

79-524

Simulation numérique du bouchon vaseux en estuaire. Application à la Gironde

Estuaire
Marée
Modèle
Sédiment
Turbidité
Estuary
Tide
Model
Sediment
Turbidity

Y. du Penhoat, J. C. Salomon

Laboratoire d'Océanographie Physique, Faculté des Sciences, 29283 Brest Cedex, France.

Reçu le 31/1/79, révisé le 14/3/79, accepté le 26/3/79.

RÉSUMÉ

Une note précédente de Borne de Grandpré (1979) exposait un modèle numérique des courants et de l'intrusion saline en estuaire. Ce modèle a été utilisé comme point de départ à une simulation du comportement des sédiments fins. Le modèle en différences finies qui en résulte est bidimensionnel dans le plan axe de l'estuaire, verticale, et permet de reproduire les déplacements instantanés des accumulations turbides, et leur évolution au cours de quelques cycles de marée. Dans l'application faite en Gironde, on n'a pas recherché un étalonnage très précis, on a supposé le fond affouillable en tout point, et les apports de sédiments par les limites marines et fluviales, négligeables (sur un cycle de marée) devant les quantités mises en suspension à partir du fond. Les résultats obtenus semblent réalistes, mais l'intérêt principal du modèle dans son état actuel est de permettre une compréhension des phénomènes complexes qui créent le bouchon vaseux, et de mesurer quantitativement et de manière commode, l'effet de chacun d'eux : débit fluvial, marée ou topographie de l'estuaire, par exemple.

Oceanol. Acta, 1979, 2, 3, 253-260.

ABSTRACT

Numerical simulation of estuarine turbidity maximum.
Application to the Gironde estuary

In a previous paper, Borne de Grandpré (1979) detailed a numerical model of velocities and salinity intrusion in an estuary. This model has been used as a starting point to simulate the behaviour of fine sediments. The resulting finite difference model is two dimensional, laterally averaged, and permits simulation of the instantaneous movements of the turbidity maximum and its evolution over a period of several tide cycles. In its application to the Gironde estuary, the model has not been tuned very accurately: the bottom has been supposed erodable everywhere and the input of sediment by the river or the sea considered negligible (during one tide cycle) compared to the amount eroded from the bottom. Results appear to be realistic, but the main interest of the model in its actual state is to provide a useful insight of the complicated phenomena which create the turbidity maximum and to evaluate quantitatively in a very easy way, the separate effects of such factors as river discharge, tide, or estuarine topography, for example.

Oceanol. Acta, 1979, 2, 3, 253-260.

La présence de quantités importantes de sédiments en suspension dans les estuaires, est bien connue, et les échanges entre le bouchon vaseux, et la crème de vase, ont été mis en évidence de longue date, et précisément dans l'estuaire de la Gironde, par Glangeaud. Ces

accumulations turbides posent parfois de délicats problèmes pour le maintien des chenaux de navigation ce qui a, par le passé, motivé un certain attrait pour leur étude. Aujourd'hui, un regain d'intérêt se fait jour, puisque l'on se préoccupe de la qualité des eaux.

On sait, en effet, que les sédiments en suspension interviennent de façon déterminante en limitant la pénétration de la lumière, et en consommant de grandes quantités d'oxygène pour dégrader la matière organique qu'ils contiennent. En outre, de nombreux polluants tels que les métaux lourds ou certains insecticides sont fixés par les particules solides, et donc piégés à l'intérieur du bouchon vaseux et de la crème de vase. L'effet de concentration qui en résulte, et le temps de résidence important des sédiments dans l'estuaire, font que le secteur fréquenté par le bouchon vaseux est particulièrement vulnérable aux rejets de polluants.

LE PHÉNOMÈNE DU BOUCHON VASEUX

Le transport des sédiments fins en estuaire résulte des actions globalement antagonistes de la marée et du débit fluvial. Le principal effet sédimentologique de ces processus est le piègeage qui résulte, aux environs de la limite amont de pénétration de l'eau salée, de la convergence des vitesses résiduelles près du fond (vitesses intégrées sur une période longue par rapport à la période de la marée), qui sont dirigées vers l'amont dans la partie aval de l'estuaire, et vers l'aval dans la partie amont. Les accumulations turbides généralement localisées autour de ce point nodal sont, au moins partiellement, remises en suspension par le courant au cours du flot ou du jusant, dès que la tension de cisaillement exercée sur le fond dépasse une certaine valeur critique : le seuil d'érosion. Un second seuil existe, inférieur au précédent : le seuil de décantation, en dessous duquel, bien que les courants ne soient pas forcément nuls, les sédiments en mouvement ont la faculté de se déposer.

Ces matières en suspension, de concentration généralement faible (de l'ordre du gramme par litre, ou moins), forment le bouchon vaseux dont les caractéristiques et la position géographique varient au cours de la marée, tandis que sur le fond, une zone à très forte concentration (de l'ordre de 100 g/l) : la crème de vase, reste pratiquement immobile.

En Gironde, on évalue entre 2 et 5 millions de tonnes (Allen, 1972, p. 220) la quantité de sédiments présents en suspension dans le bouchon vaseux, ce qui correspondrait à environ 2 ans d'apports fluviaux.

La description simpliste que l'on peut donner ainsi du phénomène du bouchon vaseux masque en fait notre ignorance des nombreux phénomènes qui interviennent au cours du cycle d'érosion, transport et dépôt des particules solides. Cette ignorance tient sans doute au très grand nombre de facteurs mis en jeu tels que la stratification, la variation des coefficients de marée (cycle morte-eau - vive-eau), la succession des débits fluviaux, la déformation de l'onde de marée au cours de sa propagation, et également à la mauvaise connaissance des propriétés des sédiments, d'autant plus délicates à appréhender qu'elles sont probablement différentes en nature et au laboratoire. Il faut alors recourir à des expressions empiriques, et la simulation mathématique peut se révéler ici un outil très intéressant en guidant le choix des expressions les mieux adaptées à reproduire

les phénomènes observés, notamment en séparant les effets propres à chacun des facteurs agissants.

MODÈLES EXISTANTS

Les modèles mathématiques simulant la formation d'un bouchon vaseux, et son déplacement sont encore aujourd'hui en nombre restreint :

Le premier semble avoir été celui de Odd et Owen (1972), appliqué à l'estuaire de la Tamise. Il s'agit d'un modèle à fond plan et à largeur variable, selon une fonction exponentielle de l'abscisse. L'écoulement étant divisé en deux couches d'épaisseur inégale, l'équation dynamique est résolue directement par différences finies, et l'équation de la conservation de la masse des sédiments, par la méthode des caractéristiques.

Le modèle d'Ariathurai et Krone (1976 a) est un modèle bidimensionnel en plan horizontal, toutes les variables sont intégrées sur la verticale. La distribution des vitesses et les caractéristiques du sédiment sont connues par les mesures en laboratoire de Krone. L'équation de la conservation de la masse est résolue par une méthode en éléments finis avec un terme « source » évalué à chaque pas de temps. Ce modèle a été profondément modifié pour être appliqué à l'estuaire du Savannah en remplaçant la dimension latérale par la coordonnée verticale.

Le modèle de Kuo, Nichols et Lewis (1978) est également un modèle bidimensionnel selon l'axe de l'estuaire et la verticale. L'écoulement est divisé en six couches superposées, et les équations de la dynamique, de la conservation du sel, et de la masse des sédiments en suspension sont résolues simultanément en différences finies. La simulation a été effectuée pour l'estuaire du Rappahanock.

Quelques modèles en valeurs « résiduelles » ont également été développés pour des problèmes de sédimentation à long terme. Ainsi le modèle de Christodoulou *et al.* (1974) (in Ariathurai, Krone, 1976 b), qui suppose vérifiées les hypothèses suivantes : la loi de distribution verticale des sédiments est indépendante de la concentration; la profondeur est constante; les courants sont la superposition d'une composante résiduelle et d'une composante de marée sinusoïdale.

La distribution horizontale est tout d'abord calculée par un modèle unidimensionnel en différences finies, puis cette solution est développée sur la verticale.

Le modèle de Festa et Hansen (1978), pour un estuaire schématique de profondeur constante, est un modèle bidimensionnel vertical, tenant compte de la dispersion horizontale. Le bouchon vaseux y est étudié en fonction de la vitesse de chute des sédiments, de l'intensité des apports fluviaux ou marins et de la circulation résiduelle.

Parmi les modèles en valeurs instantanées exposés ici, celui de Kuo, Nichols et Lewis est certainement le plus intéressant. Il possède néanmoins deux inconvénients majeurs et ne paraît pas applicable aux estuaires à fort marnage :

- Le premier de ces inconvénients est commun à la plupart des modèles développés sur la côte est des USA.

Le marnage étant faible, l'adoption d'un pas de discrétisation vertical de l'ordre du mètre (ici $\Delta z = 2$ m), permet de mener le calcul sur un quadrillage figé, les variations de la cote de la surface étant notablement plus faibles que le pas Δz choisi. Dans le cas des estuaires dont le marnage a une valeur voisine de la hauteur d'eau totale, cette technique est inutilisable et force est d'introduire un procédé qui permette de redéfinir une nouvelle grille de calcul au fur et à mesure de la variation du niveau de l'eau.

• Par ailleurs, s'agissant d'un modèle en valeurs moyennes intégrées sur des mailles d'épaisseur Δz , les limites du domaine d'intégration sont définies par une série de sauts discrets d'amplitude Δx , Δz . Il en résulte une forme du fond en marches d'escalier qui n'est certainement pas sans influence sur les résultats qui peuvent être obtenus.

Le modèle que l'on a réalisé ici, remédie à ces défauts en recherchant des solutions locales sur un quadrillage de dimension variable, prenant en compte la forme exacte de la surface et du fond.

Quant aux modèles en valeur résiduelle, ils sont handicapés par la difficulté fondamentale de relier les phénomènes sédimentaires à la moyenne des grandeurs hydrodynamiques mises en jeu. Bien que les accumulations turbides, sous leur forme observable, résultent de la succession de très nombreuses périodes d'érosion, de transport, et de sédimentation, il paraît douteux que de tels modèles puissent reproduire les mécanismes sédimentaires estuariens aussi longtemps que l'opération « valeur moyenne de ces mécanismes sur la marée » ne pourra être faite avec suffisamment de précision. On voit mal, par exemple, comment on pourrait, dans l'état actuel de nos connaissances, relier la turbidité à la vitesse moyenne, sans faire intervenir l'asymétrie de la marée ou l'effet prépondérant des valeurs maximales du courant.

En ce sens, le modèle présenté devrait contribuer à faire mieux comprendre les phénomènes instantanés et peut être aider à réaliser ultérieurement des modèles en valeur résiduelle plus crédibles.

MODÈLE DES COURANTS ET DE L'INTRUSION SALINE

La simulation est effectuée par un modèle bidimensionnel selon l'axe de l'estuaire, et la verticale. L'abandon de la dimension latérale est pratiquement imposé par la difficulté actuelle de réaliser des modèles mathématiques tridimensionnels, et de les étalonner en fonction des mesures disponibles. Par ailleurs, les zones fréquentées par ces accumulations turbides sont généralement relativement éloignées de la mer, et situées dans des secteurs assez étroits. Le cas particulier de la Gironde est probablement l'un des moins favorables du littoral français, de ce point de vue.

Le système d'équations, après intégration sur la largeur, est donc le suivant :

• L'équation de continuité

$$\frac{\partial (bu)}{\partial x} + b \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

• L'équation de continuité intégrée sur la verticale

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(b \int_{-\xi}^{H_0} u dz \right) = 0. \quad (2)$$

• L'équation du mouvement selon ox

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0. \quad (3)$$

• L'équation du mouvement selon oz , réduite à l'équation de l'hydrostatique.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g. \quad (4)$$

• L'équation de la conservation de la masse de sel

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} - \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(b K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

avec :

- ox dirigé vers l'aval, et oz vers le bas;
- $u(x, z, t)$, $w(x, z, t)$ composantes horizontale et verticale de la vitesse U ;
- $S(x, z, t)$ salinité;
- $P(x, z, t)$ pression;
- $\rho(x, z, t)$ densité;
- $N_z(x, z, t)$ coefficient vertical de dispersion de la quantité de mouvement;
- $b(x)$ largeur;
- $\zeta(x, t)$ cote de la surface libre;
- $K_x(x, t)$ coefficient horizontal de dispersion pour la matière;
- $K_z(x, z, t)$ coefficient vertical de dispersion pour la matière.

On supposera que les turbidités atteintes dans le bouchon vaseux, n'ont pas une valeur suffisante pour affecter notablement la masse volumique de l'eau saumâtre. Cette hypothèse n'est pas obligatoire, elle a cependant été introduite ici, pour séparer le calcul des vitesses et des salinités (qui se fait alors sans tenir compte des turbidités) du calcul de l'effet des courants sur le comportement des sédiments.

Ce système est résolu en différences finies, par un schéma mixte implicite-explicite, dont le réseau de calcul de la composante horizontale de la vitesse est décalé par rapport aux points de calcul de la salinité, et de la composante verticale du courant.

Le schéma utilisé est très proche de celui de Hamilton (1975). Sa grande particularité est de tenir compte de la forme exacte de la surface et du fond, et de résoudre le système en termes de valeurs locales et non de valeurs moyennes dans une maille ou une couche d'eau. En pratique, on définit des points de calcul en dessous

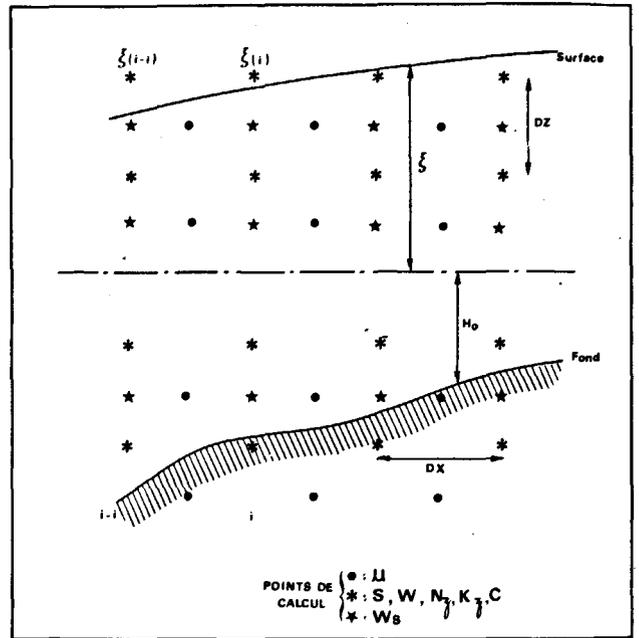
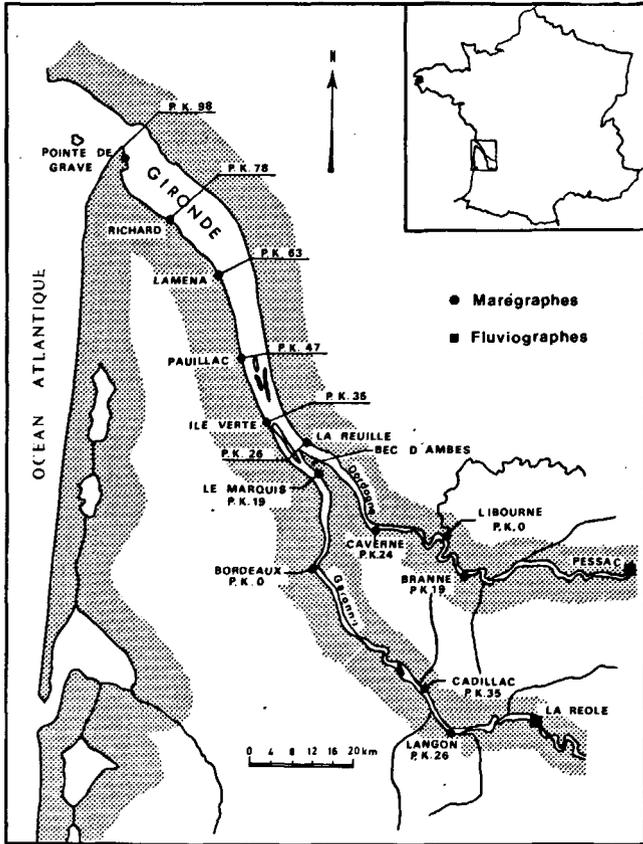


Figure 1
Estuaire de la Gironde.
Gironde estuary.

Figure 2
Réseau des points de calcul.
Finite difference grid.

Figure 3
Profils verticaux de salinité et de vitesse heure par heure, marée moyenne-débit fluvial 980 m³/s.
Vertical profiles of salinity and velocities plotted hour by hour.

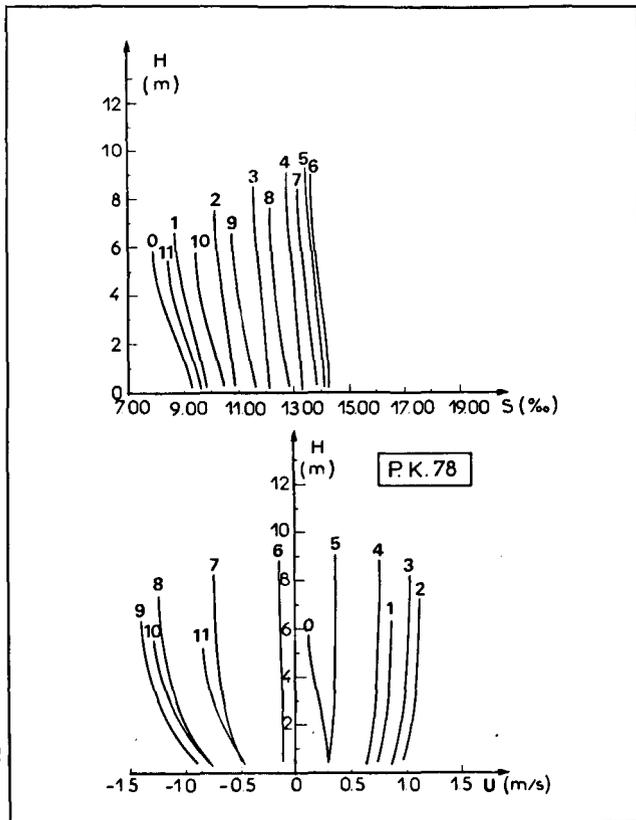
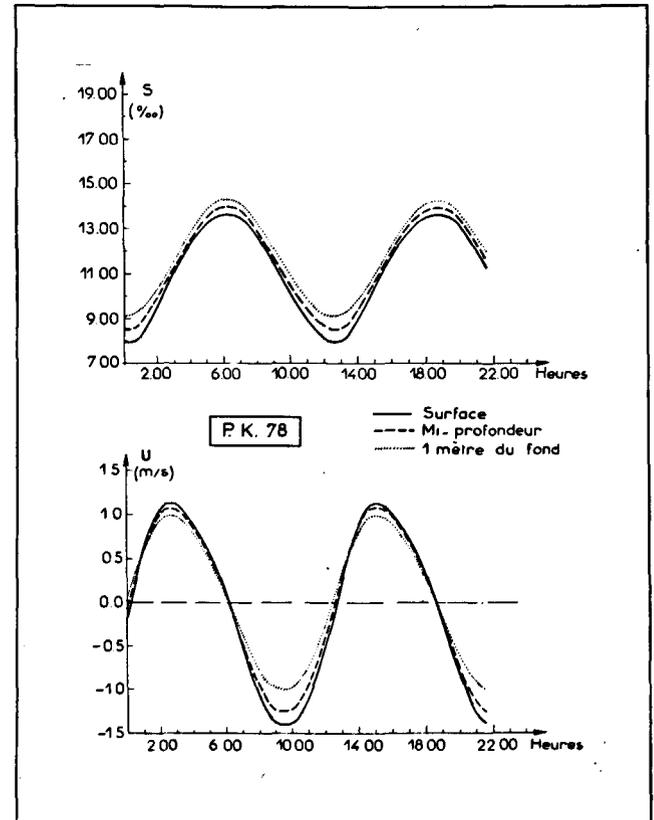


Figure 4
Évolution des salinités et des vitesses au cours du temps, marée moyenne-débit fluvial 980 m³/s.
Computed salinity and velocities at P.K. 78.



du fond, et au-dessus de la surface, où sont calculées des valeurs virtuelles qui n'ont aucune réalité propre, mais servent à effectuer les calculs près des limites inférieures et supérieures (fig. 2). Tous détails techniques relatifs à cette première partie du modèle sont exposés dans Borne de Grandpré, du Penhoat (1978) et Borne de Grandpré (1979).

Les figures 3 et 4, issues de cette dernière publication, sont un exemple des résultats obtenus en Gironde au PK 78, lieu-dit « Richard » (fig. 1), pour une marée moyenne et un débit fluvial de 980 m³/s.

MODÈLE DE BOUCHON VASEUX

Pour simuler le comportement des éléments en suspension il faut adjoindre au système d'équations qui a été considéré dans la première partie, l'équation (6) de conservation de la masse des sédiments

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (W_s c) \\ = \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x b \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Cette relation est très semblable à l'équation de la conservation de la masse de sel. Elle en diffère par l'apparition d'une nouvelle inconnue : la vitesse de chute des particules W_s ,

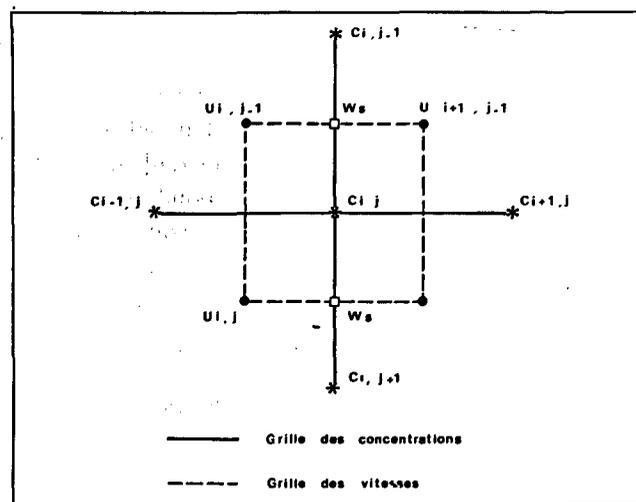
$$W_s = k C^{3/2} S^{1/2} \quad (\text{Bonnefille et al., 1976}).$$

Le réseau de calcul et la technique de résolution sont identiques à ceux utilisés pour la dispersion du sel. La turbidité est calculée aux mêmes points que la salinité, seule la vitesse de chute est localisée entre les points de calcul de la salinité.

Les pas de résolution adoptés sont :

$$\Delta t = 2 \text{ minutes}, \quad \Delta x = 2 \text{ km}, \quad \Delta z = 1 \text{ m}.$$

Figure 5
Détail de la grille de calcul.
Detail of the finite difference grid.



Les indices i et j correspondent respectivement à la discrétisation de l'abscisse et de la verticale.

L'équation (6) est écrite sous la forme :

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^{t+\Delta t} - C_{i,j}^t}{\Delta t} \\ = - \frac{1}{4 \Delta x} \{ U_1 (C_{i+1,j}^t - C_{i,j}^t) \\ + U_2 (C_{i,j}^t - C_{i-1,j}^t) + (U_1 + U_2) \Delta C \} \\ - W_{i,j}^t \left(\frac{C_{i,j+1}^t - C_{i,j-1}^t}{2 \Delta z} \right) \\ - \frac{1}{\Delta z} \left\{ W_{si,j+1}^t \left(\frac{C_{i,j+1}^t + C_{i,j}^t}{2} \right) \right. \\ \left. - W_{si,j}^t \left(\frac{C_{i,j}^t + C_{i,j-1}^t}{2} \right) \right\} \\ + \frac{1}{2 \Delta z^2} \{ (K_{zi,j+1}^t + K_{zi,j}^t) (C_{i,j+1}^t - C_{i,j}^t) \\ - (K_{zi,j}^t + K_{zi,j-1}^t) (C_{i,j}^{t+\Delta t} - C_{i,j-1}^{t+\Delta t}) \} \\ + \frac{1}{b_i \Delta x^2} \{ b_{i+1} K_{xi+1}^t (C_{i+1,j}^t - C_{i,j}^t) \\ - b_{i-1} K_{xi-1}^t (C_{i,j}^{t+\Delta t} - C_{i,j-1}^{t+\Delta t}) \}, \end{aligned}$$

avec

$$U_1 = \frac{u_{i+1,j}^t + u_{i+1,j-1}^t}{2} \quad \text{et} \quad U_2 = \frac{u_{i,j}^t + u_{i,j-1}^t}{2},$$

$$\Delta C = \begin{cases} C_{i+1,j}^t - C_{i,j}^t & \text{si } U_1 + U_2 < 0, \\ C_{i,j}^t - C_{i-1,j}^t & \text{si } U_1 + U_2 > 0. \end{cases}$$

Conditions aux limites

Surface

La condition d'un flux de sédiment nul à travers la surface s'écrit :

$$K_z \frac{\partial c}{\partial z} - W_s C = 0.$$

Fond

Selon l'intensité de la contrainte de cisaillement, le fond peut apparaître soit imperméable aux sédiments, soit comme une source ou un puits

$$K_z \frac{\partial c}{\partial z} - W_s C + \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\text{érosion}} + \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\text{dépôt}} = 0,$$

où les termes d'érosion et de dépôt ont été pris sous la forme

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{\text{dépôt}} = W_s C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}} \right) \quad \text{si } \tau < \tau_{cd},$$

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{\text{érosion}} = -M \left(\frac{\tau}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad \text{si } \tau > \tau_{ce}.$$

La tension critique de dépôt (τ_{cd}) a été fixée ici à $0,2 \text{ N/m}^2$. La tension critique d'érosion (τ_{ce}) peut être évaluée à partir du diagramme de Postma, où intervient la notion de tassement (âge) du dépôt. Dans ce modèle, l'âge du dépôt n'est pas considéré, et le tassement est traité comme un paramètre à déterminer lors de l'étalonnage du modèle.

En nous basant sur des mesures effectuées au LCHF (Migniot, 1968), sur des vases de la Gironde, nous avons finalement introduit dans le modèle des valeurs comprises entre 5 et $0,5 \text{ N/m}^2$. Cette dernière valeur correspondant à une crème de vase de concentration environ 100 g/l .

Aval-Amont

Ne disposant d'aucune information sur la quantité de sédiment pénétrant dans la Gironde par l'amont ou l'aval, au cours d'une marée, mais celle-ci étant à l'évidence très inférieure au stock oscillant et au volume des remises en suspension au sein du bouchon vaseux, l'apport de sédiment par ces limites a été supposé nul :

Aval : $c=0$ en flot;

Amont : $c=0$ en jusant.

De ce fait, les résultats obtenus près de ces limites sont considérés comme suspects, et ne sont pas reproduits ici pour les quatre premières et dernières sections (soit 8 km).

Conditions initiales

La turbidité à l'instant initial du calcul peut être pratiquement quelconque, l'expérience nous ayant montré que l'équilibre entre la dispersion verticale et la chute des sédiments par gravité est atteint très rapidement. Lors de la simulation dont les résultats sont présentés plus loin, partant d'une concentration uniforme en tout point de 1 g/l , la solution a été considérée comme stationnaire après trois à quatre cycles de marée.

Définition des paramètres

L'expression de K_z est très semblable à celle qui a été utilisée pour le coefficient de dispersion du sel (Borne de Grandpré, 1979), mais introduit également l'effet de stratification par les sédiments

$$K_z = (K_0 + H |U| \sqrt{k} (K_1 f(z) + K_2) (1 + R_i)^{-1,75}) \times \left(\frac{k'}{\Delta c / \Delta z + k''} \right),$$

K_0 , K_1 , K_2 , k' , et k'' sont des constantes d'étalonnage.

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

R_i nombre de Richardson tel que $R_i = (ag H \Delta S) / U^2$, avec $\Delta S = \text{salinité fond} - \text{salinité surface}$.

Le coefficient K_x lié à la dispersion horizontale, représente l'effet des fluctuations turbulentes à haute fréquence et de l'intégration de l'équation de la conservation de la masse de sédiments sur la largeur de l'estuaire. Peu d'informations précises existent, à l'heure actuelle, sur

Figure 6

Évolution des concentrations en fonction du temps : a, en amont du bouchon vaseux; b, dans le bouchon vaseux.

Turbidity as a function of time: a, upstream of the maximum; b, inside the maximum.

la valeur de ce coefficient qui, fort heureusement n'est pas critique puisque le terme d'advection horizontale est très supérieur au terme de dispersion horizontale, en valeur instantanée.

Kuo *et al.*, confrontés à ce même problème, ont adopté une valeur de K_x proportionnelle à K_z , telle que la solution ne soit pas significativement influencée par ce terme, sinon par un certain lissage des irrégularités locales

$$K_x = 10^5 \cdot K_z.$$

Dans le modèle présenté ici, nous avons adopté la formule de Pritchard et Okubo (*in* Daubert, Malherbe, 1974), valable en toute rigueur pour un écoulement unidimensionnel

$$K_x = 65 UH + 10.$$

Compte tenu des valeurs de K_z issues de la formule présentée plus haut (avec $K_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, $K_1 = 1,3 \cdot 10^{-4}$, et $K_2 = 1,4 \cdot 10^{-3}$), généralement comprises entre 10^{-2} et $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, l'ordre de grandeur du quotient K_x/K_z est de 10^4 .

Malgré ce rapport relativement élevé, il apparaît, ainsi que cela était attendu, que les termes de dispersion verticale et d'advection horizontale sont très supérieurs à la dispersion horizontale qui pourrait fort bien être supposée nulle pour peu que le modèle ne simule pas un nombre de marées trop important. On peut effectivement supposer que le flux de sédiment ainsi négligé puisse à long terme influencer sur le résultat.

RÉSULTATS

La simulation présentée ici a été effectuée pour une marée moyenne (coefficient 70), et un débit fluvial relativement important de $980 \text{ m}^3/\text{s}$. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats des mesures publiées par Bonnefille (1970).

Le fond a été supposé en tout point indéfiniment affouillable et la tension critique d'érosion constante au cours du temps.

La figure 6 a présente les turbidités calculées et mesurées, en un point situé en amont du point nodal. On note que les turbidités ne présentent qu'un seul maximum, un peu avant la fin du flot, qui correspond aux apports du bouchon vaseux qui migre depuis l'aval.

Les résultats relatifs aux PK 67 et 75 (fig. 6 b, 7 a), concernent des secteurs situés à l'intérieur du bouchon

Figure 7

Évolution des concentrations en fonction du temps : a, dans le bouchon vaseux; b, en aval du bouchon vaseux.

Turbidity as a function of time: a, inside the maximum; b, downstream of the maximum.

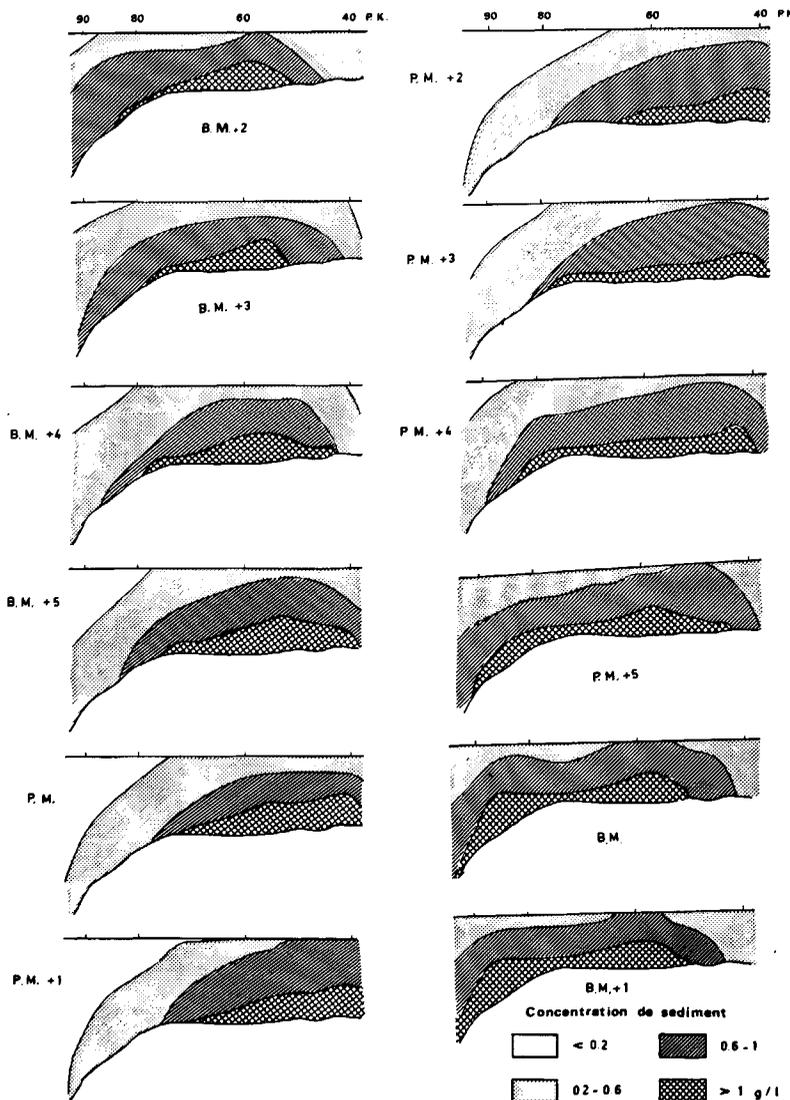
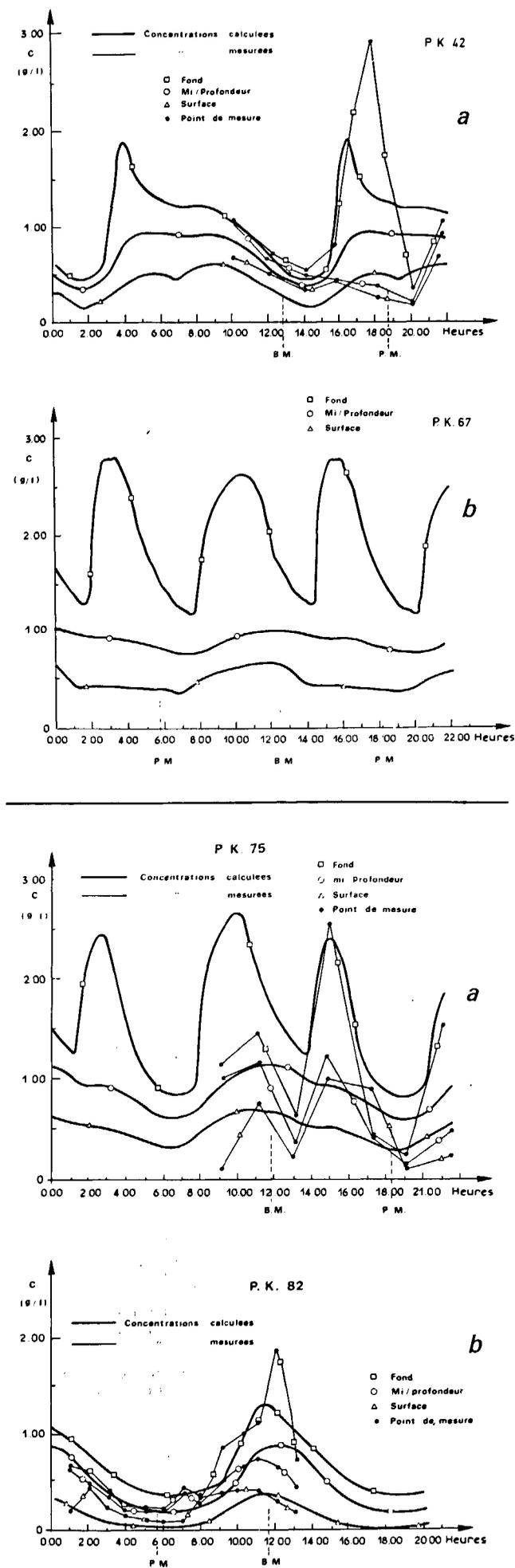
vaseux. On y observe deux maximums, en flot et en jusant qui correspondent aux plus fortes valeurs du courant, entraînant une remise en suspension importante.

La figure 7 b présente les résultats obtenus au PK 82, c'est-à-dire en aval des fortes turbidités. Le maximum unique est observé cette fois lors de l'étalement de jusant.

Le modèle reproduit donc au long de l'estuaire, le décalage progressif des fortes turbidités par rapport au cycle des courants, depuis l'étalement de flot dans la partie amont, jusqu'à l'étalement de jusant en aval, en passant par deux maximums aux environs du point nodal.

Au cours de cette marée (fig. 8) la masse des sédiments en suspension varie de 2,7 à 3,5 millions de tonnes, valeur tout à fait compatible avec l'évaluation de 2 à 5 millions de tonnes selon les marées et les débits, citée plus haut (Allen, 1972). Une autre simulation pour une même marée moyenne et un débit fluvial très faible ($6 \text{ m}^3/\text{s}$) a conduit à des valeurs comprises entre 2,3 et 3,1 millions de tonnes.

Figure 8
Évolution longitudinale du bouchon vaseux en crue, pour une marée moyenne.
Longitudinal evolution of the turbidity maximum, for an important river runoff and a mean tide.



L'un des défauts du modèle, apparent sur les résultats présentés, semble être une décantation plus faible que dans la nature ce qui confirmerait que les vitesses de chute des sédiments en nature sont différentes de ce qu'elles sont au laboratoire.

Plusieurs essais ont été réalisés à ce propos dont il ressort qu'une augmentation de la vitesse de chute diminue la quantité de sédiments en suspension et augmente la stratification. L'influence du coefficient de dispersion vertical est inverse de celui de la vitesse de chute : une augmentation entraîne une stratification plus faible, et une augmentation de la masse du bouchon vaseux.

D'autres essais sont actuellement en cours, qui ont pour but, en faisant varier divers paramètres tels que le débit fluvial, le coefficient de marée, la géométrie des berges et du fond, ou bien la différence de densité des masses d'eau par exemple, de séparer les effets respectifs de chacun des facteurs qui contribuent au mécanisme du bouchon vaseux.

Le principal handicap du modèle, dans la version actuelle, provient de ce que le terme τ_{ce} étant donné *a priori*, éventuellement variable en fonction de l'abscisse, mais constant au cours du temps, cette donnée résume une part des résultats obtenus. L'un des enseignements tirés du modèle à ce propos est que la mémoire du système est très courte en ce qui concerne l'ajustement des turbidités en fonction des courants, puisque quatre marées suffisent à obtenir une solution stationnaire, mais elle serait certainement plus importante si on faisait intervenir la nature du fond, qui à elle seule doit donc résumer les événements sédimentologiques antérieurs.

Le modèle montre bien que pour un coefficient de marée et un débit fluvial fixés, la solution obtenue varie en fonction de la répartition des tensions critiques d'érosion sur le fond, c'est-à-dire en fonction des événements fluviaux et marins qui ont précédé, et qui ont réparti sur le fond d'une certaine manière le stock de vase disponible.

Un des développements futurs du modèle devra donc être de gérer une masse de sédiments fixée *a priori*, en fonction des bilans locaux érosion-dépôt, ce qui permettra de faire évoluer les tensions critiques d'érosion au cours de la simulation et de faire intervenir d'autres phénomènes non pris en compte ici tels que le tassement des dépôts selon leur âge, et la disparition éventuelle de tout sédiment érodable dans certains secteurs.

CONCLUSIONS

Le modèle mathématique de transport des sédiments, présenté ici, permet en ne faisant qu'un minimum d'hypothèses simplificatrices, de simuler les évolutions

(déplacements, taille, intensité...) du bouchon vaseux, d'une façon réaliste. Ce modèle n'est pas encore sous sa forme définitive, il pourrait être amélioré en introduisant une fonction de tassement des dépôts, ainsi qu'une expression de la vitesse de chute en nature plus exacte. Toutefois, dans sa forme actuelle, il permet de mieux comprendre les phénomènes qui se déroulent en nature, en quantifiant et en visualisant de manière très commode l'effet de la marée, l'effet du débit fluvial, ou bien encore les conséquences d'une modification morphologique de l'estuaire (dragages, endiguements...).

Nous pensons qu'en ce sens, il constitue déjà un outil pédagogique, et pourrait bientôt revêtir un intérêt pour la gestion et l'aménagement d'un estuaire tel que celui de la Gironde.

RÉFÉRENCES

- Allen G. P., 1972. Étude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde, *thèse Doctorat ès Sci. Nat.*, Bordeaux, 315 p.
- Ariathurai R., Krone R. B., 1976 a. Finite elements model for cohesive sediment transport, *ASCE J. Hydraul. Div.*, HY 3, 323-338.
- Ariathurai R., Krone R. B., 1976 b. Mathematical modelling of sediment transport in estuaries, in *Estuarine Processes*, vol. II, Martin Wiley, 98-106.
- Bonnefille R., 1970. Mesures de vitesses, salinité et concentration en Gironde en 1969, Rapport EDF, n° 10, LNH, 64 p.
- Bonnefille R., Simoes-Teles M., 1974. Programme MATUSA de calcul de la propagation de la marée, de la salinité, et de la turbidité dans un estuaire, Rapport EDF, E/30/76/, n° 11, 25 p.
- Borne de Grandpré C. de, Penhoat Y. du, 1978. Contribution à l'étude dynamique de la marée dans l'estuaire de la Gironde, *thèse 3^e cycle*, Univ. Bretagne-Occidentale, Brest, 200 p.
- Borne de Grandpré C. de, 1979. Modèle bidimensionnel en temps réel de la circulation verticale estuarienne. Application à la Gironde, *Oceanol. Acta*, 2, 1, 61-68.
- Daubert A., Malherbe J. F., 1974. Évaluation de la capacité de réfrigération d'un estuaire. Exemple de la Loire, *Houille Blanche*, 1/2, 35-45.
- Festa J., Hansen D., 1978. Turbidity maxima in partially mixed estuaries: A two-dimensional numerical model, *Estuarine Coastal Mar. Sci.*, 7, 347-359.
- Hamilton P., 1975. A numerical model of vertical circulation of tidal estuaries and its application to the Rotterdam Waterway, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 40, 1-21.
- Kuo A., Nichols M., Lewis J., 1978. Modelling sediment movement in the turbidity maximum of an estuary, *V. Inst. Mar. Sci.*, 111, 76 p.
- Migniot C., 1968. Études des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques, *Houille Blanche*, 7, 591-620.
- Odd N. V. M., Owen M. W., 1972. A two-layer model of mud transport in the Thames estuary, *Proc. Instit. Civil Eng. London*, 175-205.
- Salomon J. C., 1977. Note de synthèse sur les modèles de l'hydrodynamique estuarienne. Rapport au CNEXO-COB, n° 77/5499, Brest, 107 p.