

Impact sédimentaire des travaux d'aménagement de l'estuaire de la Loire

Sedimentary impact of planning works in the Loire estuary, France

M. Sanchez, A. Grovel, K. Hosseini

Résumé Une conséquence des travaux d'aménagement réalisés dans les estuaires est la modification de l'hydraulique, ce qui affecte la dynamique sédimentaire des vases en créant des zones qui s'engraissent et d'autres qui s'érodent. La modélisation numérique permet de prévoir toute modification hydraulique liée aux travaux d'aménagement avec une assez grande précision. En revanche, du fait de la complexité du problème, les modèles hydrosédimentaires, même les plus performants, donnent des résultats plus qualitatifs que quantitatifs et ne permettent pas de répondre à un certain nombre des questions pratiques que peut se poser un ingénieur. Le but de cet article est d'étudier le lien entre les travaux d'aménagement de l'estuaire de la Loire, l'hydraulique, et les problèmes d'envasement et d'érosion observés dans différents secteurs de l'estuaire. Ceci est possible par l'utilisation de méthodes simples, grâce à la modélisation des principaux processus sédimentaires en jeu (transport, dépôt, tassement, érosion).

Abstract The planning works realized in the Loire estuary (France) during the course of the twentieth century have brought about an important inflow of sea water to this site. The consequences can be observed through important changes in the location of the extreme limits of both the dynamic tide and the salinity front at 0.5‰; the dynamic tide has progressed from 63 km from the river mouth in 1903

to 100 km in 1992 and the salinity front from 38 km in 1948 to 70 km in 1991. Modifications of the hydraulic conditions have also affected the dynamics of the cohesive sediments present in the estuary. The purpose of this study is to determine the impact of the past and future planning works in the Loire estuary on the erosion and deposition of cohesive sediments in relation to hydraulic conditions. The principal sedimentary processes (transportation, deposition, settlement, erosion) are simulated by simplified models from measurements carried out both in situ and in the laboratory. The dynamics of the cohesive sediment in the Loire estuary are linked with the fortnightly cycle of the tide as follows: when the tidal coefficient falls below 70, almost all the suspended matter is quickly deposited and collects near the estuary bed to form a lens-shaped body of fluid mud which consolidates during 6 days of neap tides. Finally, as soon as the tide coefficient rises above 75, this body of fluid mud is taken again into suspension and only the fraction that was highly concentrated in the course of the settlement remains on the bottom. The sediments remaining on the estuary bed in the course of a fortnightly cycle of the tide represent the residual sedimentation rate over this period. Knowledge of the maximum tide current velocities in the estuary permits the determination of the maximum hydrodynamic stress on the bottom and the critical concentration of the mud susceptible to being eroded by this current, taking into account the yield stress of the mud. In other respects, the quantity of mud that is greater than this critical concentration per surface unit and time unit can be calculated according to a theoretical model developed by Sanchez and Grovel. This methodology allows the evaluation of the residual sedimentation rate representing a layer of 0.08 m per year in front of the harbour of Montoir for the hydraulic conditions of 1976, with a maximum current velocity on

Received: 29 November 1999 · Accepted: 24 January 2000

M. Sanchez (✉) · A. Grovel · K. Hosseini
Université de Nantes, Faculté des Sciences et des Techniques,
2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes Cedex 3,
France
e-mail: martin.sanchez@physique.univ-nantes.fr
Fax: +33-2-51125550

the surface of 2.40 m s^{-1} . Following the dredging works realized between St-Nazaire and Donges after 1976, the level of the bottom has changed from -10.00 to -13.25 m (with respect to the hydrographic datum). These works have brought about a reduction in maximum velocities of 15% and an increase in the residual sedimentation rate of about 100%. This increase is in agreement with the theoretical estimation of this study. This study also describes the high sedimentation rate observed in a locally dredged berth and located in the zone of the estuary where a lens-shaped body of fluid mud is formed during slack tides. The sedimentation rate depends then on the frequency of the dredging works because the dredged zone can be filled up in a few days. Finally, a methodology is developed in order to estimate the erosion rate induced by an increase in current velocities. This methodology takes into account the vertical concentration gradient in the bed resulting from consolidation, the hydrodynamic stress linked to current velocity, the yield stress of sediment which varies with concentration and the critical hydrodynamic stress for erosion estimated from experimental measurements in laboratory. All the methodologies presented in this paper have been applied only to the estuary of the river Loire. Application to any other similar site is possible after laboratory experiments on local sediments in order to adjust the behavioural laws used to evaluate the permeability coefficient, the effective stress and the yield stress. This study shows that knowledge of hydraulic conditions and local sedimentary processes is very important for predicting the impact of planning works in an estuary.

Mots clés Sédiment · Vase · Aménagement · Erosion · Estuaire de la Loire · France

Keywords Sediment · Mud · Planning works · Erosion · Loire estuary · France

Introduction

Depuis de nombreux siècles, l'estuaire de la Loire a subi d'importantes modifications en passant d'un état sauvage, avec de nombreuses îles et chenaux, à un état «calibré». Progressivement, les zones latérales se sont exhaussées, le linéaire des berges s'est amoindri, les profondeurs du chenal se sont accrues, le lit du bief fluvio-maritime s'est abaissé constituant un bassin de marée dans la partie amont de l'estuaire, le tout entraînant une profonde modification de la propagation de la marée et une remontée de l'intrusion saline et des matières en suspension (Migniot et Le Hir 1994).

Les travaux d'aménagement des estuaires tels que les dragages, les remblaiements des zones latérales, la calibration du chenal de navigation par la construction d'épis et la protection des berges par la construction de digues longitudinales, modifient l'hydraulique dans le but principal de faciliter la navigation. Les travaux sur la Loire fluviale, avec les barrages, les extractions d'agrégats et les prélèvements d'eau, ont entraîné une diminution des apports fluviaux par charriage de sable qui sont passés depuis le début du siècle de 1×10^9 à $0,15 \times 10^9 \text{ kg an}^{-1}$. En revanche, les apports de sédiments fins en suspension par le fleuve qui représentent pour une année moyenne $1,5 \times 10^9 \text{ kg}$ environ, semblent être restés inchangés.

Au cours du vingtième siècle, les travaux d'aménagement dans l'estuaire ont engendré une progression importante de la marée dynamique, qui se localisait en vives-eaux et en étiage (conditions extrêmes) à Bellevue (point kilométrique PK 63) en 1903, et qui atteint Ancenis (PK 85) en 1976 et St Florent-le-Vieil (PK 100) en 1992. En 85 ans, la marée est remontée de plus de 35 km. La pénétration de plus en plus importante de la marée dans l'estuaire se manifeste principalement par un abaissement des basses mers qui met en danger la stabilité des anciens quais de la ville de Nantes (Grovel et al. 1999).

Les modifications de la propagation de la marée dans l'estuaire ont entraîné une remontée du front de salinité à $0,5\text{‰}$ en vives-eaux et en étiage, qui se situait au Pellerin (PK 38) en 1948 et atteint le PK 70 en 1991. Ces modifications sont également à l'origine d'une remontée de la zone de forte turbidité des eaux qui se situe aux environs du front de salinité.

Les sédiments rencontrés dans les fonds des estuaires sont en étroite relation avec les conditions hydrauliques régnant dans chaque secteur. Ainsi, on constate que la vase est le sédiment prédominant dans le chenal de l'estuaire en aval de Nantes, tandis qu'en amont de ce site on trouve principalement du sable. Au niveau de Nantes, on trouve au fond du chenal des couches alternées bien définies de vase et de sable (Ouraq 1996). Le transit des sables descendant l'estuaire vers la mer se produit essentiellement à travers le chenal, la présence des sables sur les berges étant très rare dans la zone à forte turbidité qui se situe en aval de Nantes. En effet, selon Migniot (1968), une vase consolidée n'est pas un obstacle au passage des sables et des graviers, soit par glissement, soit par saltation, si la rigidité initiale des dépôts dépasse 1 Pa.

La limite supérieure des dépôts vaseux en Loire se situe approximativement au lieu le plus en amont où les courants de flot se font sentir en mortes-eaux par un débit fluvial moyen. Ceci s'expliquant probablement par le fait que les dépôts de vase qui engraisent les fonds se produisent de préférence au moment de la renverse du courant en mortes-eaux.

L'étude des modifications de la dynamique sédimentaire des vases par les travaux d'aménagement d'un estuaire abordée dans le cadre de cet article permet d'évaluer l'efficacité de ces travaux, de prévoir les dragages d'entretien et d'évaluer l'impact sur les formations turbides et sur la qualité de l'eau dans cet estuaire.

Dynamique sédimentaire dans l'estuaire de la Loire

Le transport des vases dans les estuaires partiellement stratifiés est généralement caractérisé par l'existence d'une zone d'accumulation où les turbidités des eaux sont en moyenne plus grandes qu'ailleurs dans l'estuaire, dans le fleuve ou dans la mer. Cette zone à forte turbidité se situe en aval de l'estuaire après les crues des fleuves et remonte progressivement vers l'amont pendant les étiages.

Les estuaires sont souvent le site d'une accumulation importante des vases «peu mobiles». Le stock de ces matériaux, piégés sur des très longues durées, représente pour l'estuaire de la Loire l'équivalent de plusieurs siècles des apports du fleuve. Ce piégeage dans les estuaires de sédiments fins apportés par le fleuve qui les a transportés plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres en suspension sans dépôt important, s'explique par plusieurs facteurs dont les plus importants sont: (1) les étales du courant et la floculation qui permet le dépôt des matières en suspension; (2) la dissymétrie de la marée et la stratification des eaux qui rendent les courants de flot plus érosifs que ceux de jusant empêchant ainsi l'évacuation de la vase vers la mer; et (3) l'existence à l'intérieur de l'estuaire d'un point de convergence des courants résiduels près du fond connu sous le nom de point nodal (Allen 1972), dont la position dépend de l'intrusion saline, du débit fluvial, et de la géométrie de l'estuaire; les sédiments s'accumulent préférentiellement au voisinage de ce point.

Une accumulation importante de vase «mobile», représentant dans l'estuaire de la Loire environ 1×10^9 kg de matière solide (Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire 1984; Delft Hydraulics 1994; Fera 1994), soit l'équivalent de 8 mois d'apport par le fleuve dans des conditions moyennes, est présente au voisinage de la limite supérieure de l'intrusion saline.

Au cours d'un cycle semi-lunaire de variation du coefficient de marée (marées de mortes-eaux et de vives-eaux), le stock de vase «mobile» se présente dans l'estuaire sous deux formes différentes: en mortes-eaux la plus grande partie de ces matériaux s'accumule au fond dans une couche très concentrée en matières solides connue sous le nom de crème de vase et seulement une petite partie de cette crème de vase est remise momentanément en suspension au cours d'un cycle de marée, tandis qu'en vives-eaux, (coefficient de marée supérieur à 75 dans l'estuaire de la Loire) la plus grande partie de la crème de vase est remise en suspension entraînant la formation d'une zone à forte turbidité des eaux connue sous le nom de bouchon vaseux (la teneur en matières en suspension dans le bouchon vaseux est entre 10 et 1000 fois supérieure à celle observée dans les eaux du fleuve qui pour la Loire vaut en moyenne $0,06 \text{ kg m}^{-3}$).

La Fig. 1, montrant les emplacements de la crème de vase et de la limite supérieure du front de salinité à 0,5‰ en fonction du débit fluvial de la Loire dans les conditions morphologiques de l'estuaire d'avant 1976, prouve que ces deux emplacements sont liés. En Loire, la présence de la

lentille de crème de vase est enregistrée 6 jours sur 14,5, pendant les mortes-eaux. Sa taille moyenne est de 12500 m de longueur par 300 m de largeur et 2 m d'épaisseur. La concentration de la crème de vase varie entre 50 et 300 kg m^{-3} , avec un gradient vertical qui est fonction du temps de tassement.

La partie inférieure de la crème de vase qui se consolide au cours des mortes-eaux détermine le taux d'envasement résiduel de l'estuaire. Le processus de tassement, joue ainsi un rôle fondamental sur le taux d'envasement de l'estuaire de la Loire qui est de l'ordre de 1×10^9 kg par an (Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire 1984; Delft Hydraulics 1994).

Modifications de la dynamique sédimentaire

Taux d'envasement résiduel du chenal de l'estuaire (en face de Montoir)

À la suite des travaux de dragage réalisés entre St-Nazaire et Donges après 1976, la cote du chenal dans ce secteur est passée de $-10,00$ à $-13,25$ m CM. Ces travaux ont entraîné, dans la partie aval de l'estuaire, une diminution des vitesses maximales d'environ 15%. Dans ce qui suit, l'accroissement du taux d'envasement du chenal provoqué par cette réduction des vitesses est estimé.

La connaissance du gradient de concentration dans la crème de vase est un élément primordial pour définir le taux d'envasement (Migniot 1989). Selon les travaux de Sanchez et Grovel (1993), au cours du tassement, les modifications de la concentration à l'intérieure d'une couche de crème de vase, dépendent principalement de la relation existant entre le coefficient de perméabilité k (m s^{-1}) et la concentration C (kg m^{-3}). Des mesures réalisées en laboratoire sur dix échantillons de vase de Loire, montrent la validité de la relation empirique suivante (Sanchez et Grovel 1994):

$$k = A_1 \exp\left(-A_2 \frac{C}{\rho_s}\right), \text{ avec: } A_1 = 0.008 \text{ ms}^{-1}, A_2 = 118 \quad (1)$$

où ρ_s est la masse volumique de la fraction solide de la vase ($\rho_s = 2550 \text{ kg m}^{-3}$). L'évolution de la concentration dans une couche de vase est régie par l'équation de continuité de la phase solide:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(w_s C)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

où z est la coordonnée verticale et w_s la vitesse de la phase solide à l'intérieure de la couche de vase. Si les contraintes effectives sont faibles (ce qui est le cas pour la crème de vase), w_s dépend exclusivement de la concentration selon la relation de Been (1980):

$$w_s = -k \frac{C}{\rho_s} \left(\frac{\rho_s}{\rho_o} - 1\right) \quad (3)$$

où ρ_o est la masse volumique de l'eau ($\rho_o \approx 1000 \text{ kg m}^{-3}$). Alors, la théorie de sédimentation de Kynch (1952) est

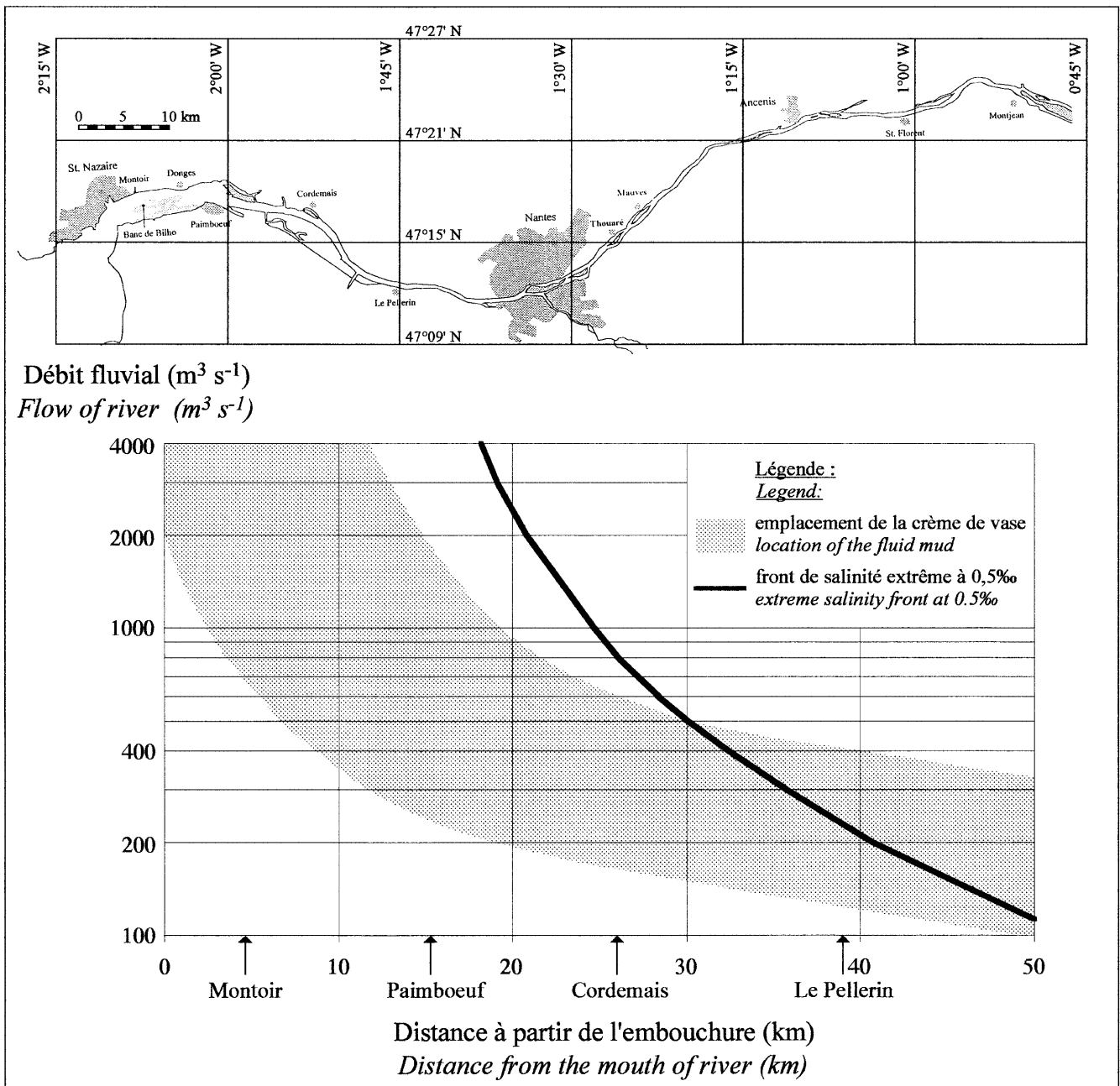


Fig. 1
Emplacement de la crème de vase en 1970 (Gallenne 1974) et limite supérieure du front de salinité à 0,5‰ en 1976 (Migniot et Le Hir 1994), dans l'estuaire de la Loire

Fig. 1
Location of fluid mud in 1970 (Gallenne 1974) and maximum penetration of salinity front at 0.5‰ in 1976 (Migniot et Le Hir 1994), in the estuary of the river Loire, France

valable et les caractéristiques associées à chaque concentration sont des lignes de pente W constante (Courant et Hilbert 1961). Lorsque le temps est représenté en abscisse et z en ordonnée, les caractéristiques représentent les lieux où la concentration est constante à l'intérieure de la couche de vase en cours de tassement.

$$W(C) = \frac{d(w_s C)}{dC} = -w_s(C) \left(A_2 \frac{C}{\rho_s} - 2 \right) \quad (4)$$

Au cours du tassement, le taux de crème de vase dépassant une concentration fixe C est le débit net à travers l'interface mobile de concentration C , donné par la relation suivante:

$$Q_{s/C} = [W(C) - w_s(C)] C = k \frac{C^2}{\rho_s} \left(\frac{\rho_s}{\rho_0} - 1 \right) \left(A_2 \frac{C}{\rho_s} - 1 \right) \quad (5)$$

La résistance de la vase aux actions hydrodynamiques est établie à travers une relation entre la tension de cisaillement τ_0 à l'interface eau-sédiment et la rigidité initiale τ_y (ou la cohésion non drainée c_u). Grâce à des mesures en laboratoire, Hosseini (1999) établit une loi empirique

permettant d'estimer le taux volumique d'érosion E_v (qui représente le volume de vase remis en suspension par unité de surface et par unité de temps) en fonction de τ_o :

$$E_v = E_{v_0} \exp \left[\alpha_v \frac{\tau_o - \tau_{oc}}{\tau_{oc}} \right] \quad (6)$$

où E_{v_0} , α_v et τ_{oc} sont les coefficients de la loi d'érosion. Selon cette loi, pour $\tau_o = \tau_{oc}$ (le terme τ_{oc} représente la tension de cisaillement critique d'érosion), on a un taux d'érosion résiduel non nul égal à E_{v_0} qui est fixé arbitrairement. Les coefficients de cette loi sont rattachés à la rigidité initiale et à la concentration de la vase:

$$\tau_{oc} = 0,294 \tau_y \left(\frac{C}{\rho_o} - \frac{C}{\rho_s} \right)^{1,11},$$

avec: $\alpha_v = 0,1145 \frac{\sqrt{\tau_{oc}/\rho_o} \epsilon}{\nu}$, $E_{v_0} = 3 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ (7)

où ϵ est la rugosité hydraulique de la surface de la vase ($\epsilon = 0,00087 \text{ m}$). Des mesures réalisées en laboratoire par Hosseini (1999) à l'aide d'un rhéomètre à cylindres, permettent d'établir la relation suivante entre τ_y (en Pa) et C (en kg m^{-3}).

$$\tau_y = 1,5 \times 10^{-11} C^5, \text{ pour: } 150 \text{ kg m}^{-3} < C < 420 \text{ kg m}^{-3} \quad (8)$$

À l'issue d'un cycle semi-lunaire de marées de 14,5 jours, le taux d'envasement résiduel du chenal est représenté par la partie inférieure de la crème de vase dont la rigidité initiale dépasse, suite au tassement, la valeur critique lui permettant de résister à l'action des courants les plus forts des marées de vives-eaux moyennes.

En 1976, la vitesse maximale du courant en surface par une marée de vive-eau moyenne (de coefficient 95) était, en face de Montoir, de $2,40 \text{ m s}^{-1}$. La tension de cisaillement au fond associée à cette vitesse maximale peut être calculée en utilisant la relation de Strickler qui s'écrit:

$$\tau_o = \frac{\rho_o g U^2}{K^2 H^{1/3}} \quad (9)$$

où g est l'accélération de la pesanteur, U la vitesse du courant en surface, H la profondeur et K le coefficient de Strickler local, qui compte tenu de la rugosité hydraulique de la vase et de l'utilisation dans la relation de Strickler de la vitesse en surface, vaut $95 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Au moment où la vitesse maximale se présente, la cote de la surface de l'eau se situe à environ $+3,00 \text{ m CM}$ (soit $H = 13,00 \text{ m}$), la tension de cisaillement τ_o maximale à l'interface eau-sédiment en marée de vive-eau moyenne est alors de $2,66 \text{ Pa}$, en face de Montoir dans les conditions de 1976. D'après les relations de τ_{oc} et de τ_y , cette dernière valeur de τ_o est susceptible d'éroder (avec un taux volumique d'érosion supérieur à E_{v_0}) la couche superficielle de vase dont la concentration est inférieure à 325 kg m^{-3} (et dont la rigidité initiale associée est inférieure à $54,4 \text{ Pa}$).

Sachant que la période des mortes-eaux, au cours de laquelle la crème de vase est présente au fond du chenal dure 6 jours, soit $d = 518400 \text{ s}$, alors, au cours d'un cycle semi-lunaire de marée (de 14,5 jours), l'épaisseur de la couche de vase engraisant le fond du chenal en face de

Montoir dans les conditions de 1976, est égale à d multiplié par la valeur de W associée à $C = 325 \text{ kg m}^{-3}$ ($W = 6,06 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$), ce qui représente pour cette période semi-lunaire une couche de $0,003 \text{ m}$, et un taux d'envasement résiduel de $0,08 \text{ m an}^{-1}$.

Toujours dans les conditions de 1976, la quantité de vase engraisant le chenal de navigation en face de Montoir par période de 14,5 jours, est égale à d multiplié par la valeur de $Q_{s/C}$ associée à $C = 325 \text{ kg m}^{-3}$ ($Q_{s/C} = 2,12 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), ce qui représente un envasement de $1,10 \text{ kg m}^{-2}$ pour cette période, soit un taux d'envasement résiduel de $27,7 \text{ kg m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Après les travaux de dragage qui ont amené la cote du fond à $-13,25 \text{ m CM}$ en aval de Donges, la vitesse maximale en surface par une marée de vive-eau moyenne en face de Montoir s'établit à environ $2,04 \text{ m s}^{-1}$. La tension de cisaillement à l'interface eau-sédiment associée à cette vitesse est de $1,79 \text{ Pa}$. Ces travaux ont fait diminuer le pouvoir érosif des courants dans la partie aval de l'estuaire, de sorte que les vases susceptibles d'être remises en suspension sont celles dont la concentration est inférieure à 305 kg m^{-3} (et dont la rigidité initiale associée est inférieure à $39,6 \text{ Pa}$). En suivant la démarche décrite ci-dessus, on évalue un taux d'envasement résiduel dans le chenal de l'estuaire en face de Montoir de $0,16 \text{ m an}^{-1}$, soit de $57,3 \text{ kg m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

L'interprétation des résultats doit se faire en fonction d'une variation relative du taux d'envasement car les évaluations de celui-ci comportent une incertitude absolue importante. Ainsi, on peut dire que les travaux de dragage réalisés après 1976 en aval de Donges ont contribué à une augmentation d'environ 100% du taux d'envasement résiduel en face de Montoir, et, donc, à une augmentation du même ordre de grandeur des dragages d'entretien nécessaires du chenal de navigation dans ce secteur, ce qui est l'ordre de grandeur réel observé après travaux (Migniot 1993).

Dans les conditions actuelles, une partie de la vase draguée dans le secteur de Montoir lors des travaux d'entretien peut avoir une concentration de l'ordre de 660 kg m^{-3} , soit une densité d'environ 1,40 (Migniot et Le Hir 1994). Il s'agit donc d'une vase très surconsolidée dont la présence ne peut pas s'expliquer par la consolidation de la crème de vase, car ce processus engendre des dépôts superficiels d'une concentration maximale de l'ordre de 350 kg m^{-3} (soit une densité d'environ 1,21). En conséquence, il est probable qu'une partie de la vase draguée lors des travaux d'entretien du chenal de navigation provienne du glissement des talus latéraux de ce chenal.

Taux d'envasement d'une souille dans l'estuaire (port de Trentemoult)

Le taux d'envasement dans un site donné est en étroite relation avec les cotes des fonds. En effet, dans un site initialement en équilibre sédimentaire, où les dépôts et les érosions se compensent pour donner un taux d'envasement résiduel nul, la réalisation de dragages s'accompagne généralement d'un envasement jusqu'à ce que les cotes des fonds reviennent à leur état initial.

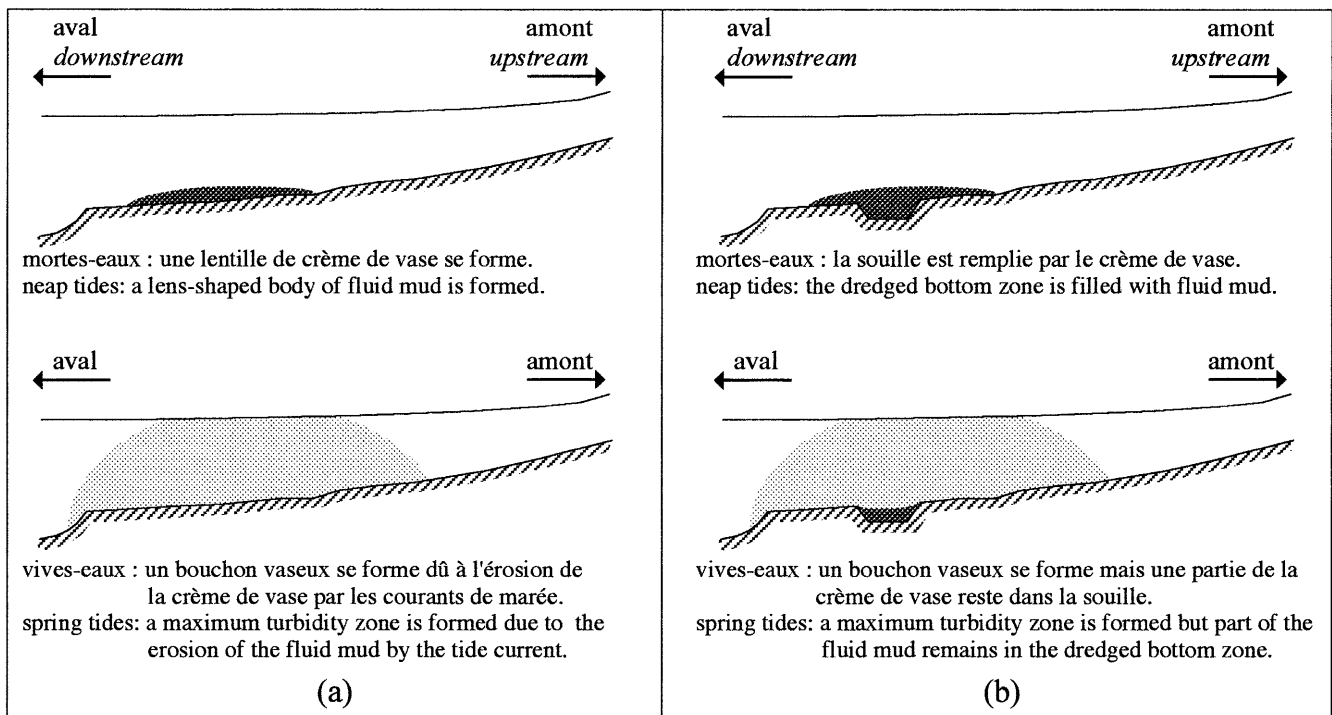


Fig. 2

Cycle sédimentaire suivi par les vases dans un estuaire en relation avec l'amplitude de la marée: a en l'absence des souilles; b en présence d'une souille

Fig. 2

Sedimentary cycle followed by cohesive sediments in an estuary in relation to tide amplitude: a without a locally dredged berth; b with a locally dredged berth

Ce phénomène concerne particulièrement les souilles situées dans la zone à forte turbidité d'un estuaire car celles-ci peuvent se comporter comme des véritables pièges à sédiments. En effet, au cours d'un cycle semi-lunaire de marées, la plus grande partie de la vase «mobile» se trouve alternativement sous la forme de crème de vase en mortes-eaux et de matière en suspension en vive-eau, avec un taux résiduel d'envasement de l'ordre de quelques millimètres par cycle de marée (Fig. 2a). Cependant, une grande partie de la crème de vase qui remplit une souille au cours des mortes-eaux n'est pas remise en suspension en vive-eau car le pouvoir érosif du courant diminue en raison de l'abaissement très localisé des fonds (Fig. 2b).

Le port de Trentemoult situé en face de la ville de Nantes constitue un exemple remarquable de ce phénomène. Au printemps 1997 ce port a été dragué sous la forme d'une souille sur une profondeur moyenne d'environ 3 m et une surface de 8000 m². Avant les travaux de dragage la cote moyenne du fond était voisine de +3,00 m CM et le taux d'envasement représentait quelques centimètres par an. Cependant, 6 mois après les dragages, la cote moyenne du fond est revenue pratiquement à sa valeur initiale par suite d'un accroissement considérable du taux d'envasement. Ce phénomène s'explique par le piégeage de la crème de vase présente dans cette zone de l'estuaire en étiage et par le faible pouvoir érosif des courants au sein de ce port,

courants qui dépassent rarement une vitesse de 0,20 m s⁻¹.

Les souilles implantées dans les zones où la crème de vase est susceptible de se former peuvent, dans l'estuaire de la Loire, être soumises à un taux d'envasement dépassant les 2 m au cours d'un seul cycle semi-lunaire de marées. L'implantation de souilles dans les zones à forte turbidité des estuaires, implique la réalisation de dragages d'entretien très fréquents et plus ces dragages sont fréquents, plus le taux d'envasement annuel est important.

Erosions prévisibles par l'accroissement des vitesses dans un point en équilibre sédimentaire

Les travaux de calibrage du chenal de navigation par la construction d'épis, ou les dragages des sables en amont de l'estuaire, sont susceptibles de modifier l'hydraulique par un accroissement des vitesses du courant. L'accroissement des vitesses s'accompagne, en général, d'une érosion des secteurs de l'estuaire qui étaient préalablement en équilibre sédimentaire.

L'épaisseur de la couche érodée dépend principalement du gradient vertical de concentration dans les dépôts du fond et de l'importance de l'accroissement de la tension de cisaillement maximale à l'interface eau-sédiment (en marées de vive-eau). Le gradient de concentration dans les dépôts résulte du phénomène de consolidation sous poids propre. Pour un sédiment normalement consolidé (sous poids propre), le gradient vertical de la contrainte effective σ' est relié à la concentration locale par:

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial z} = \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_s}\right) g C \quad (10)$$

où g est l'accélération de la pesanteur. Des mesures réalisées dans une colonne de consolidation en laboratoire par

Sanchez (1992) ont permis d'établir une loi de comportement reliant la contrainte effective à la concentration. Cette loi est:

$$\sigma' = \left(\frac{C - C_0}{B_1} \right)^{1/B_2}, \text{ avec: } C_0 = 108 \text{ kg m}^{-3},$$

$$B_1 = 93,27 \text{ kg}^{1-B_2} \text{ m}^{-3+B_2} \text{ s}^{2B_2}, B_2 = 0,1219. \quad (11)$$

où C_0 est la concentration minimale à laquelle les contraintes effectives apparaissent (frontière entre une suspension dépourvue de contraintes effectives et un dépôt à réseau continu tridimensionnel où les contraintes peuvent se transmettre grain à grain) et B_1 et B_2 sont les paramètres empiriques de la loi 11. La combinaison des équations précédentes permet d'obtenir une expression donnant le gradient vertical de la concentration en fonction de la concentration locale:

$$\frac{\partial C}{\partial z} = B_1 B_2 \left(\frac{C - C_0}{B_1} \right)^{1-1/B_2} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_s} \right) g C \quad (12)$$

Une propriété importante de la vase de Loire est que son comportement est rigide-plastique (cette vase ne gonfle pas si la contrainte de consolidation appliquée disparaît). Un cas hypothétique est examiné par la suite à titre d'exemple. Il s'agit d'étudier l'érosion provoquée par un accroissement des vitesses extrêmes de 20% dans un site préalablement en équilibre sédimentaire en dehors du chenal de navigation de l'estuaire (ce qui veut dire que les sédiments en surface ont exactement la rigidité initiale qui leur permet de résister aux actions hydrodynamiques extrêmes), où la profondeur à mi-marée est de 7,00 m et la concentration de la vase superficielle est de 310 kg m^{-3} . Selon l'Éq. (8), la rigidité initiale de cette vase est de 42,94 Pa. De plus, si cette vase a été consolidée normalement par des couches superficielles de sédiments qui ont été par la suite érodées dans des temps passés, le gradient de concentration en surface est: $\partial C/\partial z = 81 \text{ kg m}^{-3} \text{ m}^{-1}$.

La tension de cisaillement à l'interface eau-sédiment étant proportionnelle au carré de la vitesse et la résistance de la vase aux actions hydrodynamiques étant proportionnelle à la rigidité initiale, on peut conclure qu'une augmentation des vitesses extrêmes de 20% entraînerait l'érosion de la couche superficielle de vase jusque ce que la rigidité initiale de la nouvelle vase en surface soit de $1,20^2 \times 42,94 \text{ Pa} = 61,84 \text{ Pa}$, ce qui correspond à une concentration de $C = 333 \text{ kg m}^{-3}$ et à un gradient de concentration théorique $\partial C/\partial z = 40 \text{ kg m}^{-3} \text{ m}^{-1}$.

L'épaisseur Δz de la couche de vase érodable est alors donnée par:

$$\Delta z = \frac{\Delta C}{\partial C/\partial z} \quad (13)$$

où ΔC est la différence de la concentration en surface (correspondant à un équilibre sédimentaire) après et avant l'augmentation des vitesses ($\Delta C = 23 \text{ kg m}^{-3}$) et $\partial C/\partial z$ est le gradient de concentration moyen dans la couche de vase érodable dû à l'augmentation des vitesses ($\partial C/\partial z = 60,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ m}^{-1}$). On obtient alors: $\Delta z = 0,38 \text{ m}$.

Il faut signaler que la méthodologie présentée ici ne peut pas s'appliquer aux vases très concentrées comblant le fond du chenal de navigation, car ces sédiments sont très surconsolidés à la suite des dragages qui les ont découverts et leur rigidité initiale leur permet de résister très facilement aux courants extrêmes (ces sédiments ne sont pas en équilibre sédimentaire de sorte qu'une érosion de ces sédiments ne peut être envisagée que par un très grand accroissement des vitesses).

Pour un cas réel, on peut obtenir une plus grande précision dans l'évaluation de la couche de vase érodable par un accroissement du courant, par la mesure in situ du gradient de concentration dans la couche superficielle du sédiment.

Conclusions

Cet article montre qu'une évaluation fiable de l'impact des ouvrages de génie civil sur la dynamique sédimentaire des vases dans les estuaires et dans d'autres milieux est possible grâce à une connaissance approfondie de l'hydraulique et des comportements des sédiments en relation avec les processus sédimentaires qui les affectent.

Le taux d'envasement résiduel dans la zone à forte turbidité d'un estuaire est en étroite relation avec le tassement sous poids propre de la vase fraîchement déposée (qui dépend principalement de la loi reliant le coefficient de perméabilité à la concentration), avec le comportement rhéologique de la vase (relation entre la rigidité initiale et la concentration), avec les sollicitations dynamiques liées aux courants (relation entre tension de cisaillement τ_0 à l'interface eau-sédiment et les vitesses du courant) et avec le comportement de la vase sous l'action d'un courant (relation entre la valeur de τ_0 critique d'érosion et la rigidité initiale).

Le taux d'envasement d'une souille dépend principalement de la position de celle-ci par rapport à la zone à forte turbidité et de la quantité de vase susceptible de se déposer au cours des mortes-eaux, quantité qui est très variable d'un estuaire à un autre. La relation entre les conditions hydrauliques et les emplacements de la crème de vase et du bouchon vaseux, permet de définir les sites où une souille est particulièrement exposée à un fort taux d'envasement. Les érosions provoquées par un accroissement local des vitesses peuvent être prévues grâce à la connaissance du gradient vertical des concentrations, du comportement compressible de la vase (relation entre la contrainte effective et la concentration) et du comportement de la vase sous l'action d'un courant (relation entre la valeur de τ_0 critique d'érosion et la rigidité initiale).

Cette étude montre donc le lien entre l'hydraulique et les envasements et les érosions observés dans les estuaires, ainsi que l'importance de bien connaître la dynamique sédimentaire par des observations sur le terrain et le comportement des sédiments vis-à-vis des actions mécaniques et hydrodynamiques, ce qui demande à la fois des mesures in situ et en laboratoire et fait intervenir des connaissances propres de la sédimentologie, de la mécanique

Tableau 1

Récapitulation des principales lois mécaniques en relation avec la dynamique sédimentaire des vases, ajustées pour le sédiment de l'estuaire de la Loire

Table 1

Recapitulation of the principal mechanical laws in relation to the dynamics of cohesive sediments, adjusted for the mud of the Loire estuary

Variable indépendante Independent variable	Formulation Formulation	Paramètres ajustés Adjusted parameters	Autres paramètres Other parameters	Domaine de validité Domain of validity	Phénomène concerné Phenomenon concerned
Coefficient de perméabilité Permeability coefficient	$k = A_1 \exp\left(-A_2 \frac{C}{\rho_s}\right)$	$A_1 = 8 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1} A_2 = 118$	$\rho_s = 2550 \text{ kg m}^{-3}$	$50 \text{ kg m}^{-3} < C < 350 \text{ kg m}^{-3}$	Consolidation Consolidation
Contrainte effective Effective stress	$\sigma' = \left(\frac{C - C_0}{B_1}\right)^{1/B_2}$	$C_0 = 108 \text{ kg m}^{-3} B_1 = 93,27 \text{ (S.I.)} B_2 = 0,1219$		$108 \text{ kg m}^{-3} < C < 420 \text{ kg m}^{-3}$	Consolidation Consolidation
Contrainte tangentielle à l'interface eau-sédiment Hydrodynamic stress	$\tau_o = \frac{\rho_o g U^2}{K^2 H^{1/3}}$	$K = 95 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	U (vitesse de l'eau en surface)	$U > 0,05 \text{ m s}^{-1}$	Erosion Erosion
Contrainte tangentielle critique d'érosion Critical hydrodynamic stress for erosion	$\tau_{oc} = \alpha \tau_y \left(\frac{C}{\rho_o} - \frac{C}{\rho_s}\right)^\beta$	$\alpha = 0,294$ $\beta = 1,11$	$\rho_o = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ $\rho_s = 2550 \text{ kg m}^{-3}$	$100 \text{ kg m}^{-3} < C < 420 \text{ kg m}^{-3}$	Erosion Erosion
Rigidité initiale Yield stress	$\tau_y = a C^b$	$a = 1,5 \times 10^{-11} \text{ (S.I.)}$ $b = 5$		$150 \text{ kg m}^{-3} < C < 420 \text{ kg m}^{-3}$	Comportement mécanique Mechanical behaviour

que des fluides, de l'hydraulique des milieux poreux, de la rhéologie et de la mécanique des sols. Les principales lois mécaniques en relation avec la dynamique sédimentaire des vases ajustées pour les sédiments de l'estuaire de la Loire sont récapitulées au Tableau 1.

Enfin, les méthodologies développées dans cet article en prenant comme site expérimental l'estuaire de la Loire peuvent être appliquées en tout autre site où la vase soumise à l'action d'un courant pose des problèmes d'ordre sédimentaire. Cependant, toutes les lois de comportement en jeu doivent être ajustées en fonction des propriétés mécaniques des sédiments de chaque site par des mesures en laboratoire ou in situ.

Références

- ALLEN GP (1972) Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse, Université de Bordeaux, 338 pp
- BEEN K (1980) Stress-strain behaviour of a cohesive soil deposited under water. PhD Diss, University of Oxford
- COURANT R, HILBERT D (1961) Methods of mathematical physics, vol 2. Interscience, New York
- Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire (1984) Rapport final du comité scientifique pour l'environnement de l'estuaire de la Loire. Rapports Scientifiques et Techniques, no 55. Centre National pour l'Exploitation des Océans, Brest, 158 pp
- DELFT HYDRAULICS (1994) Etude hydrologique de l'estuaire de la Loire. Delft Hydraulics, Delft, 98 pp
- FERA P (1994) Estuaire de la Loire. Agence de l'Eau de Loire Bretagne, Nantes, 21 pp
- GALLENNE B (1974) Les accumulations turbides dans l'estuaire de la Loire - étude de la «crème de vase». Thèse, Université de Nantes, 323 pp
- GROVEL A, SANCHEZ M, GHADRI H, DELANOË Y (1999) Modification de la marée par le creusement du chenal d'un estuaire. Bull Eng Geol Environ 57(4):369-376
- HOSSEINI K (1999) Liaison entre la rigidité initiale et la cohésion dans les vases molles - relation avec la dynamique sédimentaire. Thèse, Université de Nantes, 163 pp
- KINCH GF (1952) A theory of sedimentation. Faraday Soc Trans 48:166-176
- MIGNIOT C (1968) Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et leur comportement sous des actions hydrodynamiques. La Houille Blanche 7:591-620
- MIGNIOT C (1989) Tassement et rhéologie des vases. La Houille Blanche 1 et 2:11-29, 95-111
- MIGNIOT C (1993) Bilan de l'hydrologie et de l'hydrosédimentaire de l'estuaire de la Loire au cours des deux dernières décennies. Association pour la Protection de l'Environnement de l'Estuaire de la Loire, Nantes, 179 pp
- MIGNIOT C, LE HIR P (1994) Estuaire de la Loire - hydrosédimentaire. Rapports de synthèse de l'APEEL, no 1. L'Association pour la Protection de l'Environnement de l'Estuaire de la Loire, Nantes, 84 pp
- OURAQ Y (1996) Contribution à l'étude des sédiments dans l'environnement estuarien: cas de l'estuaire de la Loire. Thèse, Université de Nantes, 170 pp
- SANCHEZ M (1992) Modélisation dans un estuaire à marée - rôle du bouchon vaseux dans la tenue des sols sous-marins. Thèse, Université de Nantes, 210 pp
- SANCHEZ M, GROVEL A (1993) Modélisation du tassement sous poids propre des couches de vase molle et saturée, sur un sol imperméable. La Houille Blanche 1:29-34
- SANCHEZ M, GROVEL A (1994) Dynamique des matériaux cohésifs dans l'estuaire de la Loire. J Rech Océanogr 19(3 et 4):196-201