



Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine

Isabelle Brenon et Pierre Le Hir

Laboratoire Chimie des Contaminants et Modélisation
IFREMER/Centre de BREST - B.P. 70 - 29280 PLOUZANE

Abstract

A two-dimensional depth-averaged model for tide propagation and fine sediment transport is used to simulate the turbidity maximum in the Seine estuary. Hydrodynamic results are compared with field data in order to validate the model. Whatever the initial conditions are, the formation and the behaviour of the turbidity maximum during spring tides is correctly reproduced according to field data. During neap tides, deposition patterns roughly correlated with the low velocities are in good agreement with observations. A provisional sediment budget for mean term simulations (four months) has been attempted: although qualitatively coherent, it points out the need for accounting for consolidation processes and the potential role of wave resuspension.

1. Introduction

Dans les estuaires, l'asymétrie de la propagation de l'onde de marée et les différences de densité entre eau douce et eau de mer produisent une accumulation des particules en suspension, couramment appelée "bouchon vaseux" (Allen *et al.*, 1980). Ce phénomène a une grande importance pour le comportement des contaminants et la gestion des dragages d'entretien des chenaux de navigation.

L'estuaire de la Seine est un estuaire macrotidal (7 m de marnage) avec un débit moyen d'environ 500 m³/s. Ouvert à l'ouest, il est fortement soumis aux houles du large et aux clapots dus aux vents locaux. Il est constitué du chenal de navigation du Port Autonome de Rouen (endigué jusqu'à la sortie de l'estuaire) et, de part et d'autres, de zones peu profondes en voie de comblement par des sables au sud et des vases au nord (Avoine, 1994). La dynamique du bouchon vaseux a été considérablement modifiée par l'évolution morphologique de l'estuaire et par les aménagements de ces dernières années.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du programme "Seine Aval" dont l'un des objectifs est le devenir en baie de Seine des contaminants apportés par la Seine. Pour cela, il est nécessaire de connaître le comportement des masses d'eau et des particules en suspension susceptibles de piéger des contaminants dans l'estuaire et la baie de Seine orientale. Afin de prévoir l'évolution des matières en suspension et de gérer le stock de sédiments, un modèle bidimensionnel horizontal (2DH) simulant le transport des sédiments fins et le comportement du bouchon vaseux a donc été développé. La prise en compte des seuls sédiments fins se justifie par

l'extension croissante et dominante des bancs de vase dans l'estuaire (Avoine, 1994), par leur rôle prépondérant dans l'adsorption des contaminants et par leur capacité à être remis en suspension.

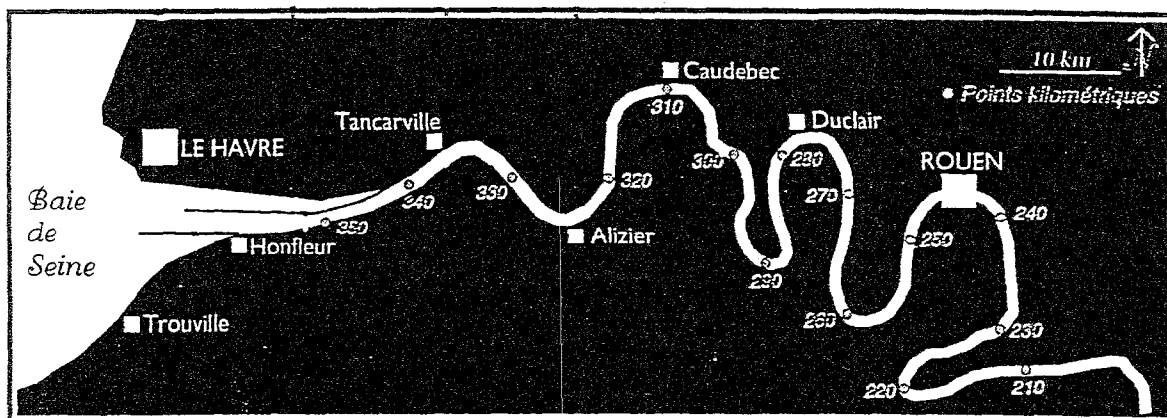


Figure 1 : L'estuaire de la Seine

2. Présentation du modèle

2.1. Le modèle hydrodynamique

Pour le calcul des hauteurs d'eau et des courants, les équations de la mécanique des fluides, intégrées sur la verticale (système de Saint-Venant), sont résolues selon une méthode implicite aux différences finies en directions alternées. Le modèle bidimensionnel horizontal utilise une bathymétrie réalisée en 1993 par le Port Autonome de Rouen dans l'estuaire aval et des relevés de 1988 dans l'estuaire amont. Pour réduire les temps de calcul tout en gardant une grande résolution dans la zone d'étude, un maillage variable (mailles de 200 à 4000 m) a été utilisé (figure 2). Le modèle tient compte des bancs découvrants de façon automatique.

A l'aval, les conditions aux limites en hauteur d'eau ont été introduites sous la forme d'une marée réelle calculée à l'aide de la composition harmonique de l'onde de marée. La difficulté consiste à générer le long des limites nord et ouest du modèle des déphasages réalistes pour chaque onde composant la marée, car les circulations induites en dépendent de façon très sensible. Les amplitudes et les phases des 26 ondes principales ont été déterminées à l'aide d'une mesure marégraphique du CNEOX (Bertherat *et al.*, 1981) et des atlas des composantes harmoniques de la marée en Manche établis par modèle physique (Chabert d'Hières *et al.*, 1978) ou par modèle numérique (Fornerino, 1982). A l'amont, un débit quotidien d'eau douce est introduit.

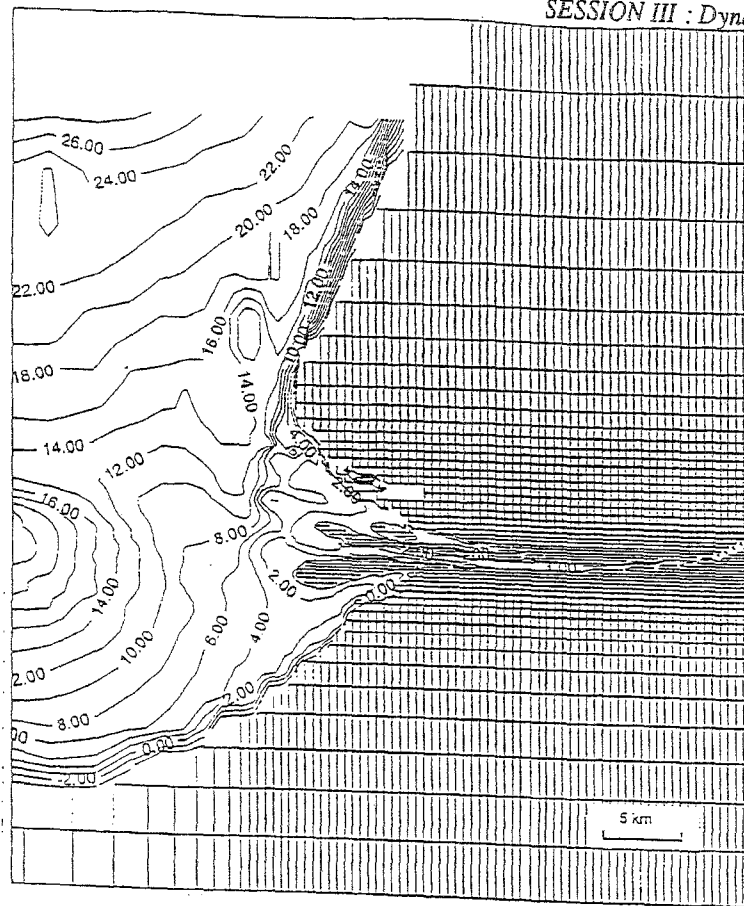


Figure 2 : Modélisation de l'estuaire de la Seine : maillage et bathymétrie.
(la Seine fluviale n'est pas représentée)

2.2. Le modèle de calcul du transport sédimentaire

Le modèle résout, pour le calcul de la concentration, l'équation de conservation de la masse qui rend compte des phénomènes d'advection, de dispersion et des échanges avec le fond sédimentaire. Le schéma de résolution explicite est écrit en différences finies selon l'algorithme de Bott (1989). Afin de réduire les temps de calcul et parce que les critères de stabilité sont moins contraignants que pour l'hydrodynamique, le calcul du transport sédimentaire est réalisé moins fréquemment que celui des courants.

Le dépôt D (en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) est écrit selon la formulation de Krone telle que :

$$D = W_s \cdot C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}}\right)$$

avec : τ_{cd} : tension de cisaillement critique (pas de dépôt si $\tau_{cd} < \tau$)
 C : concentration du sédiment
 W_s : vitesse de chute

L'érosion E (en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) est écrite selon la formule de Partheniades telle que :

$$E = k \left(\frac{\tau}{\tau_{ce}} - 1 \right)$$

avec : τ_{ce} : tension critique d'érosion de la crème de vase ou de la vase
 k : constante d'érosion

k et τ_{ce} sont, a priori, dépendant de l'état de consolidation de la vase superficielle (souvent paramétré en fonction de la densité).

Dans cette étude, les processus ont été volontairement simplifiés de façon à montrer le rôle joué par l'hydrodynamique sur les structures turbides et sur la localisation des dépôts. Ainsi, la vitesse de chute est choisie constante avec une valeur de 1 mm/s correspondant à des matériaux floкулés, dont l'ordre de grandeur est conforme aux observations *in situ* les plus récentes (Van Leussen, 1995). La tension de cisaillement critique est choisie forte ($\tau_{cd} = 10 \text{ N/m}^2$) pour que le dépôt soit toujours possible. Lorsque la turbulence est grande, les dépôts autorisés par le modèle sont instantanément remis en suspension.

Les tassements ne sont pas pris en compte. Pour cette raison, nous avons choisi pour la tension critique d'érosion une valeur égale à 0.5 N/m^2 , valeur forte pour la "vapie" mais faible pour la vase consolidée. Une calibration sommaire a ensuite conduit à prendre une valeur de la constante d'érosion égale à $5.10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ dans les limites couramment admises dans la littérature (10^{-5} à $10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{s}$). Des tests de sensibilité ont d'ailleurs montré que le modèle est beaucoup moins sensible à ce paramètre qu'à la tension critique d'érosion ou à la vitesse de chute. Le rôle des vagues dans la remise en suspension et les éventuels glissements de vase ne sont pas considérés.

3. Résultats

3.1. Hydrodynamique

La calibration du modèle hydrodynamique est effectuée à l'aide du coefficient de frottement de Strickler, surtout sensible dans la partie fluviale de la Seine. On ajuste ce coefficient pour rendre compte du mieux possible de la marée réelle. Nous avons choisi:

- de l'aval au pk 332 : $K = 45$
- du pk 332 au pk 321 : K diminue linéairement de 45 à 20
- du pk 321 au pk 285 : $K = 20$
- du pk 285 au pk 267 : K augmente linéairement de 20 à 100
- du pk 267 au pk 248 : $K = 100$
- du pk 248 au pk 230 : K diminue linéairement de 100 à 10
- du pk 230 au pk 202 (Poses) : $K = 10$

La faible valeur de K en amont rend compte d'un fort frottement dans ce secteur aux nombreuses îles. La validation est faite par comparaison de la surface libre calculée avec les données marégraphiques sur des périodes de l'ordre de 15 jours,

et par comparaison entre les courants calculés et les courants mesurés. La validation en niveaux d'eau est plus pertinente car les mesures de marée sont plus fiables et de plus longue durée que celles des courants. De plus, ces dernières sont faites à une immersion donnée alors que les courants calculés par le modèle sont moyennés sur la verticale.

La propagation de la marée est correctement simulée (moins de 5 % d'erreur et moins de 10 minutes de déphasage en hauteur d'eau) à l'embouchure et dans l'estuaire jusqu'à Duclair. La "tenue du plein" à l'aval, caractéristique de l'estuaire de la Seine, est bien reproduite (figure 3). Tout à fait en amont (de Duclair à Poses), les hauteurs d'eau sont sous-évaluées. De la même façon, la validation des courants calculés est difficile en amont où les données sont rares et anciennes. Cependant, les mesures au pk 265 (Val des Leux), faites par Guézennec (1994) semblent confirmer les résultats du modèle. Un exemple de champ de courant obtenu est donné en figure 4.

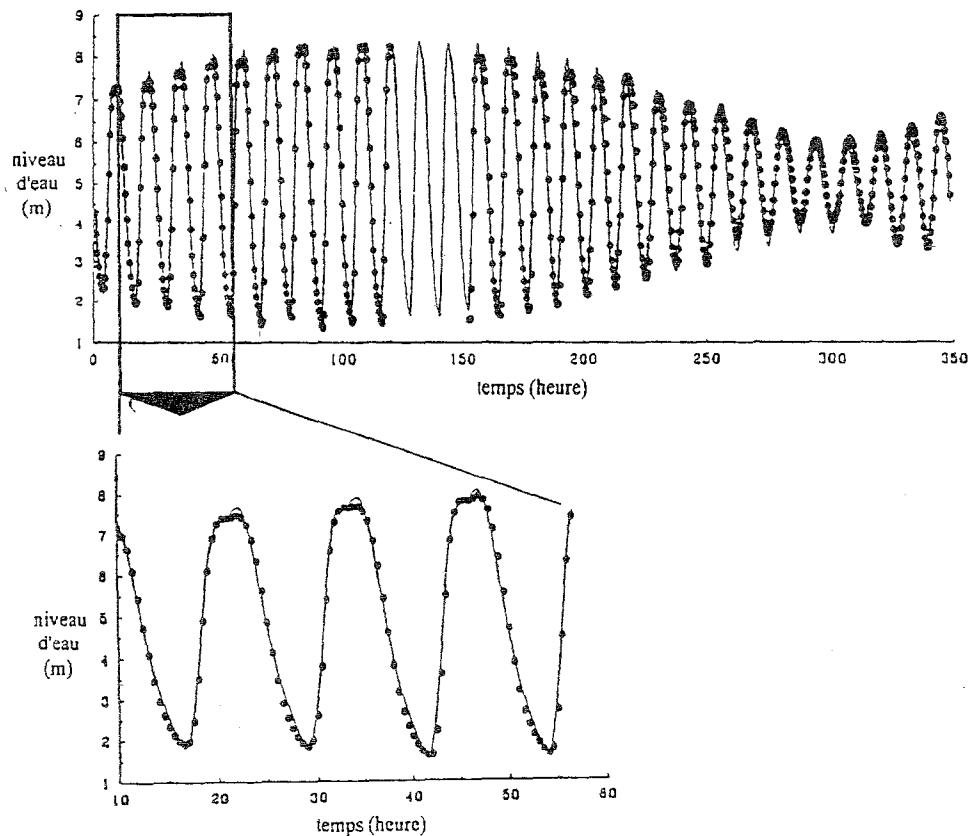


Figure 3 : Comparaisons entre la hauteur d'eau calculée par le modèle (en trait plein) et les données (en pointillés) à Honfleur. Marée du 26 février au 12 mars 1991, en vive eau. Simulation de la "tenue du plein".

3.2. Dynamique sédimentaire

La condition initiale en sédiment, volontairement irréaliste, a été introduite sous la forme d'un stock de vase facilement érodable, déposée uniformément entre le

pk 337 au pk 350. Ce stock est rapidement érodé par les courants forts du flot et du jusant en vive eau et des structures turbides peuvent alors être simulées. Afin de montrer l'indépendance de ces structures turbides vis-à-vis de la condition initiale, des simulations ont été réalisées avec des conditions initiales différentes (stock de vase à l'entrée des digues ou de chaque côté du chenal de navigation). Les structures obtenues après une cinquantaine d'heures de simulation sont semblables pour chaque simulation.

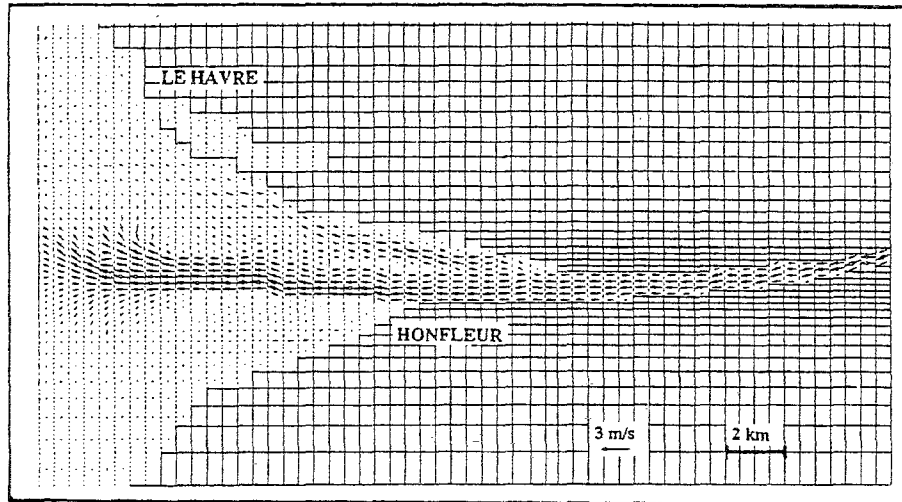


Figure 4 : Détail d'un champ de courant calculé en vive eau (BM-1).

3.2.1. Distribution de matières en suspension

Les simulations sont faites à débit moyen ($500 \text{ m}^3/\text{s}$) pendant plusieurs cycles morte eau/vive eau. En vive eau, un bouchon vaseux d'une longueur d'environ 20 km, de concentration moyenne inférieure à 1 g/l est simulé entre Honfleur et Tancarville. Il s'étend dans le chenal de navigation et dans le chenal nord, sa limite aval "sort" de l'estuaire. Il oscille de 15 km entre la pleine mer et la basse mer (figure 5). Ces caractéristiques sont en accord avec les observations. En morte eau, les particules se déposent et le bouchon vaseux disparaît.

Il peut paraître audacieux de comparer le bouchon vaseux simulé avec des conditions hydrodynamiques récentes à un bouchon vaseux observé en 1979. En fait, Avoine (1994), s'appuyant sur des données de la cellule antipollution de l'estuaire de la Seine, montre que le bouchon vaseux s'est déplacé vers l'aval jusqu'en 1975 mais que, depuis 20 ans, il se serait stabilisé ou même serait légèrement (3 à 4 km) remonté vers l'amont ces dernières années. La confrontation mesures/résultats du modèle présentée ci-dessus est donc valide.

3.2.2. Distribution de vase déposée

En vive eau, des dépôts temporaires sont simulés au moment des étales, mais les dépôts résiduels de vase restent confinés près des rives, au niveau de la vasière nord et dans l'avant-port du Havre.

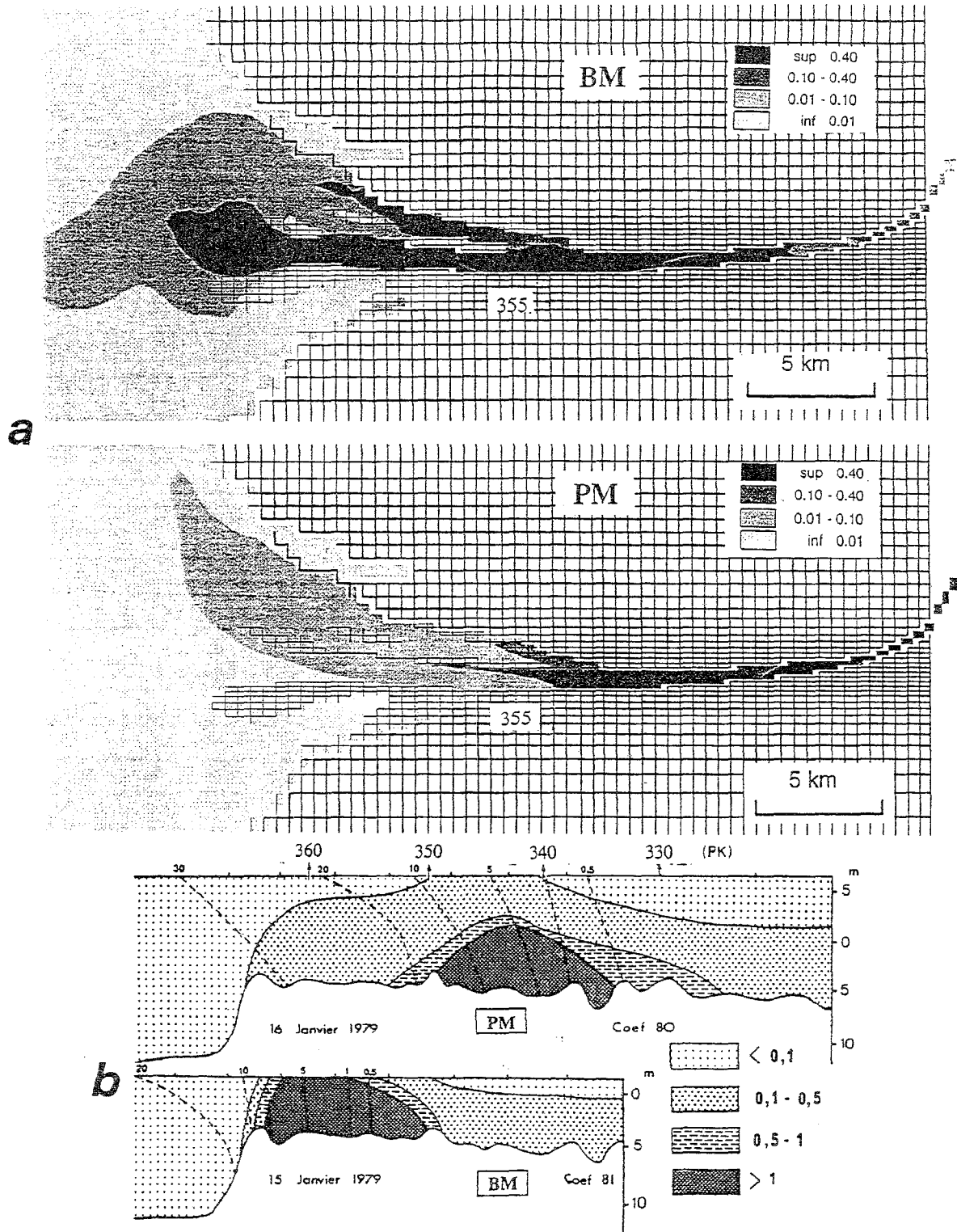


Figure 5 : a) Distribution des matières en suspension (g/l) en vive eau après 500 heures de simulation, à pleine mer et à basse mer, pour un débit constant de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. b) Mesures de la structure verticale des matières en suspension (g/l) à des conditions hydrodynamiques comparables (in Avoine, 1981).

En morte eau, les dépôts permanents, représentés sur la figure 6b par les quantités minimales de vase au cours du cycle de marée, sont nettement plus abondants. D'une façon générale, ceux-ci se produisent dans les secteurs où les courants de marée sont les plus faibles (figure 6a). L'examen de ces résultats et la comparaison avec les zones en sédimentation déduites des mesures bathymétriques récentes permettent de relever :

- un dépôt dans le chenal de navigation devant la brèche de la digue nord et plus en amont ; effectivement des dragages sont pratiqués dans ce secteur (Delouis, *comm. pers.*),
- des dépôts importants en lisière de la vasière nord, qui progresse effectivement vers le chenal nord (Avoine, 1994),
- des dépôts significatifs de part et d'autre du chenal de navigation au niveau de l'"engainement" (amorce du chenal endigué), confirmé aussi par les bilans sédimentaires ; cet endroit est d'ailleurs régulièrement dragué (Delouis, *comm. pers.*),
- l'absence de dépôts sur le banc d'Amfard, entre le port du Havre et la digue nord et dans la partie aval du chenal de navigation, ce qui est conforme aux observations,
- un dépôt très important dans l'avant-port du Havre et son chenal d'accès, où les dragages annuels dépassent le million de tonnes (Avoine, 1994).

Naturellement, la sédimentation très forte mesurée environ 5 km au nord-ouest de l'endiguement n'est pas reproduite par le modèle, puisqu'il s'agit de l'empreinte du rejet de dragage du chenal de navigation.

3.2.3. Bilan sédimentaire

Le bilan sédimentaire pendant 4 mois (figure 7) met en évidence le cycle semi-lunaire de marée. On remarque une apparition périodique du bouchon vaseux à chaque vive eau et sa disparition en morte eau, au profit de la vase déposée.

Une première simulation de 4 mois sans apport fluvial indiquait une évacuation des sédiments par le nord et une sédimentation considérable dans le port du Havre et sur la vasière nord, conduisant à un "épuisement" progressif de la masse turbide mobilisable dans l'estuaire. Cependant, pour un débit fluvial de 500 m³/s et une concentration amont de 40 mg/l, les apports de la Seine sont de 210 000 t, soit les 2/3 du stock initial introduit dans le modèle. Lorsqu'un tel flux amont est pris en compte, le modèle prédit un accroissement de la masse totale de sédiments (100 000 t en 4 mois, figure 7) et une stabilisation de la masse mobilisable à environ 500 000 t. Ces résultats provisoires (*cf.* § 4 discussion) sont qualitativement en accord avec les bilans estimés (un comblement de 1 à 2 millions de t par an, dont plus de la moitié sous forme de sédiments fins parmi lesquels 600 000 t apportées par la Seine). Une prise en compte des dragages permettrait bien sûr d'affiner la confrontation.

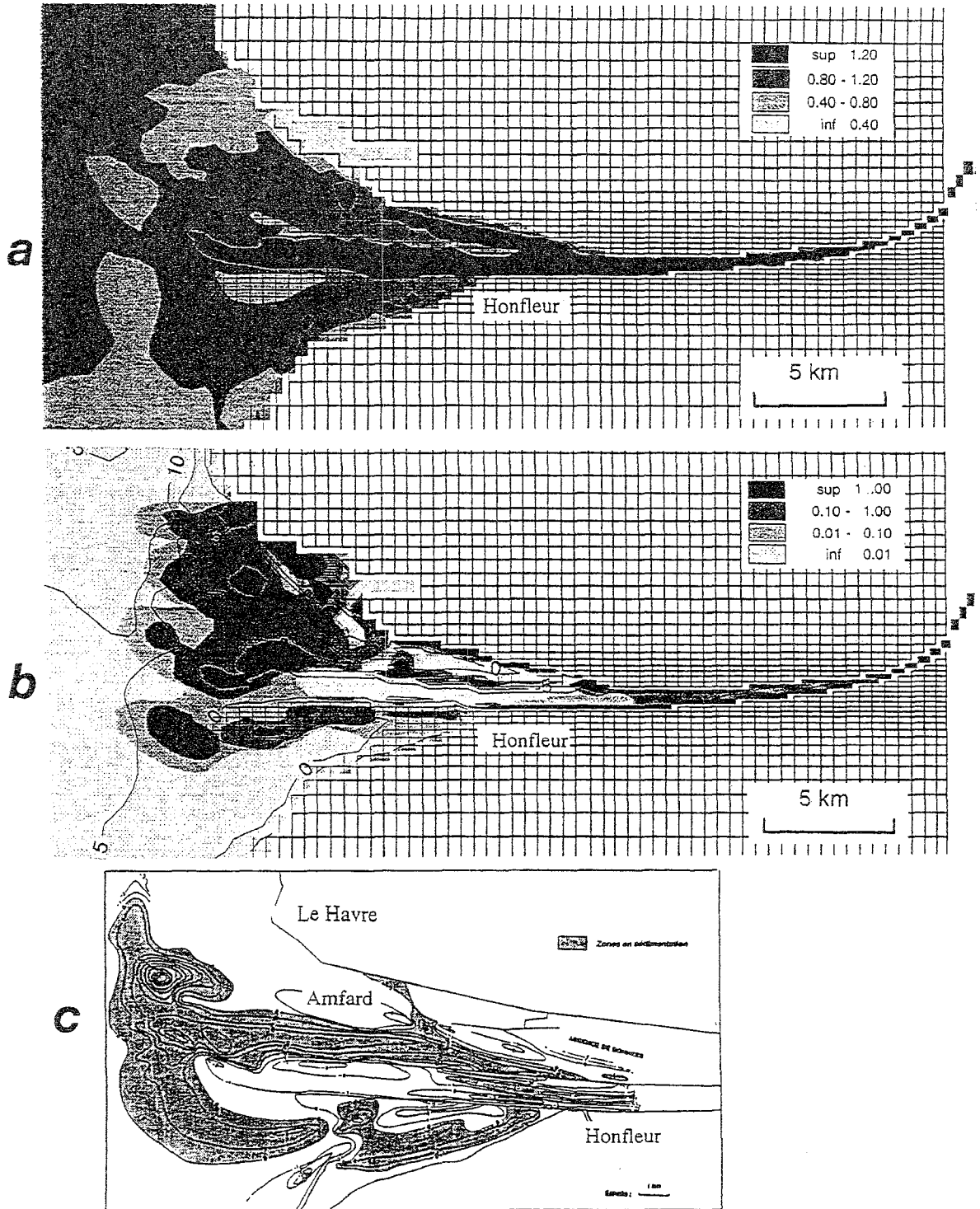


Figure 6 : a) Vitesse maximale (m/s) en vive eau. b) Vase déposée (kg/m²) en morte eau (après 900 heures de simulation). c) Zones en sédimentation entre 1978 et 1992 (in Avoine, 1994).

Les sorties de sédiments au nord se font principalement en début de revif. En effet, des dépôts de sédiments se forment en morte eau près des limites du modèle. Dès le début du revif, ces dépôts sont remis en suspension par les courants plus forts et les matières en suspension peuvent alors sortir des limites de la zone d'étude.

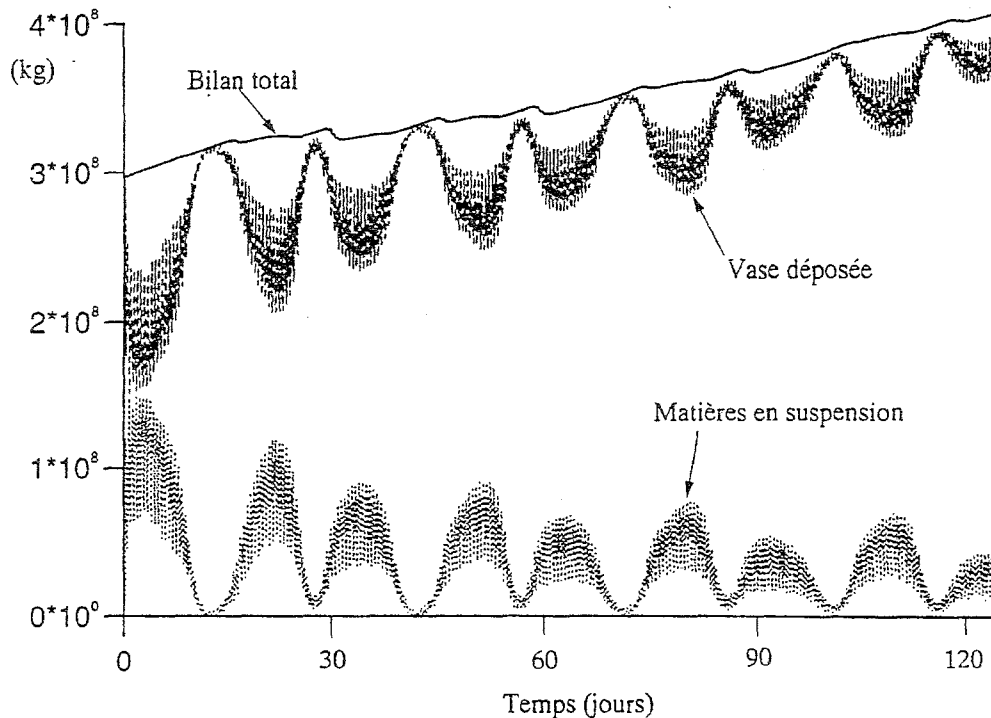


Figure 7 : Bilan sédimentaire dans l'estuaire de la Seine pendant 4 mois

4. Discussion et conclusion

Il faut tout d'abord souligner la rapidité avec laquelle le modèle 2DH reconstitue une zone de maximum de turbidité, dont la position semble réaliste pour les débits considérés. Ce résultat confirme l'origine tidale du bouchon vaseux de la Seine, ce qui ne signifie pas que les gradients de densité sont sans influence sur ce dernier : en particulier ils sont susceptibles de contribuer à sa pérennité, et de le modifier en crue. Seul un calcul tridimensionnel permettrait de le préciser.

L'analogie entre les dépôts simulés et les sédimentations observées révèle un fonctionnement "sain" du modèle, en dépit des formulations rustiques utilisées dans le modèle sédimentaire. Cela montre encore l'importance de la bathymétrie et de la propagation de la marée.

Les dépôts simulés en morte eau près de l'engainement sont complètement remis en suspension en vive eau alors qu'à cet endroit les observations montrent une sédimentation nette. Dans la réalité, un tassement des dépôts se produit en morte eau. Pour progresser dans le bilan sédimentaire, il devient donc nécessaire d'en tenir compte. Une conclusion analogue avait été formulée pour l'estuaire de la

Loire où il a été montré que le tassement influence peu les structures turbides et leurs positions mais joue un rôle majeur dans les évolutions à moyen ou long terme (Le Hir & Karlikow, 1992).

Le bilan sédimentaire à moyen terme reproduit les tendances observées, mais révèle un piégeage exclusif des matériaux dans le port du Havre et sur la vasière nord, phénomènes tous deux bien réels. Concernant le premier une simulation des dragages pourra être tentée. Pour reproduire une progression plus réaliste des vasières, deux mécanismes sont susceptibles d'intervenir. D'une part des dépôts intensifs très localisés peuvent générer des glissements le long de la pente qu'ils créent. D'autre part, les vasières et plus généralement les secteurs peu profonds sont susceptibles d'être remaniés par les houles du large et les clapots générés par les vents locaux (Avoine *et al.*, 1984).

Remerciements

Les auteurs remercient vivement P. Bassoullet (IFREMER), M. Delouis (Port Autonome de Rouen), J.P. Dupont et R. Lafite (Université de Rouen), pour leurs conseils avisés.

Bibliographie

- ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULLET P., DU PENHOAT Y., DE GRANDPRE C., 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentological Geology*, 26 : 69-90.
- AVOINE J., 1981. L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse Université de Caen. 236 p.
- AVOINE J., CREVEL L., DUBRULLE L., BOUST D., GUEGUENIAT P., 1984. Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine. XVIIIème Journées de l'Hydraulique. p. I.3.1-I.3.8.
- AVOINE J., 1994. Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. Partie 2 : Sédimentologie. Rapport IFREMER - Port Autonome du Havre. 159 p.
- 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.
- BERTHERAT C., CARCEL R., LE PROVOST C., 1981. Analyse de courants et de niveaux en baie de Seine (Campagne de mesures de Juin - Septembre 1979), 238 p.
- CHABERT D'HIERES G., LE PROVOST C., 1978. Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. 36 p.
- FORNERINO M., 1982. Modélisation des courants de marée dans la Manche. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 267 p.
- GUEZENNEC L., 1994. Mesure en continu de la turbidité en Seine aval (métrologie, suivi, interprétation). Rapport DEA, Université de Rouen. 55 p.
- LE HIR P; KARLIKOW N., 1992. Sediment transport modelling in a macrotidal estuary : do we need to account for consolidation processes? - In B. Edge (ed.) : Proc. 23rd Int. Conf. Engng, Venice (Italy), pp. 3121 -3134. Am. Soc. Civil Engrs, New York.
- VAN LEUSSEN W., 1995. estuarine macroflocs : their role in fine grained sediment transport. Thèse de l'Université d'Utrecht. pp. 488.