



Evaluation des paramètres hydrosédimentaires par des mesures en site estuarien et en laboratoire.

Martin Sanchez

*Maître de conférences, Faculté des Sciences, Université de Nantes,
2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes.*

E.Mail : martin.sanchez@physique.univ-nantes.fr

Yann Delanoë

*Maître de conférences, Faculté des Sciences, Université de Nantes,
2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes.*

E.Mail : yann.delanoë@chimie.univ-nantes.fr

Résumé

Une méthodologie pour l'étude de la dynamique sédimentaire des vases dans les estuaires à marée est développée en prenant comme référence la Loire. Une description de la localisation des zones à forte turbidité et de la dynamique des vases dans les estuaires, est présentée sur la base des mesures in situ. La modélisation des principaux processus sédimentaires tenant compte des propriétés mécaniques et rhéologiques des vases, est abordée. Les valeurs des paramètres des différents modèles ont été évaluées pour les vases de cinq estuaires français, grâce à des mesures en laboratoire. Ces modèles, couplés à des observations sur le terrain sont utiles pour appréhender correctement les problèmes d'envasement et d'érosion liés aux travaux d'aménagement en site estuarien.

Abstract

A methodology for the study of cohesive sediment dynamics in tidal estuaries is developed taking the river Loire as a reference. A description, based on in situ observations, is presented for the location and the movements of the maximum turbidity zones. The modelling of the major sedimentary processes is studied taking into account mechanical and rheological properties of sediments. The values of the parameters in the models have been evaluated through laboratory measurements for sediments coming from five French estuaries. The use of these models associated with field observations is important for any planning works in estuarine context in order to anticipate correctly the erosion and sedimentation problems.

1. Introduction

Les emplacements des estuaires, embouchures des fleuves où les eaux douces rencontrent les eaux salées marines, n'ont pratiquement pas changé depuis à peu près 6000 ans, époque à laquelle la mer a atteint un niveau proche de ce qu'il est aujourd'hui. Ceci après une remontée du niveau de la mer qui avait débuté environ 10000 ans plus tôt en partant d'un niveau 120 m plus bas que l'actuel (Pinot, 1998).

Dans la plupart des cas, les basses vallées des fleuves qui ont été envahies par la mer lors de cette dernière remontée des niveaux, se sont comblées de sédiments au cours des siècles. Ces sédiments masquent en surface les irrégularités topographiques des anciennes berges.

Les sédiments qui ont comblé les estuaires sont principalement des vases mélangées avec une fraction variable de sable. Ces vases sont constituées d'argiles issues du lessivage des sols, de débris d'organismes calcaires ou siliceux, de sels et oxydes divers, de matière organique plus ou moins dégradée (à environ 10%, mais variable d'un estuaire à un autre) et de l'eau d'imbibition.

De plus, les vases sont susceptibles de piéger les métaux lourds, les nitrates, les PCB, etc. et peuvent avoir une mauvaise qualité bactérienne, ce qui les rend souvent inadaptées à la construction et à l'agriculture.

C'est ainsi qu'actuellement on retrouve dans les estuaires un stock important de vase consolidée "peu mobile" représentant l'équivalent de plusieurs siècles des apports du fleuve. Ces matériaux fins ont été apportés en suspension par les fleuves sur plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres sans dépôt important en amont des estuaires, sauf dans les zones latérales inondables lors des crues.

L'accumulation des matériaux fins dans les estuaires s'explique par l'hydrodynamique résultant du mélange de deux eaux de masses volumiques différentes, dans une zone affectée par la marée, où le dépôt des matières en suspension peut se produire facilement lors des renverses de courant, et ce d'autant plus que la salinité croissante favorise la floculation de ces matières.

Au sein des estuaires, hormis le simple transport en suspension, on observe les processus sédimentaires suivants :

- a) le **dépôt**, le calme qui se produit lors des étales permet dans tous les cas un transfert des matières en suspension (MES) vers les fonds consolidés et dans certains cas particuliers, une partie de la vase en cours de sédimentation s'accumule dans la couche d'eau inférieure, au voisinage du fond ; cette masse s'accumulant près du fond et caractérisée par un comportement pseudo-plastique ou viscoplastique est connue sous le nom de *crème de vase* ;
- b) le **tassement**, un transfert de masse de la crème de vase vers les dépôts vaseux consolidés se produit, ceci est lié au phénomène de tassement engendré par le propre poids de la vase ;
- c) l'**érosion**, lorsque les vitesses de l'écoulement sont suffisamment élevées, elles remettent en suspension la crème de vase, créant ainsi 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).

Lorsque le bouchon vaseux se forme, une activité bactérienne contribue à une dégradation à cinétique rapide de la matière organique fixée dans les vases en suspension. Cette activité s'accompagne d'une consommation importante de l'oxygène dissous dans l'eau pouvant créer de conditions d'anoxie, mortelles pour les poissons et autres organismes vivants, surtout lors des saisons chaudes.

Dans cet article, l'estuaire de la Loire est le site de référence pour la présentation d'une méthodologie d'étude, laquelle peut s'appliquer à d'autres estuaires soumis à l'action de la marée.

Une accumulation importante de vase "mobile", représentant dans l'estuaire de la Loire environ 1×10^9 kg de sédiments (CSEEL, 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 sous la forme 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'un bouchon vaseux.

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

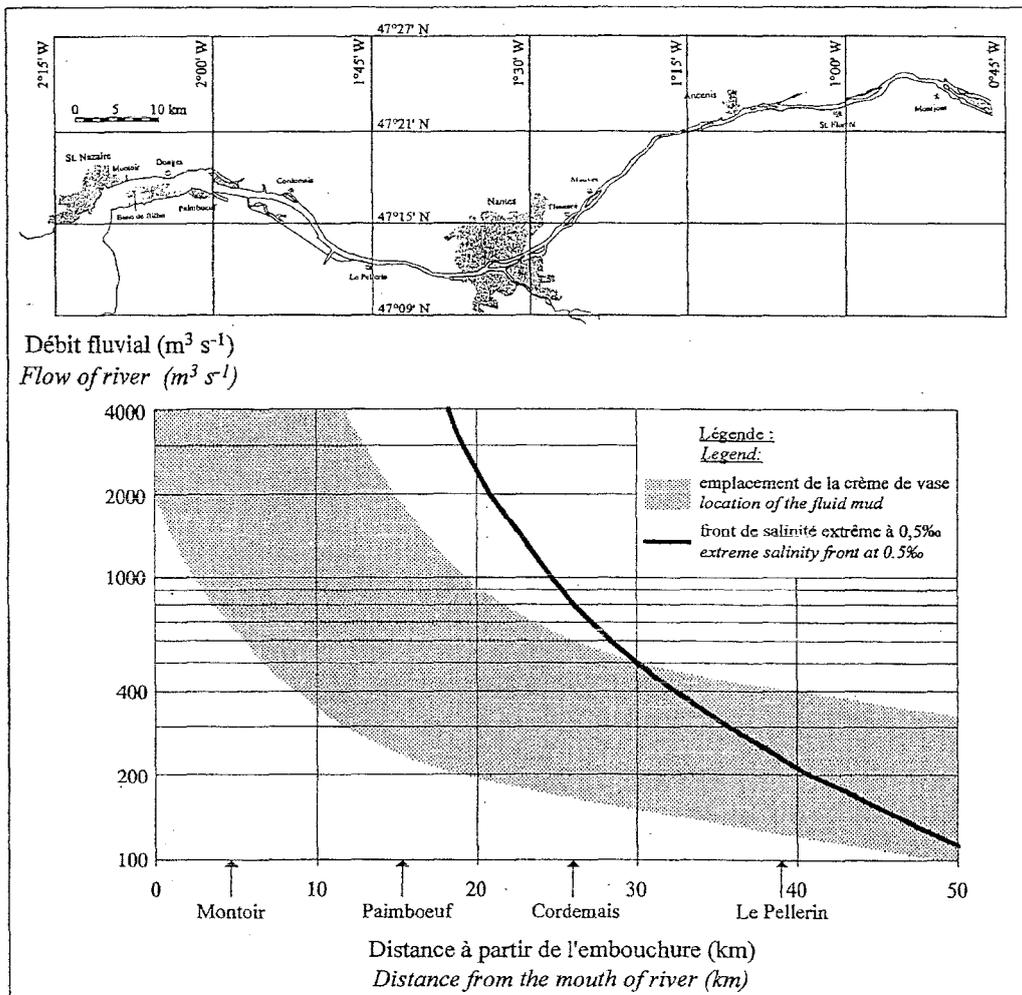


Figure 1. Emplacement de la crème de vase en 1970 (Gallenne, 1974) et front de salinité à 0,5‰ en 1976 (Migniot et Le Hir, 1994), dans l'estuaire de la Loire.

Figure 1. Location of fluid mud in 1970 (Gallenne, 1974) and salinity front at 0,5‰ in 1976 (Migniot et Le Hir, 1994), in the estuary of the river Loire, France.

Les modifications récentes des conditions morfo-hydrauliques de cet estuaire semblent avoir entraîné une progression, de l'ordre de 5 à 10 km (Ourag, 1996), de la crème de vase vers l'amont par rapport à l'emplacement donné sur la figure 1.

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 en matières sèches C de la crème de vase varie entre 50 et 300 kg m⁻³, avec un gradient vertical qui est fonction du temps de tassement.

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 (Ourag, 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.

2. Les travaux d'aménagement dans l'estuaire de la Loire

A l'état sauvage, façonné exclusivement par les courants de marée et fluviaux, les estuaires ont des sections transversales de plus en plus grandes de l'amont vers l'aval et comportent de nombreuses îles et plusieurs chenaux.

Comme la plupart des autres estuaires européens, la Loire a subi d'importantes modifications passant de l'état sauvage à un état "calibré". Progressivement, les zones latérales se sont exhausées, 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 sur la Loire fluviale, avec les barrages et les extractions d'agrégats, ont entraîné une diminution des apports fluviaux par charriage de sable qui sont passés depuis le début du siècle de 1×10^9 kg an⁻¹ à $0,15 \times 10^9$ kg an⁻¹. En revanche, les apports de sédiments fins en suspension par le fleuve qui représentent pour une année moyenne $1,5 \times 10^9$ kg environ, sont restés inchangés.

Les travaux d'aménagement des estuaires tels que les dragages, les remblais des zones latérales, le calibrage 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 d'aménagement des estuaires doivent être réalisés, dans la mesure du possible, en respectant les principes généraux avancés par Larras (1964) :

- a) règle de continuité - il faut éviter tout étranglement du lit et tout changement brusque de direction ou de profondeur (le non respect de ce principe peut entraîner des problèmes localisés soit d'érosion soit d'engraissement) ;
- b) règle de solidarité - on doit étudier les répercussions des travaux d'aménagement sur l'ensemble de l'estuaire, même si ces travaux ne concernent qu'une petite partie de celui-ci ;
- c) règle de l'unité du chenal - il faut qu'il n'y ait qu'un seul chenal pour les courants de jusant et de flot ;
- d) règle de primauté d'action au jusant - les chenaux doivent être dimensionnés afin d'être creusés et autodragués par les courants de jusant afin de faciliter l'expulsion vers la mer du stock de vase "mobile".

Ces règles ne sont pas toujours respectées si bien que des modifications non désirées de l'hydraulique et de la sédimentologie, sont observées dans la plupart des estuaires comme une conséquence des travaux d'aménagement.

L'estuaire de la Loire n'est pas une exception. En effet, au cours du XX^{ème} siècle, les travaux d'aménagement dans cet 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) et des ouvrages de protection des berges de l'estuaire.

Les modifications de la propagation de la marée dans l'estuaire de la Loire, ont entraîné une remontée du front de salinité à 0,5‰ 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.

3. Les modélisations hydrosédimentaires dans les estuaires

Usuellement, l'étude de la sédimentologie des estuaires est réalisée grâce à la mise au point de modèles mathématiques, où un modèle hydrodynamique principal est couplé à d'autres modèles qui permettent la simulation de l'évolution de la salinité, du transport dispersif des matières en suspension, de la diffusion verticale des sédiments, et des différents processus sédimentaires tels que la floculation, le dépôt, la formation de crème de vase, le tassement, et l'érosion des sédiments.

Bien que les modèles constituent un outil fort utile pour la gestion des estuaires, la qualité des résultats que l'on peut obtenir à nos jours d'une modélisation globale des processus hydrosédimentaires n'est pas complètement satisfaisante du fait de la complexité du problème. Les précisions possibles, par ordre décroissant, selon les différents aspects étudiés sont :

- reproduction des courbes de marée (très précise),
- simulation des courants (précise),

- évolution de la salinité (bonne précision),
- simulation de la dynamique sédimentaire (moyenne précision).

Afin de répondre à l'attente des ingénieurs à la recherche de résultats concrets utilisables au plus vite, on a mis au point ou amélioré des modèles simplifiés, découplés d'un modèle hydrodynamique qui reste indispensable, pour aborder trois types de problèmes liés à l'impact sédimentaire des travaux d'aménagement. On peut ainsi aborder les cas suivants (Sanchez *et al.*, 2000) :

- l'augmentation des vitesses du courant, qui se traduit éventuellement par une érosion des fonds,
- la diminution des vitesses qui se traduit par un incrément du taux d'envasement affectant les dragages d'entretien,
- les dragages des souilles, qui peuvent s'accompagner par des taux d'envasement excessivement élevés selon le site.

Dans tous les cas, la précision des résultats pouvant être obtenus par les approches théoriques est étroitement liée à la connaissance de la sédimentologie globale du site et des propriétés mécaniques des sédiments, de même qu'à la fiabilité de la modélisation hydrodynamique. Les mesures in situ et en laboratoire sont donc toujours nécessaires.

4. Les formations turbides dans les estuaires

La localisation des zones de turbidité maximale dans les estuaires en fonction des conditions hydrologiques et l'évaluation du stock de vase "mobile", sont deux aspects de la dynamique sédimentaire d'une importance de premier ordre dans les études de la qualité des eaux, des problèmes d'engraissement et d'érosion et de planification des travaux d'aménagement. Le stock de vase "mobile" résulte d'un équilibre entre les apports par le fleuve, l'expulsion des matériaux vers la mer et les échanges avec les stocks de vase "peu mobile".

Dans les sites où la crème de vase est susceptible de se former, un taux d'engraissement excessif peut affecter les chenaux de navigation, les souilles et les sites où les vitesses du courant sont relativement faibles à cause de l'implantation d'ouvrages de génie civil.

Dans les zones à forte turbidité, plus qu'ailleurs dans un estuaire, la règle de continuité doit être respectée à défaut de quoi les travaux de dragage d'entretien peuvent être très onéreux.

Dans ces zones, le taux d'engraissement résiduel ne peut pas être estimé comme une grandeur indépendante de l'action de l'homme sur le milieu. En effet, le taux d'envasement dans un site où la règle de continuité est satisfaite peut être de seulement quelques millimètres par an : la plus grande partie de la crème de vase qui se forme en mortes-eaux est reprise par les forts courants de vives-eaux. En revanche, là où la règle de continuité n'est pas respectée, dans une souille par exemple, la crème de vase reste piégée en mortes-eaux provoquant un comblement rapide jusqu'à la cote d'équilibre sédimentaire.

En mortes-eaux, les sédiments mobiles s'accumulent principalement dans une lentille de crème de vase qui se situe dans la partie la plus profonde du chenal de l'estuaire dans la zone à forte turbidité. La crème de vase peut aussi combler les

fosses situées en dehors du chenal bien que celles-ci soient très rares puisque instables d'un point de vue de la sédimentologie.

La cubature des formations de crème de vase détectées à l'aide d'un échosondeur en mortes-eaux, est la méthode la plus fiable pour évaluer le stock de vase "mobile". Cette méthode qui a été très bien employée par Gallenne (1974) dans ces travaux de thèse, lui a permis de présenter une description très claire de la dynamique sédimentaire en Loire. Néanmoins, l'estuaire étant un milieu changeant, des mesures de ce type sont toujours nécessaires.

La dynamique globale de la crème de vase en Loire au cours d'un cycle de marée de morte-eau est la suivante (Cousseau, 1994) :

- la lentille de crème de vase est présente sur tout le cycle de marée,
- aucun déplacement de la lentille n'est décelable au cours d'un cycle de marée,
- l'engraissement de la crème de vase par le dépôt des matières en suspension se produit principalement au cours du jusant, ce qui s'explique en Loire par la présence d'une lentille d'eau immobile près du fond dans la zone d'intrusion saline (Berthois, 1964). Cette lentille persiste pendant des périodes de plusieurs heures en début du jusant (jusqu'à 4 heures). Par ailleurs, les courants de flot, accompagnés de fortes vitesses près du fond, ont une action plutôt érosive.

La figure 2 montre la crème de vase détectée à l'échosondeur lors d'une campagne réalisée entre Paimboeuf et Nantes le 24 juillet 1996 par un coefficient de marée 46 et un débit fluvial mesuré la veille à Montjean de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Ouraq, 1996). A cette occasion, on a observé deux formations de crème de vase dont le volume total était de $13,65 \times 10^6 \text{ m}^3$, ce qui représente $0,82 \times 10^9 \text{ kg}$ de matières sèches en considérant une concentration moyenne de 60 kg m^{-3} (en fait, la principale source d'incertitude dans l'estimation du stock de vase "mobile" est l'évaluation de cette concentration moyenne par échantillonnage).

Le suivi de la crème de vase en mortes-eaux représente potentiellement l'un des meilleurs moyens pour connaître avec une semaine d'anticipation, la localisation et l'importance qu'aura le bouchon vaseux en vives-eaux.

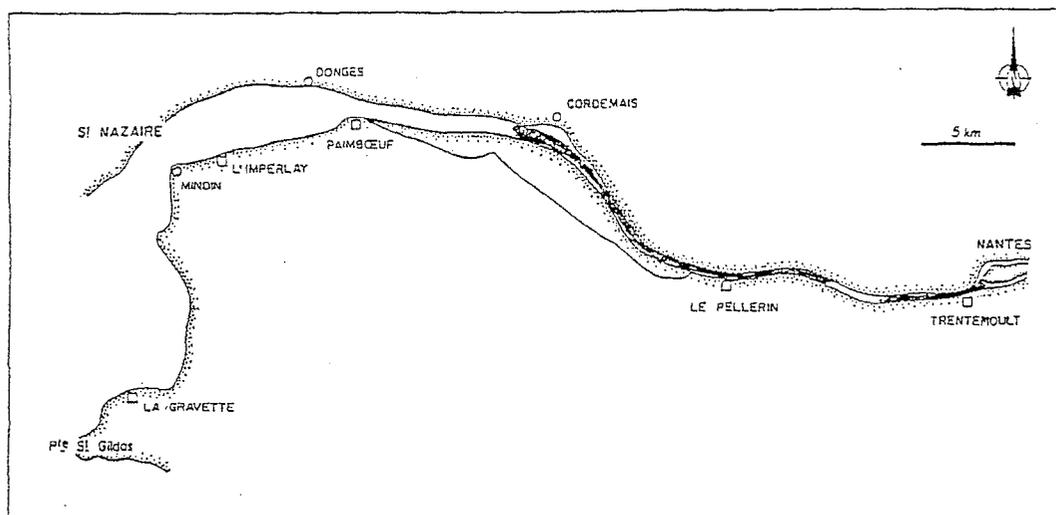


Figure 2 - Crème de vase en Loire observée le 24 juillet 1996 (Ouraq, 1996).

Figure 2 - Fluid mud in the Loire estuary on July the 24th 1996 (Ouraq, 1996).

5. Le comportement mécaniques des vases

La teneur en eau des vases superficielles déposées est généralement supérieure à leur limite de liquidité, ce qui leur donne une consistance de vase molle ou fluide dont le comportement mécanique est viscoplastique. Le paramètre rhéologique qui caractérise le mieux la résistance mécanique de ces vases est la rigidité initiale ou seuil de plasticité.

La valeur de la rigidité initiale τ_y peut être mesurée en laboratoire à l'aide d'un rhéomètre avec un rotor immergé dans la vase. Comme les valeurs de la plupart des paramètres géotechniques, la valeur de τ_y dépend de l'instrument utilisé (dimensions du rotor principalement) et du protocole des mesures.

La rigidité initiale mesurée à l'aide d'un rhéomètre Brookfield LVT en suivant la démarche expérimentale décrite par Migniot (1989), est la grandeur retenue dans cette étude pour caractériser la "cohésion" de la vase.

Des mesures réalisées par Migniot (1989) sur différents matériaux pourvus de cohésion ont montré que τ_y peut être relié à la concentration C par la loi suivante :

$$\tau_y = b C^a \quad (1)$$

D'une part, pour les matériaux "plastiques" (de rigidité initiale supérieure à une valeur variant entre 0,4 et 3 Pa, selon la vase étudiée) $a=6$ et b est un paramètre propre à chaque matériau, dont les valeurs pour les vases de cinq estuaires français soumis à la marée sont données au tableau I. D'autre part, pour les matériaux "fluides" (de rigidité initiale faible) la valeur de a est proche de 3.

Origine	Loire	Orne (Ouisseham)	La Vilaine	Seine (Rouen)	Gironde
b	21×10^{-15}	$11,5 \times 10^{-15}$	6×10^{-15}	4×10^{-15}	$2,4 \times 10^{-15}$
validité	$\tau_y > 0,4 \text{ Pa}$	$\tau_y > 3 \text{ Pa}$	$\tau_y > 3 \text{ Pa}$	$\tau_y > 1,5 \text{ Pa}$	$\tau_y > 1,5 \text{ Pa}$

Tableau I.- Valeurs du paramètre b de la loi de puissance $\tau_y = b C^a$ (unités du S.I.) pour 5 vases plastiques d'estuaire ($a=6$) (d'après Migniot, 1989).

La validité, en moyenne, de la loi de variation de τ_y avec C pour l'ensemble des vases d'un estuaire est vérifiée si la composition de sa phase solide est stable dans le temps et dans l'espace. Pour l'estuaire de la Loire, les travaux de Roger (1988) montrent que les composantes des vases de ce site sont assez stables entre l'embouchure et Nantes. En effet, malgré des différences que l'on observe entre deux échantillons de vase de Loire selon le site et la date du prélèvement, on constate qu'en moyenne celle-ci a des caractéristiques qui lui sont propres, qui permettent de la distinguer des sédiments de tout autre site.

L'étude de 36 échantillons de sédiments superficiels de l'estuaire de la Loire prélevés au cours de 3 campagnes réalisées entre Janvier et Septembre 1984 par Roger (1988), a permis de constater que la phase argileuse est composée en moyenne de 30% de smectites, 32,5% d'illites, 26,5% de kaolinites et 11% de chlorites. Ces valeurs sont proches de celles obtenues par Migniot (1989) pour la vase de l'estuaire de la Loire sur un nombre plus réduit d'échantillons.

L'étude de la granulométrie par densimétrie d'une vase de l'estuaire de Loire, permet à Migniot (1989) de déterminer la médiane de la courbe granulométrique qui est de 1,50 μm .

La matière organique, caractérisée par les matières volatiles calcinées à 550 °C pendant 2 heures, représente en moyenne sur 36 échantillons étudiés par Roger (1988) 11,86% de la masse totale solide des échantillons avec un écart-type de 2,2%. Ces valeurs sont confirmées par 20 mesures réalisées par Ouraq (1996) et 6 réalisées par Sanchez (1992).

Il faut noter que le pourcentage des sables contenus dans les sédiments peut être très variable selon le site étudié. Cependant, comme les propriétés mécaniques dépendent principalement de la fraction fine, la loi de variation de τ_y avec C est toujours valable si l'on mesure la concentration de la vase seule (Migniot, 1989).

6. L'action du courant

Les théories actuelles du transport sédimentaire par un écoulement turbulent, caractérisent la "force du courant" par la contrainte de cisaillement au fond τ_o . La relation pour évaluer cette contrainte hydrodynamique peut s'écrire comme suit :

$$\tau_o = c_f \rho_o \frac{V^2}{2} \quad (2)$$

où V est une vitesse caractéristique du courant, ρ_o la masse volumique de l'eau et c_f le coefficient de frottement local. Lorsque la stratification des eaux est négligeable (du point de vue de la variation de la masse volumique) ce coefficient de frottement peut être évalué d'une façon fiable par la relation de Strickler ci-dessous qui est valable si l'écoulement est stationnaire ou graduellement variée :

$$c_f = 0,034 \left(\frac{\epsilon}{\delta} \right)^{1/3}, \text{ avec: } V = U_{\max} \quad (3)$$

où U_{\max} est la vitesse d'écoulement maximale dans le profil de vitesses qui théoriquement doit être observée en surface, δ la profondeur considérée comme étant l'épaisseur d'une couche limite et ϵ la rugosité hydraulique équivalente de grain de sable, qui pour des vases de Loire et de Seine étudiées en laboratoire par Hosseini (1999) vaut 0,00087 m.

Dans les estuaires stratifiées l'écoulement est affecté par un gradient de densité de sorte que loi logarithmique du profil de vitesses n'est plus valable qu'au voisinage immédiat du fond (Larras, 1964). Une méthode simplifiée qui peut s'appliquer dans ce cas est de mesurer la vitesse u_a à une distance $z_a \approx 0,1\delta$ du fond. Le coefficient de frottement est alors donné par :

$$c_f = \frac{2}{(\kappa^{-1} \ln(z_a / \epsilon) + c)^2}, \text{ avec: } V = u_a \quad (4)$$

où $\kappa=0,41$ est la constante universelle de Karman et c une constante qui vaut 8,2 selon Nikuradse (1933) pour les rugosités en grain de sable uniforme.

Dans un estuaire stratifié, le gradient longitudinal de la pressions p qui entretient le mouvement est donné par :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_{om} g \frac{\partial \eta}{\partial x} + (\eta - z) g \frac{\partial \rho_{om}}{\partial x} \quad (5)$$

où η est la cote de la surface de l'eau, z la cote du point étudié ($z=0$ est la cote du fond), x la coordonnée horizontale colinéaire avec l'axe de l'estuaire, g l'accélération de la pesanteur et ρ_{om} la masse volumique moyenne entre les niveaux z et η . Le premier terme à droite de l'équation ci-dessus est lié à la pente de la surface de l'eau (terme quasi constant sur toute la verticale) et le deuxième terme est dû au gradient longitudinal de la masse volumique (terme variable avec z).

Une analogie peut être faite entre les écoulements dans les estuaires stratifiés et les couches limites turbulentes en présence d'un gradient de pression externe $\partial p^e / \partial x$, avec ce dernier en relation avec le deuxième terme à droite de l'équation 5.

En effet, en flot, l'écoulement est semblable à celui observé en présence d'un gradient de pression externe $\partial p^e / \partial x$ de signe contraire à celui de la vitesse U_{max} à l'extérieur de la couche limite ; le fluide proche de la paroi est accéléré. En revanche en jusant, $\partial p^e / \partial x$ et U_{max} ont le même signe ; le fluide proche de la paroi est alors ralenti (Figure 3).

Pour étudier les couches limites en présence d'un gradient de pression externe, Ludwig et Tillman (1950) définissent un facteur de forme du profil de vitesses $H = \delta^* / \delta^{**}$, où δ^* et δ^{**} sont respectivement l'épaisseur de déplacement et l'épaisseur de quantité de mouvement. Ces épaisseurs sont données par :

$$\delta^* = \int_0^\eta (1 - u / U_{max}) dz \quad , \text{ et : } \quad \delta^{**} = \int_0^\eta (u / U_{max} - (u / U_{max})^2) dz \quad (6)$$

où u est la vitesse locale au niveau z .

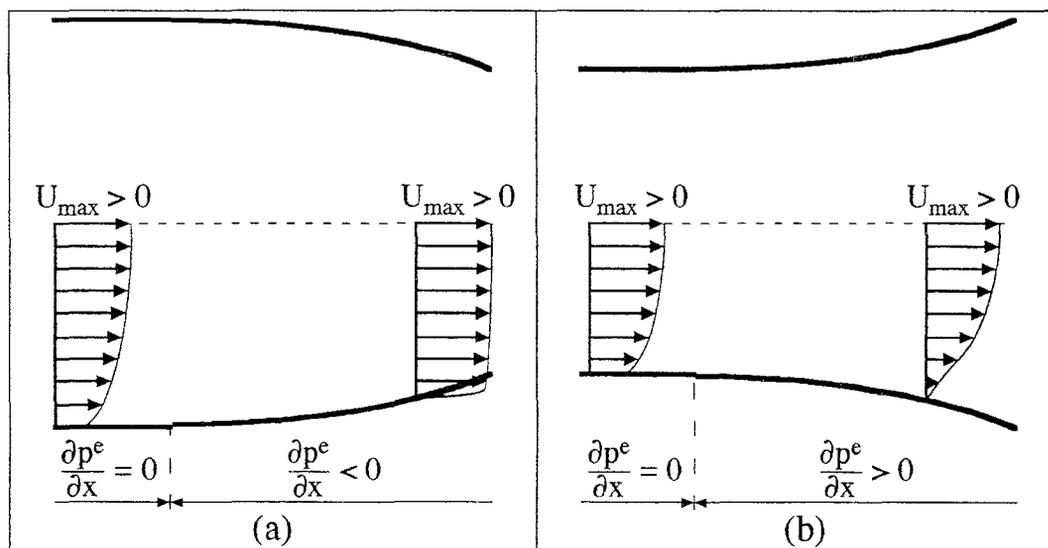


Figure 3. Représentations des couches limites avec un gradient de pression $\partial p^e / \partial x$ de signe contraire à celui de U_{max} (a) et avec $\partial p^e / \partial x$ et U_{max} de même signe (b).
 Figure 3. Representation of limit layers for U_{max} and $\partial p^e / \partial x$ of opposite algebraical sign (a) and of the same algebraical sign (b).

Des mesures en laboratoire ont permis à Ludwig et Tillman (1950) de constater que le coefficient de frottement local est proportionnel à $10^{-0,678H}$. Ainsi, sachant que $H=1,286$ correspond à un écoulement non stratifié, on peut utiliser la formule suivante pour calculer c_f dans les estuaires stratifiés :

$$c_f = 0,034 \left(\frac{\epsilon}{\delta} \right)^{1/3} 10^{0,678(1,286-H)}, \text{ avec: } V = U_{\max} \quad (7)$$

le domaine de validité de la formule ci-dessus est défini par $1,0 \leq H \leq 2,7$.

Le début d'érosion a été étudié en laboratoire sur plus de 30 matériaux cohésifs d'origines diverses par Migniot (1989). Dans ces études Migniot caractérise l'action de l'écoulement par la vitesse de cisaillement $u_* = (\tau_o / \rho_o)^{0,5}$ pour établir les formules universelles suivantes :

$$u_{*e} = 0,013 \tau_y^{0,25}, \text{ pour: } \tau_y < 3 \text{ Pa (vases fluides)} \quad (8a)$$

$$u_{*e} = 0,009 \tau_y^{0,50}, \text{ pour: } \tau_y > 3 \text{ Pa (vases plastiques)} \quad (8b)$$

où u_{*e} est la vitesse de cisaillement critique d'érosion (m s^{-1}), et τ_y est la rigidité initiale du sédiment (Pa). La loi de début d'érosion des vases plastiques proposée par Migniot peut être mise sous la forme suivante :

$$\tau_{oe} = 0,081 \tau_y \quad (9)$$

c'est-à-dire, la tension de cisaillement critique d'érosion τ_{oe} est proportionnel à τ_y . Il faut noter que pour Migniot le début d'érosion est lié à une remise en suspension généralisée qui peut être décrit comme suit :

- pour les vases fluides, le début d'érosion correspond à l'apparition d'un entraînement par le courant d'une "fumée" de vase,
- pour les vases plastiques, la condition critique d'érosion correspond à un arrachement de vase sous forme de copeaux sur toute la surface du dépôt,
- enfin, pour les vases très rigides, le début d'érosion correspond à un arrachement de galets de vase qui roulent sur le fond, entraînés par le courant.

Le critère de début d'érosion de Migniot correspond à un taux volumique d'érosion $E_v \approx 8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ (érosion d'une couche d'environ 30 mm d'épaisseur en une heure) ce qui représente une érosion relativement importante pouvant conduire à l'érosion totale de la couche de vase érodable en quelques heures.

L'étude de l'érosion en laboratoire des vases de Loire et de Seine, prenant comme critère pour le début d'érosion un taux volumique d'érosion E_v de l'ordre de $3 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ à $3 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ (érosion d'une couche de 0,1 mm à 1 mm en une heure) permet à Hosseini (1999) de proposer la loi suivante :

$$\tau_{oe} = 0,294 \tau_y \left(\frac{C}{\rho_o} - \frac{C}{\rho_s} \right)^{1,11} \quad (10)$$

où ρ_s est la masse volumique de la fraction solide de la vase ($\rho_s \approx 2550 \text{ kg m}^{-3}$). Cette loi permet de définir les couches de vase érodables sur une action prolongée du courant (de plusieurs jours). Les travaux de Hosseini (1999) montrent également que le taux d'érosion peut être calculé par la loi suivante :

$$E_v = E_{v_0} \exp\left(\alpha_v \frac{\tau_o - \tau_{oe}}{\tau_{oe}}\right), \text{ avec: } \alpha_v = 0,1145 \frac{\sqrt{\tau_{oe} / \rho_o} \epsilon}{\nu} \quad (11)$$

où ϵ est la rugosité hydraulique de la surface de la vase ($\epsilon=0,00087$ m), ν la viscosité cinématique de l'eau et E_{v_0} un taux d'érosion résiduel observé pour $\tau_o=\tau_{oe}$. Pour la vase de l'estuaire de la Loire $E_{v_0}=3 \times 10^{-7}$ m s⁻¹, et pour la vase de Seine $E_{v_0}=3 \times 10^{-8}$ m s⁻¹.

7. Le tassement des vases

La formation du bouchon vaseux résulte principalement de l'érosion de la crème de vase, dont la loi d'érosion est étroitement liée à la rigidité initiale ; la concentration de celle-ci est alors une variable de premier ordre d'importance. Le processus de tassement de la crème de vase doit donc être pris en compte dans les modélisations. En revanche l'importance de la consolidation des vases "peu mobiles" est secondaire de sorte que ce phénomène peut être négligé.

De plus, la connaissance du gradient de concentration dans la crème de vase est un élément primordial pour définir le taux d'envasement dans un estuaire (Migniot, 1989). Le processus de tassement de la crème de vase, joue un rôle fondamental sur le taux d'envasement résiduel de l'estuaire de la Loire qui est de l'ordre de 1×10^9 kg an⁻¹ (CSEEL, 1984 ; Delft Hydraulics, 1994).

Selon les travaux de Sanchez et Grovel (1993), au cours du tassement, les modifications de la concentration à l'intérieur d'une couche de crème de vase, dépendent principalement de la relation existant entre le coefficient de perméabilité k et la concentration C . Pour la plupart des vases, cette relation satisfait à la loi empirique suivante (Sanchez, 2000) :

$$k = A_1 \exp\left(-A_2 \frac{C}{\rho_s}\right) \quad (12)$$

où A_1 (m s⁻¹) et A_2 sont deux paramètres propres à chaque matériau, dont les valeurs évaluées par Sanchez (2000) à partir des courbes de tassement dressées par Migniot (1989) pour cinq vases d'estuaire, sont données au tableau II.

Selon un modèle de tassement développé par Sanchez et Grovel (1993) à partir de la théorie de sédimentation de Kynch (1952) modifiée par Been (1980), à l'intérieur d'une couche de crème de vase le débit solide net dépassant une concentration fixe C , est donné par la relation suivante :

$$Q_{s/C} = k \frac{C^2}{\rho_s} \left(\frac{\rho_s}{\rho_o} - 1\right) \left(A_2 \frac{C}{\rho_s} - 1\right) \quad (13)$$

Grâce aux équation 10 et 13 on peut évaluer la quantité de crème de vase qui se consolide en mortes-eaux et résiste aux courants extrêmes de vives-eaux. Il s'agit de la partie inférieure de la crème de vase qui détermine le taux d'envasement résiduel d'un estuaire.

Origine	Loire	Orne (Ouistreham)	La Vilaine	Seine (Tancarville)	Gironde
A ₁	0,008 m s ⁻¹	0,020 m s ⁻¹	0,017 m s ⁻¹	0,031 m s ⁻¹	0,017 m s ⁻¹
A ₂	118	72	84	47	94
validité	C<300 kg m ⁻³	C<510 kg m ⁻³	C<500 kg m ⁻³	C<675 kg m ⁻³	C<500 kg m ⁻³

Tableau 2.- Valeurs des paramètres de la loi de variation de k avec C, évalués par Sanchez (2000) à partir des courbes de tassement dressées par Migniot (1989).

8. La dynamique des matières en suspension

Les particules élémentaires de la vase de Loire ont un diamètre de chute équivalent moyen d'environ $1,5 \times 10^{-6}$ m et une masse volumique de 2600 kg m^{-3} ; leur vitesse de chute théorique est alors de l'ordre de $2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ (régime de Stokes). En revanche, les agrégats de vase que l'on rencontre sont pratiquement sphériques avec un diamètre maximal de l'ordre de 1×10^{-3} m et ils ont une masse volumique d'environ 1250 kg m^{-3} , leur vitesse de chute théorique en eau calme (lors des étales) est de $0,045 \text{ m s}^{-1}$, et correspond à un régime turbulent d'Allen. La vitesse de chute dépend donc principalement de l'état dissous ou aggloméré des matières en suspension.

Dans l'eau calme, la vitesse de chute varie principalement avec la concentration en matières en suspension C_{MES} . Des mesures en laboratoire (Migniot, 1968 ; Thorn, 1981 ; Sanchez, 1992) ont montré que pour des concentrations faibles la vitesse de chute augmente régulièrement avec la concentration dû au phénomène de floculation. En revanche, à partir d'une concentration variant de 5 à 10 kg m^{-3} selon le sédiment étudié, cette vitesse diminue quand la concentration augmente car les sédiments s'entravent dans leur chute (figure 4).

Vitesse de chute (m s⁻¹)

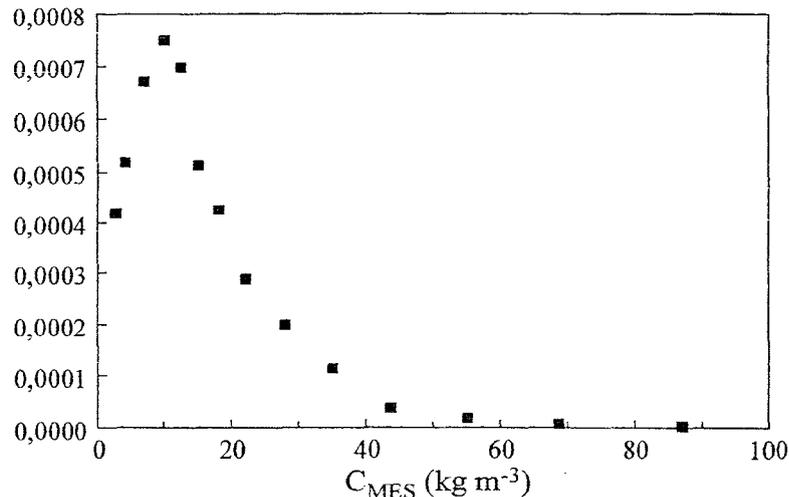


Figure 4 - Variation de la vitesse de chute d'une vase de Loire en fonction de la concentration -mesures en eau calme en laboratoire- (Sanchez, 1992).

Figure 4 - Vertical velocity as a function of concentration for a cohesive sediment of the Loire estuary -laboratory measurements in still water- (Sanchez, 1992).

Compte tenu du faible poids des agrégats de vase dans les estuaires, les travaux de Fortier (1967) sur la mécanique des suspensions, prouvent que les matières en suspension sont transportées longitudinalement avec les vitesses du courant.

Dans la colonne d'eau, le débit vertical de matières en suspension Q_s à travers une surface horizontale unitaire située à la cote z , est donné par :

$$Q_s = -w_d C_{MES} - D_t \frac{\partial C_{MES}}{\partial z} \quad (14)$$

où w_d est la vitesse de dépôt moyenne des matières en suspension situées en z à l'instant considéré et D_t le coefficient de diffusion verticale turbulente de masse de la loi de Fick-Boussinesq. On admet que D_t est proportionnel au coefficient de viscosité cinématique turbulente ν_t et du même ordre de grandeur que celui-ci ($D_t = \beta \nu_t$, avec $\beta \approx 1$). Par ailleurs, en première approximation ν_t peut être représenté par la relation simple suivante :

$$\nu_t = \kappa u_* z(1 - z/\delta) \quad (15)$$

Il faut signaler que la vitesse de dépôt w_d est un paramètre de modèle plus qu'un paramètre physique. En effet, w_d dépend de l'état plus ou moins aggloméré des matières en suspension à l'élévation z , à l'instant considéré. On peut supposer que dans les estuaires w_d augmente avec C_{MES} (mais selon une loi différente de celle établie en eau calme en laboratoire, voir figure 4) car une concentration élevée est caractérisée par la présence d'agrégats relativement lourds en suspension, alors qu'une concentration faible implique la présence de sédiments très dissous.

De campagnes de mesures in situ consistant à suivre dans son déplacement par le courant, l'évolution des matières en suspension au cours d'un cycle de marée, permettent une évaluation indirecte fiable de w_d . Une étude faisant appel à ce type campagnes a été réalisée par Brun-Cottan (2000) dans l'estuaire de la Seine.

En l'absence de courant, la diffusion verticale turbulente de masse est nulle, dans ce cas, la loi de variation de w_d avec C_{MES} montrée à la figure 4 s'applique car on est dans une configuration proche de celle des expériences. Ainsi, lors des périodes d'eaux calmes, la floculation facilite en grande partie la chute des sédiments.

En milieu turbulent, le transport diffusif vertical de masse, généralement ascendant (dirigé dans le sens de la diminution de la concentration et expliqué par le fait que les balles fluides provenant du côté de plus forte concentration transportent plus de masse solide que celles qui viennent du côté de concentration plus faible), prédomine sur le transport lié à la vitesse de dépôt w_d dès que τ_o dépasse une valeur seuil τ_{od} relativement faible de l'ordre de 0,1 Pa (soit une vitesse de cisaillement de l'ordre de 0,01 m s⁻¹).

Enfin, on doit signaler que l'équation 14 ne s'applique pas au fond (interface eau-sédiment) car deux forces non hydrodynamiques y entrent en jeu : une force de cohésion s'opposant à la remise en suspension et une force d'adhérence qui peut retenir au fond les matières en suspension qui le touchent.

Dans l'état actuel des connaissances, la condition limite $Q_{s0} = Q_s(z=0)$ à l'interface eau sédiment de l'équation 14 est soit un débit d'érosion $Q_e = E_v C$ si $\tau_o > \tau_{oe}$ (voir équation 11), soit un débit de dépôt donné d'une façon approximative par l'équation suivante (Metha, 1984) :

$$Q_d = -w_{do} C_{MESo} (1 - \tau_o / \tau_{od}) \quad \text{si} \quad \tau_o < \tau_{od} \quad (16)$$

où C_{MESo} est la concentration en matières en suspension près du fond et w_{do} est assimilé à la vitesse de chute associée à C_{MESo} pour un dépôt en eau calme, ou soit encore $Q_{so}=0$ si $\tau_{od} < \tau_o < \tau_{oe}$. Ce modèle n'est qu'une approximation grossière de la réalité qui doit évoluer dans l'avenir avec l'approfondissement des connaissances.

9. Conclusions

Les principaux mécanismes sédimentaires affectant les vases séjournant dans les estuaires sont abordés dans cet article. Des modèles pour simuler l'érosion et le tassement, ainsi que les valeurs de leurs paramètres respectifs estimées en laboratoire sur de vases provenant de cinq estuaires français à marée, sont présentés. Une approche basée sur la similitude dynamique est développée afin d'évaluer la contrainte tangentielle au fond dans un estuaire plus ou moins stratifié.

Grâce aux modèles présentés dans cet article couplés avec un modèle hydrodynamique, on peut aborder les cas suivants :

- l'augmentation des vitesses du courant suite à une réduction de la section d'un estuaire, qui se traduit éventuellement par une érosion des fonds,
- la diminution des vitesses qui se traduit par un incrément du taux d'envasement affectant les dragages d'entretien,
- les dragages des souilles, qui peuvent s'accompagner par des taux d'envasement excessivement élevés si celles-ci sont situées dans la zone de turbidité maximale.

La précision des résultats pouvant être obtenus par ces approches est étroitement liée à la connaissance des propriétés mécaniques des sédiments et de la sédimentologie globale du site, de même qu'à la qualité de la modélisation hydrodynamique. Les mesures in situ et en laboratoire sont donc indispensables.

Enfin, cet article met en lumière une insuffisance de connaissances concernant la vitesse de dépôt des matières en suspension en milieu turbulent et l'adhérence au fond des particules transportées par le courant.

10. Références bibliographiques

- Been K., 1980. Stress-strain behaviour of a cohesive soil deposited under water. Ph. D. dissertation, University of Oxford, United Kingdom.
- Berthois L., 1964. Etude de la dynamique sédimentaire dans l'estuaire de la Loire. 4^{ème} Congrès Int. Portuaire, Anvers, 1^{ère} partie, pp. 32-41.
- Brun-Cottan J.C., 2000. Titre. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, sous presse.
- Cousseau E., 1994. Dynamique longitudinale de la crème de vase en Loire. Mémoire de DEA de l'Université de Nantes, 58 p.
- CSEEL, 1984. Rapport final du comité scientifique pour l'environnement de l'estuaire de la Loire. Rapports Scientifiques et Techniques, n° 55, Publications du Centre National pour l'Exploitation des Océans, Brest, France, 158 p.
- Delft Hydraulics, 1994. Etude hydrologique de l'estuaire de la Loire. 98 p.
- Fera P., 1994. Estuaire de la Loire. Agence de l'eau Loire Bretagne, Nantes, 21 p.

- Fortier A., 1967. Mécanique des suspensions. Masson, Paris, 176 p.
- Gallenne B., 1974. Les accumulations turbides dans l'estuaire de la Loire - Etude de la "crème de vase". Thèse de l'Université de Nantes, 323 p.
- Grovel A., Sanchez M., Ghadri H. et Delanoë Y., 1999. Modification de la marée par le creusement du chenal d'un estuaire. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 57, n° 4, pp. 369-376.
- Hosseini K., 1999. Liaison entre la rigidité initiale et la cohésion dans les vases molles - Relation avec la dynamique sédimentaire. Thèse de l'Université de Nantes, 163 p.
- Kinch G.F., 1952. A theory of sedimentation. Faraday Society Transactions, Vol. 48, pp. 166-176.
- Larras J., 1964. Embouchures, estuaires, lagunes et deltas. Eyrolles, Paris, 172 p.
- Ludwig H., et Tillman W., 1950. Investigations of the wall-shearing stress in turbulent boundary layers. Nat. Advisory Comm. Aeron., Tech. Memo. n° 1285.
- Mehta A.J., 1984. Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries. Lecture notes on coastal and estuarine studies n° 14. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Springer-Verlag, Berlin, pp. 290-325.
- Migniot C., 1968. Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et leur comportement sous des actions hydrodynamiques. La Houille Blanche, n° 7, pp. 591-620.
- Migniot C., 1989. Tassement et rhéologie des vases. La Houille Blanche, n° 1 et 2, pp. 11-29 et 95-111.
- Migniot C. et Le Hir P., 1994. Estuaire de la Loire - Hydrosédimentaire. Rapports de synthèse de l'APEEL. n° 1, Publication de l'association pour la protection de l'environnement de l'estuaire de la Loire, Nantes, 84 p.
- Nikuradse J., 1933. Strömungsgesetze in rauhen. Ver Deut. Ing. Forschungsheft, n° 361.
- Ouraq Y., 1996. Contribution à l'étude des sédiments dans l'environnement estuarien : cas de l'estuaire de la Loire. Thèse de l'Université de Nantes, 170 p.
- Pinot J.-P., 1998. La gestion du littoral. Institut Océanographique, Paris, 760 p.
- Roger B., 1988. Répartition et localisation des métaux traces dans les sédiments - Application à l'estuaire de la Loire. Rapports des laboratoires, Série environnement et génie urbain EG-4, Lab. Central des Ponts et Chaussées, Paris, 260 p.
- Sanchez M., 1992. Modélisation dans un estuaire à marée - Rôle du bouchon vaseux dans la tenue des sols sous-marins. Thèse de l'Université de Nantes, 210 p.
- Sanchez M. et Grovel A., 1993. Modélisation du tassement sous poids propre des couches de vase molle et saturée, sur un sol imperméable. La Houille Blanche, n° 1, pp. 29-34.
- Sanchez M., 2000. Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Caen - Basse Normandie, 79 p.
- Sanchez M., Grovel A. et Hosseini K., 2000. Impact sédimentaire des travaux d'aménagement de l'estuaire de la Loire. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, sous presse.
- Thorn M.F.C., 1981. Physical processes of siltation in tidal channels. Proc. Hydraulic Modelling Applied to Maritime Eng. Problems, ICE, London, pp. 47-75.