



MODELISATION MATHÉMATIQUE SIMPLIFIÉE DE LA MASSE TURBIDE DANS L'ESTUAIRE DE LA LOIRE.

P. LE HIR⁽¹⁾ ; B. THOUVENIN⁽²⁾

⁽¹⁾ IFREMER - Zone Industrielle du Diable - BP 70 - 29280 PLOUZANE

⁽²⁾ IFREMER- Port Brégaillon - BP 330 - 83507 LA SEYNE SUR MER

ABSTRACT

In order to understand the reasons for anoxia events in the Loire estuary, a global mathematical modelling has been undertaken. The transport of suspended matters; and especially their organic fraction that consumes oxygen when degrading, has to be considered.

As the characteristic time scale of the organic content is likely long, a simplified one-dimensional model has been first developed, despite the three-dimensional processes that are involved. The model is coupled to hydrodynamics computations and accounts for transport, erosion and deposition of material, and even the consolidation of surficial sediments, in a schematic way.

The model can reproduce satisfactorily the turbidity maximum and its deposit as fluid mud during neap tides, at least for low river discharge. The turbid structures are few dependent on initial conditions. A sensitiveness analysis shows the importance of the settling velocity and the friction coefficient and emphasizes the lack of field measurements for model calibration and validation. Besides, a surprising sensitiveness of the model to realistic changes of the tidal spectral composition is pointed out, leading to large variations of fluid mud locations.

The model can also simulate the upward transfer of the sediment structures when the river flow increases. The model proved operational for long term simulations, thus enabling the management of sediment stock and associated contaminants. However, the occurrence of high river discharges during yearly cycles implies the need of more sophisticated models to account for stratifications.

1. INTRODUCTION

Chaque année des mortalités de poissons (mulets en particulier) se produisent en période estivale dans l'estuaire de la Loire. Ces mortalités sont provoquées par une anoxie du milieu que l'on attribue principalement à la dégradation de la matière organique particulaire (Romaña et Thouvenin, 1987; Sauriau, 1991). Cette dernière représente une fraction significative (de l'ordre de 10 %) de la masse turbide de l'estuaire, elle-même de l'ordre du million de tonnes.

Afin de mieux comprendre et de prévoir les mécanismes conduisant à l'anoxie, l'Association pour la Protection de l'Environnement de l'Estuaire de la Loire (APEEL) a demandé à l'IFREMER de développer une modélisation mathématique de l'ensemble des processus concernés. C'est en effet, la seule voie d'investigation synthétique du sujet en raison de la multiplicité des processus en jeu et de l'impossibilité de les représenter tous simultanément à échelle réduite.

Parmi les processus à considérer, figurent naturellement l'hydrodynamique dont dépendra le transport des quantités à modéliser et les processus d'érosion/dépôt propres aux éléments particuliers. La modélisation des transports de sédiments est primordiale puisque la fraction particulaire de la matière organique est réputée comme principal responsable de l'anoxie.

Si en outre on recherche des solutions pour réduire les réductions d'oxygène dissous, par exemple en contrôlant les apports de matière organique au sein de l'estuaire ou en amont, il devient nécessaire non seulement de simuler la forme et la concentration des remises en suspension, mais aussi de gérer véritablement le stock de matière organique particulaire dans l'estuaire, d'en suivre l'évolution et donc de connaître les temps de résidence caractéristiques et les trajectoires moyennes des particules tout au long de l'estuaire, en suspension dans l'eau ou même dans les dépôts superficiels. Les échelles de temps à considérer sont probablement de plusieurs mois, voire plusieurs années.

Par ailleurs, la description des processus sédimentologiques en Loire nécessite une discrétisation tridimensionnelle, en raison des disparités transversales dues aux variations de profondeur entre le chenal et les estrans latéraux, et des stratifications dues aux gradients de densité (eux-mêmes provoqués par des variations de salinité et des gradients verticaux de turbidité).

Cependant la mise en oeuvre d'un tel modèle est coûteuse en temps de calcul et incompatible avec l'échelle de temps à prendre en compte. Il est donc nécessaire de rechercher un modèle simple si l'on veut éviter des coûts d'exploitation prohibitifs.

Dans cet esprit, il a paru opportun d'utiliser un modèle unidimensionnel de la qualité des eaux de l'estuaire en cours de développement (Thouvenin, 1991) et de l'adapter aux problèmes spécifiques de transport sédimentaire.

Il s'agit dans cette première phase d'utiliser la schématisation simplifiée unidimensionnelle de l'estuaire avec les objectifs suivants :

- chercher à reproduire un maximum de phénomènes sédimentologiques observés dans l'estuaire, en particulier le bouchon vaseux et son dépôt sous forme de crème de vase,
- évaluer le rôle de la marée dans la formation du bouchon vaseux,
- étudier la sensibilité des résultats aux paramètres en jeu et au forçage physique, en particulier le débit amont et l'amplitude ou la forme de la marée à Saint-Nazaire,
- considérer la réponse du système lors de simulations de longue durée,
- et finalement donner des recommandations pour le développement de modèles à 2 ou 3 dimensions spatiales envisagés en seconde phase.

2. DESCRIPTION DU MODELE

1. Modèle hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique unidimensionnel de l'estuaire de la Loire a été écrit par Thouvenin selon le schéma développé par Salomon (1976) : il résout les équations de conservation de la masse d'eau et de la quantité de mouvement longitudinale (i.e. dans la direction de l'axe de l'estuaire) selon une technique explicite de différences finies.

L'estuaire de la Loire (figure 1) est découpé en tronçons de 2 km de long de Saint-Nazaire à Ancenis (soit 47 mailles). Les sections d'écoulement réalistes varient avec la cote de la surface libre et ont été calculées à partir de la bathymétrie de 1983-1985 pour le secteur aval de Nantes et de 1988 pour l'amont. En certains endroits, les sections ont été partagées en sections actives et sections passives pour distinguer les zones qui participent à l'écoulement de celles qui ne servent qu'à stocker de l'eau.

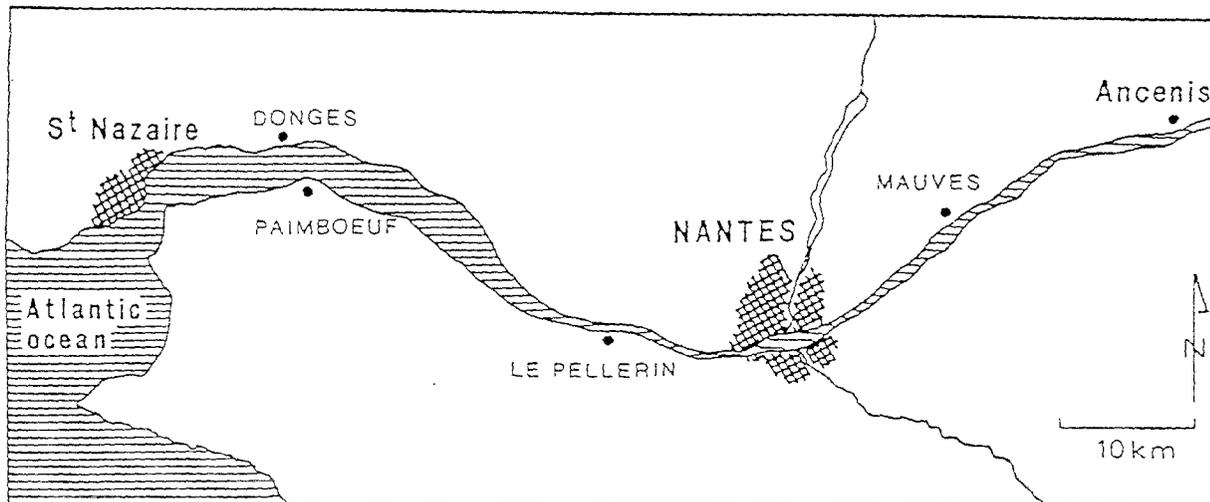


Fig. 1: L'estuaire de la Loire.

Le modèle est calibré grâce à un coefficient de frottement qui intègre le frottement sur le fond et le frottement latéral.

Les conditions aux limites sont exprimées sous forme de débit à Ancenis et de niveau de marée à Saint-Nazaire. Ce dernier est calculé à tout moment en fonction de la prédiction harmonique du S.H.O.M. et permet donc de reproduire n'importe quelle condition de marée. Toutefois, afin d'éloigner de la zone d'intérêt la condition limite pour les calculs d'advection-dispersion (en particulier de la turbidité), la limite aval de l'estuaire a été artificiellement repoussée vers le large d'une douzaine de kilomètres, avec une extrapolation régulière des sections en aval de Saint-Nazaire. Cet allongement permet de conserver les concentrations calculées à Saint-Nazaire qui sont évacuées pendant le jusant et sont susceptibles de revenir en flot.

2. Modèle de transport

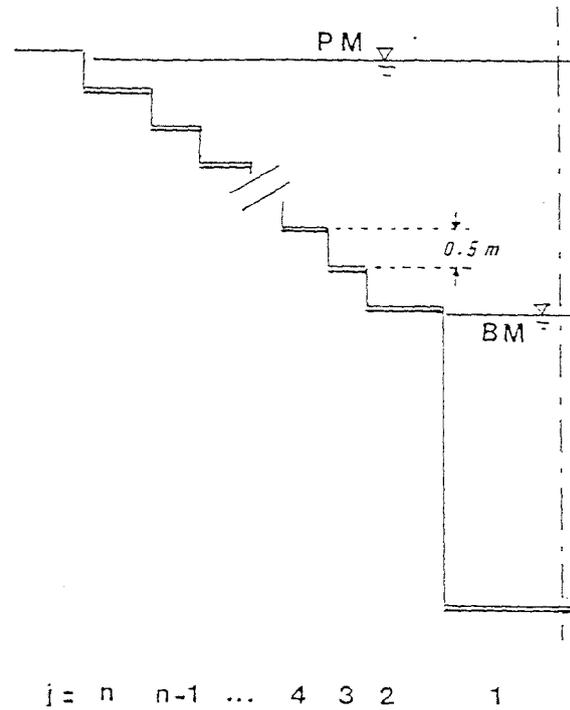
Ce modèle résout, pour chaque élément (appelé "variable d'état") dont on cherche la concentration, une équation de conservation de la masse qui rend compte des phénomènes d'advection (déplacement par les courants) et de dispersion. Le schéma de résolution explicite est écrit en différences finies selon la formulation de Bott (1989).

Dans le but d'économiser les temps de calcul et parce que les critères de stabilité sont moins contraignants pour le transport des variables que pour l'hydrodynamique, le calcul d'advection/dispersion est réalisé beaucoup moins fréquemment que celui du courant. Toutefois un nouveau calcul des débits entre sections est réalisé à partir des variations de volume intégrées pendant le pas de temps "transport", pour garantir une parfaite conservativité du schéma.

Le modèle a été écrit sous la forme d'un logiciel de transport multivariable qui permet de calculer simultanément les concentrations de plusieurs variables d'état qui peuvent interagir entre-elles. Cette formulation particulièrement adaptée à la simulation des problèmes de qualité d'eau permet de prendre en compte les formes dissoutes et particulaires (éventuellement sédimentées) d'un même élément.

3. Modèle sédimentaire

Basé sur le principe de conservation de la masse de matières en suspensions le modèle sédimentaire reprend la structure du modèle de transport précédemment décrit, avec des termes source et puits spécifiques qui sont respectivement l'érosion et le dépôt. Mais pour tenir compte de la variabilité de l'action érosive du courant dans une même section de l'estuaire, la couverture sédimentaire a été découpée latéralement en fonction de l'altitude du fond, selon un incrément de 0,50m (voir figure 2), conduisant à un maillage bidimensionnel du sédiment. Une tension de cisaillement au fond locale (τ_f) peut alors être définie en tenant compte à la fois du courant moyen dans la section et de la hauteur d'eau locale. On notera qu'une telle schématisation ne rend pas compte d'éventuelles asymétrie dans les profils en travers, en particulier au droit des méandres.



Le flux d'érosion s'écrit :

$$E = k (\tau_f / \tau_{ce} - 1)$$

(en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

où τ_{ce} est la tension critique d'érosion du sédiment superficiel (résistance au cisaillement) et k un coefficient à calibrer.

Le flux de dépôt est écrit selon la formulation de Krone:

$$D \text{ (en } \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) = W_s \cdot C (1 - \tau_f / \tau_{cd})$$

où τ_{cd} est la tension de cisaillement critique au-delà de laquelle on considère qu'aucun dépôt n'est possible en raison des turbulences.

W_s est la vitesse de chute des particules en suspension considérée en première approximation comme une constante spécifique du matériau considéré.

C est la concentration des matières en suspension, a priori uniforme dans chaque section de l'estuaire (modélisation unidimensionnelle). Toutefois, pour rendre compte des stratifications qui interviennent inévitablement dans la nature, un rapport (constant) entre la concentration au droit du chenal et la concentration sur les autres mailles d'une même section a été introduit. Ces concentrations sont relatives à des masses d'eau respectivement plus ou moins profondes. Cet artifice a pour conséquence de réduire le dépôt latéral et de mieux permettre le développement de la crème de vase.

Enfin, le modèle suppose un glissement latéral des matériaux déposés depuis les bords vers le chenal lorsque la pente transversale du fond dépasse une valeur critique.

Le sédiment est composé de deux types de matériaux :

- les sédiments fraîchement déposés, peu concentrés et donc caractérisés par une résistance au cisaillement (τ_{ce}) faible : c'est ce que nous appelons la "crème de vase",
- les sédiments consolidés, plus concentrés et caractérisés par un τ_{ce} élevé, que nous appellerons "vase".

Le modèle suppose que tout dépôt frais se fait sous forme de crème de vase et qu'à intervalles de temps réguliers (par exemple 24 h), une fraction de cette dernière se transforme en vase : c'est de cette façon très simpliste que les phénomènes de tassement ou consolidation sont pris en compte dans la présente étude (voir aussi Cohen-Solal et Pham, 1989).

3. RESULTATS

1. Hydrodynamique

La calibration du modèle hydraulique a été faite principalement par ajustement des coefficients de frottement et comparaison entre hauteurs d'eau calculées et mesures marégraphiques en une dizaine de points de l'estuaire, pour 3 périodes de 8 jours correspondant à 3 conditions de débit différenciées.

Les résultats en étiage sont présentés en figure 3 et montrent une bonne adéquation entre le modèle et les mesures, sauf en amont de Nantes. Les décalages observés s'expliquent en particulier par la difficulté de prendre en compte les irrégularités brutales des sections dans ce secteur et l'assimilation du frottement latéral à une fraction du frottement sur le fond.

Les courbes de marée qui en découlent (figure 4) montrent en étiage un gonflement du marnage en aval du Pellerin, révélant l'hypersynchronisme de l'estuaire déjà relaté par différents auteurs (par exemple LCHF, 1983).

En ce qui concerne les courants et a fortiori les tensions de cisaillement au fond qui varient comme le carré des vitesses, les valeurs sont fortes jusqu'à Nantes, de l'ordre de 2 m.s^{-1} en flot et $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ en jusant pour une marée de vive eau (coefficient 114) : la suprématie du flot sur le jusant, classique en estuaire, s'explique par l'asymétrie de l'onde marée dont la propagation est plus rapide à pleine mer qu'à basse mer (figure 5).

Ces résultats sur les courants sont difficiles à valider car les mesures de courant sont toujours ponctuelles alors que les vitesses calculées sont des valeurs moyennes sur la section transversale.

En particulier les mesures sont souvent effectuées en surface où le courant de jusant est généralement favorisé en raison des stratifications halines générées par les apports d'eau douce: naturellement cet effet est moindre en étiage où l'estuaire est supposé assez bien mélangé.

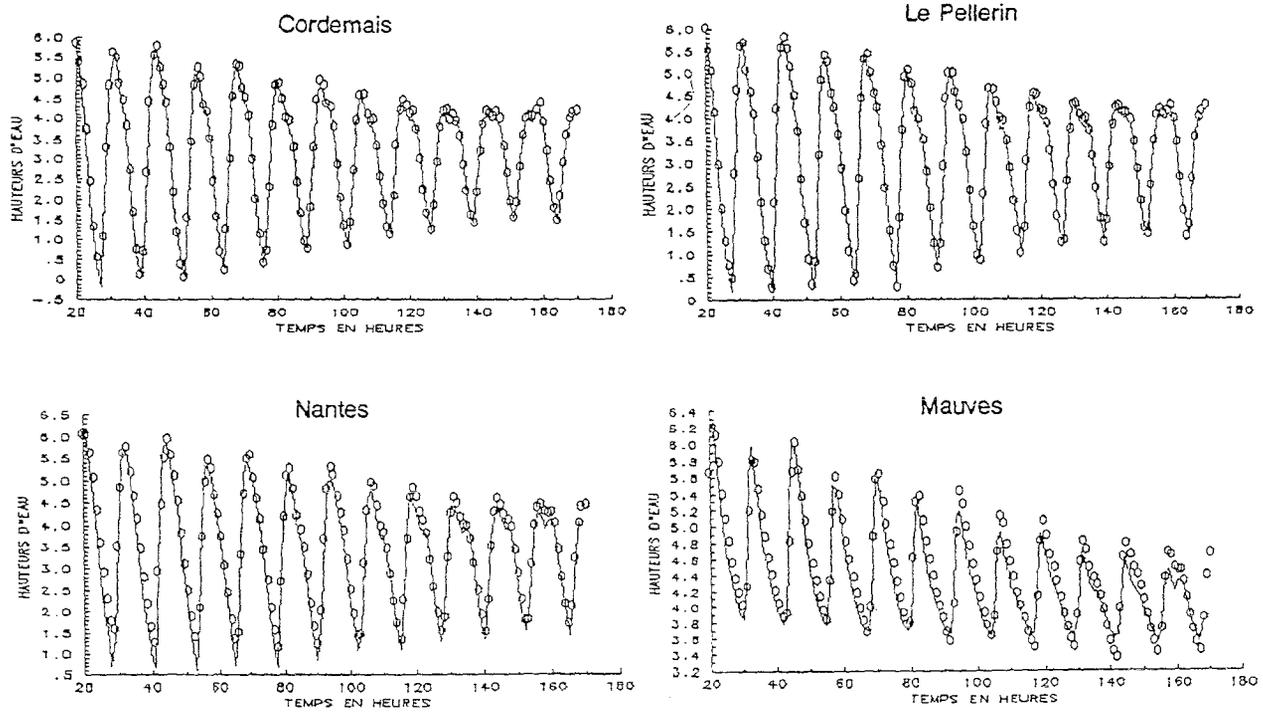


Fig.3 : Calibration du modèle hydrodynamique de l'estuaire de la Loire

période d'étéage (août 1988)

— cote de la surface calculée

○ cote de la surface mesurée (marégraphe)

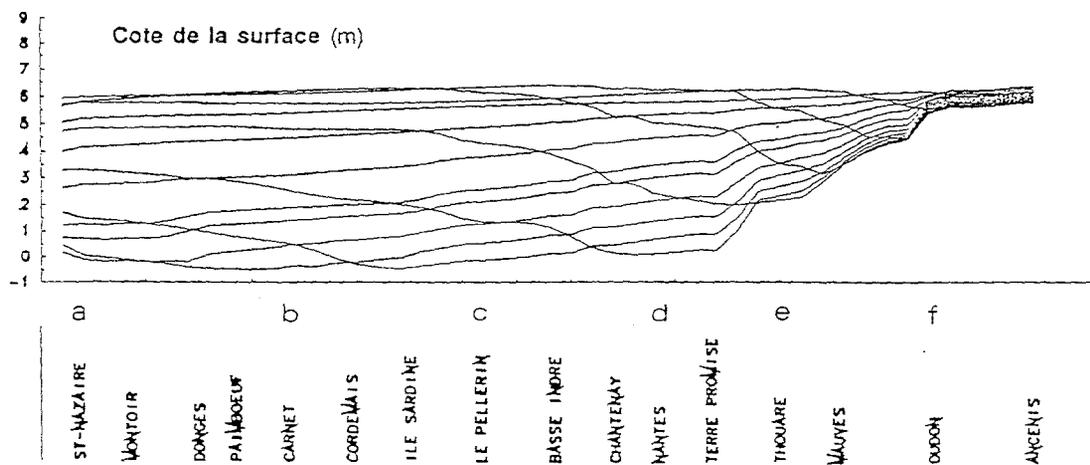


Fig. 4 : Evolution des profils longitudinaux de surface libre au cours d'une marée de vive eau, en période d'étéage (débit amont $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (1 courbe par heure)

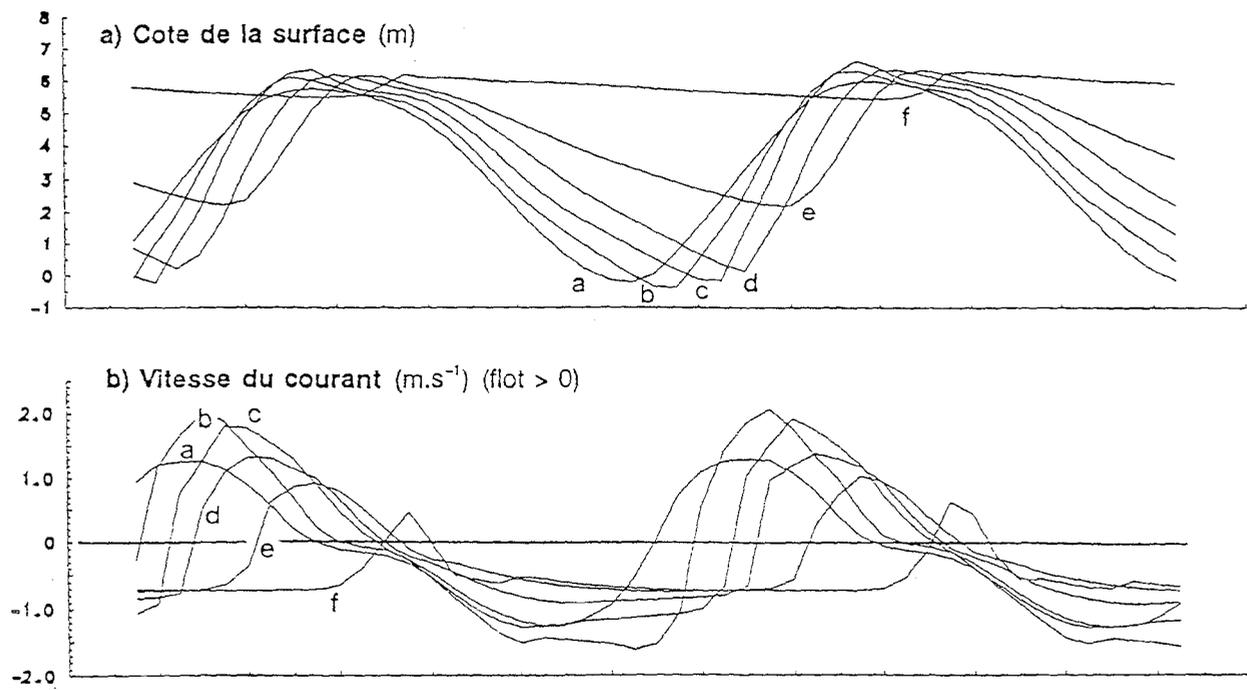


Fig. 5 : Propagation de la marée dans l'estuaire de la Loire

Vive eau - débit d'étiage ($200\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Localisation des stations sur figure 4

Origine des temps : début de simulation

2. Dynamique des sédiments

2.1 *Distribution des sédiments*

En situation d'étiage les gradients verticaux de courant, provoqués par les gradients de salinité, sont à peu près négligeables, ce qui rend raisonnable la schématisation unidimensionnelle. Les stratifications sédimentaires peuvent être fortes, mais n'entraînent pas a priori un changement important des structures courantologiques, si ce n'est un amortissement local des turbulences là où les accumulations turbides sont grandes, et donc une tendance à stabiliser les dépôts. Au contraire en crue, d'importants gradients verticaux de vitesse peuvent apparaître et induire des déplacements des structures turbides qui sont reliées principalement au courant près du fond. Pour ces raisons, c'est une situation d'étiage qui sera seule considérée dans la suite de ce chapitre.

La première utilisation du modèle consiste à rechercher les zones d'accumulation de matériaux, qu'ils soient déposés ou en suspension. La figure 6 montre l'évolution du secteur turbide au cours d'une marée de vive eau (en étiage) et pendant la morte eau suivante. On observe nettement la reproduction d'un "bouchon vaseux" en vive eau, avec des concentrations en suspension de l'ordre de 5 g.l^{-1} et le dépôt de cette turbidité sous forme de "crème de vase" en morte eau (à ce moment les matières en suspension sont considérablement réduites). Les résultats peuvent être comparés avec ceux de la figure 7 pour les turbidités et ceux de la figure 8 pour la crème de vase. On peut noter que :

- l'extension du bouchon vaseux, de l'ordre de 20 km, est correcte mais un peu trop "étalée" sur les bords (concentrations de l'ordre de 1 g.l^{-1}),
- son centre de gravité oscille au cours de la marée de $\pm 10 \text{ km}$ autour d'un point situé entre Cordemais et l'île Sardine, environ 28 km en amont de Saint-Nazaire, ce qui est en accord avec les mesures en nature (fig.7a) ou sur modèle réduit (fig. 7b),
- les concentrations calculées sont fortes mais représentent une moyenne entre valeurs en surface et au fond où dans la réalité les gradients peuvent être très élevés,
- les quantités de crème de vase sont faibles ou nulles en vive eau (en dehors de l'amont où les résultats ne sont pas significatifs en masse) tandis qu'en morte eau un dôme centré sur l'île Sardine s'est constitué. Une telle position de la "lentille" de crème de vase, ainsi que son étalement, ne sont pas en désaccord avec les résultats de la figure 8, mais cependant les observateurs considèrent que la crème est plus concentrée et légèrement plus en amont,

- la crème de vase se dépose préférentiellement en amont du bouchon vaseux, privilégiant l'étale de pleine mer qui est plus longue que celle de basse mer (cf. figure 5).

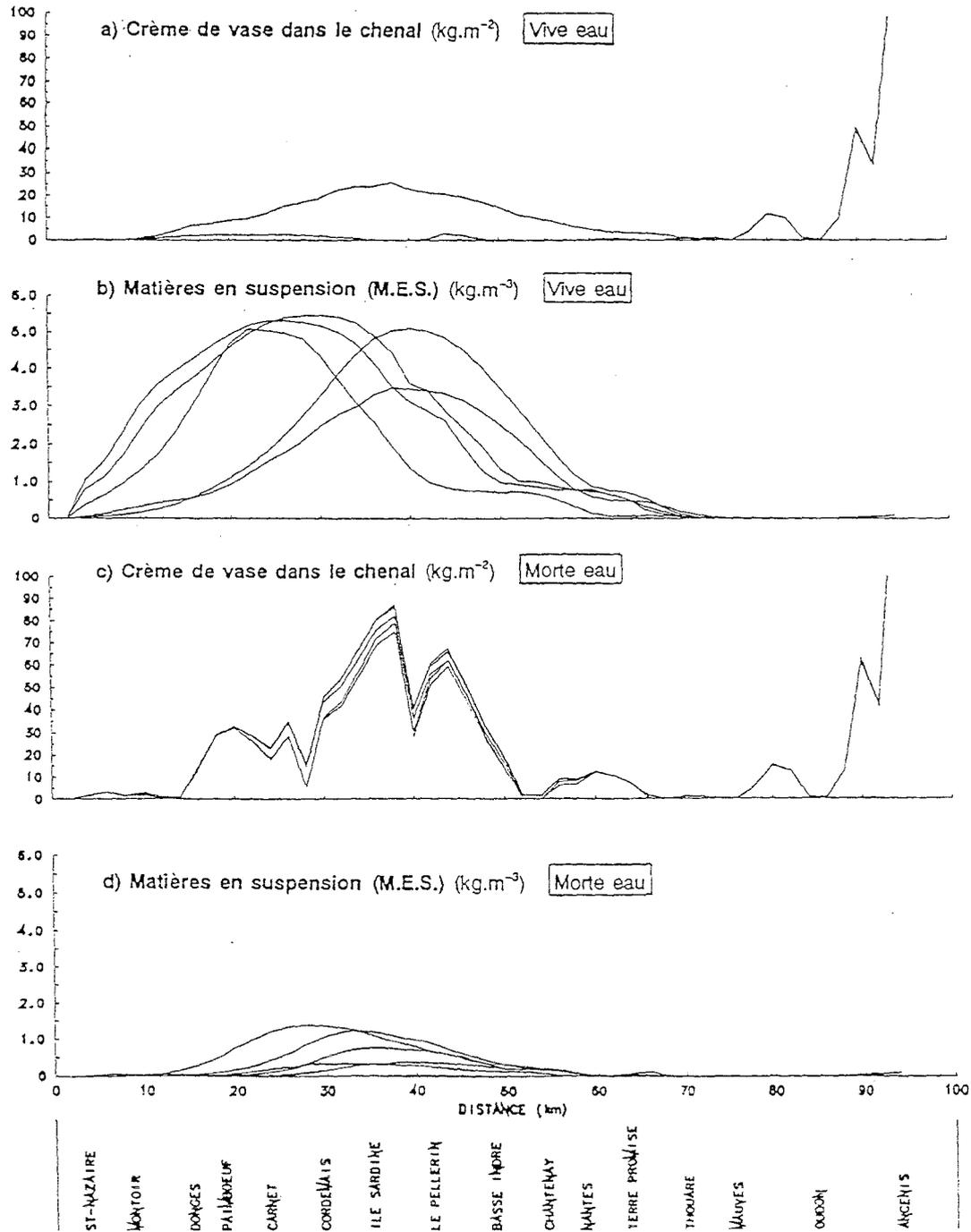
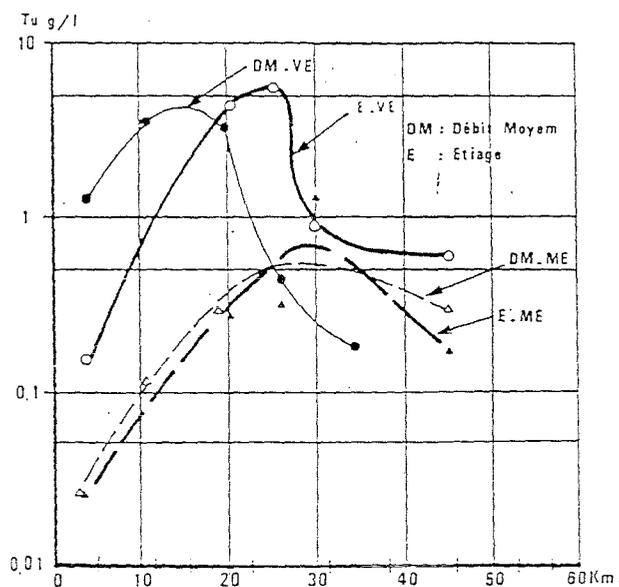
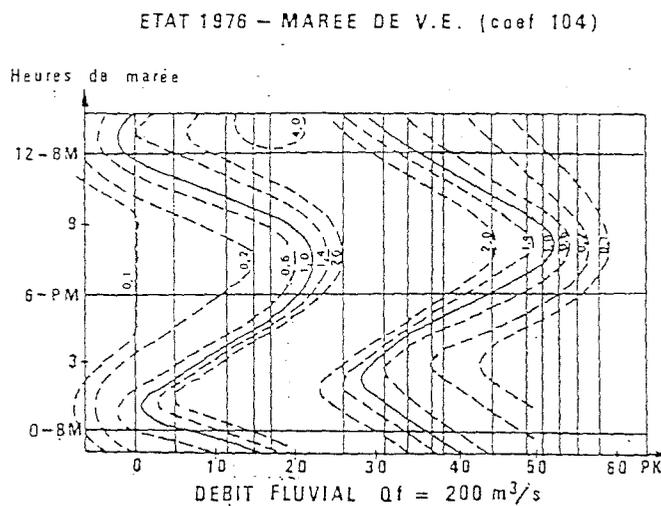


Fig. 6 : Distribution de la masse turbide dans l'estuaire de la Loire, pour un débit d'étiage ($200\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)

N.B. : Les résultats sont présentés en masse par unité de surface, et peuvent être transformés en hauteur de crème de vase après division par une concentration moyenne des dépôts. Ainsi en supposant cette concentration de l'ordre de 100kg.m^{-3} on obtient des épaisseurs de crème de l'ordre de 80cm : dans le calcul, ces hauteurs sont réparties sur toute la largeur de la maille centrale (i.e. correspondant à une cote du fond inférieure à -1m cote marine) alors que dans la réalité c'est probablement le fond du chenal seulement qui est occupé par la crème de vase, conduisant à des épaisseurs plus fortes.



a) Turbidité moyenne au cours de la marée, mesurée in situ en 1981 (d'après CSEEL, 1984)



b) Balancement amont / aval du bouchon vaseux au cours d'une marée de vive eau en étiage ($Q = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Observations sur modèle réduit (d'après L.C.H.F., 1983)

Fig. 7 : Observations des turbidités dans l'estuaire de la Loire

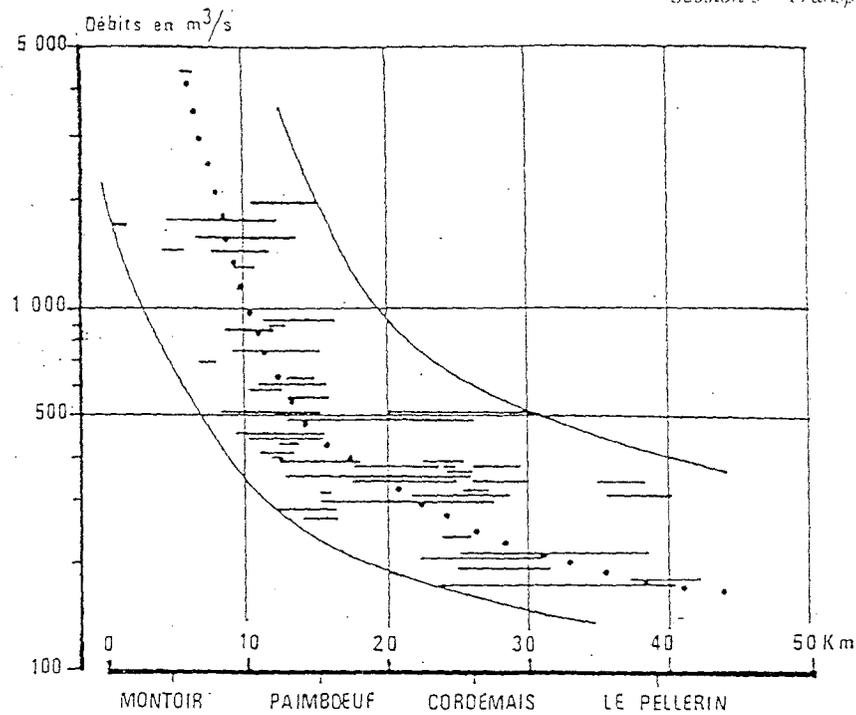


Fig. 8: Localisation de la crème de vase en fonction du débit de la Loire (d'après Gallenne, 1974).

L'évolution des matières en suspension et des quantités de crème de vase ou de vase en un point fixe est intéressante à bien des égards. Ainsi au milieu de l'estuaire, dans le bouchon vaseux, on observe (figure 9) que :

- les concentrations en matières en suspension varient de 1,5 à 6 g.l⁻¹ en vive-eau et de 0,2 à 0,7 g.l⁻¹ en morte eau,

- le maximum de concentration est atteint lors des pleines mers de marées de déchet : le flot au Pellerin qui est maximum à pleine mer (cf. figure 4) reste suffisant pour éroder la crème de vase dont le dépôt s'accroît. De même en revif, c'est au moment de la remise en suspension de la crème que les matières en suspension passent par un maximum relatif.

- le double pic de matières en suspension, net pendant la deuxième vive eau, traduit d'une part le passage du bouchon vaseux en flot ou en jusant et d'autre part la remise en suspension des dépôts frais de crème de vase,

- l'accroissement de la vase provient du tassement d'une partie de la crème de vase, simulé empiriquement chaque 24 heures, tandis que son érosion est provoquée par les courants de fin de revif, lorsque la crème de vase est complètement érodée,

- le dépôt de crème de vase, en opposition de phase avec le signal de turbidité, présente un léger retard par rapport à l'amplitude de marée, dont le minimum intervient environ 24 h avant ; d'autre part l'érosion de la crème accumulée démarre lentement pendant le revif : c'est l'effet des non-linéarités des lois sédimentologiques (effet des seuils critiques d'érosion ou dépôt, en particulier).

L'ensemble de ces phénomènes, aux conséquences environnementales parfois importantes, serait à valider par des mesures en continu in situ, inexistantes à ce jour.

2.2. Formation du bouchon vaseux - Effet des conditions initiales

Il faut noter que le bouchon vaseux présenté en figure 6 a été obtenu avec des conditions initiales très éloignées d'une configuration réelle : turbidité nulle, répartition uniforme entre Saint-Nazaire et Nantes de la crème de vase dans le "chenal" (en fait, en maille centrale). Un examen plus approfondi des structures obtenues au début du calcul (Le Hir et Karlikow, 1991) montre que l'accumulation en "cloche" des turbidités constituant le bouchon vaseux est réalisée dès les premières heures de la simulation. Le transit des matériaux vers l'amont dans la moitié aval de l'estuaire est favorisé par l'asymétrie de la marée : il semble que la suprématie du flot sur le jusant ait peu d'influence dans la mesure où en vive eau l'un et l'autre sont suffisamment forts pour remettre en suspension la crème de vase, mais c'est plutôt la durée plus longue de l'étale de pleine mer qui serait déterminante, maintenant les matériaux vers l'amont. A contrario, le transit vers l'aval dans le secteur amont de l'estuaire est lié au débit d'eau douce à évacuer.

Afin de tester la capacité du modèle à reproduire un bouchon vaseux réaliste, une simulation a été réalisée avec des conditions initiales complètement différentes. Dans le cas présenté en figure 10, on dispose initialement d'un stock infini de vase consolidée, sans crème de vase superficielle ni matières en suspension. On observe que 600 heures après, soit environ 1,5 cycle vive eau/morte eau plus tard, la distribution des matériaux sous forme de lentille de crème de vase a la même forme que celle obtenue avec les conditions initiales précédentes (qui étaient: crème de vase uniformément répartie en aval de Nantes ; pas de vase consolidée).

Cette relative indépendance entre les structures turbides et les conditions initiales montre le rôle majeur de la marée dans la "concentration" des particules sous forme de bouchon vaseux.

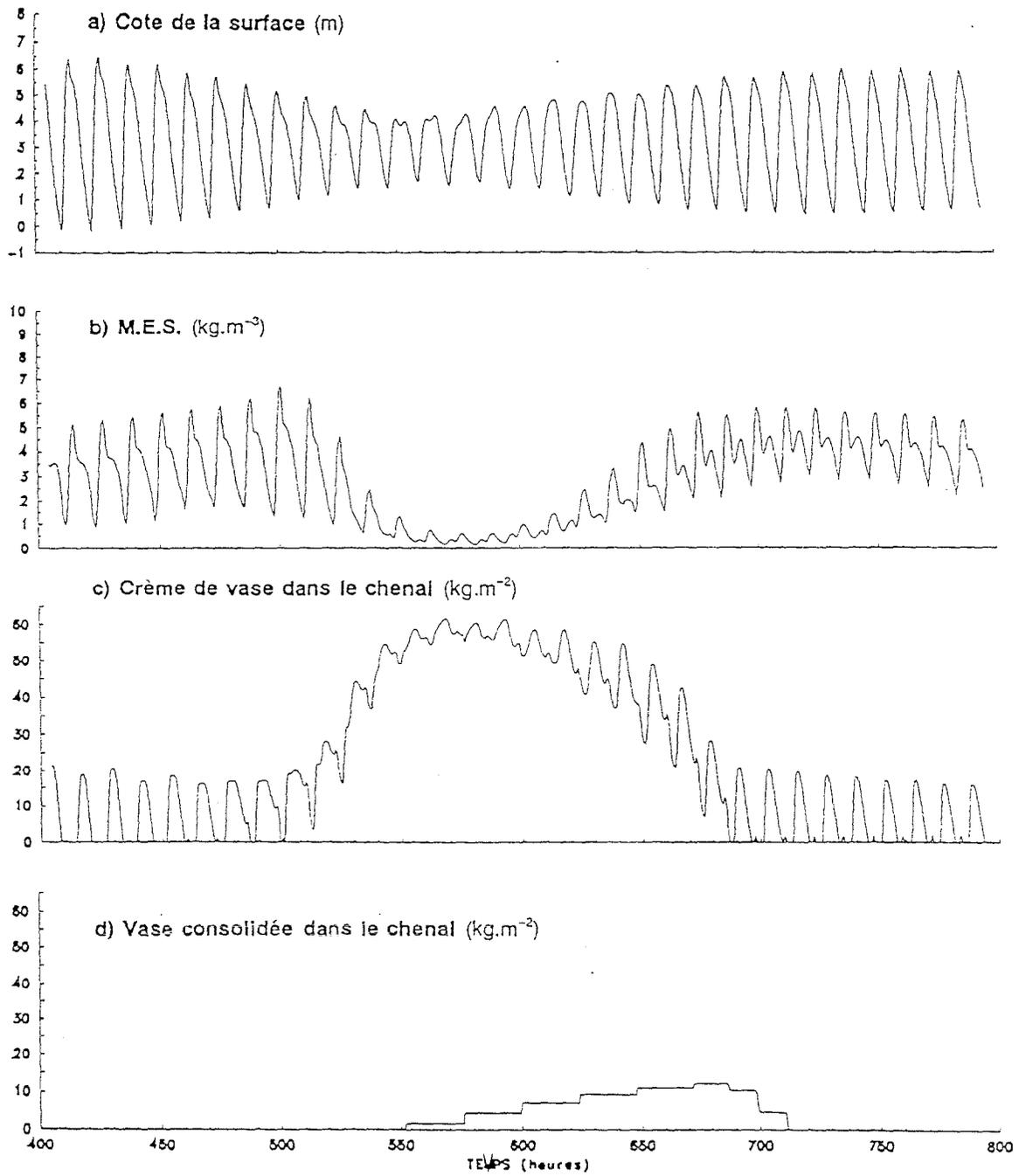


Fig. 9 : Evolution des variables sédimentologiques au Pellerin, autour d'une morte eau
(débit d'étiage : $200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$)

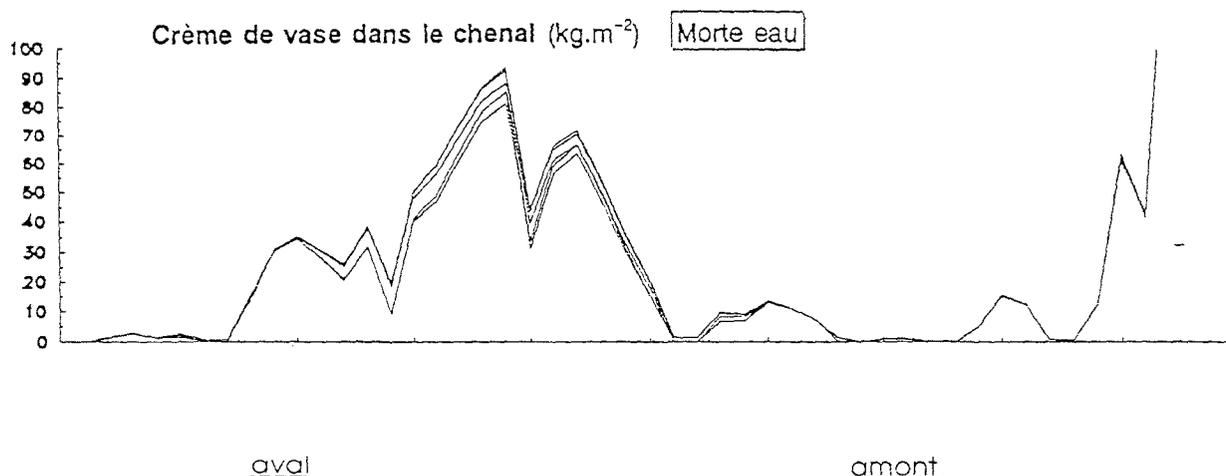


Fig. 10 : Effet d'un changement des conditions initiales sur les structures turbides calculées dans l'estuaire de la Loire. (à comparer à la figure 6 - le coefficient d'érosion de la vase consolidée est réduit d'un facteur 10 afin d'obtenir des niveaux de concentrations comparables).

2.3 Simulations à long terme

Un essai de modélisation unidimensionnelle de la dynamique des sédiments cohésifs dans l'estuaire de la Loire pendant 3,5 mois est présenté à l'aide de diagrammes d'évolution des paramètres aux points fixes (figure 11).

On note tout d'abord la remarquable périodicité des signaux, apparemment corrélés à l'amplitude de la marée. Le système a donc une réponse stationnaire et "conserve" la masse de sédiments : effectivement le flux résiduel de matières à Saint-Nazaire est de 19 000 tonnes en 3,5 mois, ce qui est peu par rapport au stock de sédiment total (vase + crème de vase + matières en suspension) qui oscille entre 800 000 et 900 000 tonnes. En outre ce flux résiduel est orienté vers l'amont, il s'agit donc d'un léger apport à l'estuaire, tout à fait réaliste en période d'étiage, bien que semble-t-il jamais quantifié en nature (LCHF, 1983). Naturellement, le modèle pourrait simuler un accroissement progressif des vases consolidées et une réduction simultanée des remises en suspension pendant l'étiage, grâce à une modification des seuils d'érosion ou du tassement. La crédibilité totale du modèle ne peut donc être obtenue qu'après une confrontation de ses résultats avec des mesures d'évolution des fonds, à court terme et en amont, dont la disponibilité n'est pas assurée.

On peut néanmoins conclure que grâce à sa conservativité le modèle semble utilisable pour les simulations longues en période d'étiage.

On remarque aussi que le dépôt de crème de vase ne se produit pas au même endroit à toutes les mortes eaux. Il apparaît qu'en période de faible décroissance de l'amplitude de marée, le dépôt a lieu préférentiellement en aval du bouchon vaseux (ici à Paimboeuf) alors qu'en période de forte décroissance (vers de très faibles coefficients de marée) le dépôt se produit surtout en amont (autour du Pellerin). En fait une étude antérieure (Le Hir et Karlikow, 1991) a montré que la position des dépôts de crème de vase par rapport au bouchon vaseux (qui, lui, varie très peu) ne dépendait pas tant de l'amplitude de la marée que de sa "forme", c'est-à-dire de la composition spectrale de l'onde qu'elle forme à Saint-Nazaire pendant la période considérée.

Ce résultat très important montre l'intérêt et le soin qu'il faut porter à la bonne représentativité de la condition limite à Saint-Nazaire. Cependant, il n'a pu encore être validé sur le terrain, faute d'enregistrement en continu des phénomènes observés.

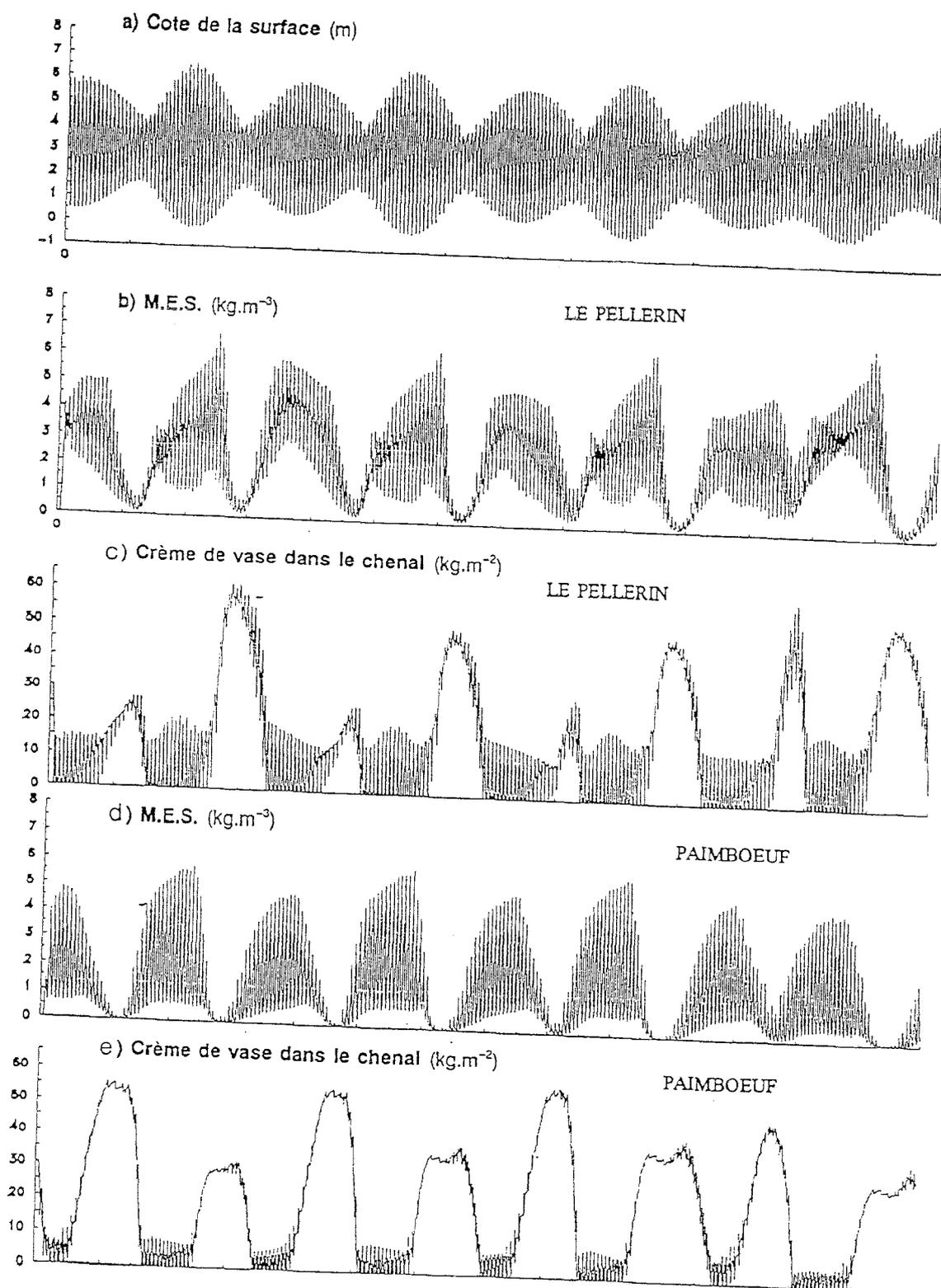


Fig. 11 : Evolution des variables sédimentologiques au PELLERIN et à PAIMBOEUF
Débit d'étiage 200m³.s⁻¹

4. CONCLUSIONS

Pour comprendre les mécanismes conduisant aux anoxies estivales de l'estuaire de la Loire une modélisation mathématique a été entreprise.

Les matières en suspension, par leur fraction organique qui consomme de l'oxygène en se dégradant, constituent une composante essentielle à étudier. C'est pourquoi il a été décidé de développer un modèle mathématique de la masse turbide de l'estuaire de la Loire. Pour simplifier l'approche et minimiser les coûts d'exploitation, un modèle unidimensionnel à d'abord été mis en oeuvre et constitue ainsi la première phase de l'étude.

Le modèle est couplé à un modèle hydrodynamique et prend en compte le transport, l'érosion et le dépôt des matériaux ainsi que le tassement des sédiments superficiels sous forme simplifiée.

Le modèle permet de reproduire correctement le bouchon vaseux et son dépôt sous forme de crème de vase en morte eau, en situation d'étiage. Les structures turbides calculées sont peu sensibles aux conditions initiales. Par contre, leur localisation dépend fortement du débit de la Loire et la remontée du bouchon vaseux lorsque l'on tend vers l'étiage a pu être simulée (Le Hir et Thouvenin, 1992). Cependant pour un débit moyen ou supérieur, la masse turbide est excessivement déportée vers l'aval, montrant bien les limites de validité de la schématisation unidimensionnelle adoptée.

En ce qui concerne les effets de la marée, une étonnante sensibilité du modèle aux changements réalistes de la forme de l'onde marée a pu être mise en évidence, en particulier pour la localisation des dépôts de crème de vase.

Le modèle semble opérationnel pour des simulations de plusieurs mois, offrant ainsi des possibilités d'utilisation pour la gestion du stock de sédiment et des contaminants associés.

Une étude de sensibilité du modèle aux différents paramètres utilisés montre l'importance de la vitesse de chute et du coefficient de frottement (donc de la calibration hydrodynamique) pour leurs effets sur les structures calculées, et met en lumière le manque de données in situ pour la calibration et la validation du modèle.

Dans cette version unidimensionnelle le modèle de transport de la masse turbide dans l'estuaire de la Loire se révèle efficace et opérationnel pour des applications aux problèmes de qualité d'eau en situation d'étiage, mais insuffisant pour simuler les phénomènes liés aux fortes stratifications comme l'amortissement de la turbulence en présence de fortes concentrations et surtout la modification des circulations de fond lorsque le débit amont augmente. Pour remédier à ces insuffisances, une schématisation plus élaborée (bidimensionnelle ou pseudo-tridimensionnelle) devra être mise en oeuvre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) BOTT A., 1989. A positive definite advection scheme obtained by non-linear renormalization of the advective fluxes. Monthly weather review, vol. 117, pp. 1006-1015.
- (2) COHEN - SOLAL E., PHAM M.H., 1989. Contribution à l'étude par modèle mathématique du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Loire. DEA et Projet de fin d'études ENSTA n° 150/1989.
- (3) CSEEL, 1984. Rapport final du Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire. Rapport CNEXO/CNRS, n° 55.
- (4) GALLENNE B., 1974. Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude de la "crème de vase". Thèse de 3e cycle Université de Nantes.
- (5) L.C H F 1983 Synthèse générale des études hydrosédimentaires de l'estuaire de la Loire. Etat actuel et perspectives d'avenir. Rapport pour le CSEEL, juillet 1983.
- (6) LE HIR P., KARLIKOW N., 1991. Balance between turbidity maximum and fluid mud in the Loire estuary. Lessons of a first mathematical modelling. Int. Symp. on the Transport of suspended sediments and its mathematical modelling. Florence Sept. 1991.
- (7) LE HIR P., THOUVENIN B., 1992. Modélisation mathématique de la masse turbide dans l'estuaire de la Loire. Phase 1 : modèle unidimensionnel. Rapport IFREMER DEL/92.02.
- (8) ROMANA A., THOUVENIN B., 1987. Oxygène dissous en Loire: faisabilité d'un modèle mathématique. Rapport IFREMER DERO/EL 87.07.

- (9) SALOMON J.C., 1976. Modèle mathématique de la propagation de la marée en estuaire et des transports sableux associés. Application aux estuaires de la Loire et de la Seine. Thèse d'état. Université Bretagne Occidentale.

- (10) SAURIAU P.G., 1991. Etude des populations de mulets dans l'estuaire de la Loire. Bilan des études 1989-1990. Rapport du Laboratoire de Biologie Marine de l'Université de Nantes pour l'APEEL.