinctes de l'estuaire: le premier domaine est à influence marine dominante, les teneurs en silice ne dépassent pas 5 mg/l. 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 brièvement ressentir 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). Enfin on définit une dernière zone par des teneurs en silice comprise entre 10 et 12 mg/l. Cette zone est à influence fluviale dominante.

Ray (1984), dans l'estuaire de la rivière Mahanadi, aux Indes, constate également ce phénomène de dilution de la silice dans les eaux marines. De plus cet auteur signale des écarts à la courbe théorique de dilution, qui semblent montrer la présence dans l'estuaire d'organismes (diatomées), consommant de la silice.

Noguès (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.

ESTUAIRE DE LA RIVIERE DE CAYENNE

EVOLUTION DU PH

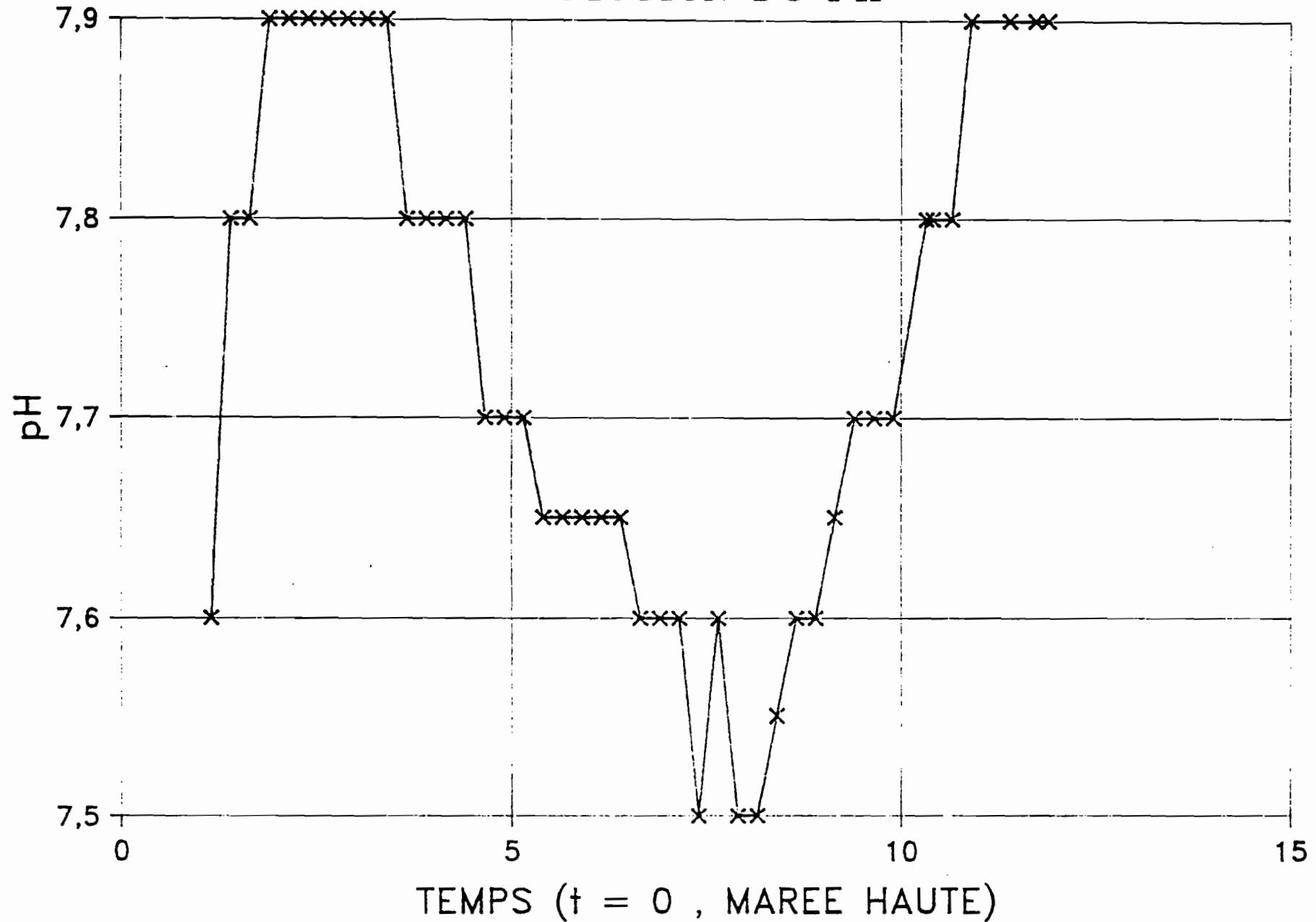


Fig. 9 : Evolution du pH au cours d'un cycle de marée. Rivière de Cayenne.

RIVIERE DES CASCADES

EVOLUTION DU PH

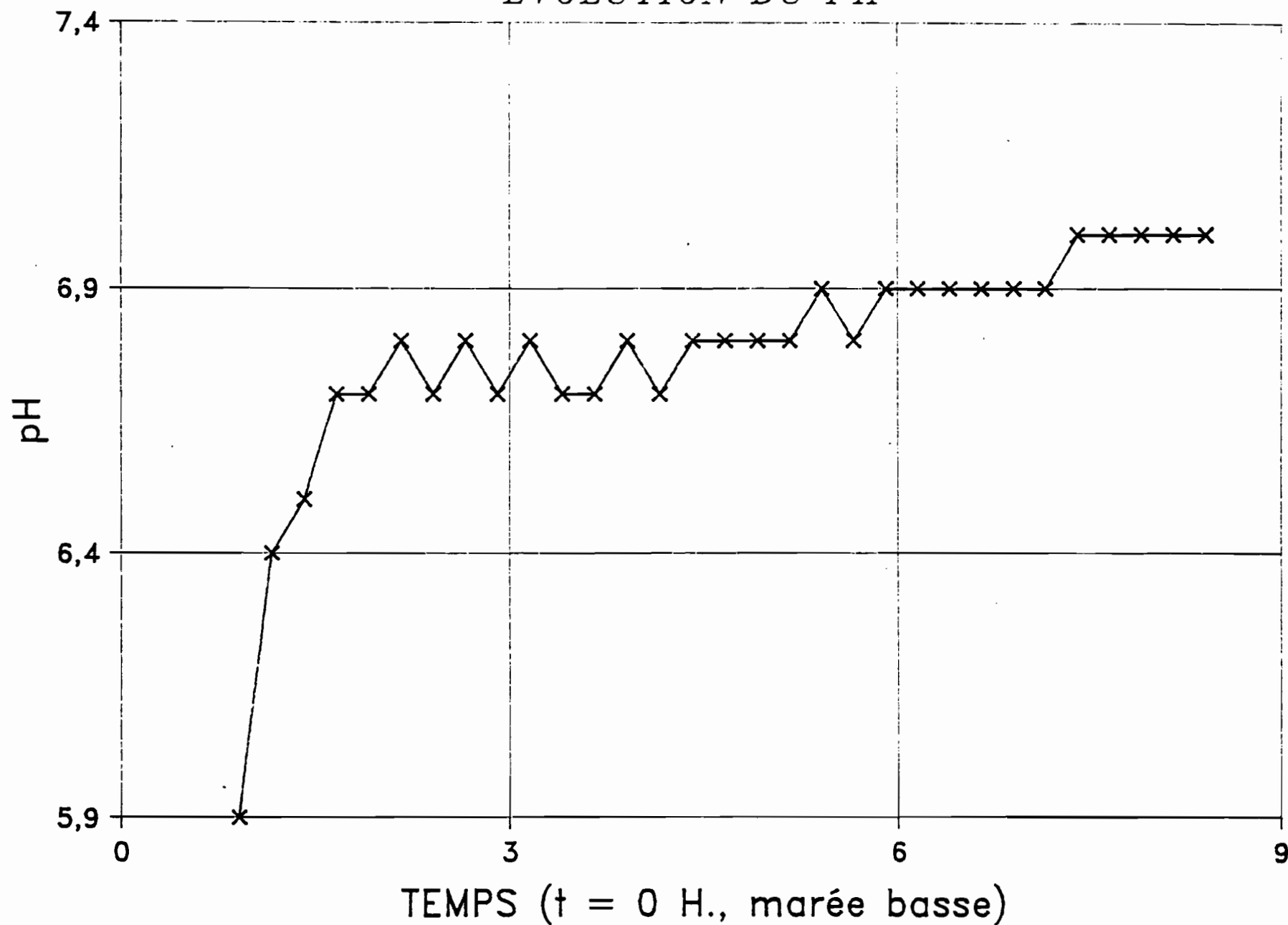


Fig. 10 : Evolution du pH au cours d'un cycle de marée. Rivière des Cascades.

ESTUAIRE DE LA RIVIERE DE CAYENNE

EVOLUTION DE LA TENEUR EN O₂ DISSOUS

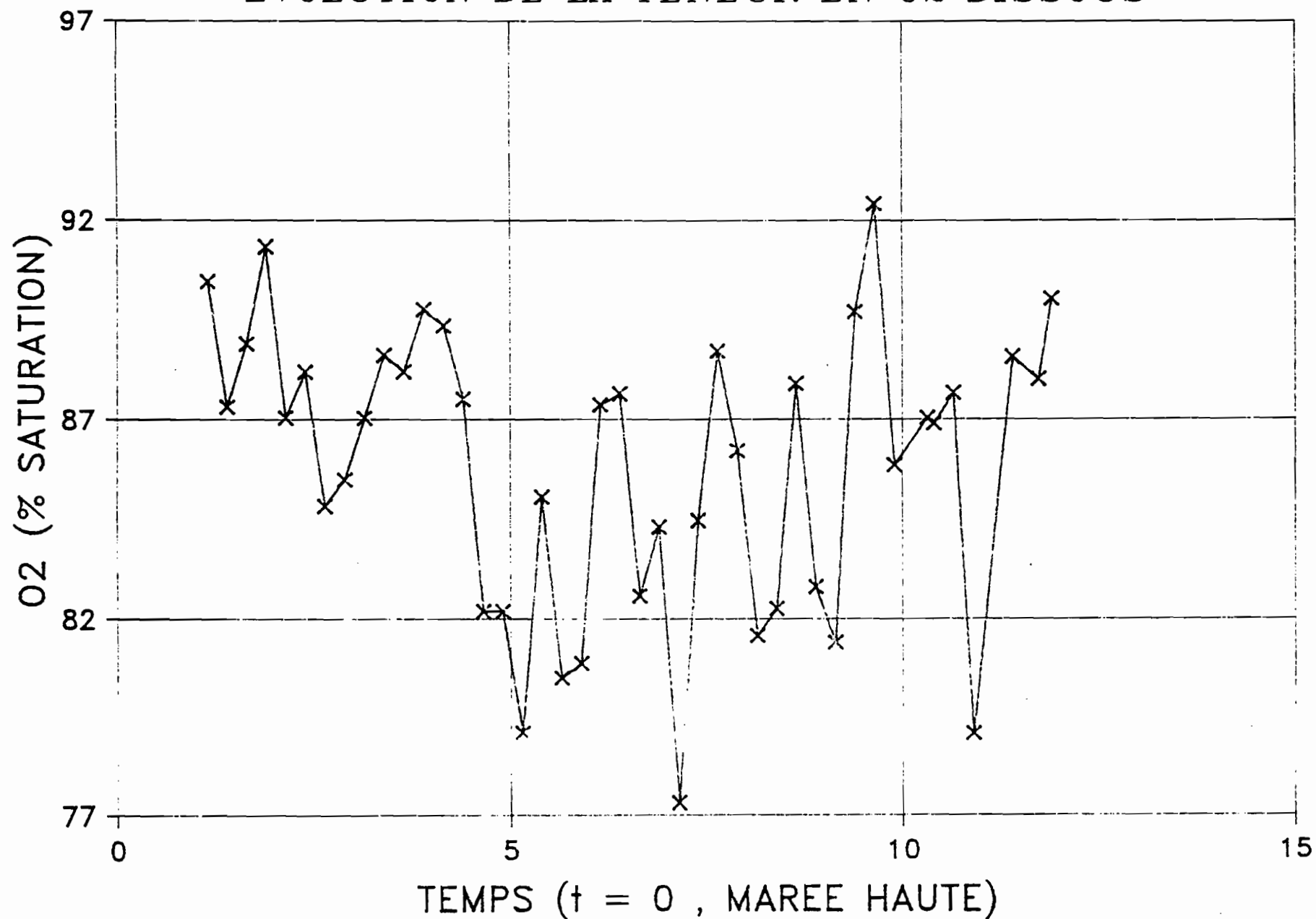


Fig. 11 Evolution de la teneur en oxygène dissous au cours d'un cycle de marée Rivière de Cayenne.

RIVIERE DES CASCADES

EVOLUTION DE LA TENEUR EN O₂ DISSOUS

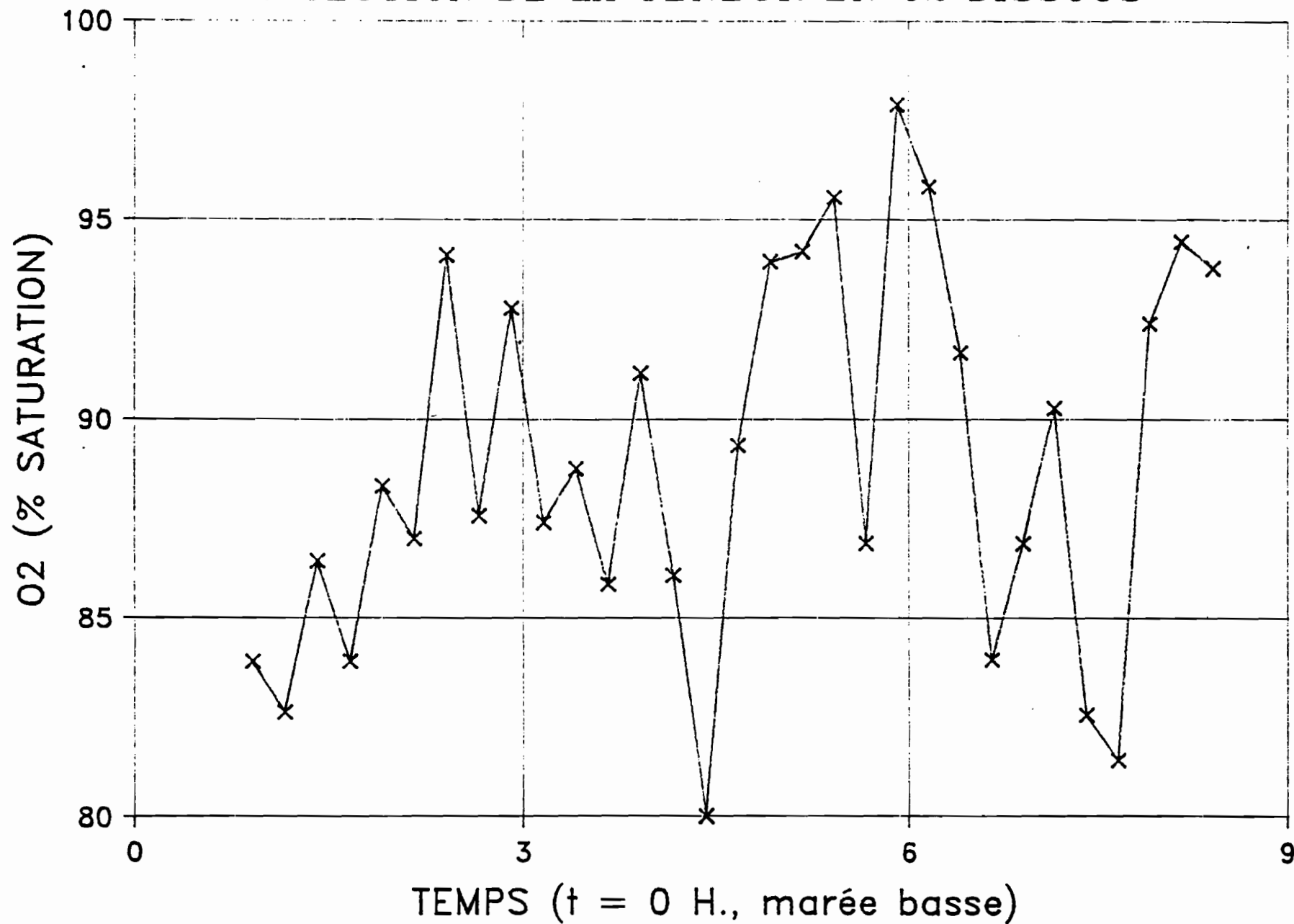


Fig. 12 : Evolution de la teneur en oxygène dissous au cours d'un cycle de marée. Rivière des Cascades.

ESTUAIRE DU SINNAMARY

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

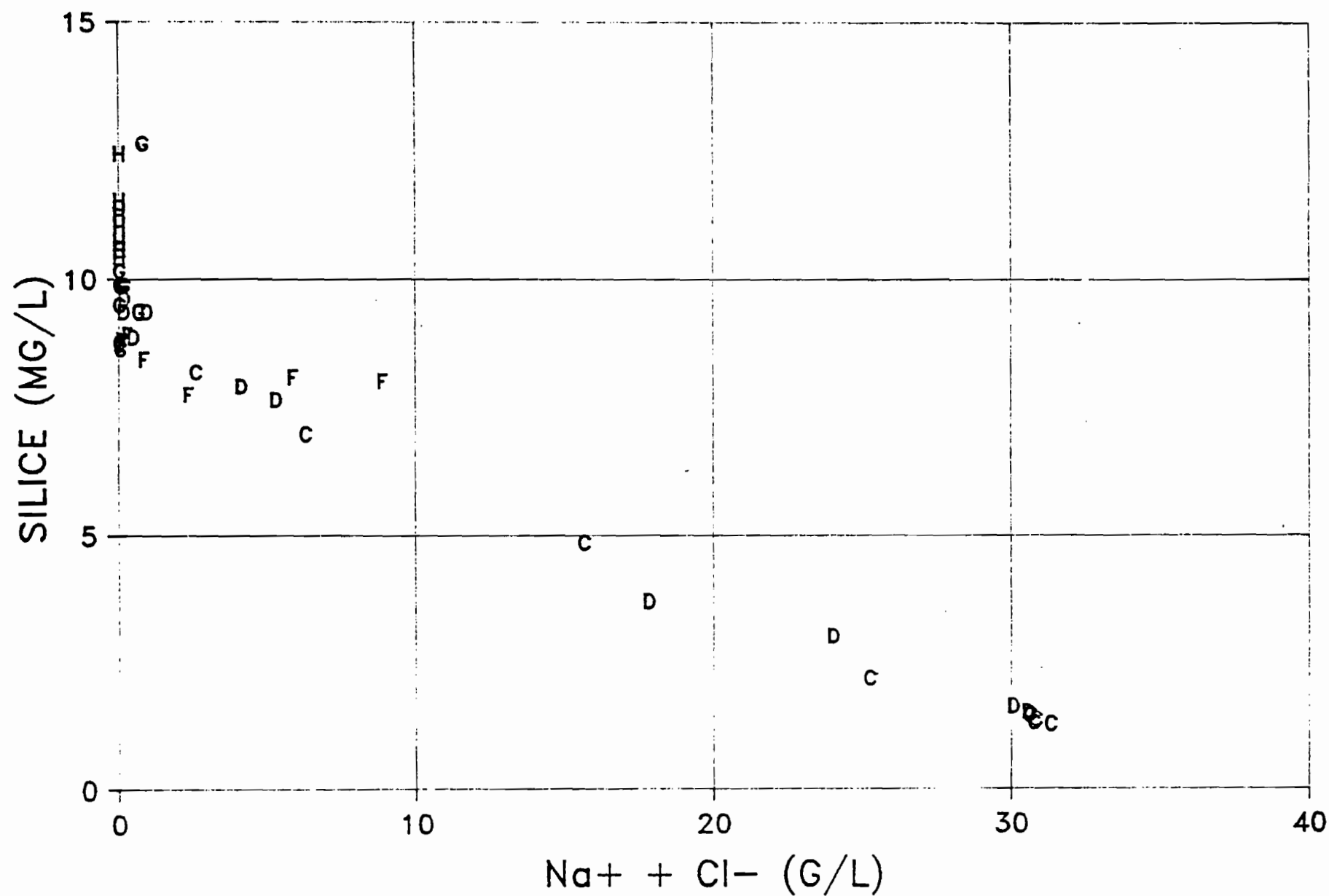


Fig. 13 : Relation silice-salinité. Estuaire du Sinnamary.

ESTUAIRE DU SINNAMARY

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

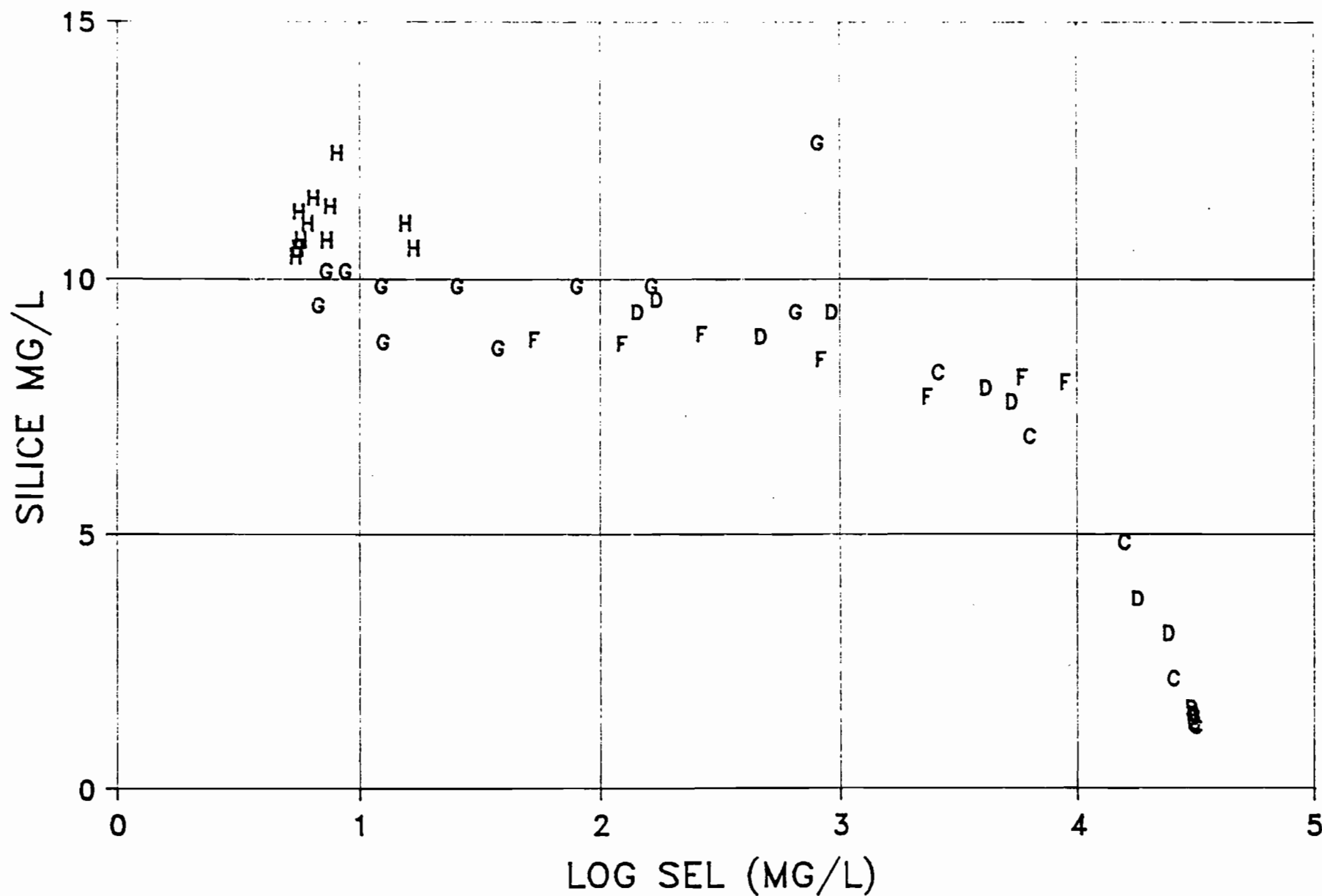


Fig.14 : Relation silice-log(salinité). Estuaire du Sinnamary.

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.

- *Les M.E.S.*

Des paramètres mesurés, la teneur en M.E.S, est sans doute celui sur qui l'hétérogénéité des masses d'eaux se fait le plus sentir. Ceci traduit les effets de remise en suspension successives des matériaux au cours de la montée des eaux.

d) MODELE MATHÉMATIQUE

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:

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

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 .
- $\overset{\text{-->}}{U(M,t)}$: le vecteur vitesse du courant.
- $K(M,t)$: le coefficient de dispersion.
- $\overset{\text{--->}}{\text{grad}}$: l'opérateur mathématique gradient.
- div : l'opérateur mathématique divergence.

Si on développe chacun des termes on aboutit à :

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

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:

$\partial C(M,t) / \partial t = K(M,t) . \partial^2 C(M,t) / \partial x^2 - V(M,t) . \partial C(M,t) / \partial x$
terme dispersif terme advectif

e) 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)

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

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 évalué 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).

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

ω est la pulsation de l'onde de marée.

e) RÉSULTATS

Le faisceau de courbes observé sur la figure n° 15 , 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° 16. 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 semblent s'aligner correctement sur les courbes théoriques.

Notons que le modèle place la limite du coin salé (15 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. Cette observation est confirmée par certains résultats expérimentaux: ainsi pendant les hautes eaux de Mai, une campagne de mesures a mis en évidence le recul vers l'aval du biseau salé, d'environ 5 km.

f) 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

SIMULATION REMONTEE SALINE EN ESTUAIRE

EXTENSION SPATIALE DE LA SALINITE

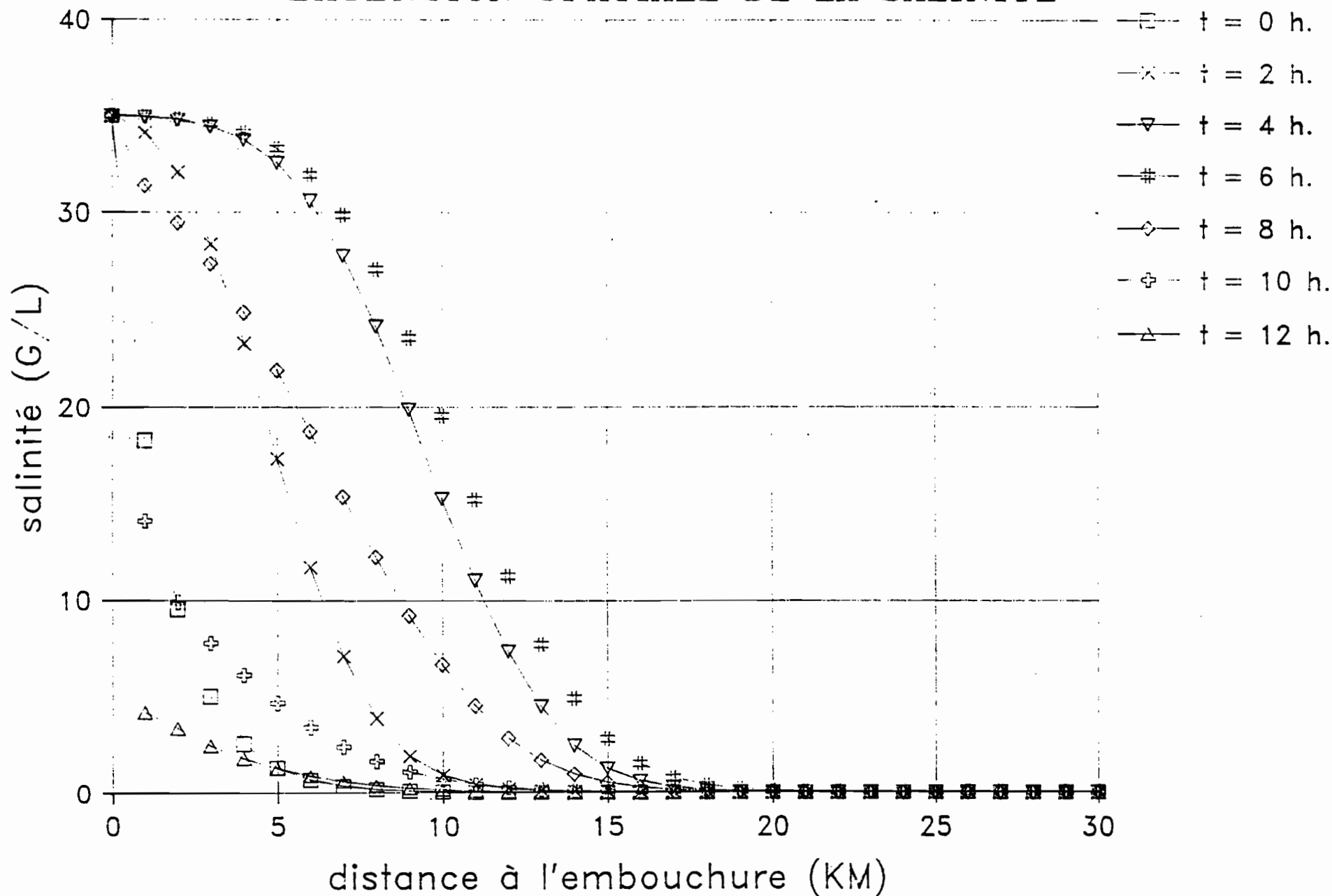


Fig. 15 : Simulation de la remontée saline dans l'estuaire du Sinnamary. Evolution de la salinité en fonction de la distance à l'embouchure.

SIMULATION REMONTEE SALINE EN ESTUAIRE

EXTENSION MAXIMALE ET MINIMALE

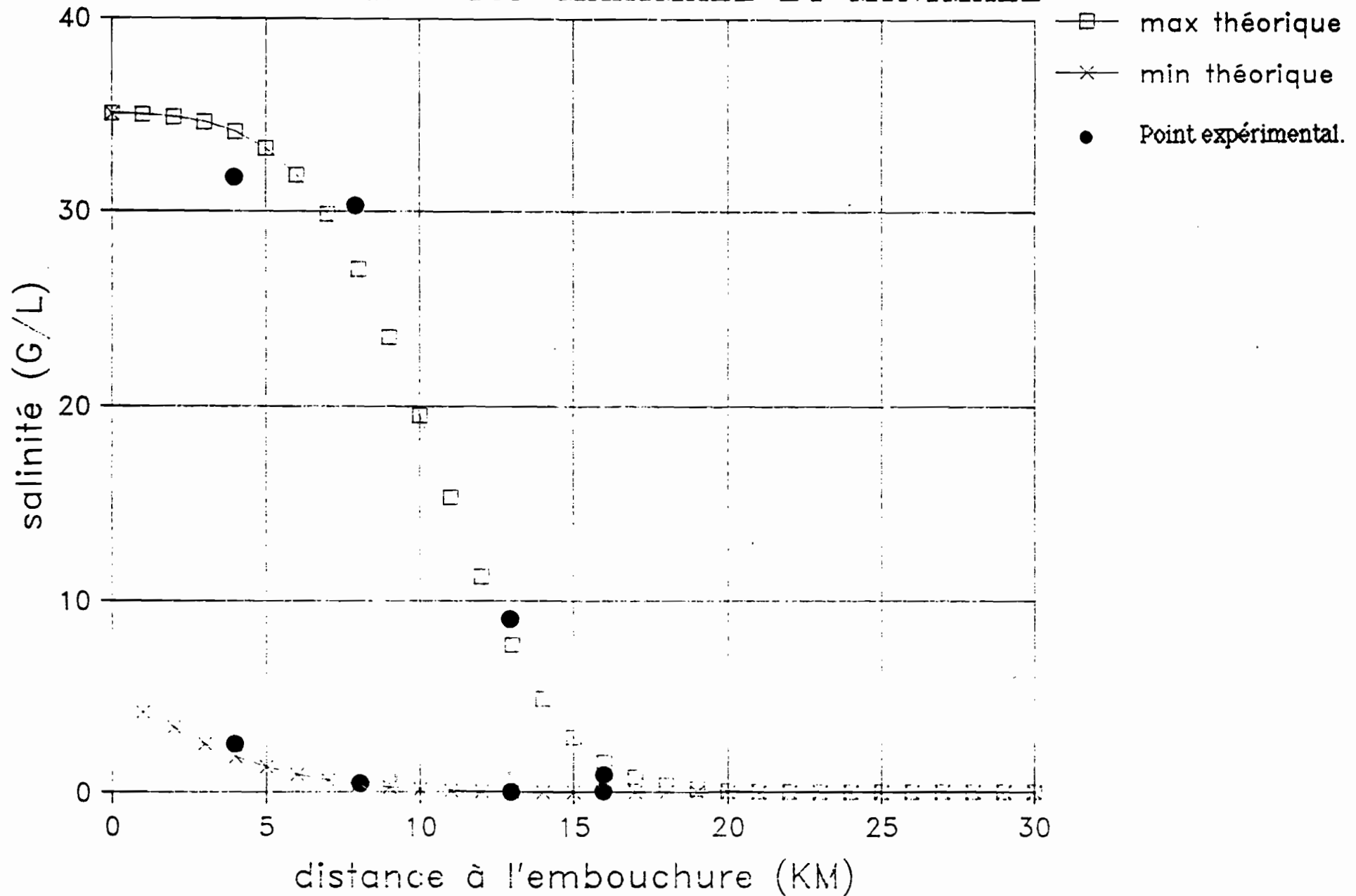


Fig. 16 : Simulation de la remontée saline dans l'estuaire du
sinnamary Comparaison courbes théoriques et expérimentales

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 4 estuaires du Mozambique.

g) PERSPECTIVES

Il serait souhaitable d'améliorer la qualité de ce modèle, par une étude plus poussée de la dynamique des vitesses dans l'estuaire. Cette étude combinée à une étude du gradient vertical de salinité, apporterait à notre modèle plus de précision et de fiabilité. De telles études mettraient en jeu des moyens techniques importants (conductimètres automatiques, ou préleveurs automatiques sur les 8 sections), et des moyens en personnel importants (jaugeage en continu sur les 8 sections de mesure).

III) PROPAGATION SPATIO-TEMPORELLE D'UN POLLUANT EN MILIEU ESTUARIEN

MODELISATION APPLIQUEE A L'ESTUAIRE DU SINNAMARY

a) INTRODUCTION

Le développement économique de la Guyane se traduit par une augmentation des risques de pollution de son milieu naturel. Le Département ne peut plus aujourd'hui négliger ces problèmes sous peine de voir se dégrader plus ou moins rapidement un patrimoine exceptionnel.

Le rejet d'un polluant dans un milieu récepteur, pose deux types essentiels de problèmes :

- * Comment va évoluer cette pollution au cours du temps et quelle sera son extension spatiale ?
- * Quel va être son effet sur le milieu environnant ?

Le premier problème posé peut être abordé à l'aide d'un modèle mathématique, établi à partir d'une équation physique, appelée équation d'advection-dispersion. Le second problème fait appel à des connaissances physico-chimiques, et le plus souvent à une expérience "post pollution".

b) OBJECTIF

Nous allons pour notre part, nous intéresser au premier point soulevé, à savoir prévoir l'extension temporo-spatiale d'un polluant, déversé dans l'estuaire du Sinnamary à partir du pont.

Nous suivrons plus particulièrement la concentration en polluant à la station de pompage de la Pointe Combi.

Les limites de notre champ d'observations ont été arbitrairement fixées à 30 km pour l'échelle spatiale, et à deux cycles de marée pour le temps.

c) SCENARIO

Nous avons choisi le scénario qui paraissait le plus proche de la réalité, en lui attribuant les hypothèses les plus favorables à la propagation de ce polluant. Les hypothèses sont les suivantes:

- * Un camion contenant 5 tonnes de polluant tombe du pont de Sinnamary, ceci constituant une pollution instantanée de 50 g/l (débit d'étiage de 100 m³/s).

- * Ce polluant est de type conservatif, c'est à dire sans interactions avec le milieu récepteur (engrais, sels de potasse, etc ...)

- * L'accident survient en saison sèche, lors d'une marée de vives eaux.

- * Nous nous sommes intéressé à deux hypothèses concernant la marée:

- (1) : Au pont l'étalement de marée basse vient de se terminer : début du flot.

- (2) : Au pont l'étalement de marée haute vient de se terminer : début du jusant.

d) MODELE MATHEMATIQUE

L'équation de propagation d'un polluant en milieu estuarien est du type :

$$\partial C / \partial t = K . \partial^2 C / \partial x^2 - V . \partial C / \partial x - B . C$$

« dispersion » « advection » « consommation »

avec : K coefficient de dispersion du polluant.

V vitesse du courant.

C concentration en polluant.

x abscisse

t temps

B coefficient de non conservation du polluant

V et K sont des fonctions de x et de t, empruntées au modèle mathématique simulant la remontée saline en estuaire. Ces fonctions ont été établies, rappelons le, à partir de mesures de vitesse et de salinité, effectuées dans l'estuaire du Sinnamary en saison sèche, et en marées de vives eaux.

B est pris ici égal à 0, pour respecter l'hypothèse de conservation du polluant.

Cette équation différentielle est également de type parabolique. Pour la résoudre nous allons utiliser la même méthode qu'en II)

e) RESULTATS

*** Hypothèse (1) : à $t = 0$, début du flot.**

Les résultats obtenus peuvent être visualisés sur les figures n° 17, 18, 19, et 20.

- On suppose que le camion contient 5 tonnes de polluant, et que ce polluant se déverse instantanément dans l'estuaire. Ceci correspond à un pulse de polluant de 50 g/l (en prenant un débit d'étiage de marée basse de 100 m³/s).

Figure 17 : on observe, au cours d'un cycle de marée, l'extension spatiale du polluant, de la mer jusqu'à 30 km en amont. Notons que le pic de pollution se déplace avec la marée, oscillant entre l'amont et l'aval du pont, en s'atténuant dans le temps et l'espace.

Figure 18 : on observe, sur deux cycles de marée, la concentration en polluant de la station de pompage de la Pointe Combi. Si l'on se fixe un seuil de tolérance de 1 mg/l (valeur proche de la concentration maximale admissible de certains métaux lourds, et agents de surface), on constate deux dépassements du seuil :

* Le seuil de tolérance est dépassé une première fois, au cours du premier cycle de marée, environ 3 heures après l'accident. Le maximum de concentration (49 mg/l) est atteint 5 heures après l'accident. On peut de nouveau pomper un peu moins de 9 heures après la chute du camion. Au cours de ce premier cycle de marée, l'arrêt des pompes aura duré 6 heures.

* le seuil est dépassé une seconde fois 15 heures après la chute, au cours du second cycle océanique. Le maximum de concentration (21 mg/l) est atteint 17 heures 30 minutes après la chute du poids lourd. La fin d'alerte a lieu 21 heures après l'accident au pont. Les pompes seront à nouveau arrêtées pendant 6 heures.

Au cinquième cycle de marée tout danger de pollution est écarté à la pointe Combi pour ce seuil de détection. Le polluant mettra donc près de 3 jours pour gagner l'océan.

Figure 19 : on observe sur deux cycles de marée la concentration en polluant au niveau du pont.

EVOLUTION SPATIALE D'UN POLLUANT

ESTUAIRE DU SINNAMARY

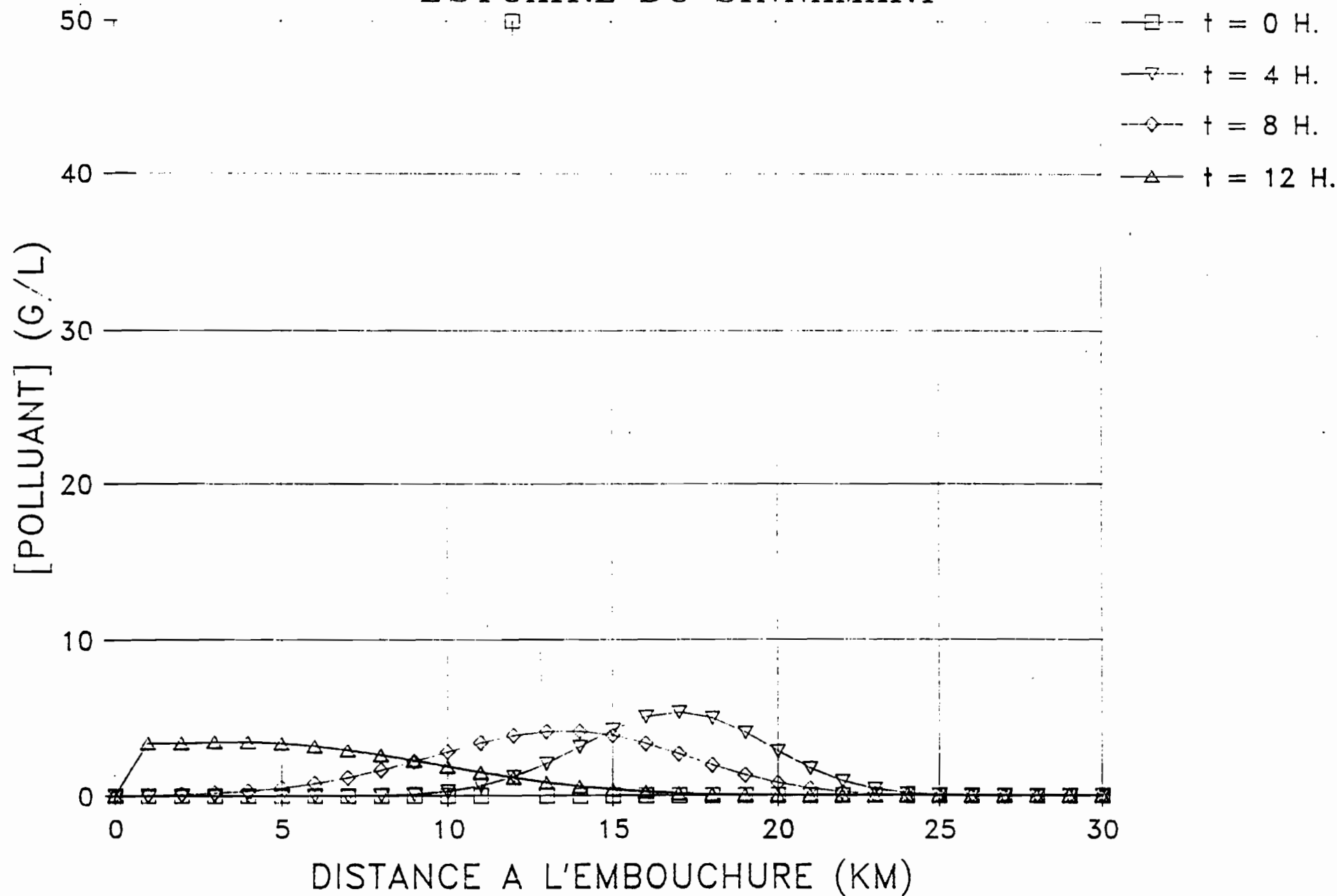


Fig. 17 : Evolution spatiale d'un polluant dans l'estuaire du Sinnamary, au cours d'un cycle de marée. A $t = 0$ rejet instantané d'un polluant au pont.

ESTUAIRE DU SINNAMARY

POLLUTION A LA POINTE COMBI

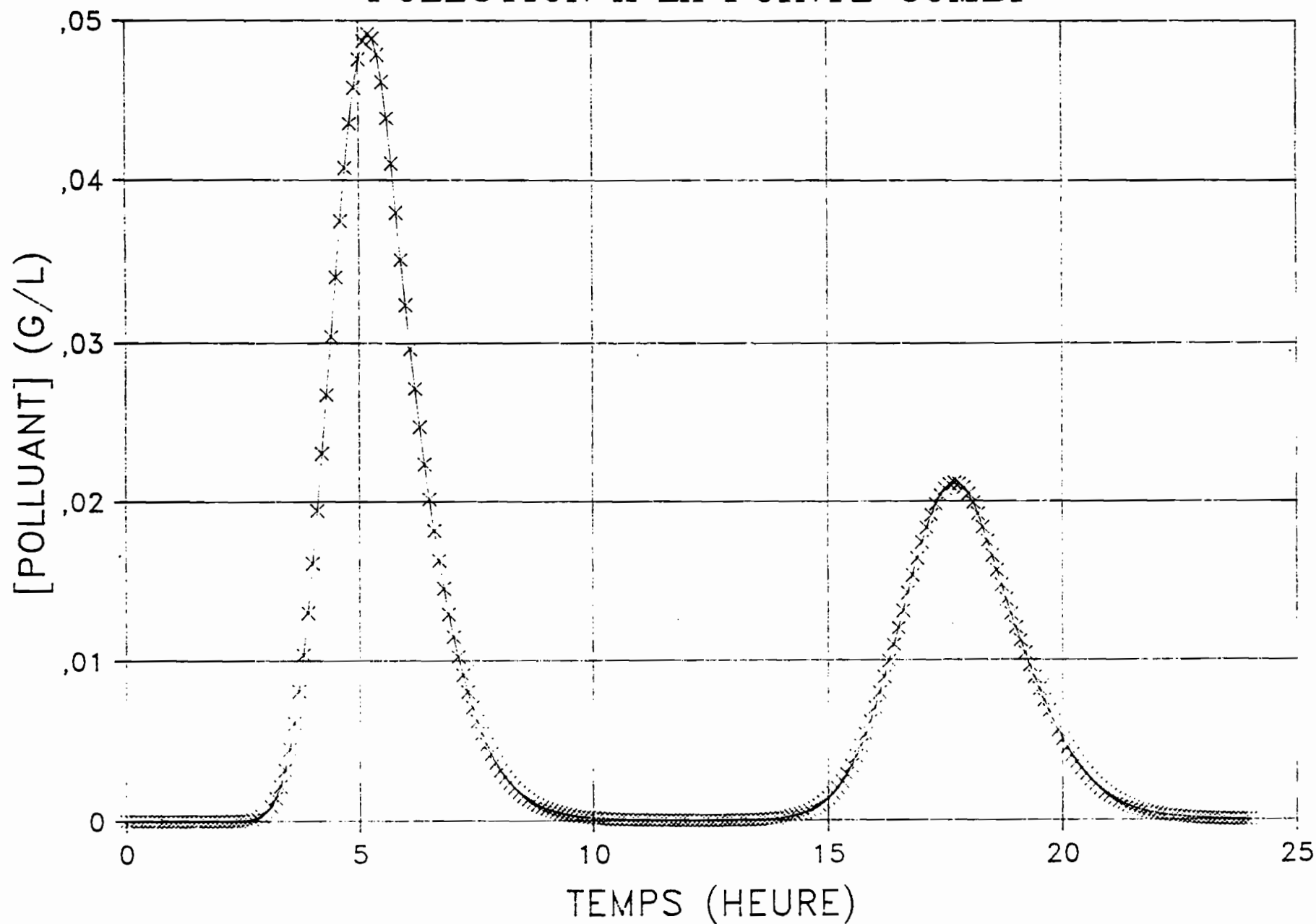


Fig. 18 : Evolution de la concentration en polluant à la Pointe Combi, au cours de 2 cycles de marées.

ESTUAIRE DU SINNAMARY

POLLUTION AU PONT

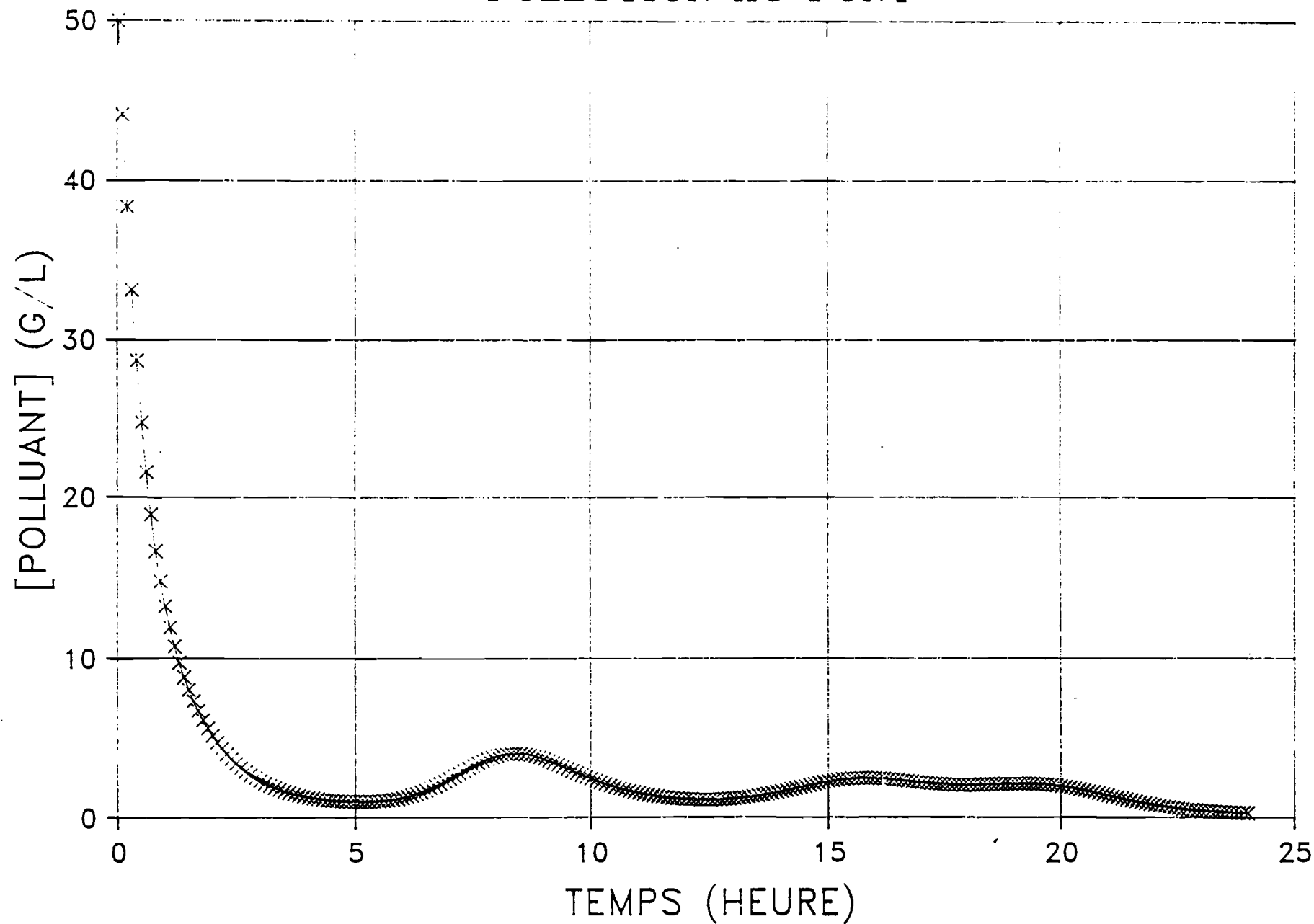


Fig. 19 : Evolution de la concentration en polluant au pont, au cours de 2 cycles de marée.

Figure 20 : on observe sur deux cycles de marée la concentration en polluant à un kilomètre de l'embouchure.

- Sur le tableau qui suit nous pouvons visualiser l'effet de la concentration initiale sur la pollution pour un seuil de détection de la pollution de 1 mg/l. C_0 est la concentration initiale en polluant, T_i est le temps correspondant au début d'alerte, T_{max} correspond au temps où la concentration est maximale à la station de pompage, C_{max} la concentration maximale observée à la station, et T_f le temps correspondant à la fin de l'alerte.

C_0 (g/l)	premier cycle de marée				second cycle de marée			
	T_i (h)	T_{max} (h)	C_{max} (mg/l)	T_f (h)	T_i (h)	T_{max} (h)	C_{max} (mg/l)	T_f (h)
50 g/l	3,2	5,2	49,0	8,8	14,9	17,7	21,0	21,4
25 g/l	3,3	5,2	24,5	8,3	15,2	17,7	10,5	20,8
2 g/l	4,3	5,2	2,0	6,2				
1 g/l								

Nous pouvons constater les faits suivants:

- Au dessous d'une concentration initiale de 2 g/l de polluant, le danger de pollution disparaît au second cycle de marée.
- Tout danger de pollution est écarté pour une concentration initiale inférieure à 1g/l de polluant.
- L'aspect unidimensionnel de ce modèle, crée une relation linéaire entre C_0 et C_{max} . De plus, quelque soit C_0 , T_{max} est égal à une constante (les autres paramètres du modèle étant maintenus identiques).

*** Hypothèse (2) : à $t = 0$, début du jusant.**

Pas de pollution à la pointe Combi pour le seuil de détection choisi, et une concentration initiale en polluant de 50 g/l. Le polluant est rejeté à l'océan.

ESTUAIRE DU SINNAMARY

POLLUTION A 1 KM DE L'EMBOUCHURE

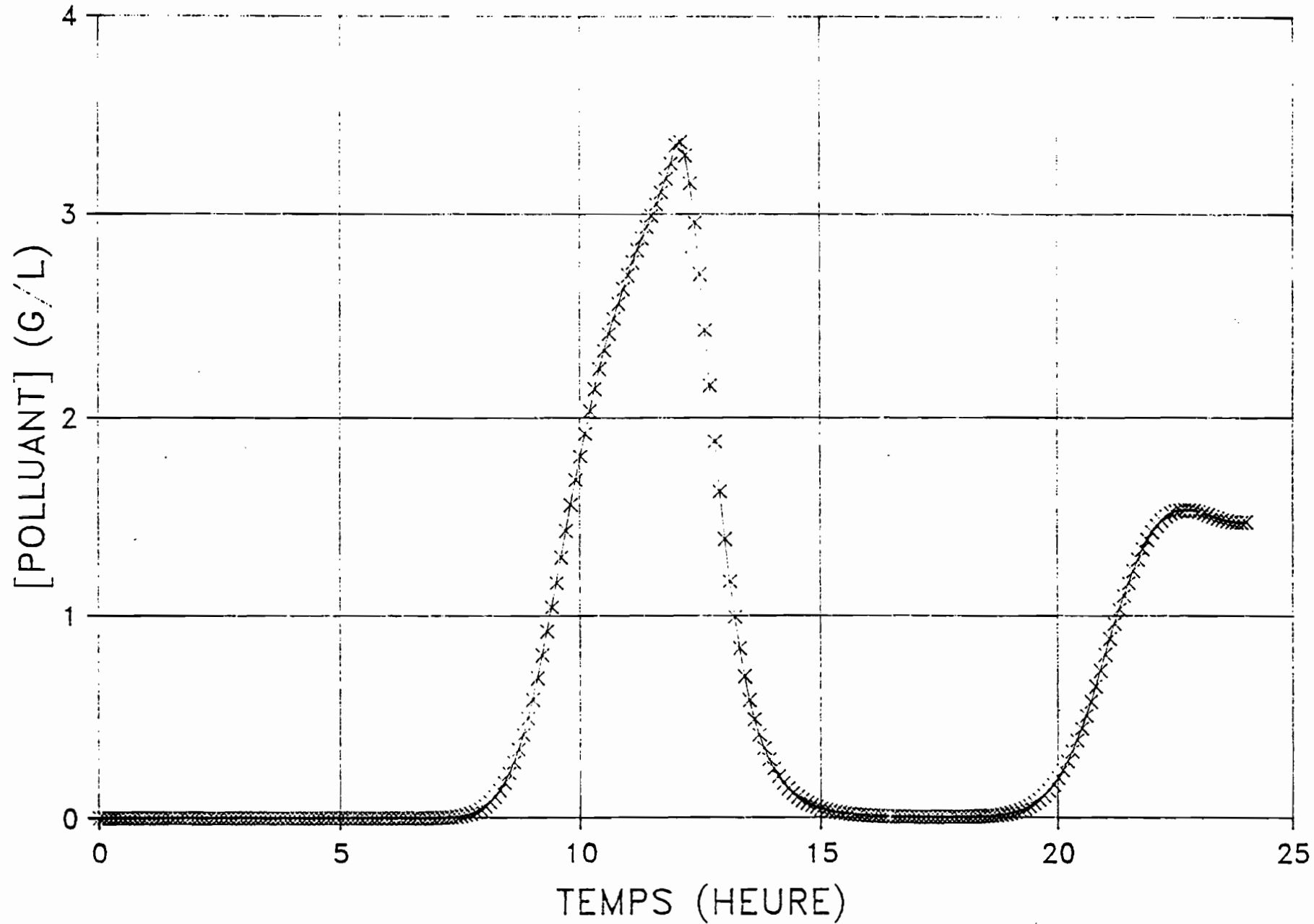


Fig. 20 : Evolution de la concentration en polluant à 1 km de l'embouchure, au cours de 2 cycles de marée.

1) CONCLUSION

Il faut garder à l'esprit que ce modèle est fondé sur des hypothèses très précises (voir SCENARIO). Il est basé sur des mesures de vitesse et de salinité effectués lors d'une campagne de mesures dans l'estuaire et le fleuve Sinnamary. Ces hypothèses ont été choisies pour fabriquer un scénario donnant une extension maximale à la propagation du polluant.

Dans l'hypothèse la plus défavorable (le rejet du polluant a lieu à l'étale de marée basse), avec le scénario envisagé, et une concentration initiale en polluant de 50 g/l, le modèle prévoit des arrêts de pompage à la Pointe Combi, au cours des 5 cycles de marée qui suivent la chute du camion. Le seuil de détection est fixé à 1 mg/l.

Ce seuil de détection, rappelons le permet de se prévenir contre la plupart des métaux lourds. Mais il faudrait diminuer la valeur de ce seuil si on voulait détecter une pollution par des pesticides (seuil fixé à 0,0001 mg/l) . L'arrêt des pompes serait alors beaucoup plus long.

On peut critiquer l'approximation faite sur la durée effective d'un cycle de marée: nous avons arbitrairement choisi 12 heures, alors que la durée réelle d'un cycle est plus proche de 12 heures 30 minutes. Signalons également que nous avons supposé les 5 cycles identiques quant à leur caractéristiques hydrodynamiques, ce qui nous éloigne encore un peu plus de la réalité.

Notons pour finir que ce modèle ne donne aucun renseignements quant à l'effet de ce polluant sur le milieu récepteur, notamment quant aux problèmes de fixation par les sédiments et l'écosystème.

IV ANALYSE SPECTRALE

a) OBJECTIFS ET MOTIVATIONS

L'analyse spectrale peut nous apporter une aide considérable dans l'analyse de séries temporelles. Nous allons l'utiliser pour deux raisons essentielles:

- Essayer de mettre en évidence des composantes dans les **fluctuations climatiques** des débits moyens mensuels des fleuves de Guyane.

Nous allons étudier une série chronologique de débits moyens mensuels à la station de Langatabiki, sur le Maroni. Sur cette station on dispose des débits moyens mensuels de 1953 à 1987.

- Eliminer l'influence de la **marée dynamique** sur les stations hydrométriques du réseau hydrographique guyanais, qui la subissent. Nous allons étudier la station de Petit Saut sur le Sinnamary, où l'influence océanique en étiage est nettement perceptible. Nous allons travailler sur un limnigramme de 16 jours, échantillonné au pas de temps horaire.

b) MÉTHODOLOGIE.

L'analyse spectrale permet la mesure de la distribution de la variance en fonction de la fréquence, ou de la période.

L'utilisation de l'analyse spectrale est de plus en plus répandue en hydrologie. Dans cette étude nous nous sommes essentiellement inspirés des travaux de Yevjevich (1972), Kite (1982), et Froidevaux et al. (1976).

Pour étudier les fluctuations climatiques du régime hydrique du Maroni à Langatabiki, nous avons choisi une méthode spectrale basée sur le spectre de la fonction d'autocovariance. Pour faire apparaître au mieux les éventuelles tendances climatiques autres que la tendance saisonnière annuelle, il est nécessaire d'utiliser des filtres. Notre choix s'est porté sur les filtres les plus employés dans la littérature: le filtre de Parzen et le filtre de Tukey.

Pour éliminer les effets de la marée on décomposera le signal en série de Fourier, et on éliminera la composante de période 12 heures.

c) RAPPELS MATHÉMATIQUES.

- Le spectre de la fonction d'autocovariance est donné par la formule suivante:

$$\text{spectre}(j) = 2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{M-1} \{ R(k) \cdot w(k) \cdot \cos[(2 \cdot \pi \cdot j \cdot k)/(2 \cdot M)] \} \right)$$

j variant de 0 à M

avec:

- $R(k) = C(k) / C(0)$: Coefficient d'autocovariance

k variant de 0 à M

$$C(k) = 1/N \sum_{i=1}^{N-k} [(x_i - \bar{x}) \cdot (x_{i+k} - \bar{x})]$$

k variant de 0 à M

On pourra utiliser les filtres suivants:

filtre de Tukey :

$$w(k) = 1/2 \cdot \{ 1 + \cos[(\pi \cdot k)/m] \} \quad 1 \leq k \leq M$$

filtre de Parzen :

$$w(k) = 1 - 6 \cdot (k/M)^2 + 6 \cdot (k/M)^3 \quad 1 \leq k \leq M/2$$

$$w(k) = 2 \cdot (1 - k/M)^3 \quad M/2 < k \leq M$$

N est le nombre de terme de la série étudiée.

M est la plupart du temps égal à N/3. Ce choix semble tout à fait arbitraire et résulter d'essais multiples. En fait plus on diminue la valeur de M, plus la hauteur du pic haute fréquence (pic annuel) diminue, mais plus la largeur de bande augmente et on perd en précision au niveau de la fréquence ou de la période.

DENSITE SPECTRALE (filtre de Parzen)

DEBITS MENSUELS LANGATABIKI (1953-1987)

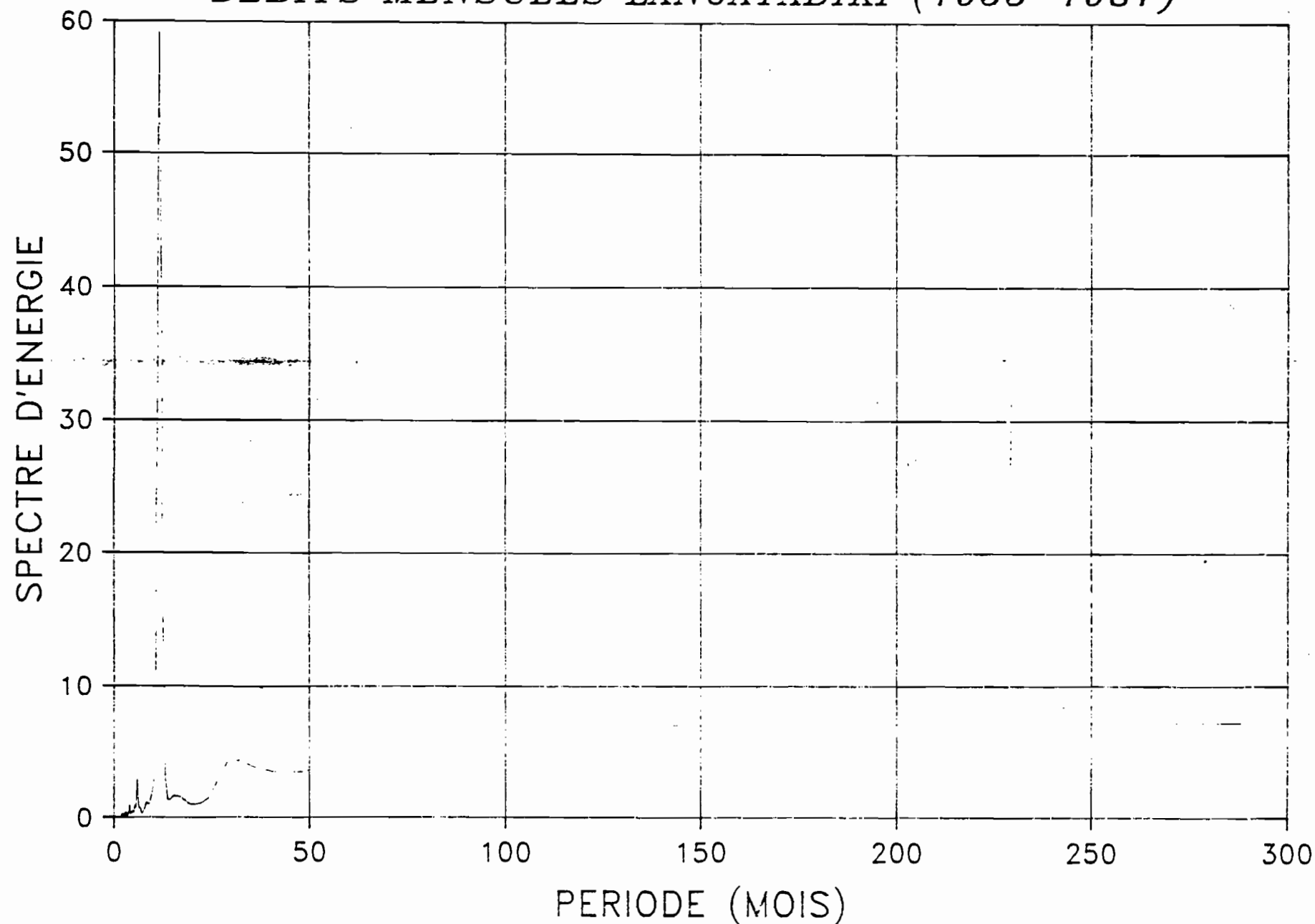


Fig. 21 : Spectre d'énergie des débits moyens mensuels de la station de Langatabiki de 1953 à 1987, Filtrage de Parzen.

- Un signal peut être décomposé en une série de Fourier selon:

$$y(i) = A_0/2 + \sum_{j=1}^{E(N/2)} \{ A_j \cdot \cos[(j \cdot 2\pi \cdot i)/N] + B_j \cdot \sin[(j \cdot 2\pi \cdot i)/N] \}$$

i variant de 1 à N , $E(N/2)$ étant la partie entière de $N/2$.

avec

$$A_j = 2/N \cdot \sum_{k=1}^{N/2} \{ y(k) \cdot \cos[(k \cdot 2\pi \cdot j)/N] \}$$

$$B_j = 2/N \cdot \sum_{k=1}^{N/2} \{ y(k) \cdot \sin[(k \cdot 2\pi \cdot j)/N] \}$$

j variant de 0 à $E(N/2)$

On peut alors reconstituer le signal, en éliminant la composante océanique, c'est à dire les fréquences multiples de 12 heures.

d) RESULTATS

- En ce qui concerne les débits moyens mensuels de Langatabiki, seules les composantes annuelles et semi-annuelles semblent influencer sur les fluctuations climatiques de cette station. Quelque soit le filtre utilisé, ces deux composantes contribuent le plus à la variance du signal de débit.

La figure n° 21 représente le spectre d'énergie de la série des débits.

- En éliminant la bande de fréquence correspondant aux fluctuations de 12 heures, 6 heures, 24 heures, la décomposition du signal en série de Fourier, restitue un signal filtré, qui représente la hauteur d'eau théorique que l'on pourrait observer si la station n'était pas influencée par les fluctuations océaniques. La méthode pourra sans doute être affinée, mais le résultat obtenu sur la figure n° 22 est déjà très satisfaisant. Le spectre d'énergie, visualisé sur la figure n° 23, met en

ELIMINATION DE LA COMPOSANTE OCEANIQUE

LIMNIGRAMME PETIT SAUT

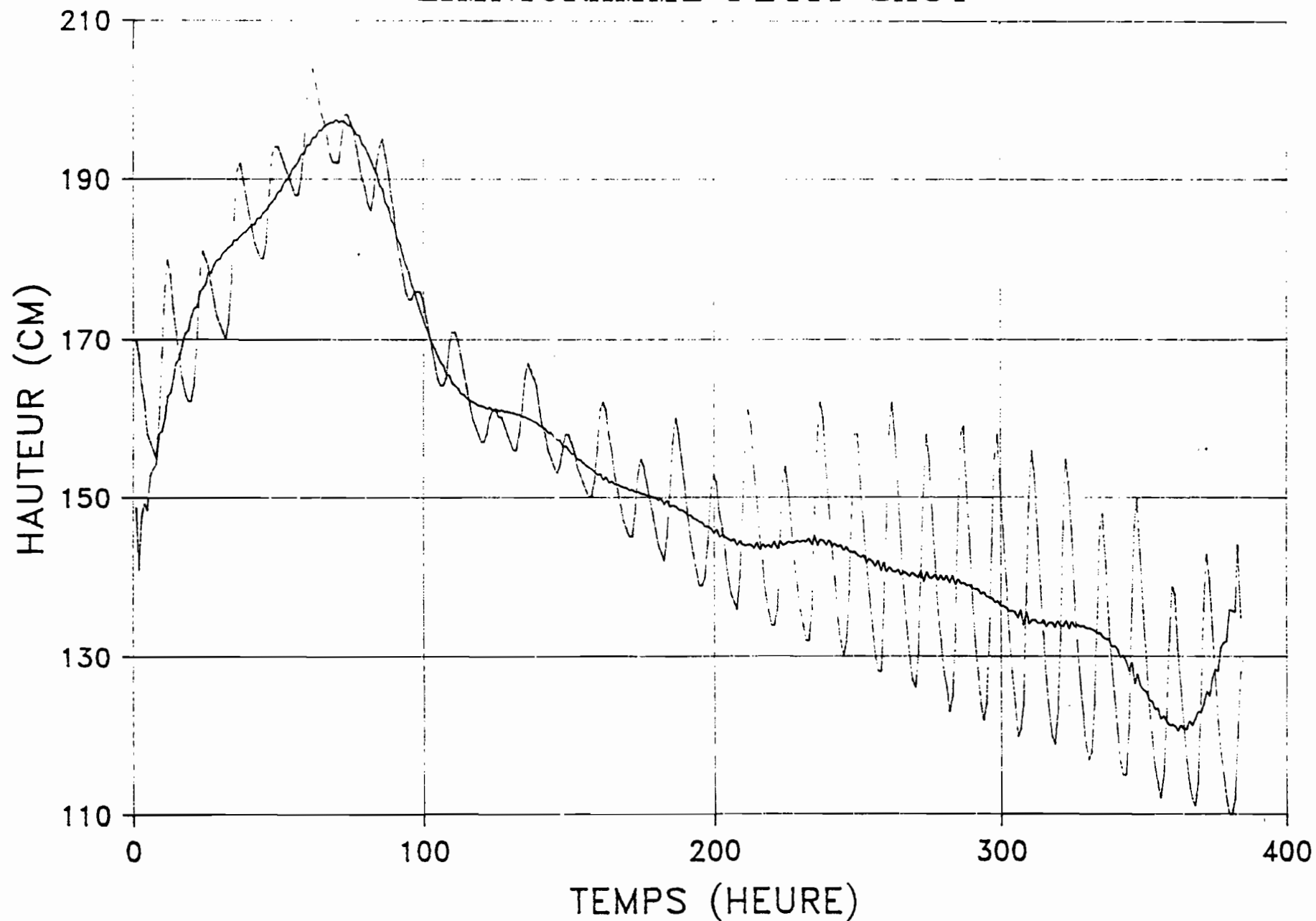


Fig. 22 : Reconstitution des hauteurs d'eau de la station de Petit Saut, après élimination de la composante océanique. Étage 1988.

PERIODOGRAMME PETIT SAUT

LIMNIGRAMME HORAIRE (384 données)

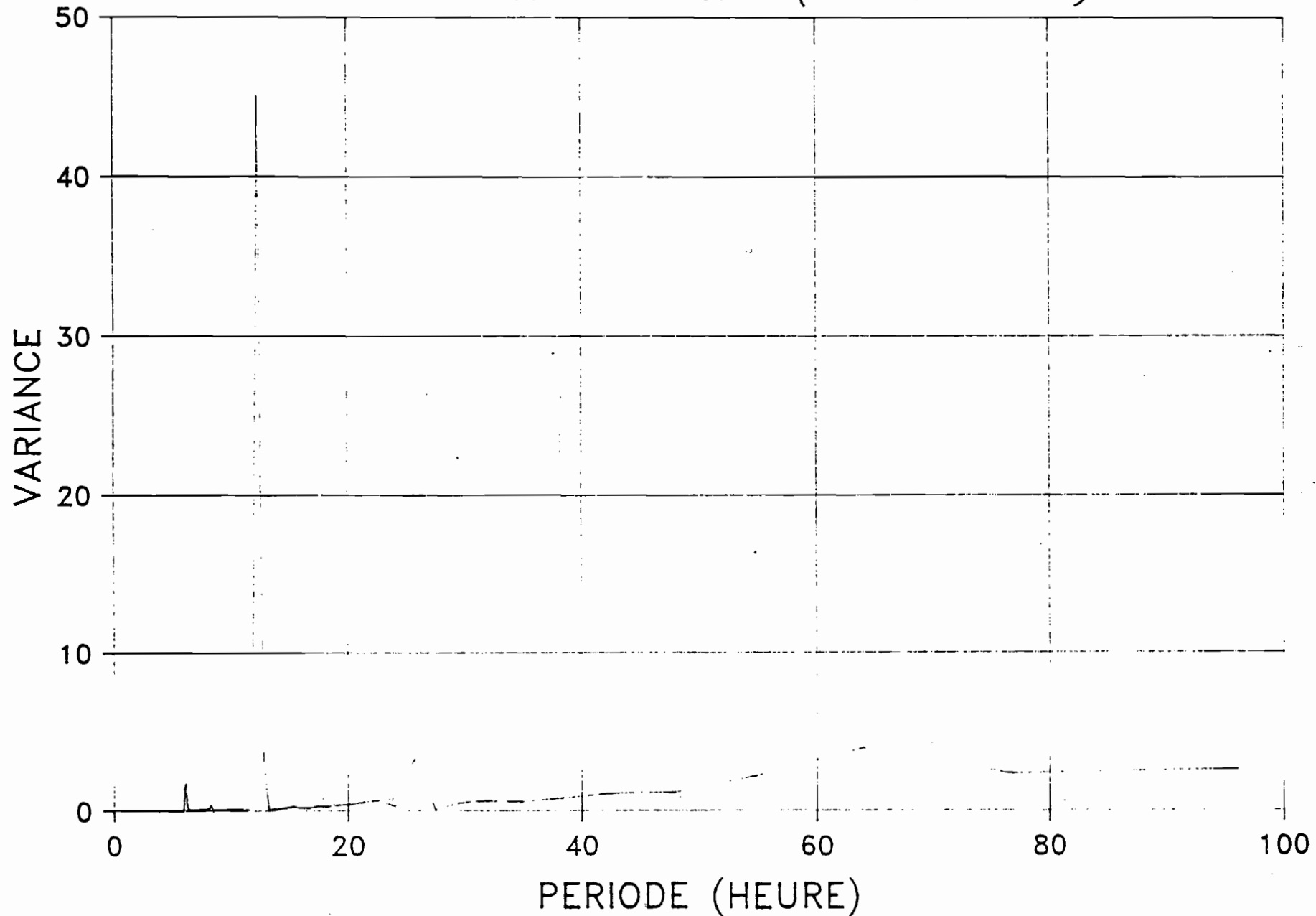


Fig. 23 : Periodogramme des hauteurs d'eau de la station de Petit Saut. Mise en évidence de l'influence océanique. Etlage 1988.

évidence l'influence dynamique océanique sur les hauteurs d'eau de la station de Petit Saut.

e) CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'analyse spectrale a donc mis en évidence les résultats suivants:

- Les fluctuations climatiques, de 1953 à nos jours, des débits moyens mensuels du Maroni à Langatabiki, sont essentiellement marquées par les variations saisonnières annuelles et semestrielles.

- Il est possible d'éliminer l'influence de la marée sur un limnigramme, en décomposant le signal, et en éliminant les fréquences océaniques des cycles de marée.

Nous avons travaillé sur un limnigramme d'étiage où l'influence océanique apparaissait nettement à l'oeil. Il serait sans doute intéressant d'appliquer la méthode à un limnigramme de moyennes eaux, où l'influence marine, si elle existe, n'apparaît peut être pas à l'oeil de l'observateur aussi averti qu'il soit.

L'analyse spectrale permet aussi la séparation des différentes composantes de l'écoulement fluvial, comme l'ont montré Hino et al. (1986) et Humbel (1988). On peut ainsi mettre au point des modèles de mélange, associant les éléments géochimiques et les divers réservoirs composant le débit du fleuve. Ce type de méthode pourra être utilisé avec profit dans le programme P.I.R.A.T., pour l'étude de la dynamique de transfert des éléments.

V OUTIL INFORMATIQUE

Le Centre O.R.S.T.O.M de Cayenne dispose aujourd'hui d'une vingtaine de micro-ordinateurs de type compatibles I.B.M, de quelques Macintoshs SE, et d'un vieux Apple IIe. L'hétérogénéité de ce matériel, est parfois irritante, mais ne pose pas en fait de réels problèmes de transfert de données d'un standard à l'autre.

Le Centre a fait récemment l'acquisition d'un mini-ordinateur SUN 4, dont les caractéristiques techniques, notamment la vitesse d'exécution des instructions (2 MIPS), et la taille de la mémoire de masse, apportent aux chercheurs des possibilités nouvelles. Signalons sur ce matériel la présence de la base de données INGRES, et une potentialité accrue au niveau du calcul numérique.

L'informatique est omniprésente en hydrologie. Nous allons dans ce chapitre présenter quelques logiciels et programmes que nous avons été amené à utiliser ou créer, pour mener à bien cette étude.

a) Le logiciel de statistiques A.D.D.A.D

*** Présentation du logiciel**

Les analyses statistiques, de ce mémoire, ont été mises en oeuvre avec le logiciel de statistiques A.D.D.A.D. L'organisation de ce logiciel repose sur trois types de fichier : le fichier des données, le fichier des résultats et un fichier de commandes.

On a le choix entre l'utilisation des disquettes, ou l'installation sur le disque dur. Pour des raisons techniques locales (disque dur de 10 M.O.), nous avons préféré ne pas installer A.D.D.A.D. sur le disque dur. On peut alors lancer le logiciel de la façon suivante:

- en plaçant sur le lecteur B la bibliothèque A.D.D.A.D correspondante à l'application statistique souhaitée.
- on place sur le lecteur A la disquette contenant les procédures de contrôle du logiciel ainsi que le fichier de données et celui des commandes.
- on tape au clavier "ADDAD nom du fichier de commandes".

*** exemple d'un fichier de commandes ADDAD:**

```
$RUN B:ANCORR   "appel à la bibliothèque A.F.C. de ADDAD"
$ENT=.
TITRE AFC (FLEUVES DE GUYANE);
PARAM NI=145 NJ=9 NF=6 LECIJ=1 STFI=1 STFJ=1; "paramètres"
OPTIONS NGR=1;
GRAPHE X=1 Y=2 GI=1 GJ=1 NPAGE=1 CADRE=0;
VAR A B C D E F G H I; "noms des variables"
FORMAT (A4,1X,9F8.2,1X); "format des variables du fichier de données"
$PRT=GRAPHE
$F10=A:DONNEES.DAT   "nom du fichier où il faut chercher les données"
$END
```

*** Commentaires**

A.D.D.A.D permet la plupart des analyses statistiques usuelles: régression, analyse en composantes principales, analyse factorielle des correspondances, nuées dynamique, classification ascendante hiérarchique

On peut toutefois lui reprocher son manque de convivialité et la mauvaise qualité de ses sorties graphiques.

b) Le logiciel de base de données hydrologiques HYDROM

*** Présentation**

HYDROM est le logiciel base de données hydrologiques standard de l'ORSTOM Il permet donc la gestion des données hydrométriques, le dépouillement des jaugeages, la lecture des cartouches (mémoire morte) de type CHLOE.

*** Aperçu sur l'organisation du logiciel (tableau II)**

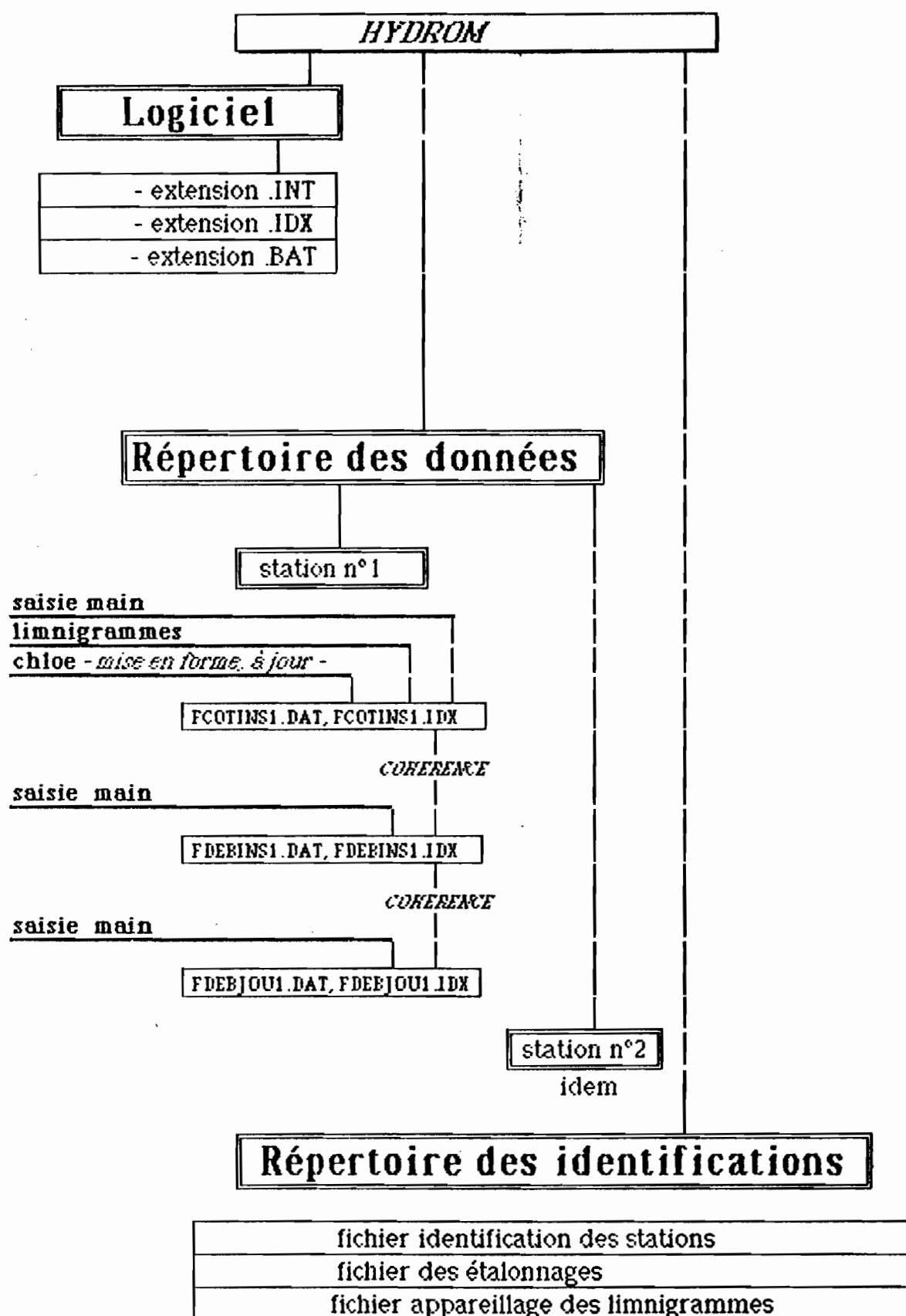


TABLEAU II

*** HYDROM ET CHLOE**

En ce qui concerne les fichiers de type CHLOE, il paraît important de rappeler la procédure de construction de ces fichiers:

Le logiciel permet la lecture des enregistrements limnimétriques des cartouches de type Chloé. La procédure est la suivante: on relie l'ordinateur au lecteur de cartouche par une liaison RS232.

Une première étape crée un **fichier brut** (nom de la station et une extension .CHA, .CHB, .CHC). Ce fichier constitue une image fidèle de la cartouche.

Une étape de **mise en forme** est alors nécessaire pour créer un fichier FCOTCHL.WRK, de format HYDROM. Mais ce fichier ne sera créé que si sa taille ne dépasse pas 1929 enregistrements par mois (ou 10 000 enregistrements par an). Si c'est le cas, on a 2 possibilités: soit on augmente, comme le propose le logiciel d'ailleurs, le seuil de variation, soit on sort d'HYDROM, et on effectue la césure du fichier en fichiers de taille < 1929 enregistrements, et on recommence la procédure de mise en forme. Il est alors nécessaire de travailler sur des répertoires différents.

Une deuxième étape dite de **mise à jour** va créer un fichier FCOTINS1.DAT et son identificateur FCOTINS1.IDX. C'est le fichier des côtes instantanées. Ce fichier n'accepte pas non plus un nombre d'enregistrements par mois supérieur à 1929 (ou supérieur à 10 000 enregistrements par an).

Une dernière procédure dite de **cohérence** est nécessaire pour avoir accès au fichier des côtes instantanées (consultation, vérification, sortie sur table traçante..).

*** Conseils pour l'organisation du répertoire des données.**

Nous allons donner ici quelques conseils concernant l'organisation du répertoire des données, qui nous paraît la plus appropriée à l'utilisation d'HYDROM. Cette méthode devrait garantir la sécurité de la base de données, tout en optimisant la rapidité d'exécution des opérations de base. Nous supposons dans tout ce qui suit que toutes les stations de mesures hydrométriques sont équipées de centrales de type CHLOE D.

L'organisation d'HYDROM dépend bien sûr de l'utilisation que l'on veut en faire, et de la précision des résultats attendus.

- Dans le répertoire des données on créera autant de sous répertoire qu'il y a de stations.

- Dans chacun de ces répertoires stations, si on dépasse 1929 enregistrements par mois, ce qui est souvent le cas dans les stations à influence dynamique océanique, deux possibilités s'offrent à l'utilisateur:

Soit la précision des mesures souhaitée est supérieure au seuil de variation et on peut alors augmenter ce dernier, afin de réduire la taille du fichier. Le fichier brut étant conservé en archives (logiciel de compactage ARC), on peut toujours, si le besoin s'en fait sentir, aller le rechercher.

Soit on ne peut pas augmenter le seuil de variation (programmé initialement sur la centrale), en raison de problèmes de précision des mesures, et il faut opérer la césure de ces fichiers en paquets de 1929 enregistrements. Dans ce cas nous recommandons le dépouillement des cartouches à l'aide du logiciel CLIP. La césure du fichier CHLOE brut qui en résulte, peut être alors effectuée par un utilitaire créé en basic qui automatise cette procédure, en créant autant de sous répertoires qu'il y a de paquets de 1929 enregistrements. On peut alors traiter avec HYDROM chacun de ces sous répertoires.

*** Commentaires et perspectives**

- Ce logiciel souffre essentiellement d'un manque de convivialité. D'autre part la restriction à 1929 enregistrements par mois, est très contraignante dans un milieu à influence dynamique océanique.

- Il semble qu'aujourd'hui encore, la nouvelle version 2.0 ne soit pas exempte de "bugs". Citons pour exemple le refus du logiciel à dépouiller un enregistrement chevauchant un 31 décembre - 1er janvier.

- Il aurait été intéressant d'intégrer à la base de données hydrométriques, une base de données physico-chimiques. Le couple concentration-débit ou concentration-hauteur est en effet à la base de toutes études sur la dynamique de transfert des éléments dissous et particuliers.

- Signalons pour finir qu'HYDROM, version 2.0 permet le traitement des données récupérées par télétransmission ARGOS. L'équipement en balise ARGOS des stations, et l'acquisition d'une station de réception,

semble aujourd'hui nécessaire pour une bonne gestion du réseau guyanais, pays où les voies de communications restent peu nombreuses.

c) Le programme POLLUANT

Ce programme existe en 2 versions. La première écrite en Turbo-Pascal, fonctionne sur un compatible IBM. L'autre version écrite en langage C, peut tourner sur un mini-ordinateur SUN.

- Compatibles I.B.M.

Le programme est écrit en Turbo Pascal. Il permet d'une part la visualisation de la propagation dans l'espace, du polluant, par pas de 10 minutes, sur un cycle de marée. D'autre part il écrit sur un fichier d'extension .csv (nombres séparés par des virgules), les concentrations en polluant, toutes les heures, et par pas de 1 km. Ce fichier peut être alors récupéré par le logiciel SC4, pour sorties graphiques.

La durée d'exécution du programme est d'environ 10 minutes.

- SUN

Le programme est écrit en langage C. Deux scénarios sont envisageables: étales de marée haute à $t = 0$ ou étales de marée basse à $t = 0$. Le calcul peut être lancé au choix sur 1 ou 2 cycles de marées. La durée d'exécution est d'environ 2 minutes.

Ces 2 versions sont en fait tout à fait complémentaires. En effet la version Turbo-Pascal peut être qualifiée de "pédagogique": on peut visualiser sur l'écran le fonctionnement physique de la propagation du polluant (fig. n° 24, 25, 26, et 27). Mais on ne peut observer la propagation sur plus de 3 cycles de marée, en raison de problèmes de mémoire, et de taille des tableaux.

Par contre la version écrite en C, permet l'étude de la propagation du polluant, sur plus de 7 cycles de marée. Cette version peut être qualifiée "d'outil de travail". Mais à l'écran, la visualisation ne s'effectuera qu'à la fin de la période d'observation. Cette version donne un bilan de pollution.

d) Le programme SALT

Il existe aussi deux versions de ce programme. L'une fonctionne sur compatible IBM, et est écrite en Turbo-Pascal, l'autre est en langage C, et fonctionne sur un SUN 4.

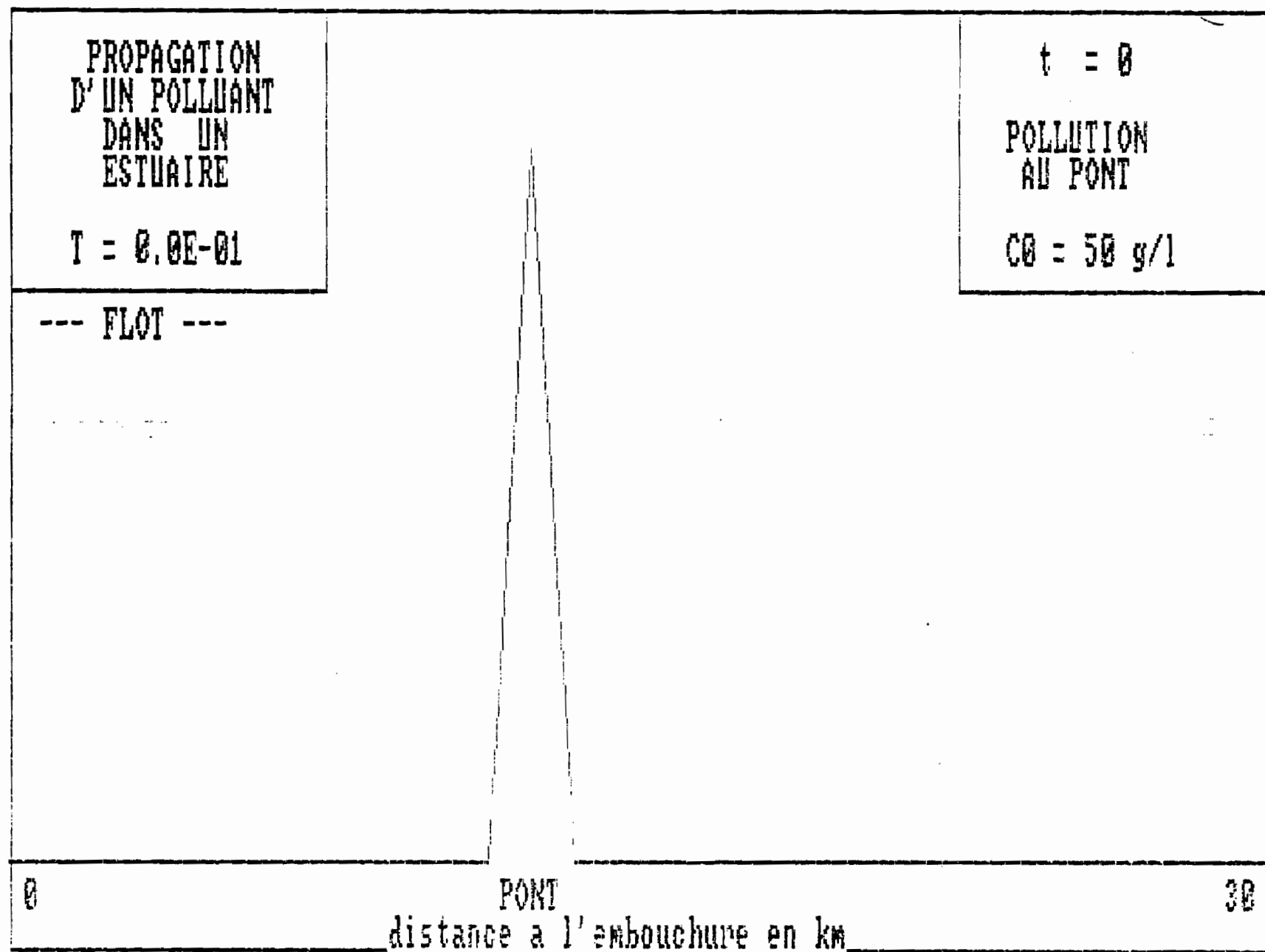


Fig. 24 : Copie d'écran de l'exécution du programme POLLUANT. A $t = 0$, un camion répand sa cargaison dans l'estuaire du sinnamary, au niveau du pont. On est à la fin de l'étape de marée basse.

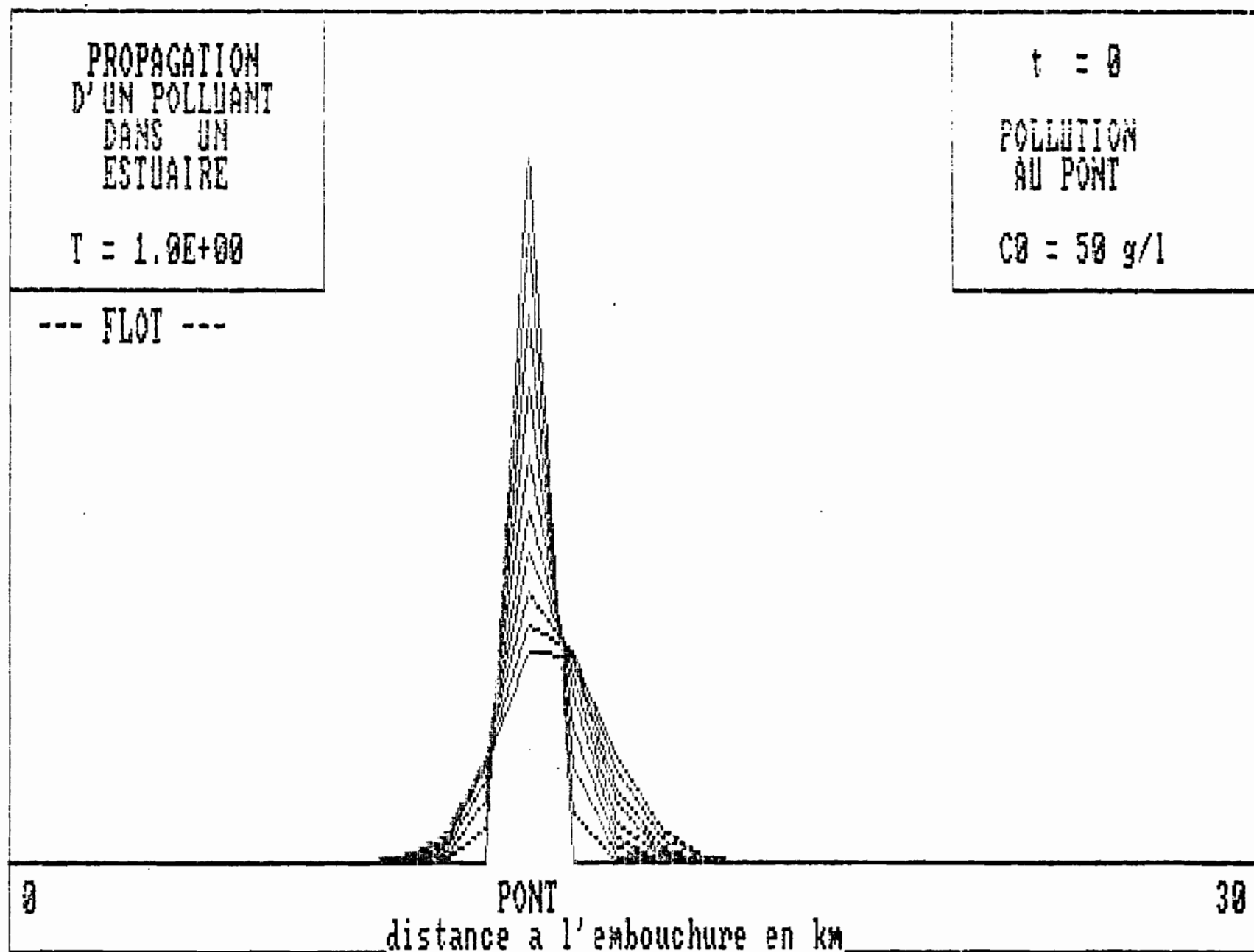


Fig. 25 : Copie d'écran de l'exécution du programme POLLUANT A $t = 0$, un camion a répandu sa cargaison dans l'estuaire du sinnamary, au niveau du pont. On peut observer l'évolution du polluant 1 heure après le rejet

PROPAGATION
D'UN POLLUANT
DANS UN
ESTUAIRE

$T = 7.5E+00$

-- JUSANT --

*** ALERTE ***

POINTE COMBI
POLLUEE

$C \text{ (MG/L)} = 7.0E+00$

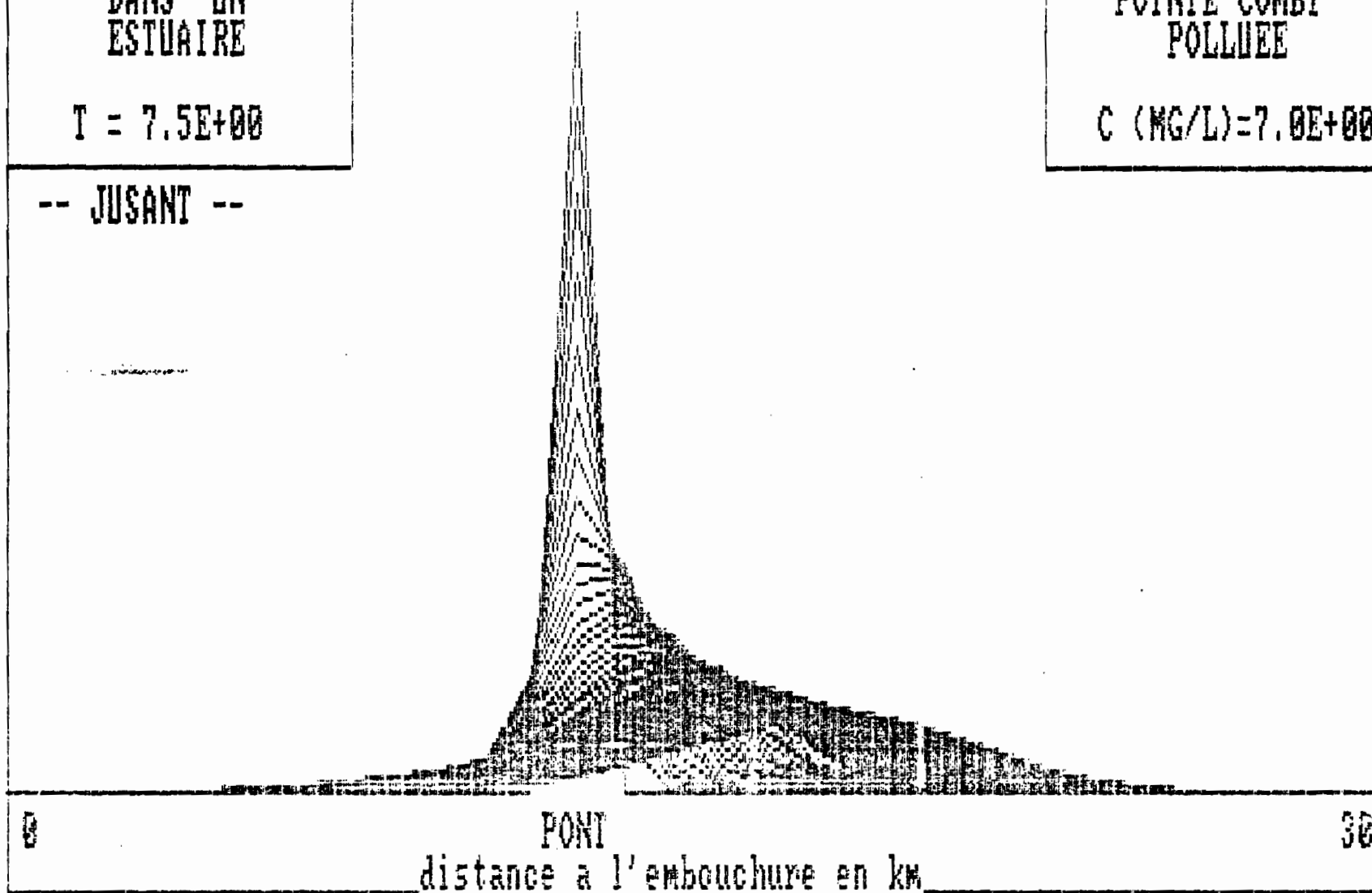


Fig. 26 : Copie d'écran de l'exécution du programme POLLUANT. A $t = 0$, un camion a répandu sa cargaison dans l'estuaire du sinnamary, au niveau du pont. On peut observer l'évolution du polluant 7.5 heures après le rejet

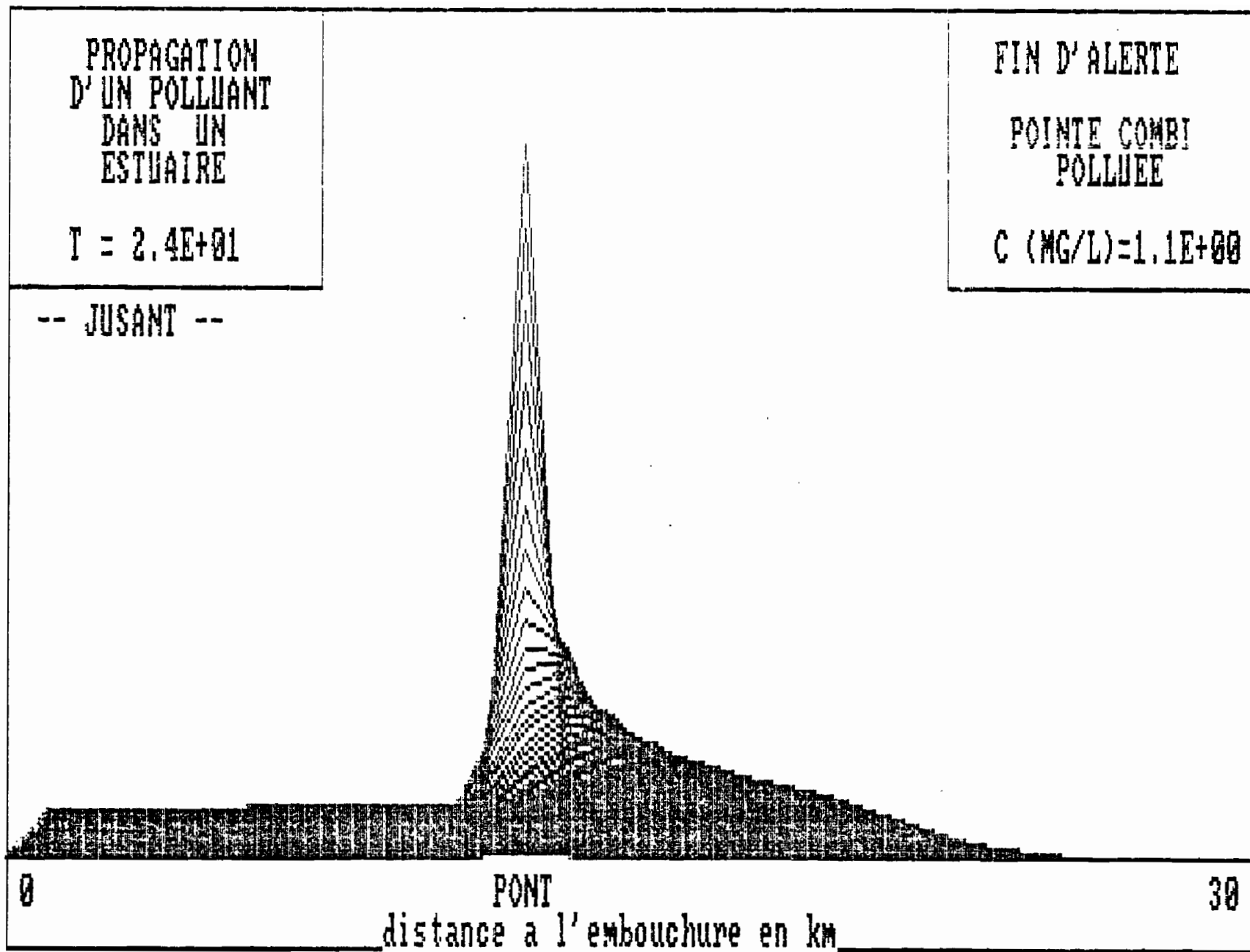


Fig. 27 : Copie d'écran de l'exécution du programme POLLUANT. A $t = 0$, un camion a répandu sa cargaison dans l'estuaire du sinnamary, au niveau du pont. On peut observer l'évolution du polluant 24 heures après le rejet.

Les remarques faites précédemment sont toujours valables. Les figures n° 28, 29, 30, et 31, sont des copies d'écran de l'exécution du programme dans sa version Turbo-Pascal.

d) *Le programme SPECTRE*

Les deux programmes ont été écrits en Turbo Pascal. Le temps de calcul est relativement long.

Le programme qui calcule le spectre d'autocovariance permet le choix d'un filtre (Parzen ou Tukey). Sa durée d'exécution, pour une série de près de 400 données est d'environ 1/2 heure.

Ce programme gagnerait à être écrit en C, et à tourner sur le SUN.

d) *Le programme FOURIER*

Le programme qui décompose le signal en série de Fourier est quant à lui, pour à peu près le même nombre de données, deux fois plus long. Son exécution dure près d'une heure. Avant d'entamer la décomposition du signal, et sa restitution après filtration, le programme commence par calculer le périodogramme de la série de données.

Il serait également intéressant d'écrire ce programme en C.

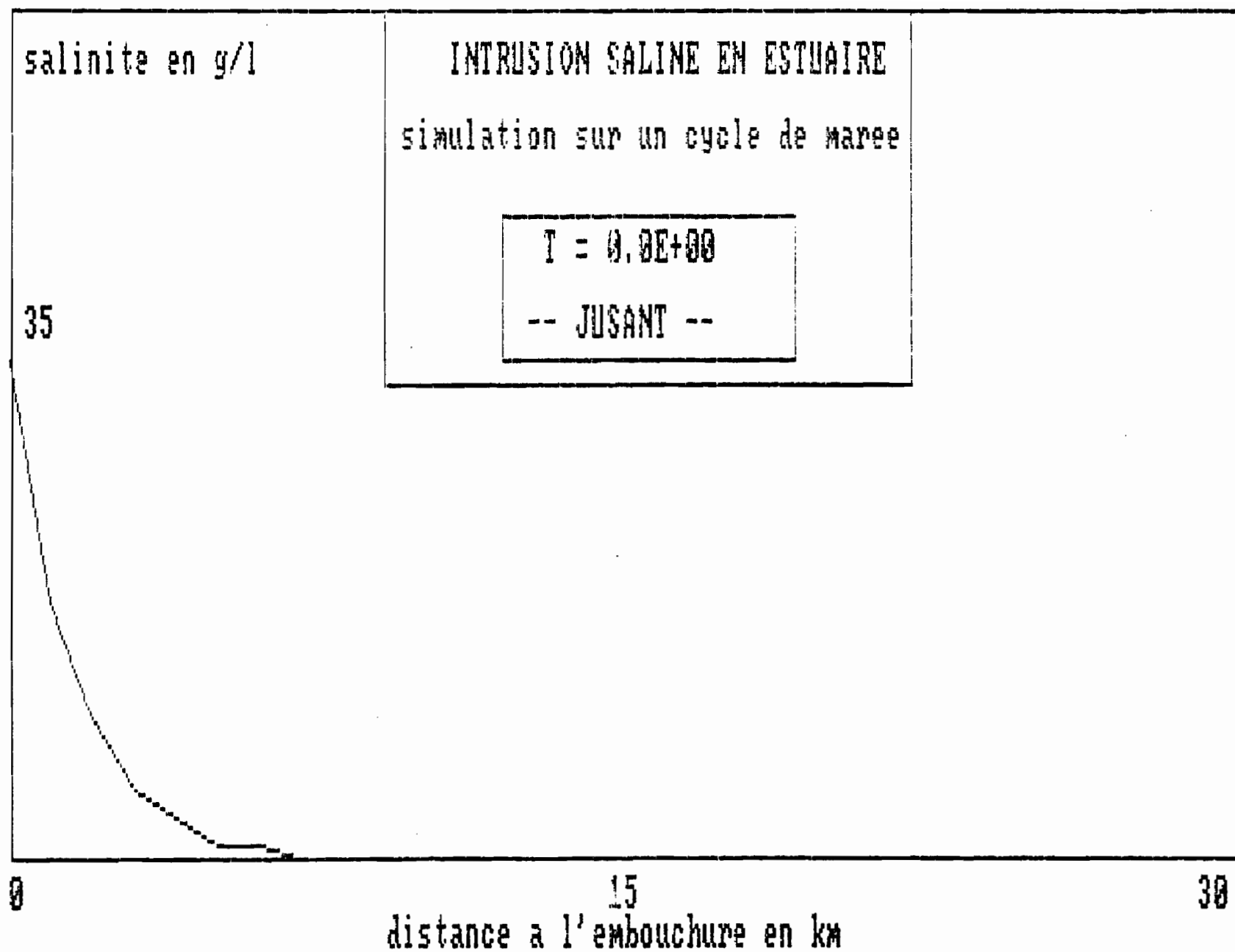


Fig. 28 : Copie d'écran de l'exécution du programme SALT. A $t = 0$, on est à la fin du jusant. On peut observer le profil de salinité dans l'estuaire.

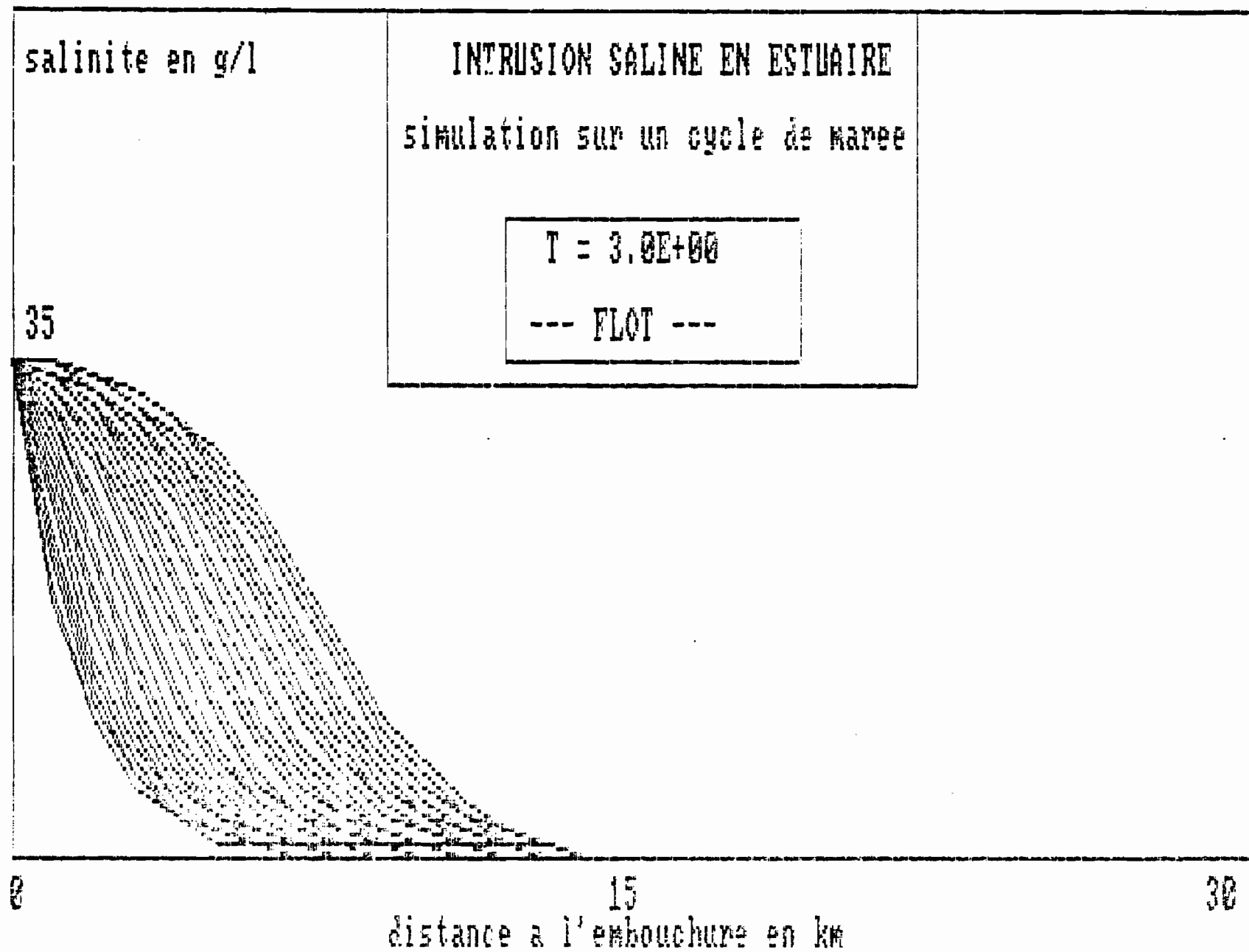


Fig. 29 : Copie d'écran de l'exécution du programme SALT. On peut observer le profil de salinité de l'estuaire de $t = 0$ à $t = 3$ heures.

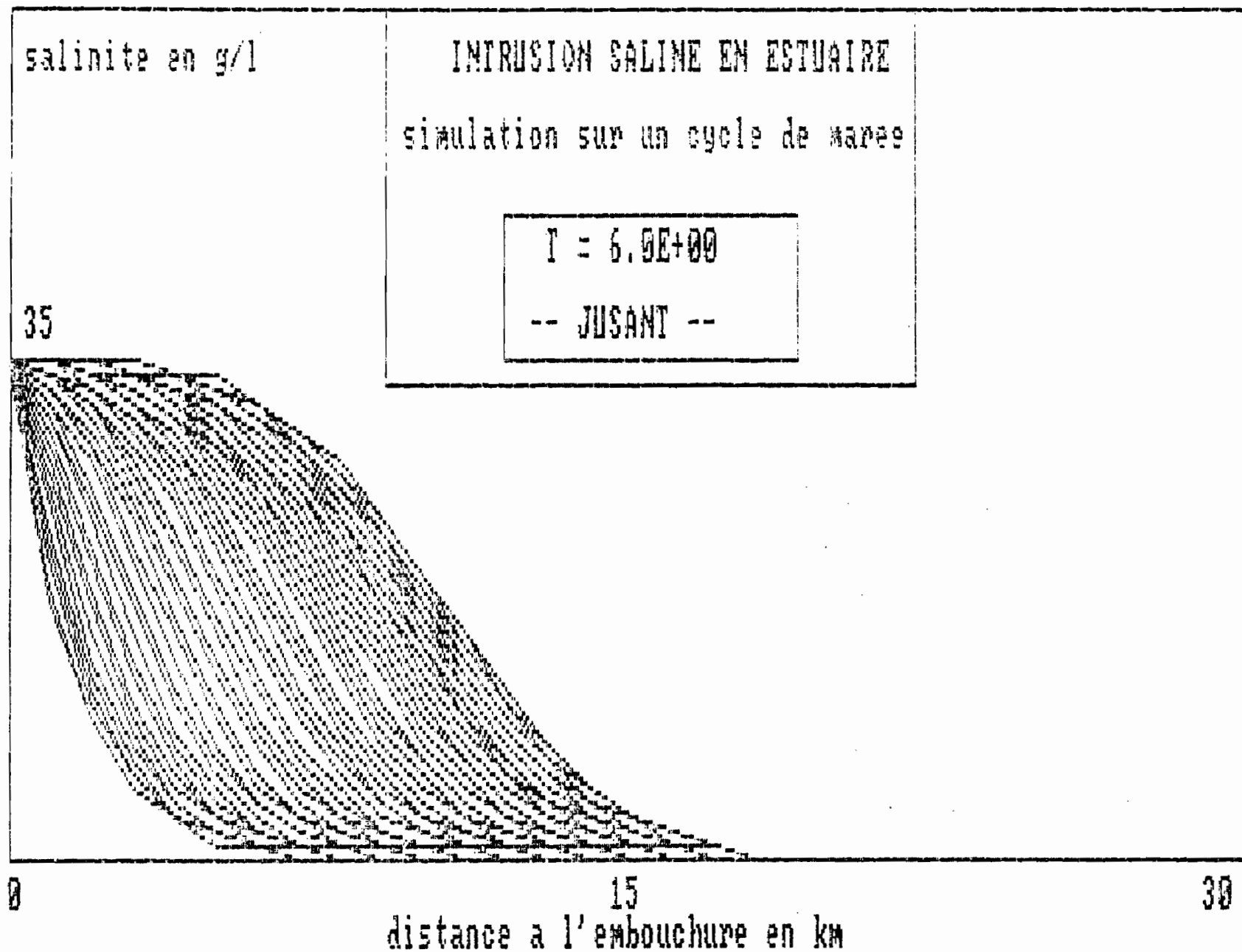


Fig. 30 : Copie d'écran de l'exécution du programme SALT. On peut observer le profil de salinité de l'estuaire de $t = 0$ à $t = 6$ heures.

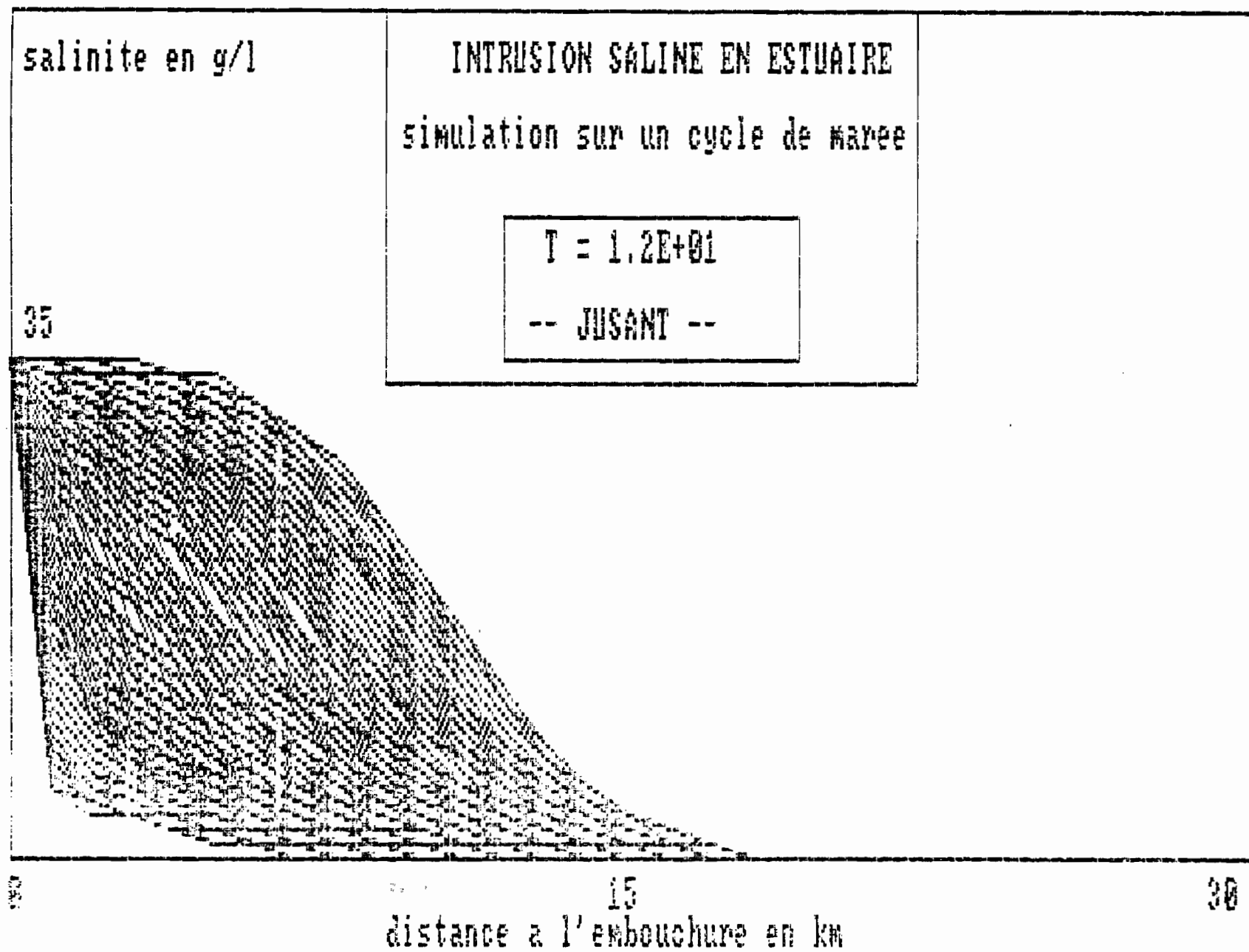


Fig. 31 : Copie d'écran de l'exécution du programme SALT. On peut observer le profil de salinité de l'estuaire de $t = 0$ à $t = 12$ heures.

BIBLIOGRAPHIE

DYER K.R. (1972): Estuaries: A Physical Introduction. Editor: J. Wiley. 140 pp.

ERHART H. (1973): Itinéraires géochimiques et cycle géologique du silicium. Katamorphisme des silicates primaires. Genèse et évolution de la silice de néoformation. Editor: Doin. 217 pp.

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, Université Bordeaux I. 379 pp.

FRITSCH J.M. (1981): Ecoulement et érosion sur les bassins versants ECEREX en 1979. Bull. liaison ECEREX, n°4, ORSTOM Cayenne. 23-44.

FROIDEVAUX R. et KRUMMENACHER R. (1976): Analyse spectrale des précipitations et débits mensuels dans un bassin karstique du Juras français. Editors: Ven Te Chow, Dixey F., Maxey G.B., Nash J.E., and van der Molen, W.H. 293-313.

GRIMALDI C. (1988): Origine de la composition chimique des eaux superficielles en milieu tropical humide. Exemple de deux petits bassins versants sous forêt en Guyane française. Sciences Géologiques ? 1-35.

HINO M. and HASEBE M. (1986): Séparation of a storm hydrograph into runoff components by both filter-separation AR method and environmental isotope tracers. Journal of Hydrology, vol. 85. Editors: Beard L.R., Davis G.H., McCulloch J.S.G., Nash J.E., and van der Molen W.H. 251-264.

HUMBEL H.X. (1988): Transport de matières en suspension et de carbone organique particulaire par la Garonne. Mémoire de D.E.A. Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de Géologie. 33 pp.

IPPEN A.T. (1966): Estuary and coastline hydrodynamics. Editor: A.T. Ippen. Engineering Societies Monographs. McGraw-Hill Book Company. 744 pp.

KITE G. W. (1982): Analysis of Lake Victoria levels. Hydrological Sciences Journal, vol. 27. Editor: Robin T. Clarke. 99-110.

LOINTIER M. (1984): Etude d'impact de l'aménagement du Barrage de Petit Saut sur le Sinnamary. Dynamique des eaux et de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary. Convention E.D.F. ORSTOM Cayenne. 39 pp.

LOINTIER M. et ROCHE M.A. (1988): Salinités et suspensions des estuaires de Guyane. Méthodes et résultats. Journées Hydrologiques de Montpellier. ORSTOM Cayenne. 21 pp.

NOGUES J.L. (1984): Etude de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary (Guyane Française). Dynamique, hydrochimie, phytoplancton. Mémoire de D.E.A., Université de Provence, Centre Saint Charles. 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.

RAY S.B., MOHANTI M. and SOMAYAJULU B.L.K. (1984): Suspended matter, major cations and dissolved silicon in the estuarine waters of the Mahanadi River, India. Journal of Hydrology, vol. 69. Editors: L.R. Beard, G.H. Davis, J.S.G. McCulloch, J.E. Nash, and W.H. van der Molen. 183-196.

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.

YEVJEVICH V. (1972): Structural analysis of hydrologic time series. Hydrology Papers. Colorado State University. Fort Collins, Colorado 80521. Vol. 56, 59 pp.